



ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ÉCONOMIQUES,
JURIDIQUES, POLITIQUES ET DE GESTION
Université Clermont Auvergne

Ecole Doctorale des Sciences Economiques, Juridiques, Politiques et de gestion
Centre d'Etudes et de Recherche sur le Développement International (CERDI)

Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, CERDI, F-63000 Clermont-Ferrand,
France

**CHANGEMENTS CLIMATIQUES : DE LA MODELISATION
DU PHENOMENE A SON EDUCATION. APPLICATION AU CAS
DES ENSEIGNANTS SENEGALAIS DU PRIMAIRE**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 7 mai 2019
pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences Economiques
par

Abdourakhmane NDIAYE

sous la direction d'Arnaud DIEMER (UCA) et Francine PELLAUD (HEP)

Membres du Jury

Sylvie Ferrari	Maître de Conférences, HDR, Université de Bordeaux	Rapporteur
Catherine Figuière	Maître de Conférences, HDR, Université de Grenoble-Alpes	Rapporteur
Michel Ricard	Professeur, Chaire UNESCO de Bordeaux	Président
Hervé Le Treut	Professeur, Directeur de l'IPSL de Paris	Suffragant
Arnaud Diemer	Maître de Conférences, HDR, UCA- CERDI	Directeur thèse
Francine Pellaud	Professeur, HEP Fribourg (Suisse)	Directrice thèse

L'université Clermont Auvergne n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

A Cheikh Abdoul Karim Mbacké Fallilou

Khadim Rassoul

A mes parents et à toute ma famille

Remerciements

C'est avec beaucoup d'émotion que j'écris ces remerciements car cela signifie bien plus que la fin d'une aventure de trois ans. Tout d'abord, je rends grâce à Dieu le SUBLIME et à Serigne Touba khadim Rassoul. Beaucoup de personnes ont joué un rôle déterminant dans la préparation de cette thèse et je tiens à les remercier du fond de mon cœur, car sans elles, mon travail ne serait pas celui que je présente.

Je voudrais, dans un premier temps, exprimer mes plus grands remerciements à Arnaud Diemer, mon directeur de thèse qui a su croire en moi depuis ma première année en France pour préparer mon Master 2. Economiste visionnaire, il a su m'aider lorsque j'en avais besoin, et s'est toujours montré présent et à l'écoute. Son soutien était académique, pédagogique et social. Ainsi, j'ai beaucoup appris à ses côtés que ce soit la démarche scientifique, les capacités de rédaction, d'analyse, la communication scientifique, la valorisation de soi, la gestion de groupes, le réseautage et tellement d'autres choses. Il a été d'une très grande patience, d'empathie rare et de dépassement élevé. Il a tout fait pour que mon travail aboutisse, au laboratoire ACTé comme au CERDI, vous avez été magnifique. Pour tous ces efforts, je vous dis merci Arnaud.

Dans un second temps, je souhaiterais remercier Francine Pellaud ma codirectrice de thèse. Pédagogue chevronnée à la Haute Ecole Pédagogique de Fribourg en Suisse, ses critiques et ses commentaires nous ont toujours poussés vers les barrières de l'excellence. Francine, je vous dis merci pour cette fructueuse collaboration.

Je voudrais ensuite remercier Hervé Le Treut, directeur de l'Institut Simon Pierre Laplace de Paris qui m'a initié à la complexité du système climatique et qui m'a connecté avec le monde académique français (Pierre Léna) ou avec les plus grands climatologues (Jean Jouzel). Merci à Hervé et à tous les scientifiques, hommes politiques, économistes et pédagogues de l'Office for Climate Change de Paris.

Naturellement, je souhaiterais remercier le laboratoire ACTé, pour m'avoir accueilli en 2016, puis toute l'équipe du CERDI, pour m'avoir accepté au sein de l'école doctorale des Sciences économiques, juridiques, politiques et de gestion. Ce centre

réputé par sa rigueur et sa quête d'excellence œuvre pour le développement international et surtout pour l'émergence des pays les plus pauvres de la planète. Tous les membres du CERDI sont à notre écoute, toujours prêts à nous rendre service, toujours présents lors de discussions scientifiques. Ce centre est exceptionnel et offre une dynamique hors du commun.

Je remercie aussi Michaël Goujon de son implication au sein du comité de thèse et de ses apports théoriques qui ont profité à mon travail. De la même manière, je remercie le professeur Michel Ricard de la chaire l'UNESCO Education, Formation, Recherche en développement durable de Bordeaux pour ses conseils et sa disponibilité.

Je souhaiterais remercier la French team, mes collègues avec qui nous étions dans cette même aventure qu'est la thèse. Manuel Morales, Timothée Parrique, Ganna Gladkikh, Florian Dierickx, Julian Torres, Faheem khushik et tous les doctorants du centre d'excellence Jean Monnet pour le développement durable.

Je remercie Mamadou Nging, directeur de l'Institut Universitaire et Technologique de Dakar qui a beaucoup fait pour moi. Je remercie le professeur Abdoulaye Diagne et M. Faye de la Faculté des Sciences économiques et de gestion de l'Université Cheikh Anta Diop

Je remercie aussi l'inspecteur Papa Thiam, le Docteur Maissa Diakhaté. Je remercie Papa Seck et à travers lui, tous mes collègues enseignants.

Enfin, je voudrais remercier des proches et des amis, ceux qui m'ont accueilli : Mbaye Niane Ndoye, Mouhamadou Ndoye, Oumy Ndoye et sa famille, Ibrahima Aidara et sa famille, Safiétou Kanoute et sa famille, Coura Thiam, Mady Gassama, Abdourakhmane Wade et toute l'équipe d'ALIFSI, Me Amadou Ndiaye, Awa kane, Babacar Seck et sa famille, Aminata Ndiaye et Alexis Hamel tous à Paris ; Mamadou Guèye et sa famille, Dame Diop, Serigne Abdou Ndiaye et sa famille, Seydina Ousmane Niang, tous à Clermont Ferrand et tous les membres de la fédération Makkarimal Akhlaq de France.

Avant -propos

Cette thèse est l'aboutissement d'un travail de recherche ancré dans l'interdisciplinarité et intégrant une structure de publication par articles.

Elle aborde la question de l'éducation aux changements climatiques en s'appuyant sur les savoirs issus des sciences du Climat, des sciences économiques et des sciences de l'éducation. Elle vise à fournir un cadre rigoureux et cohérent aux enseignants du primaire désireux d'acquérir des connaissances et des compétences en matière de changements climatiques.

Elle se compose :

- d'une introduction présentant le contexte de l'étude, les débats relatifs au concept du développement durable, la revue de littérature sur l'éducation au développement durable, le positionnement d'une éducation aux changements climatiques, la méthodologie utilisée, et les questions de recherche qui ont été analysées.
- d'un corps d'articles (au nombre de 7) publiés ou en cours de révision interrogeant le registre des savoirs scientifiques, institutionnels, mesurés et pédagogiques en matière d'éducation aux changements climatiques.
- d'une conclusion présentant les principaux résultats et les apports du chercheur à la problématique posée.

Table des sigles

AAAS	American Association for the Advancement of Science
ACA	Airport carbon accreditation
ACTé	Activité, Connaissance, Transmission, éducation
AUF	Agence Universitaire de la Francophonie
BL	Balancing loops
CAPRI	Common Agricultural Policy Regional Impact Analysis
CC	Changements climatiques
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDD	Commission sur le développement durable
CEB	Curriculum de l'école de base
CE1	Cours élémentaire première année
CE2	Cours élémentaire deuxième année
CEFE	Cellule d'Education et de Formation à l'Environnement
CERI	Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement
CELE	Centre pour les environnements pédagogiques efficaces
CERDI	Centre d'études et de recherches en développement international
CFC	Chlorofluorocarbures
CF4	Tétrafluorométhane
CH4	Méthane
CI	Cours d'Initiation
CIAP	Climatic Impact Assessment Program
CIFEODD	Conférence Internationale francophone des établissements d'enseignement supérieur et organismes sur le développement durable
CIRED	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CITE	Classification Internationale Type de l'Education
CLD	Closed loops diagrams
CMED	Commission mondiale sur l'environnement et le développement
CM1	Cours Moyen première année
CM2	Cours Moyen deuxième année
CNUCED	Conférence des Nations Unies sur le Commerce Et le Développement
CNUDB	Convention des Nations Unies sur la biodiversité biologique
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CNULD	Convention de Nations Unies pour la lutte contre la désertification
CO2	Dioxyde de carbone
COP	Conference of Parties
COP21	21ème Conférence des parties
CP	Cours préparatoire
CSC	Coût social du carbone
DD	Développement durable
DDT	Dichloro-Diphenyl-Trichloro-ethane

DeSeCo	Definition and Selection of Competencies
DEELSA	Directorate for Education, Employment, Labor and Social Affairs
DICE	Dynamic Integrated model of Climate and the Economy
DNUA	Décennie des Nations Unies pour l'Alphabétisation
DNUEDD	Décennie des Nations Unies pour l'éducation au service du développement durable
ECCDD	Education aux changements climatiques (pour un développement durable)
ECCE	Early Childhood Care and Education
EDD	Education au développement durable
EE	Environmental Education
EFA	Education for All
EFTP	Enseignement et la formation technique et professionnelle
ENIAC	Electronic Numerical Integrator And Compute
EPE	Éducation pour tous
ERE	Education relative à l'environnement
ESCAPE	Energy-efficient Scalable Algorithms for Weather Prediction at Exascale
ESD	Education for sustainable development
ESE	Etablissements d'enseignement supérieur
ESM	Energy system model
ESPE	Ecole Supérieure du Professorat et d'Education
ESVS	Education à la Science et à la vie sociale
GAINS	Greenhouse gas – Air pollution Interactions and Synergies
GCMs	General Circulation Models
GDP	Gross domestic product)
GEM-3E	General equilibrium Model for Energy Economy Environment
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIFT	Information géophysique pour les enseignants
GLOBIOM	Global Biosphere Management Model
GMT	Greenwich Mean Time
HCHC - 22	Hydrochlorofluorocarbures
HEP	Haute Ecole pédagogique Fribourg
IAM	Integrated assessment models
ICAM	Incident, Cause, Analysis Method
IDDRI	Institut du Développement Durable et des Relations Internationales
IDH	Indice du développement humain
IFADEM	Initiative Francophone pour la Formation à Distance des Maîtres
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
IMAGE	Integrated Model to Assess the Global Environment
IMHE	Programme sur la gestion des établissements d'enseignement supérieur
IOT	Input- Output Table
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
IRD	Institut de recherche pour le développement
IUCN	International Union for the Conservation of Nature
IUPN	International Union For the Preservation on Nature
KUL	University of Leuven

LULUCF	Land use, land-use change, and forestry
MAF	Millennium Acceleration Framework
MAgPIE	Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment
MAGICC	Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change
MDGs	Millennium Development Goals
MESSAGE	Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental
MIA	Modèles d'évaluation intégrée
MICS	Indice de développement de la petite enfance
MINK	Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas
MISSTERRE	Modélisation Intégrée du Système Terre
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NSF	National Science Foundation
NU	Nations-Unies
O	Oxygène
O ₂	Dioxygène
O ₃	Ozone
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
ODD	Objectifs du développement durable
OIF	Organisation internationale de la francophonie
OMD	Objectifs du millénaire pour le développement
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONU	Organisation des Nations Unies
ONG	Organisation non gouvernementale
OR2D	Observatoire des représentations du développement durable
PAQUET-EF	Programme d'Amélioration de la Qualité, de l'Équité et de la Transparence du secteur de l'Éducation et de la Formation
PAG	Programme d'Action Globale
PDEF	Plan décennal de l'Éducation et de la Formation
PIEE	Programme international d'éducation relative à l'environnement
PIK	Potsdam Institute for Climate Impact Research
PISA	Programme international pour le suivi des acquis des élèves
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PPM	Particule par million
PPP	Purchasing power parity
PRG	Potentiel de réchauffement global
PRIMES	Partial equilibrium model simulating the entire energy system
PSE	Plan Sénégal Emergent
QSV	Questions socialement vives
RAEDD	Réunion annuelle d'experts du développement durable
RAINS	Regional Air Pollution Information and Simulation
RCP	Representative Concentration Pathway
R&D	Research and development

REDOC	Représentations, Démarches, Outils, compétences
REMIND	Regional Model of Investments and Development
RICE	Regional Integrated model of Climate and the Economy
RL	Reinforcing loops
RMSE	Rapport mondial de suivi sur l'éducation
SD	System dynamic
SGD	Quality Education Goal
SNDES	Stratégie nationale de Développement économique et social
SNDD	Stratégie nationale de développement durable
SO2	Dioxyde de soufre
SPDC	Centre de Politique Sociale et du Développement de Karachi
SPGP	Science and Policy of Global Program
SSPs	Shared socioeconomic pathways
TPES	Total primary energy supply
UCA	Université Clermont Auvergne
UE	Union Européenne
UGU	Union européenne des géosciences
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
UNICEF	Fonds des Nations unies pour l'enfance
UNDP	Programme des Nations unies pour le développement
UNLD	United Nations Literacy Decade
WPNP	Weather Prediction by Numerical Process
ZEW	Centre for European Economic Research

Table des figures et des tableaux

Introduction

Encadré 1 : une indication sur le choix des méthodes	p.55
Figure 1 : les trois aspects de l'apprentissage systémique pour une	p.52
Figure 2 : L'éducation au développement durable dans les branches de l'école primaire	p.56
Figure 3 : La question de la transversalité en EDD	p.56
Figure 4: le registre des savoirs en ECCDD	p.67
Figure 5 : Les principes qui font changer notre compréhension du monde	p.76
Figure 6: Une boucle de rétroaction	p.78
Figure 7 : Arbre causal des changements climatiques	p.79
Figure 8: Les différentes composantes du système climatique	p.80
Figure 9 : Le pergélisol	p.82
Figure 10 : La complexité du système climatique	p.84
Figure 11 : La dynamique du système global	p.84
Figure 12 : Cadre REDOC	p.87
Tableau 1 : Les axes et les stratégies de l'EDD selon l'UNESCO	p.42
Tableau 2 : les compétences clés	p.51
Tableau 3 : Une démarche d'EDD dans le système éducatif	p.57
Tableau 4 : les défis d'une ECCDD	p.65
Tableau 5 : Approche analytique vs Approche systémique	p.77
Tableau 6 : Les quatre niveaux définissant la structure d'un système	p.78

Articles

Article 1 : Le climat, du savoir scientifique aux modèles aux modèles d'intégration assignée

Figure 1 : concentration du plomb dans la carotte glaciaire du Groenland central	p.92
Figure 2 : La couche d'Ozone	p.94
Figure 3 : Changements de la température terrestre selon l'âge de la carotte glaciaire	p.108
Figure 4 : évaluation de la moyenne globale du contenu thermique de l'océan superficiel	p.110
Figure 5 : l'évolution de la concentration de gaz à effet de serre depuis 1750	p.112
Figure 6 : Modéliser le système climatique	p.115
Figure 7 : Map Grid de Richardson	p.118

Figure 8 : Colonne d'un modèle de climat	
p.122	
Figure 9 : Modèle Système Terre de l'IPSL	
p.124	
Figure 10 : Diagramme de boucles dans World 3	p.125
Figure 11 : Concentration de CO2 dans l'atmosphère	
p.126	
Figure 12: Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters	p.127
Figure 13 : Boucles positives et négatives du scénario « Hausse de la pollution »	
p.128	
Figure 14 : Modèle d'optimisation du système énergie - environnement	
p.130	
Figure 15 : Exemple de couplage du système climatique et du système économique	
p.131	

Article 2 Comprendre la modélisation du climat

Figure 1: Concentration of CO2 in the Atmosphere	
p.143	
Figure 2: Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters	
p.144	
Figure 3: Positive and negative loops in the scenario "more pollution"	
p.145	
Figure 4: Optimization's model of energy and environmental system	
p.146	
Figure 5: Coupling climate system and economic system	p.148
Figure 6: Five shared Socioeconomics Pathways	p.150
Figure 7: Narratives of the shared Socio-economic Pathways in IAM	
p.151	
Figure 8: IIASA Integrated Assessment Framework	
p.153	
Figure 9: Economic circuit of GEM-3E	
p.154	
Figure 10: Computer General Equilibrium with financial sector	
p.155	
Figure 11 : GEM-E3 model dimensions	
p.155	
Figure 12: IMAGE model schematic framework	
p.156	
Figure 13: IMAGE model scenario storylines	
p.158	
Figure 14: Structure of REMIND-R	
p.159	
Figure 15: the role of expectations in REMIND-MAgPIE model	
p.162	
Figure 16: Model – Scenarios and Indicators issues for IAM	
p.164	

Figure 17: Creating a System Dynamics Model
p.165

Table 1: Main characteristics of REMIND – R
p.161

Table 2: components of the IAMs
p.163

Article 3 : Analyser un modèle climatique particulier (DICE) ayant des retombées économiques

Figure 1: Number of publications about IAMs
p.176

Figure 2: Schematic diagram of a comprehensive integrated assessment model
p.177

Figure 3: Diagram of loops in World 3
p.178

Figure 4: CO2 concentration in the atmosphere
p.179

Figure 5: Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters
p.180

Figure 6: Optimization Model of Energy System and Environment
p.182

Table 1: Main variables estimated for 2015
p.186

Table 2: Main variables estimated for 2100
p.187

Table 3: Comparative projections of DICE and IPCC, early 1990s and mid-2010
p.188

Table 4: Error forecast ratio
p.189

Table 5: Main steps in the transition from 1992 to 2017 to the DICE model r
p.190

Table 6: Decomposition of the evolution of the social cost of carbon, 2015 p.191

Table 7: Decomposition of global temperature variations 2100
p.191

Table 8: Decomposition of changes in important variables, 2100
p.192

Table 9: Decomposition of the evolution of important variables, 2015
p.193

Article 4 Comprendre le passage de l'éducation à l'environnement à l'éducation au développement durable

Table 1: Typology of representations Human/ Nature
p.202

Table 2: ESD and other international Priorities
p.212

Figure 1: The Nature Writers, alarming the world
p.205

Figure 2: Implementation of the Decade p.210

Figure 3 : Priority Action Areas
p.214

Article 5 Présentation d'une approche conceptuelle et méthodologique de l'EDD

Figure 1: The four components of Education for p.221

Figure 2: Thinking ESD in the Sustainable Development Framework
p.226

Figure 3: Complexity of Sustainable Development
p.227

Figure 4 : REDOC Framework
p.230

Article 6 : Articuler EDD et ODD

Figure 1 : Les Domaines d'actions prioritaires
p.242

Figure 2 : Penser l'éducation au développement durable p.245

Figure 3 : Le modèle REDOC
p.247

Figure 4 : Démarches interactives et complémentaires en éducation au développement durable
p.248

Figure 5 : des OMD aux ODD
p.256

Figure 6 : Les OMD en quelques chiffres p.257

Figure 7 : Les ODD, une démarche systémique propre au DD
p.258

Figure 8 : EDD, ODD et contexte socio-politique p.260

Figure 9 : ODD 4, une éducation de qualité
p.261

Figure 10 : Les cibles clés de l'ODD 4
p.262

Figure 11 : Les enjeux de l'ODD 4 et de l'EDD
p.262

Tableau 1 : Les programmes et objectifs de l'UNESCO
p.239

Tableau 2 : La mise en place de l'EDD dans trois pays du Sud
p.264

Tableau 3 : indicateurs et ODD4 p.266

Tableau 4 : Enseignants du primaire établissant un lien entre les ODD 13 et 4 P.279

Article 7 Utilisation de REDOC dans le cas du Sénégal

Figure 1 : Les quatre piliers de l'Initiative UNESCO pour faire face au changement climatique
p.280

Figure 2 : L'ECCDD au prisme du modèle REDOC
p.281

Figure 3 : Proportion d'enseignants pouvant définir le concept de développement durable
p.292

Figure 4 : Les canaux de communication des ODD
p.293

Figure 5 : Les objets d'étude du changement climatique
p.296

Tableau 1 : Nombre d'écoles enquêtées
p.290

Tableau 2 : Nombre d'enseignants interrogés selon leur statut
p.291

Tableau 3 : comparaison des échantillons
p.291

Tableau 4 : Schéma intégrateur des domaines dans le cursus scolaire
p.294

Tableau 5 : identification des causes du changement climatique
p.295

Tableau 6 : identification des conséquences du changement climatique
p.296

Conclusion

Figure 1 : Les 5 compétences de l'EDD
p.312

Figure 2 : La taxonomie de Krathwohl
p.313

Figure 3 : Les principes didactiques d'une EDD
p.313

Tableau 1 : Synthèse des compétences
p.314

Résumé

Mots clés : *Compétences, Education, Changements climatiques, Modèles, REDOC, Représentations, Savoirs*

Abstract

Key words : *Climate change Education, Knowledge, Models, REDOC, Representations, Skills,*

Table des matières

INTRODUCTION

1. Contexte de l'étude	p.22
1.1. Contexte international	p.22
1.2. Contexte international : Lutter contre le changement climatique au moyen de l'EDD	p.23
1.3. Contexte national du Sénégal	p.26
2. L'EDD, une clarification conceptuelle, institutionnelle et didactique	p.28
2.1 Le développement durable, émergence d'un concept	p.28
2.2. Le développement durable : un projet éducatif	p.34
2.2.1. Le développement durable, un détour par les « éducations à »	p.35
2.2.2. L'éducation relative à l'environnement : une éducation engagée	p.37
2.2.3 L'éducation au développement durable, un programme onusien	p.41
2.3 Vers une éducation à la durabilité	p.43
2.3.1 Education et apprentissage au prisme de la durabilité	p.47
2.3.2 Objectifs, contenus et principes spécifiques d'une EDD ?	p.50
2.3.4 Les principes didactiques généraux d'une EDD	p.53
2.3.5 EDD, domaines disciplinaires et transversalité	p.55
3. L'éducation au changement climatique (ECC)	p.57
3.1 Le climat, quelques enjeux conceptuels	p.57
3.2. L'éducation au changement climatique pour un développement durable (ECCDD)	p.59

3.3.1 Le changement climatique et les enjeux (controverses ?) scientifiques	p.60
3.3.2 Les changements climatiques comme enjeux sociopolitiques	p.61
3.3.3 Le changement climatique comme enjeux économiques.	p.62
3.3.4. Les changements climatiques comme enjeux socioéducatifs	p.63
4. Problématique	p.65
5. Plan	p.66
6. Revue de la littérature	p.71
7. Cadre méthodologique	p.75
7.1 La dynamique des systèmes complexes	p.75
7.2. Le modèle REDOC	p.86
PUBLICATION DES ARTICLES	p.89
Tableau des articles publiés ou en cours de publication	p.90
<u>Le climat, du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée (Integrated Assessment Models)</u>	p.91
1. Introduction	p.91
2. Le climat, un savoir	p.96
2.1. La question du savoir	p.96
2.2. La production des savoirs	p.97
2.3. La diffusion des savoirs	p.97
3. La question de l'objet, de la méthode et des relations introduites	p.99
4. Le débat sur le réchauffement climatique	p.99
4.1. Les pluies acides : premières pollutions révélées	
p.101	
4.2. L'eutrophisation ou « la mort de l'eau par asphyxie »	
p.101	
4.3. La pollution marine et océanique : un phénomène d'origine humaine longtemps négligé	
p.102	
5. Paradigmes et théories scientifiques, une autre lecture du climat	
p.102	
6. Histoire scientifique du changement climatique	
p.106	
7. La variabilité du climat	p.107
8. Changements climatiques et méthodes d'observations	
p.109	
8.1. La variation de la température à la surface de la Terre	
p.109	
8.2. La variation de la température des océans	
p.110	
8.3. La cryosphère	
p.110	
8.4. Le niveau moyen des océans	
p.111	
8.5. Les indicateurs biologiques	
p.111	
9. Les facteurs du réchauffement climatique	p.111
10. Des connaissances sur les climats du passé	
p.113	
10.1. Modèles et scénarios climatiques	
p.113	
10.1.1. Histoire de la modélisation des changements climatiques	
p.115	
10.1.2. Evolution des modèles numériques de climat	
p.120	

1.0.1.2.1. *La génération des modèles à intégration assignée*

p.124

Conclusion

p.133

Références bibliographiques

p.133

Integrated Assessment Models (IAM) How to integrate Energy, Climate and Economics?

p.141

Introduction

p.141

1. *World 3 - the first design of an IAM?*

p.143

2. *DICE - the Carbon Dioxide Problem*

p.146

3. *MESSAGE - Shared Socioeconomic Pathways*

p.149

4. *GEM-E3 - a General Equilibrium Model?*

p.153

5. *IMAGE - a detailed biophysical system*

p.156

6. *REMIND-R - an Economic Growth Model*

p.158

7. *Concluding remarks and challenges*

p.162

References...

p.166

Contributions of DICE and RICE to implement Integrated Assessment Models (IAM)

p.171

Introduction

p.171

1. *Integrated Assessment Models (IAM) : State of the Art*

p.172

1.1 *Context and emergence of integrated assessment*

p.173

1.2 *The AMI landscape, some landmarks*

p.175

2. *Contributions of the DICE and RICE models to the understanding of economic, energy, and climate*

p.177

2.1 *From energy resource management to taking into account the concentration of CO₂*

p.177

2.2 *The structure of the DICE-RICE models*

p.183

2.3 *The 2015 results and projections for 2100*

p.186

Conclusion

p.193

References

p.195

Environmental Education to Education for Sustainable Development: Challenges and Issues

p.199

Introduction

p.199

1. <i>The environmental issue</i>	
p.200	
2. <i>When the environment goes hand in hand with the protection of Nature</i>	
p.202	
2.1 <i>Origin of the different nature protection movements</i>	
p.203	
2.2 <i>Environmental degradation: the Nature Writers' warning</i>	p.205
3. <i>Environmental education, an inspiration from the 1970s</i>	
p.208	
4. <i>Education for sustainable development, more transversal</i>	
p.209	
4.1 <i>The three challenges of ESD</i>	
p.211	
4.2 <i>Issues for ESD</i>	
p.213	
Conclusion	
p.215	
Bibliography	
p.215	

Education for Sustainable Development: a conceptual and methodological approach

p.219	
Introduction	
p.219	
1. <i>ESD and education for</i>	
p.220	
1.1 <i>Education for ... is a-disciplinary, thematic and transversal</i>	
p.222	
1.2 <i>Education for... refers to controversial issues</i>	
p.222	
1.3 <i>Education for... gives an important place to values</i>	
p.223	
1.4 <i>Education for... prepare for action</i>	
p.224	
2. <i>ESD, a conceptual framework of sustainable development</i>	
p.225	
3. <i>ESD as a methodological framework, the REDOC approach</i>	p.229
Conclusion	
p.231	
Bibliography	
p.231	

De l'Education au Développement Durable (EDD) aux Objectifs du Développement Durable (ODD), de nouvelles prescriptions pour les pays du Sud

p.235	
Introduction	
p.235	
I. <i>Education au développement durable, quelles réalités ?</i>	
p.237	
A. <i>L'éducation au développement durable, un projet onusien</i>	
p.237	
1. <i>La Décennie des Nations Unies pour l'Education en vue du développement durable (DNUEDD)</i>	
p.238	
2. <i>La feuille de route 2015, un programme d'action globale pour l'EDD</i>	
p.241	

B. L'éducation au développement durable, un cadre théorique ?

p.243

1. L'EDD et le courant des éducations à

p.243

2. L'EDD, un cadre conceptuel

p.244

3. L'EDD, un cadre méthodologique

p.246

4. L'EDD, une affaire de bonnes pratiques et d'actions de terrain

p.249

C. L'Education au développement durable au Pakistan et au Sénégal

p.249

II. Quand le développement durable interagit avec l'EDD, les relations ODD – EDD

p.253

A. Philosophie et opérationnalité des ODD

p.255

B. ODD et éducation, la mise en perspective de l'ODD 4

p.260

C. Quels positionnements pour les pays du Sud

p.262

1. La mise en œuvre des ODD 4 et ODD 13 : le cas du Sénégal

p.263

2. La mise en œuvre des ODD 2 et ODD 4 : le cas du Pakistan

p.266

Conclusion

p.269

Bibliographie

p.270

Eduquer aux changements climatiques au Sénégal, une initiation au modèle REDOC

p.276

Introduction

p.276

1. L'ECC, à la recherche d'un cadre méthodologique : le modèle REDOC

p.278

1.1 Des représentations nécessaires pour s'immerger dans l'ECCDD

p.282

1.2 Des démarches pédagogiques favorables à l'ECCDD

p.284

1.3 Des outils didactiques adaptés à l'ECCDD

p.285

1.4 Des compétences à formaliser

p.287

2. Analyse des représentations du DD et du CC par les enseignants sénégalais du primaire

p.290

2.1 Méthodologie de l'enquête et collecte des données

p.290

2.2 Les résultats de l'enquête

p.291

2.2.1 Les représentations sociales du développement durable

p.292

2.2.2. Les représentations sociales du changement climatique

p.294

2.2.3 Les représentations sociales du changement climatique et de son éducation

p.296

3. Quelques recommandations pour intégrer l'EDD dans la scolarité obligatoire au Sénégal

p.297

Conclusion
p.298
Bibliographie
p.299

CONCLUSION
p.305

ANNEXE
p.315

BIBLIOGRAPHIE
p.318

Introduction

1. Contexte de l'étude

1.1. Contexte international : promouvoir un développement économique durable grâce l'éducation au développement durable

A la suite des travaux de la Commission Brundtland (1987), de la conférence internationale de Rio (1992) et du Sommet de Johannesburg (2002), la réflexion sur notre rapport à l'environnement et au développement s'est profondément ancrée dans le développement durable. C'est dans ce contexte de promotion de la durabilité que l'UNESCO s'est employé à mobiliser les ressources éducatives pour contribuer à construire un avenir plus viable pour la planète.

Aux yeux d'Edgar Morin, cette durabilité doit nous amener à changer nos représentations, nos conceptions et nos comportements, or sur ce terrain, seule l'éducation est susceptible de nous engager dans le bon chemin. « *Quand nous regardons vers l'avenir, il existe de nombreuses incertitudes sur ce que sera le monde de nos enfants, de nos petits-enfants et des enfants de nos petits-enfants. Mais nous pouvons être sûrs au moins d'une chose : si l'on veut que la Terre puisse subvenir aux besoins des êtres humains qui la peuplent, la société humaine devra alors être transformée. Ainsi, le monde de demain devra être fondamentalement différent de celui que nous connaissons aujourd'hui, au crépuscule du XXe siècle et du millénaire. Nous devons donc œuvrer pour construire un "avenir viable". La démocratie, l'équité et la justice sociale, la paix ainsi que l'harmonie avec notre environnement naturel doivent être les maîtres mots de ce monde en devenir. Nous devons nous assurer que la notion de "durabilité" est à la base de notre façon de vivre, de diriger nos nations et nos communautés, et d'interagir à une échelle globale. Dans cette évolution vers des changements*

fondamentaux dans nos styles de vie et nos comportements, l'éducation, dans son sens le plus large, a un rôle prépondérant à jouer. L'éducation est "la force du futur" parce qu'elle est l'un des instruments les plus puissants pour réaliser le changement. L'un des défis les plus difficiles à relever sera de modifier nos modes de pensée de façon à faire face à la complexité grandissante, à la rapidité des changements et à l'imprévisible, qui caractérisent notre monde. Nous devons repenser la façon d'organiser la connaissance. Pour cela, nous devons abattre les barrières traditionnelles entre les disciplines et concevoir comment relier ce qui a été jusqu'ici séparé. Nous devons reformuler nos politiques et programmes éducatifs. Tout en faisant ces réformes, nous devons garder le cap sur le long terme, sur le monde des générations futures vis-à-vis desquelles nous avons une énorme responsabilité » (Morin, 2000).

De ce point de vue, la Décennie des Nations Unies sur l'Éducation en vue d'un Développement Durable (DNUEDD : 2005-2014) s'est révélée être un puissant stimulant pour initier des opérations de réforme dans tous les systèmes éducatifs du monde et réorienter les curriculums vers la promotion du développement durable (Sauvé, Berryman et Brunelle, 2007). Le mot d'ordre fut donné à tous les pays de se doter d'une stratégie nationale de développement durable, susceptible de mobiliser toutes les instances ministérielles, et notamment les ministères de l'environnement, du développement durable et de l'éducation. « *Le développement durable fait ainsi l'objet de projets éducatifs nationaux dont l'institutionnalisation se réalise à travers le mouvement des réformes éducatives* » (Sauvé, 2006).

Les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) ont largement contribué à placer l'éducation (OMD 2 – assurer l'éducation primaire pour tous) au coeur des grands enjeux mondiaux (de l'OMD 1 – éliminer l'extrême pauvreté et la faim à l'OMD 8 mettre en place un partenariat mondial pour le développement). Cette dynamique a permis d'élaborer un programme ambitieux *Transformer notre monde* pour l'après 2015. Ce programme de développement durable à l'horizon 2030 s'articule autour de 17 objectifs du développement durable (ODD) : « *Le Programme 2030 comprend un objectif dédié aux mesures de lutte contre les changements climatiques (objectif 13) et reconnaît formellement que la crise climatique est liée à beaucoup d'autres problématiques mondiales. En outre, l'objectif 13 relatif à la lutte contre le changement climatique et l'objectif 4 relatifs à l'éducation de qualité permettent de mesurer l'importance de l'éducation en vue du développement durable (EDD) et du rôle de l'éducation afin de réagir face au changement climatique* » (UNESCO, 2017).

1.2. Contexte international : Lutter contre le changement climatique au moyen de l'éducation au développement durable (EDD)

En 2008, le secrétaire général de l'ONU, Ban Ki Moon, proclamait « *le changement climatique comme étant le défi majeur de notre époque* » (UNESCO, 2010, p. 2). Pourtant, il n'y a pas si longtemps encore, la question du changement climatique ne faisait pas partie des priorités de la communauté internationale. En 2001, le Groupe d'experts

intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies soulignait même que le « *changement climatique serait progressif, et donc gérable grâce à des ajustements progressifs* » (GIEC, 2001). En 2007, suite à l'analyse de nouvelles données scientifiques et la prise de particularismes régionaux (modifications des régimes des vents, des précipitations, des événements extrêmes et des glaces de mer), le ton est différent, les experts insistent sur l'urgence des mesures à mettre à place tout en évoquant les catastrophes potentielles à venir : « *Le changement de fréquence et d'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, conjugué à l'élévation du niveau de la mer, devrait avoir surtout des effets néfastes sur les systèmes naturels et humains (3.3.5)... Même si les concentrations de gaz à effet de serre étaient stabilisées, le réchauffement anthropique et l'élévation du niveau de la mer se poursuivraient pendant des siècles en raison de échelles de temps propres aux processus et aux rétroactions climatiques (3.2.3)... Le réchauffement anthropique pourrait avoir des conséquences brusques ou irréversibles selon l'ampleur et le rythme de l'évolution du climat (3.4)* » (GIEC, 2007). Ainsi comme le rappelle fort justement Romm (2007), le climat est arrivé « *plus vite et plus brutalement que ne l'avaient prévu les scientifiques* ». Il a souligné la nécessité d'une action urgente et transformatrice, au niveau local, à l'échelle mondiale, pour faire face à la menace d'un changement climatique potentiellement radical. Dès lors, notre compréhension de la menace est devenue beaucoup plus claire et certains scientifiques se demandent déjà si « *la communauté mondiale pourrait agir avec suffisamment de détermination et assez rapidement pour stabiliser la hausse de la température de la surface de la planète à 2,00 ° C au-dessus des niveaux préindustriels, généralement considérée comme une menace pour une Planète vivable* » (Oxfam International, 2009).

En 2013, le GIEC s'est appuyé sur la combinaison des observations, des effets feedback (les fameuses boucles du système climatique) et des modèles de simulations pour réaffirmer une certitude, le rôle de l'espèce humaine dans le réchauffement de la planète : « *Human influence on the climate system is clear. This is evident from the increasing greenhouse gas concentrations in the atmosphere, positive radiative forcing, observed warming and understanding of the climate system (2.14)* » (IPCC, 2013). Cette lourde responsabilité s'est transmise de génération en génération depuis plusieurs siècles, le fardeau de la dette carbone ne pourra pas s'effacer comme une vulgaire annulation de dette monétaire : « *Cumulative emissions of CO₂ largely determine global mean surface warming by the late 21st century and beyond. Most aspects of climate change will persist for many centuries even if emissions of CO₂ are stopped. This represents a substantial multi-century climate change commitment created by past, present and future emissions of CO₂ (12.5)* » (IPCC, 2013). Les regards sont désormais tournés vers les décideurs politiques et la Communauté internationale, qui lors de la Conférence des Parties (COP 21) de Paris en décembre 2015, n'ont pas hésité à commander au GIEC, un rapport spécial sur les impacts d'un réchauffement climatique de 1.5° (le GIEC a accepté cette invitation en avril 2016). Les résultats de ce rapport (IPCC, 2018) ne divergent pas des précédents.

Les scénarios à hauteur de 1.5° et 2.0° intègrent une donnée temporelle qui échappe quelque peu à l'homme (celle d'un siècle), toutefois ils laissent déjà entrevoir les modifications sur les terres (montée du niveau des eaux), la biodiversité (extinction des espèces) et les écosystèmes (forestiers, agricoles, aquatiques, humains). Les risques climatiques mettent en péril la santé, la sécurité alimentaire, les stocks d'eau potable... la sécurité humaine et la croissance économique. Si les stratégies d'atténuation (quatre trajectoires sont proposées) et d'adaptation font toujours partie de la boîte à outils du décideur politique, les situations d'urgence et les rapides évolutions du système climatique requièrent des changements plus radicaux, auxquels seul le système éducatif peut jouer le rôle de prescripteur.

« Pathways limiting global warming to 1.5° with no or limited overshoot would require rapid and far-reaching transitions in energy, land, urban and infrastructure (including transport and buildings), and industrial systems (high confidence). These systems transitions are unprecedented in terms of scale, but not necessarily in terms of speed, and imply deep emissions reductions in all sectors, a wide portfolio of mitigation options and a significant upscaling of investments in those options (medium confidence) » (IPCC, 2018, p. 17).

L'éducation est un excellent vecteur pour préparer les sociétés à faire face à ces changements globaux. Elle joue déjà un rôle important dans la réalisation des objectifs du développement durable (ODD 4). Elle doit maintenant accompagner les changements de comportements promulgués par les stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Ce point a été précisé par l'UNESCO et développé dans la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) de 2016. Tous deux conviennent que *« l'éducation fournit les compétences dont les personnes ont besoin pour prospérer dans la nouvelle économie durable, en travaillant dans des domaines tels que les énergies renouvelables, les pratiques intelligentes en agriculture, la réhabilitation des forêts, la conception des villes économes en ressources, et la gestion saine des écosystèmes. Peut-être le point le plus important, l'éducation peut apporter un changement fondamental dans notre façon de penser, d'agir et de nous acquitter de nos responsabilités les uns envers les autres, et envers la planète. » (UNESCO, 2016).* Depuis quelques années, les Etats et les institutions internationales, reconnaissent de plus en plus l'Éducation au développement durable (EDD) comme un facilitateur efficace pour un avenir plus durable. *« Sensibiliser au changement climatique et renforcer les capacités d'adaptation et d'atténuation sont des dimensions essentielles de l'EDD » (ibid.).*

A l'échelle internationale, même si des mesures concertées sont prises pour atténuer les effets du changement climatique, en renforçant la législation internationale (Accord historique de Paris 2015, Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015 - 2030) et en augmentant les moyens financiers (35,2 milliards de dollars en 2017), le changement climatique est lourd de conséquences et engage la survie de l'espèce humaine. Les sommes colossales investies dans les solutions technologiques ne pourront à elles-seules résoudre les problèmes posés par le

réchauffement climatique. Les citoyens doivent être en première ligne pour lutter contre ce fléau, en changeant leur manière de penser et d'agir, en modifiant leurs comportements et leurs attitudes : « *Il est donc impératif que l'EDD accorde une grande place à l'action climat. Les établissements scolaires peuvent jouer un rôle essentiel en aidant les élèves à comprendre les causes du changement climatique afin que ces derniers puissent décider en toute connaissance de cause et prendre des mesures appropriées, ainsi qu'en les poussant à acquérir les valeurs et compétences nécessaires pour participer au processus de transition vers un mode de vie plus viable, une économie verte et une société durable capable de résister aux changements climatiques* » (UNESCO, 2016).

Pour permettre ainsi à l'éducation de déployer ses capacités de transformation, il sera nécessaire que l'apprentissage favorise « *une réflexion relationnelle, intégratrice, emphatique, anticipatrice et systémique* » (RMSE, 2016), que les établissements scolaires deviennent des lieux « *inclusifs, démocratiques, sains, neutres en carbone, et qui posent les fondations nécessaires à la réalisation des ODD* » (ibid.), que les liens de solidarité entre citoyens du Sud et du Nord libèrent les initiatives politiques : « *Des hommes et des femmes, au Nord comme au Sud, au niveau d'instruction plus élevé tendent à être plus sensibilisés à l'environnement, plus résilients face à l'impact du changement climatique. En plus ils deviennent plus productifs et plus capables de gérer du revenu et ils ont plus de probabilité de vivre sainement, de participer à la vie politique. Enfin le bénéfice de l'éducation des filles et des femmes sont nombreux et intergénérationnels* » (RMSE, 2016), que la communauté éducative toute entière se mobilise au chevet du climat.

En 2018, The Office for Climate Education (OCE), créé avec le soutien de fonds publics et privés d'origine française et allemande, faisait paraître un rapport à destination des enseignants. Intitulé « *IPCC Special report Global Warming of 1.5°C : Summary for teachers* », ce rapport se proposait de décrypter l'analyse scientifique en insistant sur les points essentiels du changement climatique (les émissions de gaz à effet de serre hérités de la révolution industrielle, les conséquences de ces émissions sur le système climatique, l'importance de l'Accord de Paris, les impacts physiques du changement climatique ainsi que les changements intra-marginaux, les différentes possibilités qui s'offrent à nous pour répondre à ce grand défi). A l'image du GIEC, de ses travaux scientifiques et de ses recommandations à destination des décideurs politiques, l'OCE entendait mettre à disposition des enseignants des ressources pédagogiques, des outils didactiques et des exemples concrets (projets pilote) afin de créer une véritable émulation. L'idée que les enseignants soient les « *key for implementing these recommendations, especially in primary and secondary schools* » (IPPC, OCE, 2018, p. 24), n'est pas nouvelle en soi, elle était déjà présente dans les nombreuses *Educations* à qui ont émergé dans les années 1990 et 2000 (éducation à l'environnement, éducation à la santé, éducation aux médias, éducation à la biodiversité, éducation au développement durable...). Toutefois, que cette initiative prête une attention toute particulière aux pays en développement, en dit long sur les perceptions et les représentations du

changement climatique, notamment lorsque ces pays figurent en première ligne lorsqu'il s'agit de dénombrer les impacts et les conséquences du réchauffement climatique.

1.3. Contexte national du Sénégal

Au Sénégal, il existe une volonté manifeste de promouvoir le développement durable et son éducation. Le pays s'est engagé très tôt dans la ratification des conventions internationales, que ce soit l'adoption de la charte des Nations Unies sur le Développement durable, l'adoption et la mise en œuvre de l'Agenda 21 issu de Rio, la création en 1995 d'une Commission nationale de développement durable (qui constitue le cadre multisectoriel de coordination du développement durable) ou encore la mise en place d'une stratégie nationale du développement durable (SNDD, 2005) suite aux prescriptions du Sommet Mondial de Johannesburg (2002).

Cette SNDD qui délimite les conditions de la politique du Sénégal en matière de durabilité (l'éducation y trouve une place importante) a permis aux planificateurs d'introduire l'éducation au développement durable dans le curriculum de l'école de base dès 2005. Ainsi, le Sénégal peut être présenté comme l'un des chefs de file de l'éducation au développement durable sur le continent africain, que ce soit au travers de la Décennie des Nations Unies sur l'Éducation au Développement Durable (2005-2014) ou des nombreux programmes de l'OIF (Organisation internationale de la Francophonie) et de l'IFADEM (Initiative de formation à distance des maîtres d'École).

En 2007, la Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD) du gouvernement sénégalais, a confirmé ce recadrage de l'éducation dans la perspective du développement durable : *« L'intégration de l'éducation pour le développement durable doit s'effectuer sans délai du préscolaire à l'enseignement supérieur. Le contenu des enseignements doit être profondément rénové à l'échelle de tous les acteurs, en vue de les rendre aptes à favoriser la promotion de nouvelles compétences dans tous les lieux de vie. La stratégie nationale pour le développement durable doit favoriser dans la perspective de l'accroissement du niveau de sensibilisation des acteurs pour un développement durable, la construction d'un socle de compétences qui mesurent et anticipent les dysfonctionnements dans les milieux de vie et toutes les actions de développement en mesurant leurs conséquences sur le bien-être collectif et individuel »* (SNDD, 2007).

Dans sa Loi constitutionnelle n° 2016-10 du 05 avril 2016 sur la révision de la Constitution, le Sénégal a réaffirmé son engagement au niveau international, en introduisant le développement durable dans sa charte suprême. *« L'exploitation et la gestion des ressources naturelles doivent se faire dans la transparence et de façon à générer une croissance économique, à promouvoir le bien-être de la population en général et à être écologiquement durables »* (Art 25.1). Cette révision constitutionnelle s'est tenue au lendemain de l'Accord historique de Paris sur le climat, et du lancement des ODD. La

Loi Suprême du Sénégal note à cet effet que *«les pouvoirs publics ont l'obligation de préserver, de restaurer les processus écologiques essentiels, de pourvoir à la gestion responsable des espèces et des écosystèmes, de préserver la diversité et l'intégrité du patrimoine génétique, d'exiger l'évaluation environnementale pour les plans, projets ou programmes, de promouvoir l'éducation environnementale et d'assurer la protection des populations dans l'élaboration et la mise en œuvre des projets et programmes dont les impacts sociaux et environnementaux sont significatifs»* (Art.25.2).

Si la promotion de l'Education Relative à l'Environnement (ERE) est clairement mentionnée dans les documents officiels, il est très difficile en pratique de mettre en lumière les applications concrètes dans les classes primaires. Si les documents font implicitement référence au climat (*« préserver, restaurer les processus écologiques essentiels, pourvoir à la gestion responsable des espèces et des écosystèmes, préserver la diversité et l'intégrité du patrimoine génétique »* *ibid.*), il n'existe à l'heure actuelle, aucun programme officiel de formation dédiée à l'éducation aux changements climatiques dans l'enseignement élémentaire (7-12 ans). Néanmoins, l'UNESCO en collaboration avec le Ministère de l'Environnement en charge du développement durable et le Ministère de l'Education Nationale, ont organisé en 2017 une conférence interministérielle sur ce thème.

L'EDD et sa généralisation sont présentés comme un virage éducatif nécessaire et indiscutable, comme *« la solution aux limites »* de l'Éducation relative à l'environnement (ÉRE) (Sauvé, 2006) tant au niveau international que national. Partant du principe que nous avons tous un rôle à jouer pour régler les problèmes planétaires, l'EDD est apparue comme la clé de voûte des actions à mener face au changement climatique. L'éducation au changement climatique pour un développement durable (ECCDD), se positionne dès lors comme une valorisation *« des connaissances, compétences et valeurs indispensables pour rendre notre société plus saine, plus équitable et plus écologiquement viable »* (UNESCO, 2017).

Ces consensus autour des bienfaits d'une *éducatons au développement durable ou aux changements climatiques* contrastent avec les débats et les controverses autour du concept de développement durable (Pellaud, Eastes, 2016). En l'espace de quelques décennies (Rapport Brundtland, 1987), ce dernier a alimenté le champ des Questions Socialement Vives (les fameuses QSV, les anglo-saxons parlent de *Controversial issues*) au sein de la communauté scientifique, des partis politiques, de la société civile et du monde de l'éducation : *« les plus grands malheurs de l'humanité naissent de malentendus, et non pas comme le veut la polémique partisane, de la perversité des uns triomphant de la bonté naturelle des autres. Mais les pires malentendus, à leur tour, naissent de confusions faites sur les mots. Il n'y a pas de "questions de mots" au sens futile, accoutumé, parce que tout est d'abord question de mots, au sens précis et définitif de l'expression. Si nous ne partons pas, dès nos premières démarches, d'une définition concrète des mots en jeu, la partie est perdue d'avance ou plutôt elle va se jouer dans un domaine où ne subsiste plus ni sanction ni arbitrage ;*

où chacun peut prétendre avoir gagné ; où la victoire de l'un n'est pour l'autre que tricherie. J'appelle sanction le simple jugement de vérité ou d'erreur, dans un domaine où quelques vérités fondamentales sont reconnues » (Turchany, 2007). Il nous semble ainsi important de faire un détour épistémologique afin de cerner les enjeux d'une éducation aux changements climatiques en vue d'un développement durable

2. L'éducation au développement durable, une clarification conceptuelle, institutionnelle et didactique

2.1 Le développement durable, émergence d'un concept

Malgré plus de trente années d'existence (Rapport Brundtland, 1987), l'expression « développement durable » suscite toujours autant de critiques, de polémiques et de débats controversés (Boisvert, Vivien, 2010 ; Diemer, 2017). Le vocable « *développement durable* » vient de la traduction anglaise « *sustainable development* ». Le choix de la dénomination de ce concept ne fait pas l'unanimité car « *sustainable development* » n'a pas de correspondance exacte en français (Harribey, 2002). Il est très fréquent de trouver dans des ouvrages ou publications scientifiques, d'autres propositions telles que : développement soutenable, développement viable ou même écodéveloppement (Sachs, 1981). Au-delà des débats sémantiques, le concept de développement durable ressort d'une volonté de trouver un consensus international permettant à la fois un développement viable, vivable et équitable comme en témoigne sa définition officielle et sa représentation sous la forme des trois sphères qui s'entrecroisent.

Le concept de développement durable est apparu comme une tentative pour penser une évolution de nos écosystèmes et de l'humanité de façon moins agressive et plus réfléchie. Cela nécessite, d'une part une approche complexe, les systèmes auxquels nous faisons référence l'étant et, d'autre part, d'être capable d'imaginer des propositions optimales, tenant compte d'un équilibre artificiel entre économie, écologie et développement social pour favoriser cette évolution. Au début des années 80, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) lance sa « *World Conservation Strategy : Living resources Conservation for Sustainable Development* » fondée sur trois axes principaux (1) le maintien des processus écologiques essentiels et des systèmes entretenant la vie, (2) la préservation de la diversité génétique et (3) l'utilisation durable des espèces et des écosystèmes. Les premières lignes de cette stratégie sont sans équivoque: « *Human beings, in their quest for economic development and enjoyment of the riches of nature, must come to terms with the reality of resource limitation and the carrying capacities of ecosystems ; and must take account of the needs of future generations. This is the message of conservation* » (IUCN, 1980, p. I). Le développement économique ne peut être conçu sans tenir compte de la rareté des ressources naturelles

et des capacités biophysiques des écosystèmes, c'est cette réalité que les générations présentes et futures devront intégrer dans leurs choix de vie en société.

Quelques années plus tard, à la demande du Secrétaire général des Nations Unies (décembre, 1983), c'est à la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (CMED) que l'on confie la mission de : « *de proposer des stratégies à long terme en matière d'environnement pour assurer un développement durable d'ici à l'an 2000 et au-delà ; de recommander des méthodes pour faire en sorte que l'intérêt porté à l'environnement se traduise par une coopération plus étroite entre les pays en développement et entre des pays ayant atteint différents niveaux de développement économique et social et débouche sur la réalisation d'objectifs communs s'appuyant mutuellement et tenant compte des relations réciproques entre la population, les ressources, l'environnement et le développement ; d'envoyer des moyens permettant à la communauté internationale de faire plus efficacement face aux problèmes de l'environnement, et de contribuer à définir les identités de vues sur les problèmes à long terme de l'environnement et les efforts qu'il conviendrait de déployer pour résoudre les problèmes que soulèvent la protection et l'amélioration de l'environnement, l'adoption d'un programme d'action à long terme pour les prochaines décennies et des objectifs auxquels la communauté mondiale devrait tendre* » (CMED, 1987, Avant-propos). Ce que l'on a coutume d'appeler le Rapport Brundtland a eu le grand mérite de mettre en lumière de façon très claire et concrète les liens rétroactifs entre les activités humaines et l'état de notre environnement en réorientant nos modes de production et de consommation vers « *une nouvelle ère de croissance économique rigoureuse et en même temps socialement et environnementalement durable* » (CMED, 1987, p. XX11). Le développement durable jette ainsi les bases d'un nouveau projet de société où la responsabilité et l'engagement de chaque être humain comptent : « *nous sommes capables d'améliorer nos techniques et notre organisation sociale de manière à ouvrir la voie à une nouvelle ère de croissance économique* » (CMED, 1987, p.10).

C'est dans cette perspective que l'Organisation des Nations Unies (ONU), à l'occasion du Sommet de Rio de Janeiro sur l'environnement et le développement (1992), a demandé à tous ses Etats membres de se doter d'une Stratégie Nationale de Développement Durable (SNDD). Dans chaque pays, des instances nationales – principalement les ministères de l'environnement, de l'économie et de l'éducation – se sont vus mandatés pour mettre en œuvre ce projet socio-politique. En l'espace de quelques années, le développement durable a fait son apparition dans les milieux de l'éducation formelle et non formelle, en rompant avec les approches pédagogiques traditionnelles. Ces changements soutenus par des mesures curriculaires ont fortement déterminé l'ancrage du développement durable dans le monde de l'éducation et de la formation. Et ceci, malgré l'absence de changement de paradigme, le développement durable étant « *essentiellement stratégique et axée sur des indicateurs dont les critères restent flous* » (Sauvé, 2013, p.17). En effet, un paradigme se fonde sur des habitudes sociales, culturelles et économiques ; des objectifs sociétaux qui diffèrent

d'un pays à un autre. On ne peut donc espérer que le développement durable se généralise de la même manière dans tous les pays. Par ailleurs, le bilan des dix années qui se sont succédées entre le Sommet de Rio (1992) et le Sommet de Johannesburg (2002) ainsi que les Objectifs du Millénaire pour le Développement (au nombre de huit) adoptés en 2000 à New York, se sont révélés très insuffisants (Rapport, 23 juin 2010¹).

Cette période coïncide avec une période de doutes vis à vis du concept de développement durable. En France, Jacques Testard, alors Président de la Commission française du développement durable démissionne suite à la censure des travaux de ses membres par les instances gouvernementales. Ses propos fustigent le développement durable : « *le label développement durable menacé lui-même le projet affiché* », et suggèrent « *de se tourner vers des cadres de références plus soucieux du sens de notre humanité sur Terre* » (Testard, 2003, p.13-14). Cette critique associée à celle du physicien Normand Mousseau (dans son analyse sur l'exploitation des ressources minières au Québec), mettent en évidence les limites, voire les dérives d'un projet désormais globalisé : « *en faisant miroiter leur politiques de développement durable à l'échelle locale, imprimée à l'encre naturelle sur du papier 100% recyclé, l'industrie espère faire oublier les mouvements de fusion/acquisition qui continueront à concentrer dans les mains des multinationales toujours plus puissantes dont l'intérêt et les centres de discours s'éloignent constamment des mains des travailleurs (...). Le développement durable, sert d'écran de fumée qui cache les possibilités réduites de développement économique et social* » (Mousseau, 2002, p. 96). Les tentatives successives d'associer un ou plusieurs piliers au développement durable – le pilier politique ou le pilier culturel – ne feront que cristalliser les oppositions et semer le doute sur le réel projet du développement durable. Alain Deneault (2013, C- 4) qualifie le pilier politique « *d'arène de gouvernance manageriale* » et Lucie Sauvé (2013, p. 19) n'y voit qu'une volonté affichée d'autonomiser l'économie : « *le développement durable propose une fragmentation du monde en trois piliers, l'économie, désormais chosifiée, y est légitimée d'avoir, une existence autonome en dehors de la sphère sociale et de s'appuyer sur une éthique exclusivement anthropocène, l'environnement y est réduit à un ensemble de ressources pour le développement dont il importe de ne pas épuiser les stocks et la société regroupe des individus producteurs et consommateurs soucieux de reconnaître les services rendus par les écosystèmes et de ne pas épuiser les ressources que nécessite le développement* ». Sous cet angle, notre société serait dépossédée de toutes ses sphères identitaires (sociale, politique, culturelle), véritable machine de reproduction des inégalités au Nord et au Sud, elle serait désormais composée d'individus-clients cherchant à satisfaire une pléthore de besoins (demande d'éducation, demande de soins de santé, demande de biens de consommation).

Le développement durable des années 2000 serait donc entré en crise. Mais, étonnamment, il y a très peu de lieux où cette situation est évoquée. Progressivement,

¹ Rapport "A Brief for Policymakers on the Green Economy and the Millennium Development Goals"

la notion disparaît des discours politiques et d'une partie de la littérature scientifique, au profit d'autres termes comme ceux de la « *transition* » de la « *résilience* », de la « *durabilité* », de la « *décroissance* » (Latour, 2011). Certains auteurs (Zaccai, 2002) associent cet effacement aux changements de contexte, l'émergence du développement durable correspondant à une période marquée par la mondialisation des échanges, la globalisation financière (accord de Washington, 1985) et la montée en puissance de l'idéologie libérale (gouvernement Reagan aux Etats-Unis, Gouvernement Thatcher en Angleterre), et qui s'achève avec la crise des subprime de 2008. D'autres, comme Serge Latouche (2003), y voient la conséquence logique d'une usure et d'usages abusifs qui ont réduit l'expression à une rhétorique creuse, voire à une imposture.

Dans un contexte de crise économique (2008) et de désenchantement sur la gouvernance mondiale (crise des grandes institutions internationales que sont le FMI et la Banque Mondiale), c'est donc plutôt la part d'illusion et les aspects négatifs de l'ambiguïté qui sont mis en avant, menaçant une bonne partie du crédit qui s'attachait encore à la notion de développement durable. Ce sont ces critiques – que l'on peut regrouper en quatre catégories ou niveaux – qui prennent le pas, venant justifier un désir plus général de changer de vocabulaire.

La première catégorie est d'ordre sémantique, elle concerne les fonctions discursives du *syntagme* développement durable. Une très bonne illustration en est donnée par les propos d'Alice Krieg Planque (2010) : « *Au-delà des appropriations et des glissements multiples qu'elle permet (du développement soutenable à la croissance durable), l'expression par l'usage qu'elle fait des formules concessives du type : sans pour autant, ne serait rien d'autre qu'un moyen de neutraliser, de dépolitiser, les contradictions qu'elle est censée mettre en évidence* ». Franck-Dominique Vivien (2005) précise que l'ambiguïté a, depuis l'origine, été constitutive de l'émergence du concept de développement durable : « *ambiguïté dans la signification des termes (durabilité ou soutenabilité ?), et dans leurs assemblage un «oxymore», ambiguïté dans l'origine historique (le Rapport Brundtland ou bien avant...), ambiguïté des définitions (plus d'une centaine), confusion ou pas avec le terme « environnement », ambiguïté, surtout, dans les « objectifs politiques ou écologiques et dans les relations au marché ou au capitalisme mondiale* ». Matthias Maier (Institut Européen de Florence, 1999) associe cette ambiguïté aux trois fonctions suivantes : « *soit constituer un habillage, une couverture, permettant les manipulations tactiques (« green washing»), soit rendre possible la recombinaison des intérêts divergents et ouvrir de nouvelles opportunités d'actions coopératives (utilisation stratégique) soit, enfin, préparer la transition vers un «nouveau» paradigme de développement ou de démocratie (rupture politique)* ». Ainsi, au-delà d'un noyau consensuel commun, le développement durable se serait montré particulièrement accueillant à la diversité et à la contradiction : « *on pouvait ainsi distinguer au moins six conceptions totalement différentes du développement durable* » (Theys, du Tertre, Rauschmayer, 2010, p.31).

La deuxième catégorie des critiques est d'ordre scientifique ou épistémologique. En effet, la faiblesse du concept de développement durable, par exemple par rapport à celui d'environnement, est d'être une notion beaucoup trop normative, et donc incertaine, pour pouvoir se prêter à l'objectivation. L'idée qu'il pourrait y avoir une *science du développement durable* - Sustainability Science chez les anglo-saxons (Clark 2007) - ne fait pas l'unanimité, comme est d'ailleurs mis en doute le fait que le développement durable soit réellement un concept. Et beaucoup de chercheurs considèrent qu'il y a au moins autant de dangers que d'intérêts à investir sur un sujet à ce point marqué par les logiques d'action et l'ambivalence des valeurs (Berhault, 2013 ; Theys, 2014).

La troisième catégorie renvoie à des critiques discursives et normatives, elles portent principalement sur les usages politiques et idéologiques du développement durable. Ce qui lui est reproché, c'est moins de porter un projet de nature fondamentalement *social-démocrate-écologique*, que de couvrir derrière une apparence scientifico-technique, une très grande duplicité idéologique : « *chimère écologique malfaisante* » pour les uns, « *mystification servant à préserver les intérêts des pays occidentaux, ou ceux du système marchand* », pour les autres. Entre les discours forts de « *l'éco-socialisme* » (Gorz, 1991) ou de la « *décroissance* » (Latouche, 2006), d'un côté, de la priorité à l'économie ou à la compétitivité, de l'autre ; c'est toute la rhétorique consensuelle, propre aux années 1990-2000 qui est, de fait, mise en doute. Selon Theys et ali. (2010), un des aspects majeurs de ce soupçon concerne, naturellement, le rapport qu'entretient le développement durable avec l'environnement : « *cheval de Troie des écologistes pour les uns, il est, systématiquement, accusé de n'être qu'un outil de marketing, servant, en réalité, à relativiser la gravité des problèmes d'environnement, sous couvert de neutralité technique et scientifique, l'expression ne servait donc, d'abord, qu'à la manipulation stratégique* ».

La quatrième catégorie de critiques porte sur l'action et ses résultats, dans une perspective pragmatique. Nous pouvons la situer à deux niveaux, mettant toujours en jeu la question de l'ambiguïté du développement durable. Sur le terrain, les acteurs se plaignent d'avoir à choisir entre des *objectifs flous* ou *sans cesse redéfinis*, et des *injonctions bureaucratiques* définies à travers une prolifération de guidelines ou d'indicateurs impossibles à respecter. Cette vision « *top-down* » du développement durable est relatée par plusieurs dirigeants d'ONG, par la société civile elle-même et par de nombreux pays du Sud. En plus, les évaluations a posteriori dont on dispose, montrent un décalage très grand entre les espoirs qui avaient été mis dans le développement durable et les résultats réellement atteints, décalage dont on ne peut dire s'il est dû à des objectifs trop vagues ou à des moyens mal adaptés ou insuffisamment mobilisés. Cette ambiguïté a constitué un facteur très efficace « *d'attractivité* » et de dynamisme du concept de développement durable ; rendant possibles des compromis pragmatiques autour d'une culture commune minimale (« *les trois piliers* »). Elle a sans doute aussi favorisé une appropriation démocratique du

terme, en en faisant non pas une norme absolue et définitive, mais le résultat pratique d'un processus pragmatique de décision collective (à l'instar des Agenda 21) ou la résolution pratique d'une « énigme ». Edwin Zaccai (2002) a proposé le terme « *d'illusion motrice* ».

Pour autant et malgré ces critiques, le développement durable peut mener à la recherche d'accommodements raisonnables permettant de rendre plus acceptables, au plan social et environnemental, les activités et les projets de « *développement économique* » au sein des territoires. Dans ce contexte, le langage du développement durable adopté et valorisé dans divers secteurs de notre société peut sans doute être efficace dans la recherche de solutions limitant les impacts négatifs des pratiques actuelles du monde de l'entreprise et de la gestion des affaires. Cette vision du développement durable doit nous conduire à formuler une nouvelle définition du développement durable. Pour que le développement durable soit un projet planétaire, il faut qu'il implique une vue globale, systémique, non géocentrique qui oblige à repenser, par l'effort de tous, les notions telles que la solidarité, l'équité, le partage. Marin (1987) a résumé en quelques mots ces finalités. Il s'agit de « *Repenser les nouvelles bases d'un projet de société planétaire qui puisse garantir notre survie et notre reproduction historique dans un cadre d'harmonie et de réciprocité avec l'environnement* » (Marin, 1987).

Mais l'absence de moyen d'actions pour y parvenir rend cette approche incomplète car le développement durable est un processus qui se déroule sur des échelles spatio-temporelles relativement variées. Par conséquent, comme le souligne Francine Pellaud (2000), le développement durable peut être présenté comme « *un processus adaptable aux différentes cultures, tout en gardant son caractère universel de protection de l'espèce humaine et de son environnement dans une vision qualitative et non quantitative, en prenant en compte les implications écologiques, sociales et économiques qui sont indissociables de toute action humaine quelle qu'elle soit* ».

Cette définition laisse entrevoir cinq actions ou pistes de solutions aux problèmes que nous vivons actuellement (Pellaud, 2000, 2011). Il s'agit : (1) d'adopter une vision de la mondialisation qui soit prise en compte dans le respect des cultures, (2) de formuler des objectifs qualitatifs qui ont pour finalité la protection de l'homme et de son environnement, (3) d'équilibrer les interactions entre les différents domaines économie-écologie-développement social, (4) d'adapter la notion de processus aux différentes échelles de temps et d'espace dans une logique d'équité intergénérationnelle et enfin (5) de promouvoir la participation active à tous les niveaux de décision, de l'individu aux gouvernements, aux organisations internationales et aux organisations des sociétés civiles pour une nouvelle gouvernance mondiale à visage humain.

2.2. Le développement durable : un projet éducatif

Si le développement durable constitue un objet ambigu et victime de son succès, il en va tout autrement de son éducation. En effet, les instances internationales ont toujours considéré l'éducation comme un « *moyen* » d'accomplir leurs visées politiques en matière d'environnement et de développement. Chacune des grandes conférences internationales a donné lieu à des recommandations relatives à l'éducation. En ont découlé, en fonction de la vision transformatrice de l'éducation, des déclarations, des programmes ou des stratégies. En 1972, la première Conférence Mondiale sur l'Environnement Humain, qui réunissait 113 Etats à Stockholm, sonna l'alarme sur la gravité et l'accélération des problèmes environnementaux liées à la surexploitation des ressources en mettant en évidence les interactions et les interdépendances qui existaient entre les réalités sociales et écologiques, entre l'économie et l'environnement. Ses conclusions stipulaient clairement « *qu'il ne fallait pas considérer isolément les problèmes écologiques actuels et futurs et qu'une solution acceptable ne pourrait y être apportée que dans la mesure où l'on reconnaît que leurs véritables causes étaient la pauvreté et le sous-développement d'une part ainsi que qu'une consommation excessive et un gaspillage des ressources d'autre part* ». Bien qu'à cette date, le développement durable ne soit pas encore mentionné comme tel, l'Unesco et le PNUE mirent en place « *le Programme international d'éducation relative à l'environnement (PIEE)* » (Sauvé, 1997). Quelques décennies plus tard, le caractère prescriptif d'une telle éducation, centrée sur la transmission des connaissances et la modification des comportements, se retrouve dans de nombreux projets éducatifs onusiens. D'une certaine manière, l'éducation n'est plus perçue comme « *un objectif en soi mais comme un moyen d'amener des changements de comportements et de styles de vie, de disséminer des connaissances et de développer des habiletés, et enfin de préparer le public à appuyer les changements vers la soutenabilité émanant d'autres secteurs de la société* » (Unesco, 1997, p. 1). Des initiatives internationales et nationales ont ainsi vu le jour. Le développement durable s'est introduit dans le cercle très fermé des « *éducations à* », à côtoyer les défenseurs d'une éducation relative à l'environnement, puis a pris ses distances pour constituer l'un des projets phares de l'UNESCO depuis 2005.

2.2.1. *Le développement durable, un détour par les « éducations à »*

La question du développement ne peut être dissociée de la controverse entre enseigner le développement durable et éduquer au développement durable (Pellaud, 2011). En effet, si le développement durable suppose de distiller des connaissances scientifiques permettant de cerner ses différents enjeux, il requiert également de définir les changements de comportements propices à son investiture. Dans ce dernier cas, il renvoie directement à l'émergence et au développement des *éducations à*.

Les éducations à, déclinées sous la forme d'éducation à la santé, à l'environnement, au développement durable, sont présentées comme de nouveaux champs d'investigation dans le cadre du milieu scolaire et périscolaire (Barthe, Alpe, 2012). Elles se

différencient « *des disciplines par l'absence de référent académique et donc de curriculum clairement établi* » (Lange, Victor, 2006).

Elles s'opposent principalement à la « *forme scolaire* » mise en place à la fin du XIXe siècle (Vincent, 1994, Monjo, 1998). Celle-ci, admise par tous comme une nécessité inhérente à l'acte d'enseigner, est conditionnée par un certain nombre de caractéristiques : « *règles impersonnelles et structure hiérarchique dans la classe, un seul maître responsable d'un groupe d'élèves triés par âges, existence d'un lieu distinct et fermé* » (Angela Barthes, Yves Alpe, 2012). Cette forme scolaire s'applique aussi aux contenus scolaires, en imposant « *un découpage horizontal du savoir* » en « *matières scolaires* », qui s'appuient sur des savoirs scientifiques de référence. Elle accorde également une préférence au « *caractère cumulatif des savoirs, et au contrôle du processus de transmission et de ses résultats (examens, diplômes, inspections)* » (*ibid.*). La forme scolaire a pris un tournant avec l'époque de J. Ferry : organisation, définition d'enjeux spécifiques (dépassant largement le cadre de l'école), éradication des particularismes locaux, diffusion des valeurs de la modernité, exaltation du sentiment national et de la citoyenneté. Même si l'enseignement dans son ensemble y contribue, sur le plan symbolique la figure emblématique du maître y contribue aussi fortement. Dans ce contexte, le système éducatif est conçu à la fois pour enseigner et éduquer. Ces « *fonctions sociopolitiques de l'école* » (Prost, 1992) justifiaient dans les enseignements la présence de valeurs (morale, citoyenneté, patriotisme...) ou même de positions idéologiques (débats autour de la démocratie), fort peu remises en question jusqu'aux années soixante. Mais au cours du lent processus de didactisation des contenus scolaires (1960-1990), cette place des valeurs a connu un rétrécissement considérable et progressif.

Le mouvement pour « *la massification scolaire* » (Merle, 2009) a donné la priorité aux contenus de savoir. La méfiance résultant de la mise en cause idéologique (Baudelot et Establet, 1972) des fonctions de l'école (inégalité des chances scolaires, rôle du capital culturel...) par le développement de la sociologie de l'éducation et la « *théorie de la reproduction* » (Bourdieu et Passeron, 1970) conduit à suspecter tout élément semblant relever plus ou moins d'un « *curriculum caché* » (Perrenoud, 1993). Dès lors, de nombreux professeurs se considèrent alors strictement comme des enseignants, ils ne sont plus des éducateurs : « *Ils fondent leur légitimité sociale par la légitimité scientifique et académique des savoirs qu'ils dispensent* » (Angela Barthes, Yves Alpe, 2012). Dans ces conditions, l'enseignement à l'école s'organise autour de la question des fondamentaux : « *Il s'agit de déterminer une base éducative minimale indispensable, qui se décline par tranches d'âge* » (*ibid.*). Parallèlement, la conception utilitariste de l'éducation, fondée sur l'employabilité future, qui s'accompagne de la montée en puissance du « *modèle des compétences inspiré de l'entreprise* » (Ropé et Tanguy, 1994), domine en prétendant répondre à une crise de l'école (Joshua, 1999), caractérisée par le doute sur l'utilité sociale des savoirs.

Les années 90 sont toutefois marquées par un mouvement de changement induit par des questions relatives à la détérioration de l'environnement, à l'arrivée de nouveaux vecteurs de communication (le numérique et l'internet), à la montée des problèmes d'incivilité et de violence ou encore issues des critiques du Sud envers les prescriptions éducatives du Nord. *L'éducation à l'environnement* (Girault et Sauvé, 2008), *l'Education civique juridique et sociale* (Alpe et Legardez, 2000), *l'éducation à la santé* (Eymard, 2004), *l'éducation au développement durable* (Diemer, 2013) viennent s'ajouter aux deux éducations déjà présentes dans le cadre scolaire, l'éducation civique et l'éducation physique et sportive. Ces *éducations à* remettent partiellement en question « *le partage entre la fonction d'instruction, centrée sur les savoirs, et la fonction d'éducation, centrée sur les valeurs à transmettre.* » (Audigier et Tutiaux-Guillon, 2008). Le plus souvent, elles répondent à une injonction politique supranationale et leurs contenus sont orientés par des pratiques d'acteurs et de partenariats. Les enjeux de ces actions éducatives constituent un nouveau souffle pour les acteurs de l'éducation et une nouvelle exigence pour leur formation (Fouguet et al, 2016). Elles trouvent leur justification dans les propos de Gauchet (2013) : « *nous sommes en proie à une erreur de diagnostic ; on demande à l'école de répondre par des moyens pédagogiques des problèmes civilisationnels résultant du mouvement même de nos sociétés, et on s'étonne qu'elle n'y parvienne pas. Quelles sont ces transformations collectives qui aujourd'hui posent à la tâche éducative des défis entièrement nouveaux ? Ils concernent au moins quatre fronts : les rapports entre la famille et l'école, le sens des savoirs, le statut de l'autorité, la place de l'école dans la société* ».

D'une manière générale, les *éducations à* font apparaître deux constantes. La première est liée à l'interconnexion des problématiques tant du point de vue éducatif (centration sur des expériences à vivre, des compétences, nature mixte et controversée des savoirs impliqués) que du point de vue sociétal (imbrication des questions environnementales, sanitaires, sociales et économiques). La seconde se tourne vers une ressemblance des démarches pédagogiques favorisant leur aspect éducatif et non leur assujettissement à des visées utilitaristes ; la place déterminante et impliquée du sujet dans sa dimension sociale, tant l'élève que l'enseignant, de ses valeurs et de ses systèmes de représentations-connaissances.

Legardez et Simonneaux (2006) ont insisté sur ce qu'ils appellent les quatre caractéristiques principales de ces « *éducations à* » : (1) elles sont thématiques (le développement durable, l'environnement, le changement climatique.) et non disciplinaires, ce qui les distingue du modèle standard des contenus scolaires à caractère scientifique ; (2) elles ont une relation étroite avec des « questions socialement vives (QSV) » parce qu'elles se focalisent sur des problèmes que se pose la société, en même temps qu'elles sont une réponse à une forme de demande sociale d'éducation. Elles peuvent être controversées (le changement climatique, la gestion de la biodiversité) ; (3) elles accordent une place aux valeurs et à l'action (la pratique : les bons gestes constituent la première étape pour lutter contre le changement

climatique) ; (4) elles ont comme objectif généralement explicite, de faire évoluer des comportements, car le but est de comprendre pour agir (les bons gestes conduisent à court/moyen/long terme à un changement de comportement).

Ces caractéristiques font des *éducations* à un modèle éducatif cherchant à imbriquer savoirs, valeurs et pratiques ; puis s'inscrivant dans une volonté de faire agir pour transformer.

2.2.2. *L'éducation relative à l'environnement : une éducation engagée*

Selon Sauvé et Orellana (2008), l'un des objectifs majeurs de l'éducation relative à l'environnement est « *le développement d'une compétence critique* ». Pour faire émerger une telle compétence, ces dernières suggèrent « *l'intégration de trois types de savoirs* » (ibid.). En premier lieu, il s'agit d'un ensemble de connaissances générales et spécialisées permettant d'aborder les réalités complexes sous une diversité d'angles d'analyse et de reconnaître la pluralité des regards et des arguments possibles à propos d'un phénomène ou d'une situation. En second lieu, il s'agit d'un savoir-faire lié à des habilités cognitives, dont l'analyse, la synthèse et l'évaluation, associées à des habilités stratégiques, comme celles de rechercher et de traiter l'information, de construire un argument, de discuter, etc. Enfin en troisième lieu, il s'agit d'un savoir-être fondé sur des attitudes, en particulier le scepticisme, la curiosité et la capacité de se remettre en question, et s'appuyant sur un système de valeurs favorisant l'approche critique des réalités, dont la rigueur, le souci de pertinence et la justesse.

C'est à travers cette intégration des trois savoirs que progressivement se construit ce que Sauvé et Orellana appellent « *un savoir-agir* », c'est-à-dire « *savoir exercer une pensée critique de façon pertinente et efficace, en fonction du contexte* » (ibid.). Dans ce cas, la compétence n'est pas un état, c'est un processus : « *Si la compétence est un savoir-agir (...), l'opérateur compétent est celui qui est capable de mobiliser, de mettre en œuvre de façon efficace les différentes fonctions d'un système où interviennent des ressources aussi diverses que des opérations de raisonnement, des connaissances, des activations de la mémoire, des évaluations, des capacités relationnelles ou des schémas comportementaux. Cette alchimie reste encore largement une terra incognita* » (Le Boterf, 1994). Ainsi le caractère engagé de l'éducation relative à l'environnement se trouve dans la quête de cette « *compétence critique* », où le mot critique renvoie à l'idée de jugement évolutif. Elle peut alors s'appliquer dans trois domaines :  conomie-politique, pédagogique et  thique. « *D busquer l'argument fallacieux dans une publicité « verte », cerner les avantages et les limites d'une politique publique en matière d'environnement, repérer les biais et les failles d'un documentaire sur les changements climatiques, identifier des éléments pour l'amélioration d'un plan de développement urbain, voilà des lieux d'exercice de la pensée critique* » (Sauvé et Orellana, 2008).

Concrètement, il s'agit, pour la mise en œuvre d'une « *compétence critique* », de « *faire des choix de consommation écoresponsables, de participer efficacement aux débats publics en matière d'environnement, de s'assurer de la pertinence et de la cohérence interne d'un projet d'écodéveloppement* » (ibid.). Cette étape fait référence au transfert des compétences où « *toutes les pratiques qui visent une reconnaissance des acquis de l'expérience commencent par l'analyse de cette expérience. L'objectif du retour d'expérience est triple : se reconnaître dans son expérience, la mettre en valeur, objectiver cette expérience aux yeux d'autrui* » (Jacques Aubret in Le Boterf, G. (1994).

Ce retour d'expérience qui suppose un « *esprit critique* », par l'exercice de « *la pensée critique* » et pour une compétence critique intégrale ne peut s'ouvrir que sur une préoccupation de critique sociale. Dans ces situations, les questions de quoi et de comment ne suffisent plus pour garantir un retour d'expérience. Elles se substituent par excellence à celle du pourquoi où le mot « *critique* », « *fait référence aux fondements et pratiques de la Théorie critique ou plutôt, du champ diversifié des propositions qui se réfèrent à celle-ci : la posture critique consiste à mettre au jour les relations de pouvoir au cœur des questions sociales, afin de contrer l'aliénation et l'oppression* » (Sauvé et Orllana, 2008).

La société existe par elle-même, et ne se discute pas : la prise en compte des questions sociales peut être seulement d'en perfectionner le mécanisme. « *L'homme vit en société parce qu'il est sociable, c'est -à-dire parce qu'il a besoin de la société de ses semblables. Ce besoin n'est pas plus discutable que la faim ou la soif ; il est seulement d'un ordre plus élevé* » (Marie, 1869). Justement dans nos sociétés post-modernes, la « *question du pourquoi* » nous aide à ordonner ces « *besoins* » (Brundtland, 1997). La visée finale de cette posture est celle de l'émancipation, de l'équité et de la justice sociale.

Conscients des liens étroits entre culture et nature, société et environnement, les acteurs du champ de la théorie critique, dont les pédagogues critiques, « *reconnaissent qu'il n'est plus possible de les traiter séparément, ils abordent désormais les questions sociales dans une perspective écologique ; l'idée de justice s'est élargie à celle d'écojustice* » (Bowers, 2001, Grünewald, 2005). Des questions sociales, comme celles liées à l'énergie ou à l'usage de l'eau ou de la terre, et plus globalement aux périls et catastrophes liés au changement climatique par exemple, sont abordées dans cette perspective de critique sociale.

Elle est à la fois réflexive : « *qui décide quoi ? Pourquoi ? Au nom de qui ? Dans quel but* » et auto-réflexive : « *Qui sommes-nous ? Que voulons-nous faire ? Que pouvons-nous faire ensemble ? Quelle est notre espace de liberté ? Quelles sont nos entraves ? Quels sont nos lieux et nos outils de pouvoir ?* » (Sauvé et Orllana, 2008). Ainsi, la pédagogie critique s'ouvre sur l'idée de transformation, de reconstruction, au-delà de la déconstruction des réalités sociales, de la recherche des causes des diverses formes d'aliénation. Ici, l'idée de critique renvoie à celle de changement, « *un changement de paradigme* » et « *un changement de comportement* » (Pellaud, 2011).

Il convient donc à ce stade de notre réflexion de faire la part des choses entre l'enseignement et l'apprentissage de la pensée critique et la pédagogie critique. La première est axée « *sur la logique, la clarté, la cohérence et la quête de ce qui est vrai à travers la gangue du faux, visent avant tout l'autonomie des gens pour une sorte d'auto-défense intellectuelle, vers une plus grande liberté de pensée et une émancipation individuelle* ». La seconde quant à elle, « *est orientée pour sa part vers des valeurs sociales : justice, équité, démocratie, émancipation collective* » (Sauvé et Orllana, 2012). Par cette dernière, on s'intéresse « *aux systèmes de croyances et d'action qui renforcent certains pouvoirs, de même qu'aux structures de pouvoirs dans une société qui déterminent les voies d'aliénation et d'émancipation* » (Burbules et Berk, 1999).

En pédagogie critique, la signification des réalités est primordiale et celle-ci ne peut pas s'enfermer dans une rationalité pure. La posture critique fait appel à l'engagement de l'être dans l'action, en toute cohérence. Dans son ouvrage *Critical Pedagogy*, Joe L. Kincheloe (2004) offre une synthèse éclairante de ce courant pédagogique. Au fond des choses, il y trouve l'amour. L'amour est à la base d'une éducation préoccupée de justice, d'égalité et de génie créatif. Si la pédagogie critique n'est pas traversée d'une bonne dose de ce que Freire appelle « *l'amour radical* » (Freire, in Sauvé et Orllana, 2012) alors elle ne sera que l'ombre d'elle-même. [...] « *La pédagogie critique vise à accroître notre capacité d'aimer ; elle veut amener le pouvoir de l'amour au centre de nos vies quotidiennes et de nos institutions sociales, et repenser la raison en fonction de notre humanité et dans une perspective d'interconnexions [...]. Un savoir critique cherche à se connecter à la sphère de notre corporéité et de nos émotions, de telle sorte qu'il permette d'appréhender différents niveaux de l'être et de comprendre la souffrance humaine, pour mieux la soulager* ». (Kincheloe, 2004 in Sauvé et Orllana, 2008)). Pour désigner cette dimension de l'éducation préoccupée par l'approche critique des réalités, Nicholas C. Burbules et Rupert Berk (1999) suggèrent une forme de criticité, la « *criticalité* » (criticality). La « *criticalité* » permet « *de dépasser la dichotomie entre « pensée critique » (qui fait généralement référence à une démarche individuelle distancée de l'objet de critique) et « pédagogie critique » (démarche intersubjective et engagée vers l'équité sociale)* » (ibid.). Ainsi ces théoriciens suggèrent « *une criticité alternative qui implique de penser différemment, et en particulier, de situer les réalités dans le contexte idéologique qui les génère ou les supporte* » (ibid.). Dans ce contexte, Sauvé et Orllano nous invitent « *avant tout de prendre une distance critique à l'égard de nos propres cadres de référence, trop rarement décodés, fussent-ils d'inspiration néolibérale ou marxiste ou autre* » (Sauvé et Orllano, 2008). Burbules et Berk (1999) quant à eux, nous « *invitent à saisir les distorsions et représentations biaisées des idéologies, à commencer par celles qui nous infiltrent* » (Burbules et Berk, 1999). Enfin, Kellner (1978) nous « *propose d'examiner le cycle de vie des idéologies* » (par exemple, développement puis développement durable ou soutenable).

Toutefois, l'exercice de la criticité peut être entravé par un système social (scolaire, politique, économique), comme par exemple les difficiles relations entre l'éducation

relative à l'environnement et le développement durable ou au contraire, le favoriser et le valoriser, ici l'exemple le plus concret est la parfaite cohabitation entre le développement durable et l'éducation au développement durable (EDD). A ce niveau, il existe un fort lien entre l'exercice de la criticité et celui du pouvoir. Dans ce contexte, Sauvé et Orllana soutiennent que la dimension critique de l'éducation relative à l'environnement (sa criticité) « *se manifeste sous forme de pensée critique ou de critique sociale ou d'une intégration ou du dépassement des deux, se retrouve donc étroitement liée à la dimension politique de celle-ci. Les rapports de pouvoir en ce qui concerne les choses publiques dont l'éducation et l'environnement, se jouent dans un espace politique où l'adoption d'une posture critique est de nature à débusquer et prévenir l'enlisement partisan* » (Sauvé et Orllana, 2012). Ainsi, le développement d'une compétence critique est indissociable du développement d'une compétence  thique. En effet, dans une perspective de transformation sociale, les valeurs d'équité, de justice et d'éco-justice ne peuvent être envisagées en dehors de la sphère politique. Mieux, en matière d'environnement comme pour toute autre question sociale, les arguments, discours, propositions et projets soumis à l'analyse critique ne peuvent être abordés sans examiner le creuset des valeurs dont ils ont émergé et qu'ils contribuent à renforcer. De là, Sauvé et Orllana (2008) concluent que « *la posture critique elle-même répond à une exigence de responsabilité intellectuelle et sociale (...), la posture critique devient une valeur instrumentale salvatrice : en situation d'oppression, quand tout espace de liberté apparaît étouffé, l'ultime dignité qui nous reste, l'ultime refuge inviolable de notre être authentique, est celui de porter un regard critique sur la situation et sur ses acteurs. Criticité et authenticité vont de pair* ».

Notons, pour terminer sur ce point, que si l'ERE fut une initiative des instances internationales, elle a été enfantée par le concept d'«  co-développement » de Maurice Strong et de Ignacy Sachs au lendemain de la Conférence de Stockholm (1972). En décrétant la mort de l' «  co-développement » et l'émergence du développement durable, l'éducation relative à l'environnement ne pouvait plus survivre. L'absence cruciale de ressources pour mettre en œuvre le Projet ERE a non seulement limité sa portée dans plusieurs pays notamment dans les pays du Sud où l'aide dépendait de l'aide des pays du Nord, mais a fait disparaître le vocable « *environnement* » au profit de celui de « *développement durable* ». Francine Pellaud (2011) nous décrit l'impasse du Projet ERE dans les pays du Nord notamment en France : « *Tout comme « l'éducation à », « pour » « relative à », « en faveur », de l'environnement, continue à poser problème, éducation et développement durable se retrouvent dans la même impasse. Rien qu'en France, les dénominations sont passées d'« Education relative à l'environnement » à « Education à l'environnement en faveur du développement durable » pour finir en « Education au développement durable ».*

Sous le parrainage de l'ONU, la promotion du développement durable s' st ainsi traduite par l'éclosion d'un nouveau projet, celui d'une éducation au développement durable, plus conforme aux aspirations des Nations Unies.

2.2.3 *L'éducation au développement durable, un programme onusien*

Le rôle que doit jouer l'éducation dans le projet « *développement durable* » est souligné dans tous les textes institutionnels tant à l'échelle mondiale qu'à l'échelle locale. Cette vision top down est une option politique de la communauté internationale pour répondre à la crise contemporaine (à la fois environnementale, sociale et économique). Lucie Sauvé nous dépeint le contexte : « *face à la crise de la sécurité actuelle, le développement durable devient l'objet d'un projet éducatif prioritaire promu par les instances de gouvernances tant internationale que nationale* » (2004, p.161).

S'il fallait écrire une histoire de l'éducation au développement durable (EDD), il faudrait remonter à la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED) de 1992, où plus de 178 Etats membres ont défini un cadre d'action pour le chapitre 36 de l'Agenda 21, reconnaissant que l'éducation, la formation et la sensibilisation du public étaient des instruments indispensables pour la transition vers un développement économique durable. Par cette décision, les Etats Nations ont souhaité « *réorienter l'éducation vers un développement durable* » (ONU, 1992 paragraphe 36) en confiant cette lourde tâche à une institution, l'UNESCO (ibid. Chap. 36).

Parallèlement, trois conventions peuvent être considérées comme les actes fondateurs pour l'éducation, la formation et la sensibilisation du public. Il s'agit de la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC), de la Convention des Nations Unies sur la biodiversité biologique (CNUDB) et enfin de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULD). Les principes de l'Agenda 21 (ou Action 21) et les cadres qui le sous-tendent continuent d'orienter la réflexion conceptuelle et la planification de l'éducation au développement durable (EDD), de l'échelon mondial aux actions régionales et initiatives locales de l'Agenda 21. Si les instances internationales telles que l'Organisation des Nations-Unies (ONU), l'Organisation des Nations-Unies pour l'Education, la Science et la Culture (UNESCO), le Fonds des Nations Unies pour l'Enfance (UNICEF), l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE) et l'Organisation Internationale de la Francophonie (OIF), ont joué un rôle important dans la définition des grands principes de l'éducation au développement durable, son immersion dans les systèmes éducatifs nationaux a été initiée par l'UNESCO via la Décennie des Nations-Unies en vue d'un Education au Développement Durable (DNUEDD).

En 2002, l'Assemblée nationale des Nations Unies a proclamé la période 2005-2014, Décennie Education au service du Développement Durable (DEDD) et désigné l'UNESCO, comme agence référente. Par cette Résolution (57/254), l'ONU invitait « *les gouvernements à envisager d'inclure dans les stratégies et plans d'action respectifs en matière d'éducation, les mesures permettant de donner effet à la Décennie* » (ONU, 2002). Et en tant que tête de file de cette initiative mondiale, l'UNESCO (2004) a présenté les

orientations de cette Décennie dédiée à l'éducation au développement durable : « *il importe dans l'intérêt des sociétés actuelles et futures de repenser et de réviser l'enseignement de l'école maternelle jusqu'à l'université pour y intégrer davantage des principes de connaissances, de compétences de modes de pensée et de valeurs à l'appui de la durabilité dans chacun des trois grands domaines : social, environnemental, et économique. Il conviendrait, pour ce faire, d'adopter une approche holistique et interdisciplinaire* » (UNESCO, 2004, p. 34).

Un programme d'application international pour la Décennie fût rédigé après une consultation de tous les partenaires du système des Nations-Unies. En 2005, un Plan international de mise en œuvre de la DUEDD énonça les finalités de l'EDD : « *L'éducation au développement durable prépare des gens des horizons les plus divers à prévoir, faire face et trouver des solutions aux questions qui menacent la durabilité de notre planète* » (UNESCO, 2005, p. 7) et définit un cadre permettant aux partenaires d'apporter leur contribution² à la Décennie.

Tableau 1 : Les axes et les stratégies de l'EDD selon l'UNESCO

AXES DE L'EDD	STRATEGIES EN FAVEUR DE L'EDD
1. Améliorer l'accès à une éducation de base de qualité	1. Elaboration d'une vision commune et mobilisation
2. Réorienter les programmes d'éducation pour intégrer la durabilité	2. Consultation et maîtrise
3. Mieux sensibiliser le public à la notion de durabilité	3. Partenariats et réseaux
4. Fournir une formation pour faire progresser la durabilité dans tous les secteurs	4. Renforcement des capacités et formation
	5. Recherche et innovation
	6. Utilisation des Technologies de l'information et de la communication(TIC)
	7. Suivi et évaluation

Source : UNESCO (2005)

Cette histoire institutionnelle de la mise en place de l'éducation au développement durable resterait cependant inachevée si nous n'évoquions pas les débats et les représentations de la durabilité au sein des Nations-Unies et les appels à une éducation à la durabilité.

² Au-delà de l'engagement de tous les Etats membres de l'UNESCO, des Etats comme « *le Japon, la Suède, l'Allemagne et le Danemark ont défendu et appuyé cette initiative au travers de fonds extrabudgétaires à l'UNESCO* » (UNESCO, 2013, p.13).

2.3 Vers une éducation à la durabilité ?

A la suite de la parution du rapport *Notre Avenir pour Tous* (1987) de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement (plus connue sous le nom de Commission Brundtland) et des préconisations issues de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED), qui s'est tenue à Rio de Janeiro en juin 1992, la notion de développement durable est entrée dans les plans et les stratégies des Etats Nations au point de constituer le principe de base de l'éducation au développement durable. Cette trajectoire mérite que l'on s'y attarde car elle permet de comprendre les mouvances d'un concept très controversé (en 1992, Jickling émet déjà des doutes sur la cohérence logique de la juxtaposition des termes durable et développement) et les cadres théoriques qui s'y rattachent. Son analyse doit également nous permettre de clarifier les relations sémantiques qui existent entre l'éducation et la durabilité, afin de cerner les fondements d'une éducation à la durabilité (Sterling, 2003).

Dans les années 2000, Di Giulio, (2004) et Kaufmann-Hayoz, (2006) ont précisé les contextes dans lesquels les termes durabilité et durable pouvaient être mobilisés.

(1) « *Dans le langage courant, ces mots sont utilisés dans le sens de "permanent", "qui dure" (par ex. : assimiler une matière de façon durable) ».*

(2) « *Comme terme de sylvoiculture, la "durabilité" désigne initialement un principe d'exploitation selon lequel il faut veiller à ne pas couper davantage de bois qu'il n'en pousse dans le même laps de temps. Cette acception s'applique actuellement aussi à l'exploitation d'autres ressources naturelles et est reprise également pour les écosystèmes ; le terme signifie alors que l'exploitation d'un certain écosystème ou d'une certaine ressource doit s'orienter de façon à garantir une utilisation sur la durée aussi bonne que possible (pour les générations futures) ».*

(3) « *Dans un sens écologique, "durable" signifie que l'exploitation de l'environnement naturel doit, dans l'ensemble, s'effectuer de façon à conserver, sur la durée, les ressources naturelles comme base matérielle du développement humain ; le terme "développement durable" est alors compris comme un développement qui veille à ce que les ressources naturelles soient conservées sur la durée (pour les générations futures) ».*

(4) « *Les Nations Unies ont développé un autre contexte d'utilisation et donc une nouvelle compréhension terminologique, qui se distingue des conceptions précédentes. L'idée de la durabilité doit constituer une ligne de conduite prioritaire pour le développement de la société humaine, et permettre une approche intégrée de l'environnement et du développement (tant social qu'économique). Elle doit se référer à l'ensemble de l'humanité et créer une perspective qui englobe non seulement les êtres humains qui sont actuellement vivants, mais aussi les générations futures ».*

D'une certaine manière, ces différents contextes permettent de comprendre la position de la Commission Brundtland (1987) et le cadre conceptuel de la définition du développement durable : « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* » (Commission Brundtland, 1987, p. 51). Ils suggèrent également que l'idée de durabilité incarne le but du développement de la société à l'échelle mondiale. Ainsi, comme le souligne Di Giulio, le développement durable « *équivalait à un développement qui vise à parvenir à cet état et qui en assure la continuité sur la durée, une fois cet objectif réalisé* » (Di Giulio, 2004, p. 308). Une idée bien présente dans le rapport Brundtland (« *le développement durable ne consiste pas en un "état fixe de l'harmonie, mais plutôt un processus d'évolution* », CMED, 1987) mais également dans les rapports de l'UNESCO, « *le concept de développement durable n'est pas une notion simple, ce document le montre bien ; il n'y a pas de carte qui indique la route à suivre* » (EPD-97/CONF.401/CLD.1, 1997, Préface).

Ainsi, la durabilité ne décrit pas un état d'harmonie qui empêcherait toute autre évolution. C'est un but vers lequel il faut tendre en y travaillant constamment. De fait, le chemin à parcourir pour tendre vers ce but doit être constamment redéfini. L'objectif est donc double : il s'agit d'une part, de faire participer tous les groupes d'intérêt, et d'autre part, de parvenir à un consensus sur l'aménagement concret du développement souhaitable à l'échelle de l'humanité : *le développement durable constitue alors une idée normative, qui repose dans la compréhension des Nations Unies sur une position anthropocentrique. Les autres êtres vivants, c'est-à-dire la nature dans son ensemble, n'ont de valeur que dans la mesure où ils revêtent une utilité pour les êtres humains* (Ott, 2001 ; Döring & Ott, 2001 ; Conrad, 2000 ; Steurer, 2002 ou Neumayer, 1999).

De cette position normative, nous tirons trois enseignements :

1. L'idée politique part de plus du principe que les problèmes économiques, sociaux, culturels et écologiques ne sont pas indépendants les uns des autres et que, de ce fait, la seule approche appropriée est une vision globale des problématiques, proposant des résolutions de problèmes qui soient adaptées à ce phénomène.
2. Du point de vue social, on vise une égalité des chances et des droits pour tous, ainsi que la possibilité de mener une vie épanouie. Dans la dimension économique, il s'agit de garantir le bien-être pour tous et de l'accroître en vue de satisfaire les besoins existants.
3. Le but prioritaire poursuivi dans la dimension écologique consiste dans le fait de conserver la possibilité que la vie se perpétue sur la terre et de préserver les conditions vitales essentielles à l'être humain. Ces trois dimensions sont considérées comme étant de même valeur.

En résumé, les Nations-Unies ont exprimé une position claire à travers l'idée de développement durable, elles visent « *une soutenabilité de nature écologique,*

socioculturelle et économique, qui se manifeste dans le fait que les conditions vitales naturelles, immatérielles et matérielles sont garanties sur le long terme » (CI-Rio, 1992). L'institution spécialisée pour la promotion de l'éducation, de la culture et de la science dans le monde est bien consciente de cet état de fait, qu'elle mentionne dans un de ses documents. La force du développement durable « tient au fait qu'il reconnaît franchement l'interdépendance des besoins humains et des exigences de l'environnement. Ce faisant, il rejette la poursuite obsessionnelle d'un seul objectif au détriment des autres. La quête irréfléchie du « développement », par exemple, ne peut être acceptée quand elle a pour prix des dommages irréparables causés à l'environnement. Mais il n'est pas question non plus d'assurer la protection de l'environnement au prix du maintien dans la pauvreté de la moitié de l'humanité. (...) Il faut imaginer une relation nouvelle et viable dans la durée entre l'humanité et son habitat ; une relation qui place l'humanité au centre de la scène, sans oublier pour autant ce qui se passe sur les « côtés » (...) » (EPD97/CONF.401/CLD.1, 1997, paragraphe 37).

Le changement de paradigme est sans ambiguïté, dans son rapport, la CMED a consciemment renoncé à dresser un nouveau bilan de la situation mondiale ; elle oppose expressément aux pronostics sombres sur l'avenir et aux tableaux esquissés par l'ouvrage « *Limits to growth* » (Meadows et al. 1972), une image optimiste d'un avenir qui semble accessible moyennant certaines transformations sociétales. Selon elle, l'humanité est tout à fait en mesure de façonner un avenir caractérisé par plus de bien-être, plus de justice sociale et plus de sécurité (Commission Brundtland, 1987). La CMED ne nie aucunement les problèmes liés au développement et à l'environnement, c'est d'ailleurs la base de son rapport. Toutefois, ce qui change, c'est la perspective dans laquelle les recommandations d'action sont élaborées : « *les recommandations ne sont pas formulées sur la base d'un scénario catastrophe, mais doivent plutôt s'orienter d'après la vision d'un avenir juste* » (ibid.). Le développement durable constitue donc une idée régulatrice au sens kantien du terme. En effet, les concepts de liberté, de démocratie et de justice, qui ne sont pas définis avec une grande précision, mais qui néanmoins jouent un rôle central, servent d'indicateurs pour agir et doivent être redéfinis par chaque génération. « *Il s'agit donc d'une valeur d'orientation pour les processus de recherche et d'apprentissage humains* » (Minsch et al, 1996 ; Ott, 2001 ou Kübler et al., 2001). L'idée de la durabilité doit donc être concrétisée sous la forme d'objectifs opérationnalisés. L'un de ces objectifs, et donc aussi l'une des fonctions de l'éducation dans le contexte du développement durable, se réfère à l'accès à l'éducation. Ainsi la durabilité selon l'acceptation onusienne confère à l'éducation trois principales fonctions.

- La première fonction de la durabilité positionne l'éducation comme un objectif concret dans la vision de la durabilité. L'éducation est désignée dans de nombreux documents des Nations Unies comme étant « *un besoin humain de base et donc comme faisant partie, dans la compréhension des Nations Unies, d'une bonne qualité de vie pour l'être humain* » (la Déclaration universelle des droits de l'homme du 10 décembre 1948, le

Pacte international du 16 décembre 1966 relatif aux droits économiques, sociaux et culturels, le Pacte international du 16 décembre 1966 relatif aux droits civils et politiques). Dès lors, il importe dans le cadre d'un développement durable de veiller à ce que tous les êtres humains, qu'ils soient vivants actuellement ou fassent partie des générations futures, puissent exercer leur droit à l'éducation (à tous les degrés). Ainsi donc, l'éducation constitue, de ce point de vue, l'un des buts (sociaux) concrétisés d'un développement durable.

- La deuxième fonction de la durabilité relie l'éducation à la transmission de compétences. Dans le contexte du développement durable, l'éducation sert en premier lieu à la transmission de compétences, c'est-à-dire une transmission de techniques culturelles nécessaires au développement durable. Concrètement, il s'agit de faire une distinction précise entre les différentes compétences à transmettre. La Commission sur le développement durable (CDD) des Nations Unies associe ces techniques culturelles à la lecture et l'écriture, ces dernières « *constituent une condition nécessaire pour que les êtres humains puissent participer aux processus de décision survenant dans le cadre d'un développement durable* » (CDD, 1998). De son côté, le Secrétariat général des Nations Unies les désigne sous le nom de « *conditions sine qua non* » (E/CN.17/1998/6/Add. 2, 1998), puisque l'éducation de base prépare les êtres humains « *à transformer la société pour l'avenir* » (ibid.). De ce point de vue, l'éducation est une condition indispensable pour que l'une des exigences liées à l'idée de la durabilité, à savoir la nécessité de la participation, puisse être réalisée, même si elle n'est pas suffisante à elle seule.

Cette deuxième fonction de la durabilité associe également l'éducation à une mesure servant à la réalisation de buts « concrétisés » du développement durable. Ces buts, comme par exemple celui de l'exploitation optimale des ressources naturelles, ne peuvent être réalisés que si les personnes qui les mettent en œuvre disposent des connaissances et des aptitudes nécessaires. Les Nations Unies soutiennent en ce sens que l'éducation « *sert donc à acquérir des capacités nécessaires pour atteindre dans une société les buts d'un développement durable, tels que ceux fixés dans l'Agenda 21. De même, par rapport à certains buts sociaux de l'Agenda 21, l'éducation est aussi considérée comme un élément important en vue de leur réalisation (par ex. garantir une occupation professionnelle et un revenu). De ce point de vue, l'éducation constitue en premier lieu un instrument, qui peut et doit contribuer à réaliser des buts concrétisés d'un développement durable. Les aptitudes à transmettre dans cette fonction se déduisent à partir des objectifs et des mesures concrétisés d'un développement durable* » (CEP/AC.13/2004/8, 2004).

Dans le cadre de cette transmission de compétences spécifiques au développement durable, le Secrétariat général des Nations formule dans ce même document certains « *buts en matière d'éducation, selon lesquels l'éducation doit rendre les êtres humains capables de travailler avec les exigences et les défis spécifiques à l'idée de la durabilité* » (ibid.). Ces buts visent les points suivants : « *l'éducation doit aider la personne à réfléchir de façon critique à sa place dans le monde et à la signification d'un développement durable pour elle-même, de*

même que pour la société dont elle fait partie ; l'éducation doit rendre capable de concevoir et d'évaluer des visions concernant des voies de développement et des projets de vie. Elle doit transmettre la compétence de débattre et de justifier des décisions portant sur des esquisses de l'avenir, de concevoir des plans pour réaliser des visions souhaitées et de jouer un rôle actif et constructif dans les processus survenant dans la société » (ibid.). De ce fait, l'éducation constitue une condition préalable suffisante, qui doit rendre les êtres humains capables de contribuer à faire avancer les processus spécifiques nécessaires pour la concrétisation et l'application de l'idée de la durabilité, et ainsi de remplir les exigences qui résultent de cette idée même.

- La troisième fonction de la durabilité positionne l'éducation comme une institution (registre politique) devant mettre en œuvre les objectifs du développement durable. Outre les buts se rapportant expressément au secteur de la formation, l'Agenda 21 contient toute une série d'objectifs qui ne se réfèrent pas spécifiquement à certains secteurs ou institutions, mais qui concernent plutôt la société dans son ensemble, avec toutes ses institutions. Nous y trouvons par exemple « une administration et des prises de décision efficaces, transparentes et évaluables, ou encore une utilisation rationnelle des ressources naturelles ». Il ressort donc de ce document que « le secteur politique de l'éducation ainsi que les écoles en tant qu'institutions sont appelés, tout comme tous les autres secteurs et l'ensemble des institutions de la société, à contribuer à favoriser un développement durable, en s'efforçant de réaliser des objectifs de ce type » (CEP/AC.13/2004/8/Add.25, 2004). De ce point de vue, l'éducation fait donc partie intégrante de la société humaine et, en tant que telle, elle doit évoluer pour permettre la mise en œuvre du développement durable.

Il ressort de cette présentation que dans la conception onusienne de la durabilité, c'est bien l'idée régulatrice d'un développement durable qui constitue la base d'une éducation au développement durable : « Dans la compréhension de la durabilité des Nations Unies, il est primordial de parvenir à un consensus politique, et si possible aussi de société, sur les buts plus concrets, même si ce consensus peut n'être que provisoire à chaque fois. Les buts opérationnalisés doivent permettre l'action de la dynamique souhaitée, qui soutient l'idée de durabilité. C'est la raison pour laquelle il s'agit de rendre des êtres humains capables de participer, conjointement avec d'autres, à un développement durable, d'élaborer des buts pratiques qui tiennent compte des dimensions socioculturelle, écologique et économique, mais également de se positionner de façon critique par rapport à cette idée même » (Bertschy et al, 2004). C'est à partir de ce moment, qu'il est possible de définir ce que renferme le projet éducatif, la place de l'apprentissage, les objectifs, les compétences attendues et les contenus d'une éducation à la durabilité.

2.3.1 Education et apprentissage au prisme de la durabilité

Si l'éducation vise la mise en œuvre de moyens propres à assurer la formation et le développement d'un être humain tout au long de sa vie, elle reste fondée sur « quatre

piliers : apprendre à connaître, apprendre à faire, apprendre à vivre ensemble, apprendre à être » (Delors, 1996). Notre acquisition de compétences, nos apprentissages et nos expériences se relayent et s'imbriquent, de manière permanente durant tout le processus. Ce qui fait dire à Durdel (2002), que « toute éducation développe premièrement les compétences permettant à une personne de se situer dans le monde de manière autonome et de prendre des responsabilités dans la société. Deuxièmement, l'éducation signifie une lutte pour dégager l'évidence dans un monde de plus en plus complexe et touffu. Troisièmement, l'éducation vise le maintien et le développement d'une conscience critique sans la perte d'un sentiment positif, ni la disposition à l'action ».

Dans la compréhension onusienne du développement durable, « certains axes de politiques sociales apparaissent sous forme de visions de société comme c'est le cas ici pour l'idée de durabilité » (Bertschy et al, 2004). Toutefois ceci nécessite certains préalables : « pour que de telles finalités donnent lieu à des visions fécondes du point de vue pédagogique, elles doivent être travaillées sous certaines conditions » (Oelkers, 1990).

Oelkers nous expose ici ces conditions :

1 « l'éducation touche à l'espérance, et donc à des sentiments forts et existentiels portés sur l'avenir. Une vision pédagogique doit donc assurer de l'optimisme en dépit des mouvances sociétales opposées. Elle doit montrer que tout ne s'en va pas à vau-l'eau et, parallèlement à cela, que tout ne se développe pas toujours dans la direction souhaitée. Elle ne peut pas réellement donner une orientation pour l'avenir, mais doit pourtant prétendre pouvoir le faire ». (Ibid.)

2 « La réalité est plurielle et différenciée dans sa systémique. Lorsqu'une vision pédagogique propose une unité, elle perd sa crédibilité et devient dogmatique. La "pédagogisation" d'une finalité doit de ce fait prévoir un aménagement ouvert de l'avenir. La mise en œuvre de l'idée politique ne doit pas être mal comprise, comme si elle constituait une éducation vers un comportement correct » (ibid.). Claussen soutient aussi cette idée : « pour savoir ce qui sera correct à l'avenir, on ne dispose ni d'un consensus de société, ni de prévisions sûres dans le domaine des sciences sociales » (Claussen, 1996).

3 « La pédagogisation d'une finalité relevant de la politique sociale ne doit pas constituer sa seule mesure de transposition. La transmission de compétences correspondantes peut y contribuer d'une certaine manière, en particulier en présence d'un milieu social favorable, mais la pédagogie ne peut et ne doit pas anticiper sur le processus et imposer ainsi des décisions politiques » (Oelkers, 2004).

D'après cette analyse, l'éducation et le développement durable ne se contredisent pas dans leurs prémisses, l'idée de durabilité recèle même un potentiel pour étayer et stimuler des processus d'apprentissage. En effet, lorsqu'il s'agit de décrire des objectifs, des contenus et des principes de transmission en matière d'éducation au développement durable, le processus d'apprentissage constitue un moment fort. Selon Jonnaert (1999), l'apprentissage au sens large « est un processus inscrit dans une

perspective temporelle longue, quasi continu, rarement achevé, pouvant sans cesse être réactivé, pouvant être ou non amorcé par les apprentissages scolaires, et d'adaptation des connaissances du sujet aux représentations qu'il se fait des exigences des situations auxquelles il est confronté ». Giordan (1998) va plus loin en affirmant que : « *Apprendre n'est pas un processus scolaire uniquement, auquel se soumettent les élèves afin d'acquérir un savoir défini et prescrit* », c'est également « *une dynamique personnelle, ou sociale, d'élaboration et de mobilisation* ».

Au travers des progrès des théories cognitives (Künzli, 2006), la notion d'apprentissage s'est muée en un processus actif, d'autodétermination, constructif, en situation et en interaction sociale. Certains principes de ce processus d'apprentissage peuvent être exposés.

- « *Apprendre est un processus actif : c'est une suite d'actions intériorisées et leurs interactions sur et avec les structures cognitives de l'apprenant* » (Piaget, in Giordan, 1998). Ici toutes les interactions entre les influences réciproques (intérieures et extérieures) sont guidées par l'homme. « *L'action stimule puissamment l'intérêt de l'élève et le place dans une situation telle, qu'en retour, il éprouve le désir d'exécuter une tâche* » (Bertschy et al, 2007). Par conséquent, « *l'action doit être fortement contextualisée et couplée à d'autres relations (d'expression, d'écoute, d'échange) propres à l'apprentissage et passer par des phases de confrontation* » (Giordan, 1998).

- « *Apprendre est un processus d'autodétermination : l'apprenant décide ce qu'il apprend, car c'est un processus qui le concerne et qui se déroule en lui-même en tenant compte des influences externes. Ce sont ses propres structures existantes qui déroulent les processus d'appropriation, soit l'assimilation et l'accommodation* » (Künzli, 2006). Ces structures se forment par confrontation active avec l'environnement et ces structures ne présentent aucun vide qui puisse être rempli de l'extérieur.

- « *Apprendre est un processus constructif : l'apprentissage s'élabore sur les structures cognitives existantes, aux contenus différents et en échange avec l'environnement social. A partir de là, de nouvelles structures se construisent, voire s'intègrent. La qualité de l'apprentissage est déterminée par les conceptions et connaissances préalables qu'il faut prendre en compte pour construire les nouvelles structures cognitives des apprenants* » (Bertschy et al, 2007).

« *Apprendre en situation : la situation d'apprentissage est conçue de telle manière que les connaissances de l'apprenant puissent entrer en interaction avec les savoirs. Cette dimension interactive de l'apprentissage est définie comme une interaction entre savoirs et connaissances* » (Jonnaert, 1999). Ici, le travail réflexif de l'apprenant sur ses propres connaissances est concrétisé en interaction avec le savoir mis en situation.

En somme, les principes d'apprentissage décrits ci-dessus doivent déterminer nos choix didactiques en matière d'éducation au développement durable. Toutefois ces critères méritent une ouverture, c'est-à-dire un élargissement aux démarches

constructives proposées par les enseignants et qui permettent à l'apprenant de s'approprier des savoirs. Dans cette perspective constructiviste, « les connaissances de l'apprenant priment sur le savoir à apprendre » (Jonnaert, 1999). Par conséquent, « le rôle de l'enseignant consiste à créer des situations qui favorisent justement ces apprentissages actifs, autodéterminés, constructifs, sociaux et en situation » (Künzli, 2006). Cette interaction permet : la prise en compte des conceptions des élèves, la création consciente du processus de transfert (« des compétences pour d'autres contextes », Devalay 1992), la facilitation d'un processus autonome et responsable, l'usage optimale « des formes directes et indirectes d'enseignement » par les enseignants (Meyer, 2004), la prise en compte de la subjectivité et l'adaptation de l'évaluation aux objectifs du contexte d'apprentissage (Pike et Selby, 1999).

2.3.2 Objectifs, contenus et principes spécifiques d'une EDD ?

Comme toute éducation, l'EDD doit contribuer à réaliser les objectifs de formation prioritaires. Dans les sociétés modernes, la formation est comprise comme étant une nécessité se prolongeant tout au long de la vie. C'est alors un défi qui se pose sans cesse à l'être humain (apprenant), lequel doit en effet constamment se positionner par rapport aux contenus d'apprentissage à l'école et par rapport au monde dans son ensemble. Selon cette compréhension, Durdel (2002) soutient que l'EDD contribue à rendre un individu capable de : « (1) se situer dans le monde de manière autonome et d'assumer des responsabilités dans la société, (2) lutter pour dégager l'évidence dans un monde de plus en plus complexe et touffu, ainsi que de (3) disposer d'une conscience critique, sans perdre un sentiment positif, et d'une disposition à l'action ». Ces caractéristiques interdépendantes s'acquièrent par l'effort et sous la responsabilité de l'apprenant.

Partir d'une représentation de la durabilité et lui assigner des objectifs généraux permet de reformuler l'EDD via une démarche active : « Les élèves sont aptes et prêts à participer à des processus sociaux permettant de déterminer et de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour tendre vers un développement durable. Ils ont conscience de la signification du développement durable et saisissent le sens de la coresponsabilité de tous dans l'évolution de la société aux niveaux socioculturel, économique et écologique ; ils connaissent les effets combinés de ces trois dimensions » (Bertschy et al, 2007). Cette démarche a toutefois besoin d'intégrer des compétences spécifiques à une EDD.

Les compétences clés formulées dans le cadre de l'étude de l'OCDE intitulée « La définition et la sélection des compétences clés » (DeSeCo - DEELSA, 2002) constituent une tentative de concrétiser ces objectifs de formation prioritaires par la description de compétences devant être acquises. « Ces compétences clés sont classées dans trois domaines de compétences distincts : "Agir de façon autonome" (Acting autonomously), "Se servir de médias de manière interactive" (Using tools interactively) et "Interagir dans des groupes hétérogènes" (Functioning in socially heterogeneous groups) » (Bertschy et al, 2007).

Tableau 2 : les compétences clés

Domaine de compétences	1 les élèves sont capables de juger de manière critique l'idée de durabilité en tant que but souhaitable de l'évolution de la société et d'évaluer d'autres conceptions de son développement (Pike et Selby, 1999)
Agir de façon autonome	2 les élèves sont capables d'évaluer leur propre vision des autres ainsi que les tensions actuelles du développement durable (Pike et Selby, 1999)
	3 Les élèves sont capables de prendre des décisions étayées qui répondent aux exigences du développement durable dans des conditions d'incertitude, de contradiction et de connaissance partielle (Sheumpflug et Scrôck, 2000).
Domaine de compétences	4. Les élèves sont capables de s'informer de manière ciblée sur le domaine du développement durable et d'utiliser efficacement les informations obtenues pour prendre des décisions allant dans le sens du développement durable (Pike et Selby, Sheumpflug et Scrôck,2000)
Se servir d'instruments et de médias de manière interactive	
Domaine de compétences	5.Les élèves sont capables de développer avec d'autres des visions en relation avec le développement durable et de concevoir les étapes de transposition à leur réalisationl (Pike et Selby, 1999, Scheumpflug et Schrock,2000, Niekke,2000, De Bono, 1994)
Agir dans des groupes	6.Les élèves sont en mesure de débattre avec d'autres de décisions sur le développement durable (Prote, 2000)

Source : Bertschy et al. (2007)

Le choix des contenus d'enseignement pour l'EDD ainsi que l'orientation de l'enseignement doivent de plus satisfaire à une série de critères, qui résultent d'une part de l'idée régulatrice du développement durable et, d'autre part, de principes didactiques spécifiques à l'EDD.

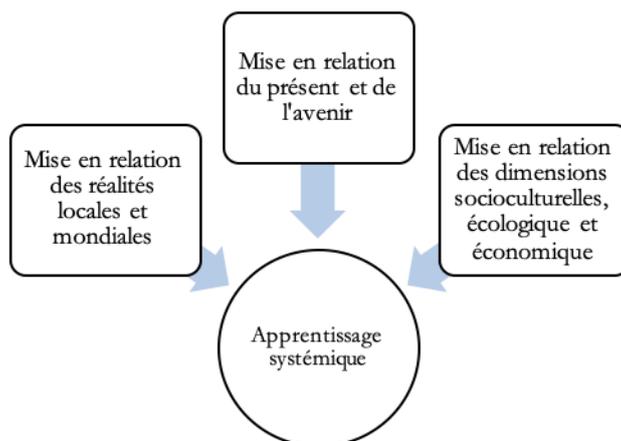
L'idée régulatrice de la durabilité constitue, un contenu d'enseignement indispensable. Dans ce sens, en remplissant sa fonction de cadre, elle permet l'application de la réflexion à d'autres « *objets concrets* » (Kyburz-Graber et al, 2000). D'après Pike et Selby (1999), « *cette thématization implicite de l'idée d'un développement durable dans chaque unité d'enseignement réalisée dans le cadre d'une éducation au développement durable est comprise d'après le modèle de l'enseignement récurrent de Bruner, qui prévoit que [...] les fondements de toute branche peuvent être enseignés à tout être humain à tout âge sous une certaine forme* ». Il convient alors de considérer les différentes

séquences d'enseignement comme un mouvement en spirale qui s'appuie les unes sur les autres et que les principes de base doivent être à nouveau thématifiés à chaque niveau de progression.

Les principes didactiques spécifiques s'orientent selon des visions. Pour la planification et la réalisation de l'enseignement d'une éducation au développement durable, cette orientation projette un avenir souhaité, la durabilité de notre société. La vision sert d'une part comme « *instrument de planification, qui permet de déterminer les contenus et l'organisation des contenus ainsi que le déroulement de l'enseignement : quelle différence y-a-t-il entre la vision et les conditions qui prévalent actuellement ? Comment cette vision pourrait-elle être réalisée ; quelles sont les connaissances et les aptitudes nécessaires à cet effet ? A quel moment de l'enseignement met-on le présent en avant, et à quel moment met-on l'accent sur l'avenir ? D'autre part, la vision sert aussi de point de repère et d'orientation pour les décisions à prendre dans le cadre de l'enseignement même et influence par exemple l'accompagnement des projets. La question fondamentale n'est donc plus d'une manière générale : "Quels sont nos problèmes actuellement et comment pouvons-nous les résoudre ?", mais : "Quel avenir souhaitons-nous dans un domaine donné ; quel avenir est-il possible ; comment pouvons-nous atteindre l'avenir souhaité ?* » (Pike & Selby, 1999). Dans ce cas, nous assistons à un changement de perspective de l'enseignement : on ne cherche pas l'accès aux problèmes, mais l'accès aux perspectives. Cela signifie que les apprenants « *puissent concevoir des visions de l'avenir et se positionner par rapport à ces dernières, il est indispensable qu'ils aient l'occasion de s'approprier une réflexion réactive (critique, analytique) et également proactive (créative, constructive)* » (de Bono, 1994).

Apprentissage systémique : les deux aspects fondamentaux de ce principe didactique sont d'une part, que « *l'apprentissage doit s'inscrire dans différentes perspectives ; cela implique que plusieurs accès différents doivent être donnés à un seul et même phénomène dans le cadre de l'enseignement dispensé* » (Bertschy et al, 2007) et d'autre part, que « *ces perspectives doivent être reliées les unes aux autres. Le déroulement de l'enseignement doit donc amener les apprenants à adopter une approche systémique et leur donner des aides dans ce sens* » (ibid.).

Figure 1 : les trois aspects de l'apprentissage systémique pour une éducation au développement durable



Source : adapté d'après Bertschy et Künzli, (2004)

Orientation vers l'action et la réflexion : Les apprenants acquièrent des connaissances et des aptitudes approfondies par « *un positionnement actif, dans le sens de rendre possibles des représentations inactives* » (Bruner, 1974), mais aussi par « *une action réfléchie* » (Aebli, 1981) autour du contenu d'enseignement et finalement « *une réflexion sur les expériences réalisées* » (Bertschy et al, 2007). Dans ce contexte, La réflexion sur les expériences engrangées joue un rôle extrêmement important, car « *les conclusions ne s'imposent pas automatiquement par l'action* » (Scholz, 2003). Les expériences concrètes (par exemple dans des formes d'apprentissage coopératives) peuvent favoriser le travail de réflexion ; elles en sont pour ainsi dire la base et peuvent ainsi conduire à de nouvelles prises de conscience. « *Les phases d'action et celles de réflexion sont donc centrales, et il est important de veiller à en assurer une alternance adaptée* » (Scheunpflug et Schröck, 2000). Pour le travail de réflexion en classe, il existe de nombreuses méthodes, qui ont été testées et dont l'efficacité a été parfois vérifiée empiriquement (cf. notamment Guldemann, 1996). Citons à titre d'exemple le journal d'apprentissage, la méthode du feed-back, le modèle de la réflexion à haute voix, des partenariats d'apprentissage institués et la conférence de classe (Beeler, 1999).

2.3.2 Les principes didactiques généraux d'une EDD

Cela étant, l'EDD ne peut pas (et ne doit pas) se limiter à des principes didactiques spécifiques. Elle doit également mobiliser des principes didactiques généraux.

Apprendre par situation : Généralement, l'enseignement part d'une thématique ou d'une problématique pertinente qui suscite l'intérêt des apprenants et facilite ainsi leur apprentissage. Par « *problème* » nous entendons ici, « *toute tâche non remplie, qui peut résulter d'une lacune de connaissances ou de plans d'action incomplets, de contradictions dans les affirmations sur certains phénomènes ou sur des plans d'action, ou encore d'une complexification inutile de vision de la réalité ou des plans d'action* » (Aebli, 1983). En d'autres termes, le problème se réfère à une forme d'arrangement des processus

d'enseignement, qui doivent motiver les élèves à apprendre. D'après cette compréhension, « *problème* » ne renvoie pas au « *problème de société* » comme par exemple le chômage des jeunes ou la coupure d'électricité dans nos villes (ibid.). Dans cette posture, la problématique peut donner lieu à des expériences d'apprentissage importantes : « *les apprenants doivent par exemple activer leurs connaissances, formuler des hypothèses et les vérifier, organiser leur apprentissage de façon autonome et gérer les échecs* » (Bertschy et al, 2007). Il s'agit dans ce principe didactique de développer une connaissance subjective et intersubjective, de "*découvrir par soi-même*" (ibid.).

Accessibilité : Fondamentalement, la question du principe didactique de l'accessibilité est la suivante : « *comment rendre accessible aux apprenants un objet d'enseignement ? Autrement dit, quels sont les cas spéciaux, les phénomènes, les situations et les expériences qui permettent aux enfants de comprendre un objet d'enseignement donné ou qui, au contraire, le rendent difficile à saisir* » (Klafki, 1962 d'après Jank et Meyer, 1996). Le thème doit être une passerelle qui permet à la fois « *de créer un accès au présent des apprenants et, en même temps, à leur avenir* » (de Haan et Harenberg, 1999). L'éducation au développement durable doit permettre d'engranger des expériences et, sur la base de l'horizon expérimental et les attitudes des élèves, leur donnant accès non seulement à l'avenir mais aussi à ce qui est complexe et abstrait. « *Faire intervenir des expériences implique de les rendre accessibles et communicables, afin de pouvoir les utiliser pour appréhender l'objet en question* » (Kyburz-Graber et al. 2000). Donc sur la base de l'horizon expérimental des apprenants, il est judicieux de créer un lien avec la société et avec l'avenir. A cet égard, « *il est primordial de ne pas laisser ces considérations se baser sur une notion naïve de l'expérience en partant, par exemple, du principe que les expériences n'interviennent que lorsqu'il y a contact direct, corporel avec un objet* » (Scholz, 2003, p. 43).

La visée participative : La participation désigne « *une forme d'activité d'acteurs au sein d'une pratique de vie commune à laquelle les acteurs appartiennent* » (Böhme et Kramer, 2001). Les éléments constitutifs de la participation sont d'une part « *le fait d'exercer une influence sur les décisions prises* », et d'autre part, « *le fait d'assumer les conséquences de ces décisions, mais aussi l'interaction et l'échange d'informations entre personnes impliquées* » (Bättig, 2002). Ainsi, la visée participative en tant que principe didactique se rapporte à deux niveaux : (1) la classe en tant qu'ensemble, et destinataire de cette visée et (2) la personnalité individuelle de chaque enfant dans le domaine le concernant personnellement à participer à la prise de décisions. Nous pouvons conclure que dans l'idéal, l'enseignement doit favoriser les aptitudes à participer et les expériences de participation. La participation des élèves peut être plus ou moins forte et doit se rapporter à différents domaines « *par exemple sur la question de ce qui est appris, comment c'est appris, avec qui c'est appris et combien de temps dure l'apprentissage* » (Prote, 2000).

Combinaison entre apprentissages, dimensions sociale, personnelle, méthodologique et contenu : Ce principe « *décrit le fait que les objectifs pédagogiques dans les domaines social, personnel ou méthodologique sont liés aux objectifs de contenu ; ils doivent de ce fait être acquis*

au travers de certains contenus, et non au moyen de séquences d'enseignement isolées » (Stern et Möller, 2004). La capacité à participer de manière constructive à des processus de décision nécessite un contenu d'enseignement concret, tel que la préparation d'un jeu de rôle sur le thème « *gestion des déchets* ». Ce principe didactique ne se réalise qu'en relation avec le principe de l'orientation vers l'action et la réflexion. Par conséquent, ce type d'apprentissage se produit dans un contexte social à l'aide de méthodes d'apprentissage et d'enseignement spécifiques ; leur emploi doit être aussi contextualisé et ciblé. En effet, les compétences sociales, personnelles et méthodologiques s'acquièrent toujours à l'aide de certains contenus, et donc en situation. En somme, comme le soulignent Stern et al, « *le moyen par lequel on apprend, par exemple, le travail en équipe, ou encore comment apprendre à apprendre, est déterminant* » (Stern, 2003a ; b ; Stern et Schuhmacher, 2004).

Méthodes d'apprentissage : L'enseignement doit proposer une variété de méthodes d'apprentissage au moins pour deux raisons : d'une part, l'apprentissage et l'enseignement varient selon la personne, et d'autre part, ils reposent sur des connaissances préalables différentes pour chacun des élèves, tout comme d'ailleurs pour l'enseignant. A cet effet, Pike et Selby (1999) affirment que « *les méthodes sont comprises comme des instruments flexibles, qui doivent être modifiés ou adaptés à chaque fois selon la situation d'enseignement* » (Pike et Selby, 1999). Dans l'enseignement relatif à l'éducation au développement durable, l'objectif n'est pas de recenser des méthodes appropriées ou non appropriées mais plutôt de savoir utiliser la diversité des méthodes existantes. Le choix de ces méthodes nécessite certains critères et doit s'appliquer à tous les champs décisionnels de l'enseignement : contenu, objectifs, médias, temps, contrôle des acquis ainsi qu'aux conditions d'apprentissage qui prévalent.

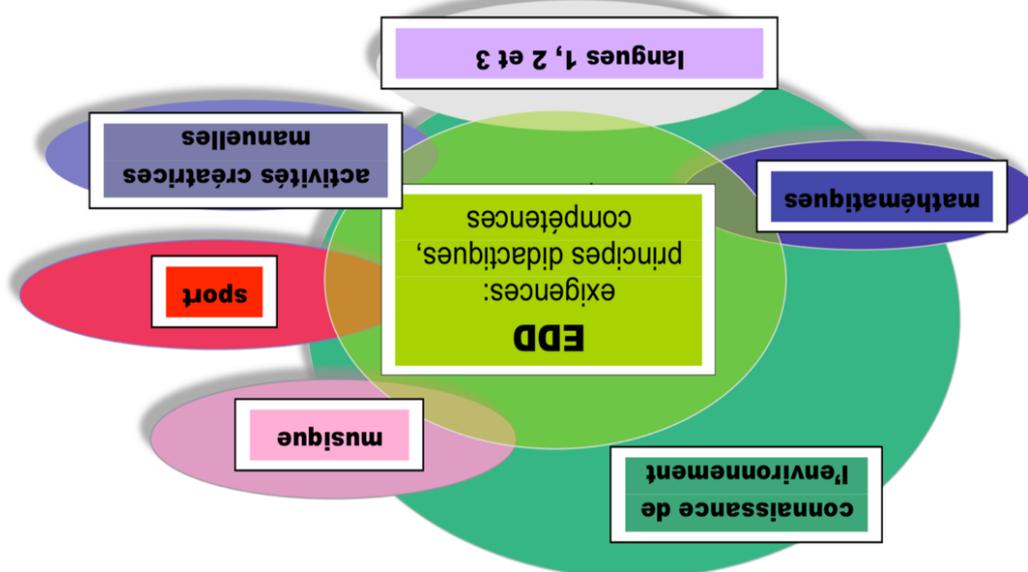
Encadré 1 : une indication sur le choix des méthodes

- **Objectifs pédagogiques** : les compétences sociales ne peuvent aisément se transmettre par un exposé "ex cathedra" ; il convient plutôt d'avoir recours à différentes formes de travail en groupes.
- **contenus** : les apprenants saisiront mieux et plus facilement les différents intérêts des acteurs en présence dans un domaine d'intervention en faisant un jeu de rôle qu'en travaillant sur un extrait de texte.
- **principes didactiques** : si le choix méthodologique se porte par exemple sur la combinaison des apprentissages dans les dimensions sociale, personnelle, méthodologique et de contenu, il faudra chercher à créer des synergies dans le choix des méthodes avec ces différents domaines de compétences
- **capacités, préférences des enseignants et des apprenants** : de par leur expérience de l'enseignement, les enseignants acquièrent une grande compétence pour ce qui est du choix des méthodes

2.3.3 EDD, domaines disciplinaires et transversalité

S'il est un principe unanimement reconnu en matière d'éducation au développement durable, c'est qu'elle n'introduit pas de discipline supplémentaire. Comme le rappelle fort justement l'OCDE (2005, p. 3), « les programmes existants d'éducation au service du développement durable mettent plutôt l'accent sur l'environnement et abordent le développement durable sous la forme de notions et aptitudes générales (esprit critique, citoyenneté) sans en faire une discipline à part entière³ ». Dans le cycle primaire, l'EDD se situe généralement dans une branche déjà existante. L'environnement (rapport à la nature et au monde du vivant) est la clé d'entrée de l'EDD. Selon le thème de réflexion et les objectifs pédagogiques, une articulation avec des connaissances issues d'autres disciplines – les activités créatrices manuelles ou le sport – permet d'établir une grille de lecture pluridisciplinaire.

Figure 2 : L'éducation au développement durable dans les branches de l'école primaire

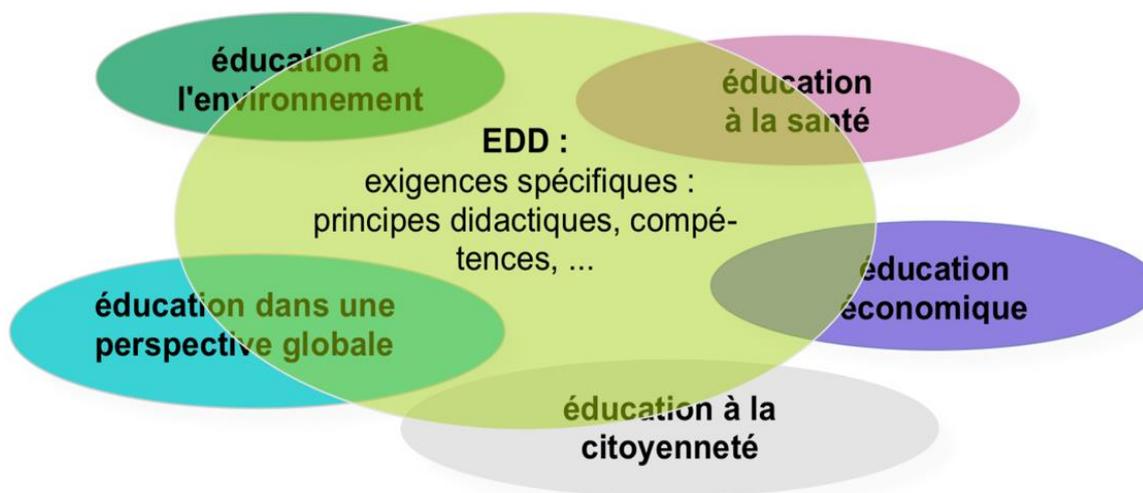


Source : Berstchy et al. (2007, p. 62)

Cela étant, l'EDD peut très vite devenir un terrain de juxtapositions de connaissances et de transversalité sur lequel des principes didactiques et des compétences vont permettre d'établir des ponts et des interactions avec d'autres types d'éducatifs. L'EDD peut ainsi reprendre à son compte, différents contenus, des outils ou des approches pédagogiques. Cela peut être le cas lorsque l'EDD entre en interaction avec l'éducation à l'environnement (analyse du cadre de vie ou du milieu) ou avec l'éducation à la santé (jeu de rôles en prévention santé).

³ <http://www.oecd.org/fr/croissanceverte/41230879.pdf>

Figure 3 : La question de la transversalité en EDD



Source : Kunzli (2006), repris dans Bertschy et al. (2007, p. 65).

Dans un document intitulé *Elaboration des programmes d'enseignement au service du développement durable*, l'OCDE propose une démarche d'éducation au développement durable adaptée au primaire, secondaire et supérieur, à partir d'une subdivision en éléments généraux (cours, notions, systèmes, paramètres et pratiques).

Tableau 3 : Une démarche d'EDD dans le système éducatif

	Cours	Notions	Systèmes	Paramètres	Pratiques
Niveau primaire	Chaque dimension abordée isolément sous un angle général dans les cours habituels	a) économie b) environnement c) social	a) marchés b) écosystèmes c) société	a) richesse b) empreinte écologique c) vote	a) collecte de fonds b) éco-école c) citoyenneté
Niveau secondaire	Intégration de deux dimensions (ou plus) dans les cours existants (sciences sociales, par ex.)	a) économie/ environnement b) économie/ social c) social/ environnement	a) échange de permis d'émission de carbone b) capital humain c) transport	a) coûts de l'inaction sur le climat b) répartition des revenus c) mesure du bien-être	a) entreprises vertes b) lutte contre la pauvreté c) <i>Fairtrade</i>
Niveau supérieur	Intégration des trois dimensions dans des unités à part entière (étude du développement durable)	a) économie/ environnement et social b) facteurs inter-générationnels c) mécanismes de participation	a) stratégies nationales de développement durable (SNDD) b) stratégies de consommation et de production écologiquement viables c) stratégies d'éducation au service du développement durable (EDD)	a) indicateurs de capital b) indices de durabilité c) études d'impact sur la durabilité	a) production durable b) consommation durable c) responsabilité des entreprises

Source : OCDE (2005, p. 5)

3. L'éducation au changement climatique (ECC)

Si l'éducation a été présentée comme un catalyseur essentiel du développement durable, il n'y a qu'un pas à faire pour qu'elle soit la clé de la réponse mondiale au changement climatique. En effet, selon l'UNESCO (2011), l'ECC incarnerait trois volets d'un programme ambitieux qui vise à (i) aider à comprendre et à atténuer l'impact du réchauffement climatique ; (ii) à changer les attitudes et les comportements ; (iii) à faciliter l'adaptation aux tendances liées au changement climatique.

Ce programme suppose trois niveaux d'investigation : (1) le renforcement des connaissances de base permettant de comprendre le système climatique et de cerner des notions telles que le changement climatique ou le réchauffement climatique ; (2) la détermination du champ d'analyses d'une Education au changement climatique ; (3) l'intégration des différents éléments (cours, notions, systèmes, paramètres, pratiques) dans une démarche d'ECC.

3.1 Le climat, quelques enjeux conceptuels

Si la connaissance du climat impose de définir ce que l'on entend par système climatique, elle souligne également qu'une sensibilisation au changement climatique passe par une étape conceptuelle marquée par des définitions et une stabilisation des savoirs (scientifiques).

A ce stade de l'analyse, il nous semble important de bien dissocier le réchauffement climatique du changement climatique. Le dictionnaire du web, *larousse.fr*, définit le réchauffement climatique comme « *une modification du climat de la Terre caractérisé par un accroissement de la température à sa surface* ». Le Dictionnaire environnemental, emploie presque les mêmes termes pour définir le réchauffement climatique : « *une augmentation de la température moyenne à la surface de la planète* ». Au-delà de ces deux définitions, le constat est sans équivoque : si la Terre s'est réchauffée naturellement, il convient de préciser les forces à l'origine de ce réchauffement. Nous savons que le Soleil nous envoie un rayonnement composé d'un peu d'ultraviolets, surtout de lumière visible et d'infrarouge proche. Nous savons aussi que 30% de ce rayonnement est directement réfléchi par les nuages, l'atmosphère et la surface de la Terre. Les 70% restants sont absorbés pour 20% par des gaz présents naturellement dans l'atmosphère et pour 50% par les océans et le sol. En définitive donc, seulement 50% du rayonnement solaire initial arrivent au niveau de la surface de la Terre. Cette absorption du rayonnement solaire réchauffe l'atmosphère et surtout la surface de la Terre. *Sans cet apport d'énergie, la Terre serait glaciale.*

Le réchauffement de la Terre est normal avec une température moyenne de +15°C et ce que l'on coutume d'appeler *effet de serre* est le processus naturel résultant de l'influence de l'atmosphère sur les différents flux thermiques contribuant aux températures au sol de la Terre. Toutefois, lorsque ce réchauffement dépasse la norme et dérègle le système climatique, l'effet de serre est appréhendé à partir « *de l'augmentation des gaz à effet de serre due à l'activité humaine, en particulier la combustion de*

carburants fossiles, appelé effet de serre anthropique » (Dalmedico et al, 2007, p. 7). Le réchauffement climatique est donc une hausse de la température moyenne de la surface de la Terre, occasionnée par un excédent de gaz à effet de serre anthropique. Il est à l'origine du changement climatique.

Proposer une définition du changement climatique n'est pas une chose facile du fait de son caractère controversé. Nous savons que les conditions atmosphériques changent en permanence grâce à la météorologie et à la climatologie. La météorologie nous renseigne sur la variation des phénomènes atmosphériques (nuages, dépressions, précipitations.), en utilisant des données précises comme la température, l'humidité et l'autre étudie la succession de ces conditions météorologiques sur le long terme, grâce à des statistiques. Cela permet de déterminer notre système climatique, le système global. Le système climatique est constitué d'une série d'interactions entre différents éléments que sont : l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la biosphère. Tous ces compartiments jouent un rôle déterminant dans la constitution et la régulation du système.

C'est pourquoi, les climatologues et les météorologues parlent du changement climatique lorsque « *le climat global de la Terre ou l'ensemble des climats régionaux subissent une modification durable (ou minimum sur une durée de dix ans)* » (CNRS). Un climat étant défini, par ces derniers, par de nombreuses variations, un changement climatique ne peut être traduit à priori par un simple changement de la température moyenne. Ce qui nous pousse à dire qu'il comprend probablement aussi des modifications de la valeur moyenne ou de la variabilité des précipitations, des vents, de l'humidité des sols. Pour le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), les changements climatiques sont « *des variations statistiquement indicatives de l'état du climat ou de sa variabilité, persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance de variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols* » (GIEC, 2001).

La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), définit, dans son article premier, les changements climatiques, comme « *des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* » (CCNUCC, 1998, art 1). Ces conditions, il convient de faire une distinction entre « *les changements climatiques* » attribuables à l'activité humaine, donc anthropiques, altérant la composition de l'atmosphère et la « *variabilité du climat* » imputable à des causes naturelles. Dans ses deux derniers rapports (4e et 5e), le GIEC a confirmé la thèse anthropique en affirmant que « *la probabilité pour que le réchauffement climatique soit d'origine humaine est de plus de 90%* » (GIEC, 2007). En définitive, le changement climatique est la résultante du réchauffement de notre planète dû principalement à l'activité humaine. Un

changement de comportement et d'attitude via une éducation au changement climatique est donc préconisée pour inverser cette tendance.

3.2. L'éducation au changement climatique pour un développement durable (ECCDD)

Dans son document intitulé « Initiative de l'UNESCO pour faire face au changement climatique », l'UNESCO, définissait l'ECC par sa finalité et son but : « *les programmes scolaires de l'ECC doivent porter sur les connaissances, talents et compétences qu'il faut acquérir, et contribuer à la mitigation du changement climatique et à l'adaptation à ce phénomène. Ils doivent aussi présenter des concepts scientifiques, des théories et des projections élémentaires en matière de changement climatique et traiter des thèmes tels que la consommation durable, la préparation aux catastrophes, la protection de l'environnement, le recyclage, l'eau, la désertification et les énergies renouvelables en prenant en compte leur pertinence dans les contextes nationaux et locaux. En fin les concepts tels que l'éthique, les droits de l'homme, l'égalité des sexes, l'incertitude, la gestion des risques, la justice sociale et la prise de décision sont essentiels pour préparer les apprenants à vivre dans un environnement changeant* » (UNESCO, 2011).

L'ECC se présente ainsi comme un changement de paradigme par rapport à l'ERE (le changement est vital, c'est une question de survie) et se caractérise par un changement de perspective de l'EDD. En effet, l'ECC a la lourde responsabilité d'encourager les changements de comportements et d'attitudes alors que nous ne sommes pas en mesure d'évaluer pleinement toutes les conséquences de nos actes et de nos décisions (d'une certaine mesure, il s'agit d'aller au-delà du principe de précaution). L'ECC doit donc fournir des cadres de représentation, une diversité d'approches pédagogiques et des outils didactiques appropriés pour aider « *les apprenants et surtout les jeunes générations à comprendre les enjeux [du changement climatique] et à se sentir concernés, à changer de style de vie pour réduire les gaz à effet de serre et à s'adapter à l'évolution des conditions locales* » (UNESCO, 2011). Il s'agit à la fois, de sensibiliser le public à la question du changement climatique ; d'éveiller les consciences sur la question de l'effet de serre anthropique et de libérer les capacités à solutionner les problèmes afin d'agir en citoyens responsables et de prendre les décisions susceptibles de maintenir la durabilité des écosystèmes. Dans cette perspective, l'ECC est nécessaire à tous les niveaux du système éducatif (primaire, secondaire, supérieur) et dans tous les contextes d'éducation formelle et non formelle. Elle doit s'adapter à nos divers contextes tout en privilégiant la transmission de nos connaissances et de nos pratiques traditionnelles respectives. Finalement, faire comprendre les enjeux des changements climatiques à nos enfants, par la sensibilisation et la formation sont les meilleurs moyens de modifier les comportements et les attitudes.

Ce passage à l'ECC s'effectue dans un contexte et sur un objet qui renvoie au triptyque *Sciences Techniques et Société* (STS). Si le changement climatique est un problème global complexe du fait de ses interactions avec de nombreux autres enjeux (la souveraineté alimentaire, la sécurité énergétique, la réduction de la pauvreté...), ses conséquences sont avant tout locales, ce qui fait que nous ne sommes pas tous exposés aux mêmes risques. Si le changement climatique s'invite dans l'agenda politique des systèmes éducatifs, il sera sujet aux controverses et donc au traitement de questions socialement vives (Legardez, 2017). Il conviendra d'outiller les apprenants afin qu'ils sachent appréhender ces controverses (notamment lorsqu'elles sont médiatisées par plusieurs vecteurs de communication). Si le climat se doit d'interpeller les citoyens, c'est pour à la fois qu'ils perçoivent leur rôle en matière de mitigation du changement climatique (les éco-gestes sont nécessaires pour atténuer les effets de mes actes sur le système climatique) et qu'ils soient capables de développer des capacités d'adaptation à ce phénomène. Le cadre STS suppose que le climat attise une série d'enjeux scientifiques, politiques, économiques, sociaux et éducatifs stigmatisant les controverses et le jeu des acteurs.

3.3.1 Le changement climatique et les enjeux (controverses ?) scientifiques

Depuis la fin du XIXe siècle, « *le modèle général de l'effet de serre* » est utilisé dans la majorité des travaux scientifiques sur l'évolution des climats (Arrhenius, 1896). Il permet à la fois d'établir le bilan radiatif de la Terre et de calculer la température moyenne d'équilibre à la surface de la planète. « *Ce modèle décrit donc le lien entre la composition chimique de l'atmosphère et la température moyenne de surface. L'un des enjeux majeurs pour la communauté inscrite dans le paradigme de l'effet de serre est d'affiner le paramétrage des équations thermodynamiques, en y intégrant par exemple le rôle des nuages dans le bilan radiatif de la Terre* » (Le Treut, 2006). Ces calculs se font sur la base de divers scénarios socioéconomiques décrivant ce que pourraient être les émissions anthropiques à l'horizon 2100, en fonction d'orientations énergétiques et démographiques plus ou moins émettrices de gaz à effet de serre.

Nous savons qu'au sein de la communauté interdisciplinaire du GIEC, « *l'essentiel des débats porte sur les causes et les conséquences socioécologiques d'une évolution climatique globale* ». Tandis qu'en dehors de la communauté du GIEC, « *l'essentiel des controverses porte sur les bases physiques de l'évolution des climats* » (Urgelli, 2008).

Ainsi l'un des éléments les plus discutés est la définition d'une température moyenne de surface ou encore le traitement statistique des données qui conduit à calculer la moyenne globale des températures. Il existe aussi des controverses entre l'évolution de la température moyenne et l'évolution de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone sans négliger l'existence de forçages non-anthropiques.

Toutefois, et c'est notamment le cas lorsque le thème nécessite une vue systémique globale et des apports scientifiques transversaux, « *les débats entre économistes, démographes, sociologues mais aussi biologistes et géo-ingénieurs portent sur les mesures d'atténuation et d'adaptation, leurs coûts socioéconomiques et les différents modèles de développement mobilisables* » (Urgelli, 2008). Ce sont ces débats qui soulèvent des questions liées d'une part à la diversité des représentations médiatiques des risques climatiques et d'autres à leur intégration dans des projets éducatifs.

3.3.2 *Les changements climatiques comme enjeux sociopolitiques*

Les années quatre-vingt-dix sont souvent associées à la période d'activation de l'alerte sociale à propos des risques climatiques. Cette situation est en partie liée aux « *travaux scientifiques corrélant les évolutions des températures et des teneurs en dioxyde de carbone atmosphérique, à partir des carottages de glaces polaires* » (Lorius et al. 1985 ; Barnola et al. 1987). La plupart des scientifiques du climat associent ces changements à la transformation anthropique de la composition de l'atmosphère (GIEC, 2018). En 1988, la création du GIEC devient ainsi, un enjeu socio-scientifique visant à fournir une expertise à l'attention des décideurs politiques sur la part de responsabilité des activités humaines dans l'évolution climatique globale. De nombreux laboratoires de recherche dans le monde entier se sont engagés dans ce processus d'expertise et des modèles numériques de la « *machine climatique* » (Urgelli, 2008) ont été développés pour permettre au GIEC de livrer son premier rapport (1990). A Rio, les débats se sont orientés sur les stratégies de réduction (mitigation policy) des émissions de gaz à effet de serre, marqués par une absence de « *consensus quant aux décisions concrètes à mettre en œuvre pour limiter les risques climatiques* » (Urgelli, 2008). Les divergences reposent notamment sur le caractère controversé de l'expertise scientifique (Hourcade, 1993), entre d'un côté les Etats-Unis et l'Union européenne et de l'autre côté les pays industrialisés et les pays émergents. Depuis cette date, les rapports du GIEC se succèdent et sont fortement attendus par les décideurs politiques⁴. Les experts n'hésitent plus à se lancer dans de longues campagnes médiatiques afin que la communauté internationale soutienne l'effort scientifique et prenne en compte les scénarios des modèles dans les négociations internationales sur le climat (Conférences des Parties, COP). En fin de compte, sur fond de controverses socio scientifiques, cette question des changements climatiques est désormais régulièrement remise à l'ordre du jour des agendas politiques, scientifiques et médiatiques entrelacés. Ainsi, comme le rappelle fort bien Urgelli (2008), « *Socialement, la représentation scientifique des risques climatiques véhiculée par les rapports d'expertise devient celle de la menace climatique* »

⁴ Voir la demande adressée par les participants de la COP21 (Paris) au GIEC et la publication du rapport 2018.

3.3.3 Le changement climatique comme enjeux économiques

Si la durabilité soulève de nombreux problèmes pour les économistes (définition du long terme, prise en compte et estimation des risques, gestion de l'incertitude, paramétrisation du taux de préférence pour le temps...), elle a également engendré deux approches (écoles de pensée) que l'on qualifie aujourd'hui de durabilité faible et de durabilité forte. D'un côté, les économistes d'inspiration orthodoxe (Solow, 1974) qui s'appuient sur des modèles linéaires intégrant des fonctions de production à facteurs substituables (l'épuisement des ressources naturelles est un fait parmi tant d'autres, une autre combinaison optimale des facteurs de production émergera), mettent en avant des ajustements de marchés (variation des prix et des quantités ou intégration des taxes) et ont une foi inébranlable dans l'innovation (la technologie devient une réponse économique à un problème de société). De l'autre, les économistes d'inspiration hétérodoxe (Georgescu-Roegen, 1971, Daly, 1977), regroupés sous la bannière du courant *Ecological Economics*, qui insistent sur l'idée d'un état stationnaire, sur la circularité des flux et des stocks (matière et énergie), sur l'épuisement des ressources naturelles et la montée du phénomène entropique. Ils entendent ainsi ramener l'économie à sa juste place (ré-encastrement de l'économie dans le social).

Dans le cas du changement climatique, les enjeux des économistes sont de deux ordres. D'une part, le climat renvoie au triptyque économie - énergie - climat... The Fable of the Elephant (Economie) and the Rabbit (énergie), popularisée par Hogan et Manne dans les années 70, se voit modifiée par l'entrée d'un nouveau personnage, the black bird (climat) qui invite à une nouvelle approche méthodologique (Diemer, 2019), une analyse des systèmes complexes en interaction dynamique (ce que les anglo-saxons nomment *System Dynamics*). Ainsi, nos activités économiques créent de la croissance et des gaz à effet de serre, ces derniers modifient le climat occasionnant des changements climatiques qui affectent nos activités économiques.... D'autre part, les travaux des économistes mobilisés dans le cas du changement climatique renvoient principalement à une lecture en termes de durabilité faible. Les travaux de William Nordhaus illustrent cet ancrage. Nordhaus a participé activement à la controverse qui, au début des années 1970, a accompagné la publication du premier rapport du Club de Rome, *The Limits to Growth*. À ses yeux, la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre était la seule question environnementale qui valait la peine d'être étudiée. Son approche de l'économie du changement climatique (Nordhaus, 1977) repose principalement sur une analyse coûts-avantages (ACA) et une représentation macroéconomique de la problématique du changement climatique. Le modèle DICE (*Dynamic Integrated Climate Economy*) qu'il a conçu et présenté au début des années 1990 (Nordhaus, 1993), s'inspire de la théorie néoclassique de la croissance (modèle de Solow) et de la règle d'optimisation de Ramsey (1928). En substance, comme le mentionne Olivier Godard (2007), le modèle DICE permet de suggérer que, grâce à la

poursuite de l'accumulation du capital et de la croissance, les générations futures seront beaucoup plus riches que les générations présentes et qu'elles pourront donc gérer plus facilement le changement climatique que ces dernières.

Dans ce cadre à la fois contextuel et théorique, c'est l'évaluation économique qui, en déterminant un niveau optimal de pollution, doit guider la prise de décision en matière de lutte contre le changement climatique. Celui-ci est analysé comme une externalité qu'il convient d'internaliser en le faisant entrer à l'intérieur des cadres et des règles de la décision économique. Cela se traduit d'abord par un recours à une ACA, qui compare les coûts des avantages et des dommages induits par le changement climatique et les coûts et avantages liés à la lutte contre le changement climatique. La conclusion à laquelle Nordhaus (1991) aboutit à la suite de ses calculs, laquelle n'a guère varié depuis sur le fond, est celle d'un effort « *modeste* » à consentir à court terme pour réduire les émissions de GES. Cette internalisation du changement climatique dans le système économique s'appuie sur la mise en place d'un « *marché du carbone* », (par le biais d'un système de permis négociables ou d'une taxe), le signal-prix permettant aux acteurs économiques d'intégrer le climat dans leurs calculs économiques.

3.3.4. *Les changements climatiques comme enjeux socioéducatifs*

Au lendemain du Sommet de Terre de Rio (1992), les Etats se sont engagés dans la promotion du développement durable en validant le Programme Action 21 de l'ONU. Ce programme d'actions souligne l'importance de l'application des principes de précaution, de solidarité, d'équité et de responsabilité individuelle et collective pour la résolution durable des problèmes environnementaux globaux.

Le Chapitre 36 : « *Promotion de l'éducation, de la sensibilisation du public et de la formation* », de la Section IV « *moyens d'exécution* », insiste sur le fait que « *ces principes doivent être promus par l'éducation formelle et non-formelle, et par des campagnes de communication médiatique*⁵ ». Un grand nombre de pays de l'OCDE intégrera ce projet de sensibilisation, d'éducation et formation dans leurs programmes de politique éducatif. Deux ans après l'entrée en vigueur de l'Accord de Paris, le projet socioéducatif entend bien limiter les risques climatiques en « *stabilisant les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* » (Art 2 CCNUCC). L'Article 6 de la CCNUCC et le Protocole de Kyoto, à travers son Article 10, appellent « *les gouvernements à éduquer, responsabiliser et engager toutes les parties prenantes et les principaux groupes sur les politiques relatives au changement climatique* »

⁵ Cependant, comme le souligne Jacquinet-Delaunay (2007), citant Schaeffer (1972) « *la diversité des intentions, des intérêts, désirs ou craintes des récepteurs de cette communication* » n'est pas prise en compte.

Intégrer l'ensemble des enjeux des changements climatiques à l'école nécessite des approches pédagogiques ouvertes à l'interdisciplinarité voire à la transdisciplinarité. Dans le cadre du traitement didactique de ces questions, Legendre (2005) n'hésitait pas à rappeler que « [...] la solution aux grands problèmes de l'heure, tels les changements climatiques [...] dépend d'une approche et d'une saisie globale des choses. De plus, l'apprentissage s'inscrit aujourd'hui dans un monde sans frontière, où, grâce surtout aux médias d'information, l'interpénétration des problèmes et des connaissances est devenue une réalité quotidienne à laquelle l'école ne peut demeurer étrangère. En somme, ni l'école, ni aucune discipline ne peut revendiquer l'exclusivité de l'apprentissage ou de la formation de l'élève. Dans un tel contexte, l'insertion de l'activité pédagogique, à base d'interdisciplinarité, au cœur de la réalité socioculturelle, s'avère une condition indispensable de l'adaptation de l'école à notre monde en constante évolution ». L'intégration des changements climatiques dans les contenus d'enseignement, nécessite de relever certains défis : « (1) appréhender la nature controversée de cette question ; (2) appréhender la diversité des connaissances en jeu (aspects scientifiques et non-scientifiques) ; (3) établir le lien entre ces connaissances et les contenus et pratiques d'enseignement existants et enfin (4) s'ouvrir à l'interdisciplinarité pédagogique » (Gayford, 2007). Dans son projet *Education 2030*, l'OCDE (2018, p. 4) a brossé le tableau d'un futur de l'éducation et des compétences. Si les défis qui se posent sont en premier lieu d'ordre environnemental - le changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles exigent des actions d'atténuation et d'adaptation urgentes - deux questions d'une portée considérable doivent trouver des réponses.

De quelles connaissances, compétences, attitudes et valeurs, les apprenants auront-ils besoin pour réussir leur vie et bâtir le monde de demain ?

Comment les systèmes éducatifs peuvent-ils transmettre ces connaissances, compétences, attitudes et valeurs de manière efficace ?

4. Problématique

Notre travail de thèse vise à clarifier le champ, les caractéristiques et les principes d'une Education aux Changements Climatiques dans le contexte du Développement Durable (ECCDD) et d'élaborer des propositions pour son intégration dans la formation de base. Nous avons souhaité inscrire cette problématique dans un double cadre : celui de l'interdisciplinarité (cette thèse s'inscrit dans une codirection permettant d'intégrer les sciences de l'éducation et les sciences économiques) ; celui du cycle primaire du système éducatif sénégalais. En effet, ce que l'on apprend aux petits a toujours eu l'avantage de demeurer pour la vie. L'investissement émotionnel, qui se retrouve dans la curiosité et la spontanéité avec laquelle les jeunes enfants s'expriment, en fait le véritable moment d'apprentissage, d'initiation. L'école primaire

doit donc permettre à l'élève, futur décideur, à se familiariser avec certains concepts relatifs à l'environnement, au changement climatique et au développement durable.

Dans ce contexte, nous devons préparer la jeunesse sénégalaise à s'assumer pour le bien-être de son pays et de l'humanité. Cette préparation n'est possible que si le programme d'enseignement sénégalais envisage d'introduire des cours, des notions, des analyses en termes de systèmes, des débats autour de thèmes clés et de pratiques préfigurant une Education aux Changements Climatiques en vue du Développement Durable (ECCDD).

Tableau 4 : les défis d'une ECCDD

	Cours	Notions	Systèmes	Thèmes clés	Pratiques
Niveau primaire	Chaque dimension du changement climatique doit être abordée sous un angle général dans les cours habituels	1/ Environnement et climat 2/ Social 3/ Economie	1/ Ecosystème 2/ Société 3/ Marchés	1/Effet de serre 2/ Démocratie et justice 3/ Activités et Richesse	1/ Eco-école 2/ Citoyen responsable 3/ Financement

Mais la problématique d'une ECCDD ne se limite pas à ce qu'il convient de disséminer comme connaissances et compétences aux apprenants, elle doit également intégrer la principale courroie de transmission d'une telle éducation, les enseignants. Ces derniers doivent être outillés intellectuellement et matériellement pour dispenser cet enseignement aux élèves. C'est dans cette optique que nous avons souhaité interroger les représentations sociales des enseignants sénégalais du cycle primaire sur les concepts principaux tels que le développement durable, les changements climatiques et leurs corollaires éducatifs, à l'aide d'un questionnaire. Face à la menace grave qui persiste sur notre planète, l'ECCDD se doit de partir des représentations sociales et collectives afin de proposer des démarches pédagogiques innovantes, des outils appropriés au contexte et des compétences susceptibles de forger l'éco-citoyen de demain.

Imaginer les fondements et les principes d'une ECCDD nécessite également de réfléchir aux savoirs scientifiques qu'il convient de mobiliser – même dans le cadre d'une réflexion dans le cycle du primaire. Il s'agit principalement de savoirs entremêlés issus des sciences de la nature, des sciences économiques et des sciences humaines et sociales. Le système climatique est en interaction avec le système politique, le système économique et la société dans son ensemble. A travers, l'ECCDD, il s'agit de rappeler que la Science doit se faire citoyenne et responsable : le choix même des objets de recherche est questionné au regard de la pertinence sociale et des formes de développement promues (explicitement ou non) par l'activité scientifique. Aussi, en raison de la nécessité d'appréhender les réalités dans une approche systémique et globale, en tant que chercheur, nous sommes amenés à favoriser le dialogue des

savoirs, au sein même de l'espace scientifique où l'interdisciplinarité s'avère féconde, mais aussi dans l'espace public où se construisent d'autres types de savoirs.

En raison de l'importance de la connaissance scientifique dans une écologie du savoir qui prend en compte la complexité et la globalité des réalités, et en raison aussi de l'importance accordée à la science comme argument, caution ou alibi dans les décisions politiques et économiques relatives aux questions socio-écologiques comme les changements climatiques, l'éducation doit contribuer à l'émergence d'une « *intelligence collective* » (Taddei, 2018), capable de saisir les arguments scientifiques de façon critique, de les insérer dans un ensemble de savoirs de divers types, de les mettre en relation dialectique avec ces derniers, et de les utiliser comme matériau de construction d'un argumentaire approprié au contexte.

C'est dans ce contexte que notre de travail de thèse entend proposer un modèle de pensée (au sens de *Thinking System*) intégrant les sciences économiques et politiques, les sciences de l'éducation et la science climatique. Dans la mouvance des réformes éducatives qui ont cours ou qui sont en phase d'implantation ou de consolidation dans diverses régions du monde (et notamment au Sénégal), la prise en compte de l'interdisciplinarité dans les curriculums, constitue un défi pour les planificateurs des systèmes éducatifs. Une éducation basée sur des objets de savoirs intégrés entre eux dans une perspective d'interdisciplinarité, un rapprochement entre les sciences avec un projet d'apprentissage centré sur des réalités concrètes et significatives comme les changements climatiques, voilà le contexte dans lequel nous voulons intégrer l'éducation aux changements climatiques dans la prescription de l'éducation au développement, et ceci dès le cycle primaire⁶.

5. Plan

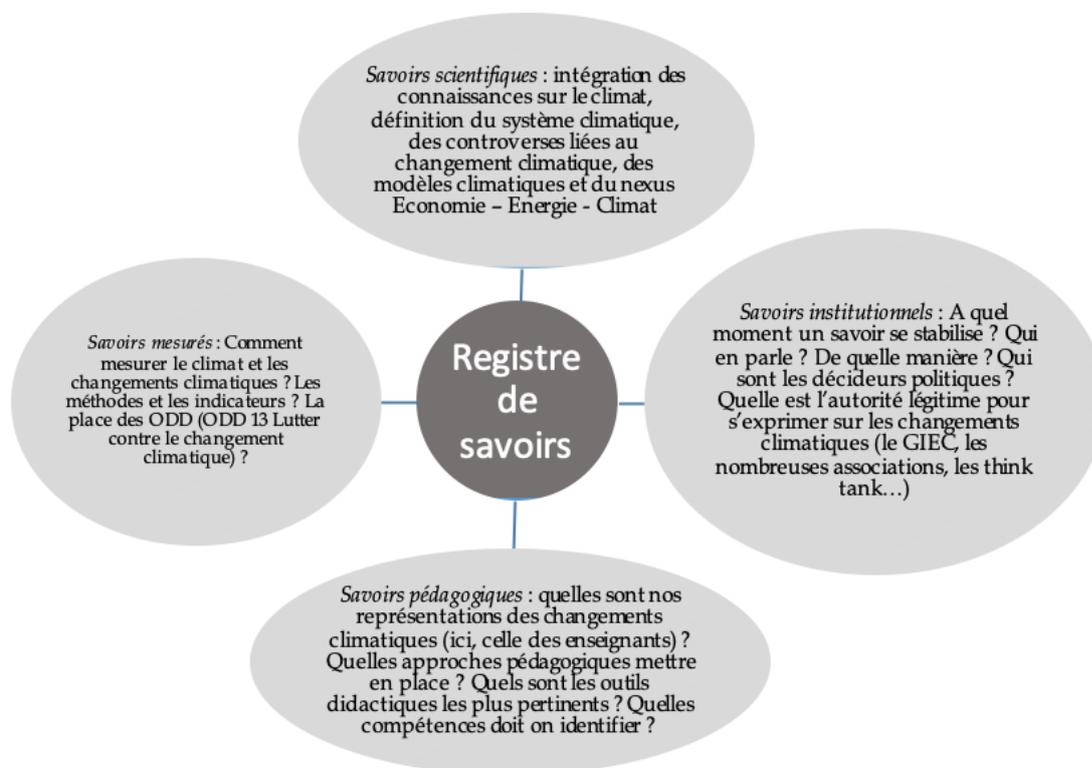
Pour répondre aux diverses questions introduites précédemment et surtout permettre à l'Éducation aux Changements Climatiques en vue d'un Développement Durable (ECCDD) de s'inscrire durablement dans le paysage des « éducations à », notre thèse s'est attachée à faire converger deux pistes de travail :

(1) une analyse des formes de savoirs en lien avec les changements climatiques, et sur ce point, nous avons utilisé une matrice qui s'appuie sur la distinction entre savoirs

⁶ Ce point nous semble très important car une grande partie des programmes et des contenus n'intègre l'interdisciplinarité que dans le cycle secondaire. Par ailleurs, les connaissances et les savoirs concernant notre système économique sont complètement absents du cycle primaire. Or, des démarches pédagogiques tirées de l'analyse du cadre de vie (ERE) ou encore des applications d'investigation reliées à la théorie de l'enquête de Dewey permettent au jeune public de cerner les notions économiques qui font partie de leur quotidien.

scientifiques (climat, économique, politique, social...), savoirs institutionnels, savoirs mesurés et savoirs pédagogiques ;

Figure 4 : le registre des savoirs en ECCDD



(2) une étude des représentations sociales⁷ des enseignants du cycle primaire sénégalais s'insérant dans le modèle REDOC (REprésentations, Démarche pédagogique, Outils didactiques, Compétences) développé avec l'AUF (IFADEM) dans le cadre d'un projet d'implantation de l'EDD dans cinq pays d'Afrique (Bénin, Burkina-Faso, Niger, RDC, Togo).

Ces deux pistes de travail offrent une certaine richesse intellectuelle, notamment lorsqu'il s'agit d'identifier un registre des savoirs pour l'ECDD tout en les replaçant (ces savoirs) dans le cadre des représentations (on aurait pu imaginer également questionner la notion de conceptions). Les savoirs s'inscrivent dans le champ de la validation des discours, ceci donne lieu à un grand nombre de débats et de controverses (enjeux de sociétés), tout en encastrant les savoirs dans des matrices pré-déterminées. Vergès (1994a) a résumé fort bien cette idée en distinguant trois niveaux de déterminations sociales.

⁷ « Une représentation sociale est une forme de connaissance, socialement élaborée et partagée, ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité commune à un ensemble social » (Jodelet, 1994, p. 36).

- Une *matrice culturelle d'interprétation* qui comprend d'une part, des éléments de culture nationale : par exemple, la représentation globale de l'économie est centrée différemment selon la nationalité des individus (principalement en ce qui a trait à l'État, aux banques ou aux entreprises). Et d'autre part, des éléments caractéristiques du groupe social d'appartenance : les représentations du rôle de l'État dans l'économie peuvent être différentes en fonction du milieu social des individus (par exemple : professions indépendantes *versus* salariés aux niveaux inférieurs du cursus scolaire).
- Des *pratiques sociales* : activités professionnelles, monétaires, de consommation, etc. Ces pratiques peuvent être directes (consommation) ou indirectes (activités professionnelles) pour les individus d'âge scolaire.
- Des *discours qui circulent* à un moment donné dans la société. Ces discours sont le fait des médias, des organisations sociales (associations, partis, syndicats, etc.), des personnes influentes (intellectuels et autres) et plus largement de tous les membres de la société ; c'est ce que Vergès (1994a) nomme : le « débat idéologique ». Les discours sur les changements climatiques n'échappent à ces considérations même si les modèles climatiques ont inscrit le climat dans une approche scientifique.

Dans une perspective d'éduquer aux changements climatiques, la question des processus de socialisation est essentielle. Elle permet d'appréhender le degré de liberté de l'acteur social et ensuite, d'appréhender la place qu'elle nous semble laisser à l'école. Il est ainsi possible de penser l'action de l'école dans la formation des représentations sociales des changements climatiques et du développement durable des enseignants. En effet, d'une part, le discours scolaire est bien l'un de ceux qui circulent ; il peut donc avoir une influence sur l'évolution des représentations des acteurs de l'école. D'autre part, la formation scolaire peut avoir un impact sur les représentations des élèves : les pratiques scolaires peuvent être considérées comme des pratiques sociales spécifiques. Les représentations sociales représentent donc un élément clé dans la manière dont nous allons faire émerger une éducation aux changements climatiques au Sénégal.

Le coeur de notre thèse est articulée autour de 7 articles qui ont été publiés ou qui sont en cours de révision. Chacun de ces articles introduit un registre des savoirs contextualisés (le développement durable, la place des enjeux climatiques) ; une littérature relevant des sciences de l'éducation (Éducation au développement durable, Éducation aux Changements Climatiques en vue d'un Développement Durable), des sciences du climat (connaissances et modèles climatiques) et des sciences économiques (principalement des IAM - *integrated Assessment Models*) ; un cadre méthodologique

(Analyse des systèmes complexes, System Thinking et REDOC) ; et une discussion sur les enjeux éducatifs liés aux changements climatiques (contenus, ODD 4).

- Le premier article intitulé « Le Climat : du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée (Integrated Assessments Models) » a été publié dans le numéro 9 de la *Revue Francophone du Développement Durable* (mars, 2017). Cet article aborde le climat à partir de trois types de savoirs : *les savoirs scientifiques* (qu'est-ce que le climat ? Qu'est-ce qu'un modèle climatique ? Qu'est-ce qu'un modèle intégré ?), *les savoirs institutionnels* (le rôle du GIEC, le contenu de ces différents rapports, les polémiques autour du réchauffement climatique), *les savoirs mesurés* (comment mesure-t-on le climat ? Les débats autour de la mesure, les techniques mobilisées). Il s'agit ici de faire un état des connaissances qui servira à comprendre ce que l'on entend par système climatique et par modèle du climat. Cet article permettra aux enseignants d'acquérir des connaissances de base sur le changement climatique.

- Les deuxième et troisième articles sont intitulés respectivement : « IAM : How to integrate Economics, Energy and Climate ? » et « Contributions of DICE and RICE to Implement Integrated Assessment Models (IAM) », il s'agit des chapitres 1 et 6 d'un ouvrage collectif *Integrated Assessments Models and Others Climate Policy Tools : Challenges and Issues*, à paraître en juin 2019 chez Oeconomia. Ils abordent la question des outils (modèles) utilisés par les chercheurs pour mieux appréhender les conséquences du changement climatique et proposer des stratégies de mitigation ou d'adaptation. Ce registre des savoirs scientifiques permet de cerner les architectures de nombreux modèles, notamment la famille des *Integrated Assessment Models* (IAM). Le modèle DICE, conçu par William Nordhaus (Prix Nobel d'Economie en 2018), permet de présenter les hypothèses d'un modèle intégré et de soulever la question des taux de préférence pour le temps entre les générations (préférence pour le temps présent ou le temps futur).

- Le quatrième article est intitulé « Environmental Education to Education for Sustainability Development : Challenges and Issues » et a été publié dans la revue *International Journal of Humanities and Social Science* (vol 9, 2019). Cet article introduit les savoirs pédagogiques en analysant deux projets éducatifs que tout oppose (par leur histoire, leur objet et leur contexte), l'éducation à l'environnement (EE) et l'éducation au développement durable (EDD). Ce texte souligne la place de l'UNESCO dans la mise en place de l'EDD (décennie 2005 - 2014) ainsi que les méthodes pédagogiques promulguées par cette institution (démarche participative, approche systémique, pratiques collaboratives).

- Le cinquième article s'intitule « Education for sustainable development : a conceptual and methodological approach » et sera publié en mai 2019 dans la *Revue International Journal of Education*. Les savoirs pédagogiques sont mobilisés afin de rendre compte de trois analyses de l'EDD. La première resitue l'EDD dans le courant des éducations à,

en insistant sur le champ des questions socialement vives et la place des valeurs. La seconde propose d'appréhender l'EDD à partir d'une reconfiguration du développement durable (ce dernier incarne un nouveau paradigme avec 6 clés d'entrée : les enjeux de société et les controverses, une approche par la complexité et la transdisciplinarité, une démarche systémique, 5 dimensions, des échelles spatio-temporelles, des valeurs). La troisième propose un modèle de pensée (System Thinking) pour l'EDD selon le modèle d'analyse REDOC pour (Représentations, Démarche pédagogique, Outils didactiques, Compétences).

- Le sixième article s'intitule « De l'éducation au développement durable (EDD) aux Objectifs du Développement Durable (ODD), de nouvelles prescriptions pour les pays du Sud ? » a été publié en 2017, dans un numéro Hors Série de la Revue Francophone du développement durable (décembre). Les savoirs pédagogiques (principes de l'EDD) sont ici mis en relation avec les savoirs mesurés (les ODD). L'article montre comment articuler l'EDD (ces principes, son contenu, ses valeurs) avec les ODD 4 (Éducation de qualité), ODD 1 (pauvreté) et l'ODD13 (lutte contre le changement climatique) à partir de deux cas concrets : le Pakistan et le Sénégal. Des démarches pédagogiques (pédagogie critique, pédagogie par projets, analyse du milieu, pleine conscience) et des outils didactiques (cartes de controverses, photo-formation, cartes conceptuelles, contes) appropriés dans le cadre de l'EDD sont présentés.

- Le septième et dernier article introduit l'éducation aux changements climatiques. Il est en cours de révision dans la revue *Education Relative à l'Environnement*. L'article intitulé « Eduquer aux changements climatiques au Sénégal, une initiation au modèle REDOC, via les représentations sociales » entend revenir sur l'émergence de l'éducation au changement climatique en vue d'un développement durable (ECCDD). Cette éducation renvoie d'une part, aux connaissances qu'il convient de transmettre pour atténuer les effets du changement climatique et s'adapter à un environnement en constante évolution et, d'autre part, aux compétences attendues pour modifier nos attitudes et nos comportements. A partir du modèle REDOC, nous avons cherché à faire ressortir les représentations sociales du développement durable et du changement climatique des enseignants du cycle primaire au Sénégal (réalisation d'un questionnaire), de manière à proposer des démarches pédagogiques innovantes, de concevoir des outils didactiques pour développer des compétences en vue d'une éducation aux changements climatiques (ECC).

6. Revue de la littérature

Fournir une revue de la littérature adéquate sur le climat, l'économie et l'éducation aux changements climatiques pour les générations actuelles et futures reste un défi. Il s'agit en effet d'ouvrir plusieurs champs d'investigation.

Le premier concerne les connaissances scientifiques qu'il convient de maîtriser pour comprendre la science du climat, ses interactions avec les autres sciences, et la manière de diffuser largement ces savoirs. La science du climat a fait de grands progrès au cours des deux dernières décennies et les observations du réchauffement climatique confirment chaque jour, les hypothèses émises dans les premiers rapports du GIEC (GIEC, 2018). La science du climat est une science interdisciplinaire, elle appartient aux Sciences de la Terre. Les principes de base du système climatique sont décrits par les sciences naturelles, principalement la physique, la chimie, la biologie et la géologie. Cette approche pluridisciplinaire s'intègre très bien dans le cycle primaire, surtout lorsque les enfants expriment le souhait et la curiosité de comprendre le phénomène des pluies, du vent, des orages... Le système climatique est par essence complexe, et cette complexité se retrouve à de nombreux étages de la société, ceci explique la nécessité de développer des analyses intégrées (ce point justifie à nos yeux, le recours aux modèles d'intégration assignée ainsi que leur large diffusion auprès du public) : *« Des mesures efficaces, équitables et socialement acceptables en faveur du climat, de l'environnement, nécessitent une analyse intégrée des impacts actuels et futurs, des vulnérabilités, des différents groupes de population, des risques, des coûts et des opportunités liés au changement climatique et à la variabilité, en tenant compte des événements extrêmes et des dangers liés au climat et à leur récurrence »* (Tasquier et, 2013).

Au cours des dix dernières années, l'Union Européenne (2008) a recommandé un ensemble de réformes innovantes pour l'enseignement des sciences, en intégrant les questions environnementales dans le programme scientifique, pour répondre au besoin de faire de l'école un lieu d'éducation citoyenne. Trois approches ont été proposées pour faire progresser l'apprentissage des sciences en Europe : la promotion d'un enseignement précoce des sciences (dès le plus jeune âge) ; la rénovation des méthodes pédagogiques ; et la formation initiale et continue des professeurs.

Dans le cas d'une éducation au changement climatique, il s'agit de commencer par faire comprendre aux apprenants les enjeux du changement climatique et d'initier une culture de l'éducation scientifique, stimulée par la curiosité et l'envie d'apprendre. Besson et al. (2010) ont soulevé les difficultés d'une telle démarche : *« les concepts de physique cruciaux impliqués pour comprendre l'effet de serre (absorption, transparence, corps noir) sont généralement traités superficiellement, à la fois par les manuels et les enseignants »*. Tasquier et al. (2013) ont également insisté sur les limites d'une telle approche, *« le traitement des problèmes environnementaux tels que le changement climatique dans l'apprentissage des sciences, ne semblent pas suffisantes pour favoriser un changement de comportement »* (Tasquier et al., 2013).

Malgré ces insuffisances, les problèmes environnementaux comme le réchauffement climatique reste un domaine stimulant pour motiver les apprenants. Ainsi plusieurs spécialistes suggèrent de les introduire dans les programmes éducatifs pour permettre à ces derniers « *d'approfondir leurs connaissances en physique mais aussi d'examiner des sujets généraux comme la modélisation* » (Svihla & Linn, 2011). Concernant les changements de comportements, certains chercheurs ont tendance à mettre l'accent « *sur le potentiel de compréhension pour engendrer des changements de comportement* » (Reynolds et al. 2010 ; Read et al. 1994), tandis que d'autres suggèrent que « *l'augmentation de la quantité de données pertinentes sur des informations relatives au changement climatique ne signifie pas que cette action sera automatiquement effectuée* » (Leiserowitz et al. 2010).

Les connaissances alimentant un registre des savoirs, il est nécessaire de cerner les différents types de connaissances nécessaires à la compréhension du changement climatique et susceptibles de générer des changements de comportements. D'après Tasquier et al. (2013), « *Deux types de connaissances semblent être fondamentaux* ». Le premier type de connaissances met l'accent sur « *la compréhension de dynamique causale de base menant au changement climatique, car si on ne comprend pas comment et pourquoi les gaz à effet de serre sont responsables du réchauffement climatique, ils ne penseront même pas à réduire les émissions de CO₂* » (Pongiglione, 2012). Le second type se réfère au « *savoir procédural, c'est-à-dire des informations pratiques et contextualisées localement qui aident les personnes à traduire leurs convictions relatives au changement climatique en actions concrètes* » (Kaiser et Fuhrer, 2003).

Dans le domaine politique, d'importants travaux, comme ceux de Hamilton (2010), ont mis « *en évidence des effets d'interaction entre croyance politique et éducation au changement climatique* ». S'appuyant sur les rapports du GIEC et les résumés à destination des décideurs politiques, il note qu'aux Etats-Unis, « *ces preuves scientifiques accumulées sur le changement climatique apparaissent, à première vue, ne pas avoir déplacé très loin l'opinion publique américaine* » (ibid.). Afin de toucher un public averti et idéologiquement réceptif, des campagnes de sensibilisation basées sur la diffusion d'arguments scientifiques ont été menées sur le sol américain. Reflétant le succès de tels arguments, les sondages ont noté que l'inquiétude suscitée par le changement climatique et son éducation augmentait chez les démocrates tandis que qu'elle diminuait chez les républicains. Cette absence de volonté politique pour riposter efficacement contre les impacts du changement climatique se traduit par une contradiction manifeste entre le discours officiel des décideurs et les modèles socioéconomiques qu'ils proposent. En plus des interactions significatives que révèlent l'analyse multivariée d'Hamilton, ces résultats empiriques concordant avec d'autres interprétations théoriques soulignent que « *les préoccupations sociales classiquement identifiées concernant les préoccupations relatives à l'environnement en général et au climat en particulier ont changé ces dernières années* » (ibid.).

Des travaux similaires sont à noter dans le domaine économique. Le rapport STERN (2006), intitulé « *The Economics of Climate Change* », s'est attaché à analyser les impacts du changement climatique sur la croissance et le développement, à présenter les réponses politiques en matière d'atténuation et d'adaptation aux risques climatiques ainsi que les réponses à apporter... L'une de ces réponses introduit une éducation aux changements climatiques, impulsée par les Etats : « *Fostering a shared understanding of the nature of climate change, and its consequences, is critical in shaping behaviour, as well as underpinning national and international action. Governments can be a catalyst for dialogue through evidence, education, persuasion and discussion. Educating those currently at school about climate change will help to shape and sustain future policy-making, and a broad public and international debate will support today's policy-makers in taking strong action now* » (2006, p. xxi). Si le changement climatique est bien le résultat d'une externalité liée à l'émissions de gaz à effet de serre par nos activités économiques, il ne s'agit pas de n'importe quelle externalité : elle est globale dans ses causes et ses conséquences, les impacts sont perceptibles et persistants à long terme, les incertitudes et les risques en termes d'impacts économiques sont systémiques, il y a un risque sérieux et important de changements irréversibles. Les réponses à apporter doivent être à la mesure du problème : « *The breadth, magnitude and nature of impacts imply that several ethical perspectives, such as those focusing on welfare, equity and justice, freedoms and rights, are relevant. Most of these perspectives imply that the outcomes of climate-change policy are to be understood in terms of impacts on consumption, health, education and the environment over time but different ethical perspectives may point to different policy recommendations* » (2006, p. 23). L'information, l'éducation et la discussion publique constituent d'excellents outils pour forger les comportements « raisonnables » des citoyens du monde. Le changement climatique ne sous-tend pas uniquement des risques potentiels ou avérés, mais également des remises fondamentales des politiques structurelles mises en place depuis des décennies par les grandes institutions internationales. En 2008, le Rapport sur le Développement Humain des Nations-Unis (UNDP) n'hésitait pas à évoquer la responsabilité du changement climatique dans les échecs répétés en matière d'Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) et sur l'éducation notamment : « *Climate change is hampering efforts to deliver the MDG promise. Looking to the future, the danger is that it will stall and then reverse progress built-up over generations not just in cutting extreme poverty, but in health, nutrition, education and other areas* » (UNDP, 2007).

En se basant sur ces deux rapports, Bangay et Blum (2010) ont insisté sur le fait que « *le rôle de l'éducation pour relever les défis sur le changement climatique est de plus en plus reconnu. Ils montrent aussi la nécessité d'associer l'offre et la demande éducative aux impacts possibles du changement climatique et de la dégradation de l'environnement* » (Bangay et Blum, 2010). Ils notent cependant que « *la capacité de l'éducation pour contribuer aux mesures d'adaptation et d'atténuation n'a pas encore pénétré dans la pensée dominante du*

développement » (ibid.). Deux recommandations sont préconisées. Premièrement, « *le potentiel de l'ensemble des domaines de compétences et des canaux éducatifs, formels et non formels, et du primaire à travers l'enseignement supérieur et l'éducation des adultes, doivent être investis* » (ibid.). Deuxièmement, « *les éducateurs doivent reconnaître les dangers de l'étiqutage et les idées préconçues (idées fausses) qui surviennent souvent lors de l'utilisation de termes tels que « éducation au développement durable » surtout que de telles idées fausses ont eu tendance à limiter la capacité transformatrice d'une telle éducation* » (ibid.).

« *La clarification conceptuelle* » (Pellaud, 2011) semble donc fondamentale dans ce domaine. Elle nous pousse à éclairer nos choix, non pas à fournir simplement de nouveaux intrants au programme déjà existants mais plutôt d'examiner dans quelle mesure les systèmes éducatifs existants peuvent préparer les individus à relever les défis du changement climatique. Eduquer aux changements climatiques nécessite en premier lieu des enseignants alphabétisés et formés sur le climat. De nombreuses organisations, dont la NASA, la NOAA et la NSF, ont octroyé des subventions pour sensibiliser le public au changement climatique et améliorer l'état de l'éducation en élaborant des programmes élargis, du matériel pédagogique et en formant des enseignants du primaire et du secondaire. Depuis 2003, l'UGU (Union européenne des géosciences) organise un séminaire sur une semaine, GIFT (Information géophysique pour les enseignants), à l'intention de groupes de 70 enseignants européens réunis à l'Assemblée générale de l'EGU à Vienne. Chaque année, le séminaire aborde un sujet différent : « *l'eau ; L'acidification des océans ; évolution et biodiversité ; énergie et développement durable ; changement climatique, risques naturels et sociétés ; la terre vue de l'espace ; le cycle du carbone ; les géosciences dans la ville ; les régions polaires ; l'histoire de la terre ; les océans* ». Tous ces sujets sont plus ou moins liés au changement climatique. Les enseignants participant aux séminaires apprennent les sciences du climat directement auprès des scientifiques et partagent leurs expériences d'enseignement.

Notre travail de recherche est symptomatique des difficultés rencontrées pour saisir les savoirs nécessaires et suffisants, identifier les représentations (sociales mais également idéologiques) des apprenants (voir tout simplement des citoyens), proposer des démarches pédagogiques complémentaires, utiliser des outils didactiques appropriés au contexte et imaginer le référentiel de compétences propice à l'institution d'une éducation aux changements climatiques. Les articles qui composent cette thèse, renvoient chacun à une littérature puisant ses sources dans l'interdisciplinarité. Il s'agit d'interroger les savoirs scientifiques du climat et de les mettre en interaction avec les savoirs issus des sciences économiques et des sciences de l'éducation ; d'intégrer une approche du climat via les questions socialement vives (le climat étant un objet à multiples controverses) ; de comprendre les tenants et aboutissants d'une *éducation à* (une histoire des éducations à est ici nécessaire pour comprendre les passages successifs d'une éducation à l'environnement à une éducation au développement durable à une éducation aux changements climatiques en vue d'un développement

durable) ; de cerner le rôle des parties prenantes (ici l'UNESCO) dans l'émergence et la constitution d'une ECCDD ; d'imaginer les modèles éducatifs de demain.

7. Cadre méthodologique

Le développement durable est par nature portée par un ensemble de disciplines qu'il convient de reconnecter en fonction des thèmes abordés. Les changements climatiques sont en train de modifier profondément la nature qui nous entoure (influence sur les saisons, l'érosion de la biodiversité, la disponibilité des terres...). Ils participent également au remodelage du paysage socioéconomique (déplacement des populations, modification des conditions agronomiques des terres et donc des productions agricoles, problèmes liés à la sécurité et à la souveraineté alimentaire). Ils sont enfin générateurs d'événements extrêmes telles que des inondations, des ouragans et d'autres catastrophes naturelles.

Ces situations contextualisées et problématisées – notre problématique est bien de clarifier le champ, les caractéristiques et les principes d'une Education aux Changements Climatiques en vue d'un Développement Durable (ECCDD) – nous ont amené à privilégier deux clés entrées méthodologiques : la dynamique des systèmes complexes et le modèle REDOC.

7.1 La dynamique des systèmes complexes

La Dynamique des Systèmes Complexes (DSC) est une juxtaposition de termes, systèmes et complexité, qui ne relèvent pas uniquement du domaine conceptuel, ils incarnent également un changement de cadre méthodologique.

Accepter la complexité revient à lutter contre la pathologie du savoir, qu'Edgar Morin a largement décrit sous le terme de « Paradigme de la simplification » dans les deux volumes qui constituent sa *Méthode* (1977 – 1980) et son opuscule *Introduction à la Pensée Complexe* (2005, p. 18) : « *Nous vivons sous l'empire des principes de disjonction, de réduction et d'abstraction dont l'ensemble constitue ce que j'appelle le paradigme de la simplification* ». Une situation complexe impose la nécessité d'une vision globale du contexte et de considérer tous les facteurs qui entrent en interaction pour expliquer un phénomène (logique d'une chaîne causale dont il convient de fixer les limites du terrain de jeu). Elle a une dimension quantitative, c'est « *l'extrême quantité d'interactions et d'interférences entre un très grand nombre d'unités* » (Morin, 2005, p. 48) mais également qualitative, la complexité s'accompagne d'indéterminations et de phénomènes aléatoires, elle convoque la notion d'incertitude « *au sein de systèmes richement organisés* » (Morin, 2005, p. 49). La difficulté de la pensée complexe réside principalement dans le fait qu'elle nous oblige à nous confronter au jeu infini des interactions, à la solidarité des phénomènes entre eux, à l'incertitude et à la contradiction, Edgar Morin a élaboré des outils conceptuels, plus précisément trois

principes permettant d’entrevoir le visage de ce nouveau paradigme. Il s’agit (1) du *principe dialogique* qui associe deux termes complémentaires et antagonistes. La complexité serait ainsi liée à un certain mélange d’ordre et de désordre, porteur de véritable rupture épistémologique. Ces deux termes collaborent et produisent de l’organisation et de la complexité ; (2) du *principe de récursion organisationnelle* (qui rappelle le processus du tourbillon) qui s’appuie sur l’idée que les produits et les effets sont à la fois causes et producteurs de ce qui les engendre. Ainsi la société est le résultat des interactions entre les individus, toutefois, une fois produite, la société rétroagit sur les individus ; et enfin du *principe hologrammatique* qui renvoie aux énoncés suivants : la partie est dans le tout et le tout est dans la partie. En d’autres termes, l’hologramme propose de dépasser l’approche réductionniste (qui ne voit que les parties) et l’approche holiste (qui ne voit que le tout). Dans son ouvrage *Pour une Education au Développement Durable* (2011), Francine Pellaud insistait sur le fait que le développement durable imposait un changement de paradigme et que dans la droite lignée des travaux de Morin, il était possible de définir un ensemble de principes (relativité, gérance des flux, non permanence, non certitude, ambivalence, interdépendance...) permettant d’aborder le développement durable et donc les changements climatiques.

Figure 5 : Les principes qui font changer notre compréhension du monde

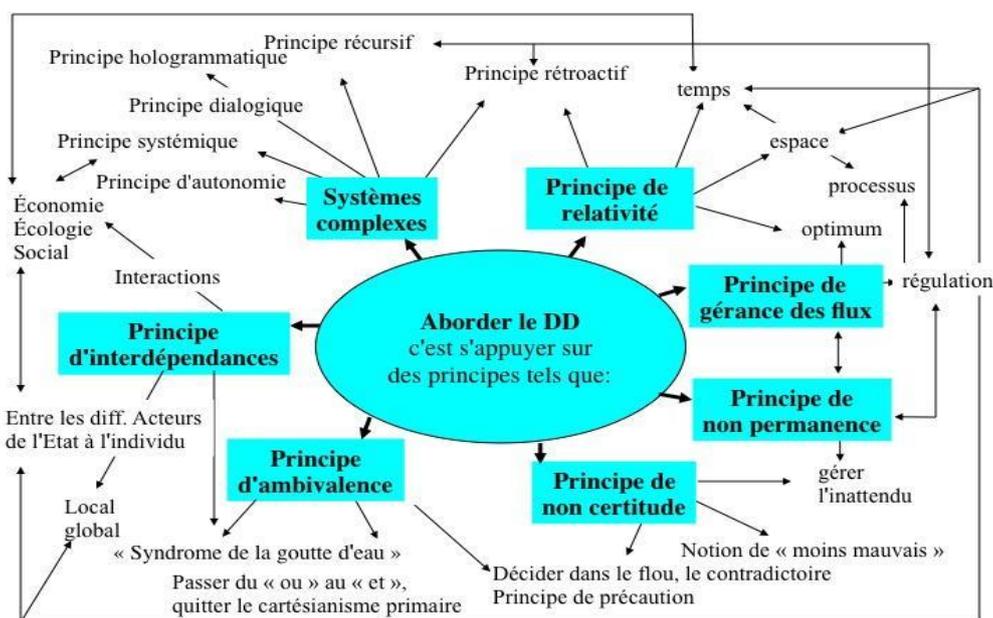


Figure 1: PELLAUD, 2000-2012

Source : Pellaud (2011, 2013).

Cette complexité a néanmoins besoin d’un terrain de jeu pour s’exprimer et s’affranchir des contraintes du rationalisme et du réductionnisme. Le terrain, elle le trouve dans l’analyse systémique. L’analyse systémique ne doit pas être considérée comme une science, une théorie ou une discipline (Diemer, 2013, 2017), il s’agit avant

tout d'une méthodologie « permettant de rassembler et d'organiser les connaissances en vue d'une plus grande efficacité de l'action » (Rosnay, 1975, p. 91). Elle est née du rapprochement de plusieurs disciplines dont la cybernétique (Wiener, 1948), la théorie de l'information (Shannon, 1948) et la théorie des systèmes (Von Bertalanffy, 1968). Plus qu'une opposition farouche à l'approche analytique, l'analyse systémique ouvre de nouveaux horizons à la démarche scientifique.

Tableau 5 : Approche analytique vs Approche systémique

<i>Approche analytique</i>	<i>Approche systémique</i>
Isole, se centre sur les éléments	Relie, se concentre sur les interactions entre les éléments
Considère la nature des interactions	Considère les effets des interactions
S'appuie sur la précision des détails	S'appuie sur la perception globale
Modifie une variable à la fois	Modifie des groupes de variables simultanément
Indépendante de la durée (les phénomènes sont réversibles)	Intègre la durée et l'irréversibilité
La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie	Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action.
Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles	Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes
Conduit à un enseignement disciplinaire	Conduit à un enseignement pluridisciplinaire
Conduit à une action programmée dans son détail	Conduit à une action par objectifs
Connaissance des détails, buts mal définis	Connaissance des buts, détails flous.

Source : Rosnay de (1975, p. 119).

Joel de Rosnay (2007) a précisé les différents constituants d'un système : 1° des éléments ou agents en interaction ; 2° de très nombreuses relations qui s'établissent entre ces éléments ou ces agents ; 3° des niveaux hiérarchiques formant des réseaux interdépendants et comprenant des nœuds au niveau de chaque réseau ; 4° un comportement dynamique dans le temps, généralement non linéaire ; 5° une capacité à évoluer dans le temps et à prendre le chemin d'une complexité croissante.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons cherché à mobiliser le champ fertile de l'analyse systémique avec l'étude des phénomènes complexes, par l'intermédiaire de la dynamique des systèmes (*System Dynamics*). Cette méthode a été développée dans les années 50 au MIT par J.J. Forrester (1963, 1969), puis popularisée par la publication du Rapport « *Limits to Growth* » (Meadows et al., 1972). Selon Forrester (1961), la notion de système implique une structure de fonctions en interaction, tant les fonctions séparées que les interactions définies par la structure contribuent au comportement du système. Ainsi pour décrire un système, il convient non seulement de décrire les fonctions séparées mais également leur méthode d'interaction : "As used here, a system means a grouping of parts that operate together for a common purpose" (Forrester, 1968, p. 1). Ainsi, pour identifier la structure d'un système spécifique, il faut comprendre la nature fondamentale de la structure commune à tous les systèmes dynamiques (Diemer, 2018). Dans ses deux ouvrages *Principles of Systems* (1968) et *Urban Dynamics* (1969), Forrester proposera une description détaillée de la

dynamique des systèmes autour de quatre niveaux hiérarchiques : (1) une limite fermée du système ; (2) des boucles de rétroaction comme éléments structurants à l'intérieur des limites du système ; (3) des variables de niveau (état) représentant les accumulations dans les boucles ; (4) des variables de vitesse (débit) représentant l'activité dans les boucles de rétroaction.

Tableau 6: Les quatre niveaux définissant la structure d'un système

A Closed boundary	
1 Feedback loops	
a Levels	
b Rates	
	(1) Goal
	(2) Observed condition
	(3) Discrepancy
	(4) Desired action

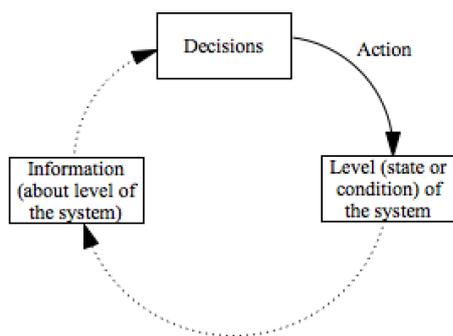
Source : Forrester (1967, p. 2)

Cette conceptualisation d'un système met l'accent sur deux points importants inhérent à la méthode de la dynamique des systèmes.

La Limite d'un système « fermé » : Pour élaborer un système, il faut établir la limite à l'intérieur de laquelle se produisent les interactions du système, ce sont elles qui lui confèrent son comportement si caractéristique. Ce point reprend la distinction entre variables endogènes et variables exogènes d'un modèle, tout en précisant qu'un système n'est jamais fermé en soi, il le devient lorsque le modélisateur fixe les limites de son étude : « *the closed boundary does not mean that the system is unaffected by outside occurrences. But it does say that those outside occurrences can be viewed as random happenings that impinge on the system and do not themselves give the system its intrinsic growth and stability characteristics* » (Forrester, 1969, p. 12).

La structure des boucles de rétroaction : Le comportement dynamique des systèmes est généré par des boucles de rétroaction (Roberts, 1975). Une boucle de rétroaction est composée de deux types de variables, appelées variables de taux et de niveau. Une boucle de rétroaction est une structure à l'intérieur de laquelle un point de décision - l'équation de vitesse - contrôle un flux d'écoulement ou d'action. L'action est intégrée pour générer un niveau de comportement du système. L'information sur le niveau est la base sur laquelle le débit est contrôlé.

Figure 6: Une boucle de rétroaction



La figure 5 est la forme la plus simple d'un système de rétroaction, il peut y avoir des retards et des distorsions supplémentaires qui apparaissent séquentiellement dans la boucle. Il peut y avoir beaucoup de boucles qui sont interconnectées.

Source : Forrester (1968a, p. 8 – 9)

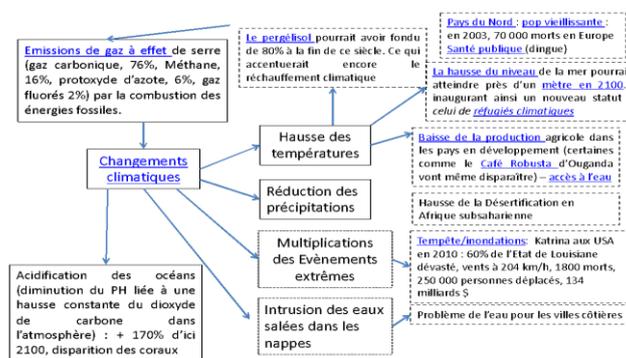
Ainsi, le but de « la modélisation » en dynamique des systèmes est d'expliquer les comportements à partir d'une théorie causale (Lane, Sterman, 2011), puis d'utiliser cette théorie comme base pour concevoir des politiques d'intervention dans la structure du système, et enfin de chercher à changer les comportements à l'intérieur du système pour en améliorer ses performances (Lane, 2008). Chaque étude en dynamique des systèmes commence par une situation problématisée et contextualisée, un ensemble d'hypothèses est ensuite proposé pour décrire la situation analysée (Goodman, 1974). Ces hypothèses sont contenues dans un Modèle Mental en Dynamique des Systèmes (MMDS). Chaque lien causal d'un modèle a une polarité, qui indique le sens d'un effet d'une variable (explicative) sur une autre variable (expliquée). La nature de cette influence dépend du type de lien de causalité considéré. Dans un modèle de dynamique de système, la polarité de chaque boucle de rétroaction est un élément crucial pour comprendre le comportement du modèle. La perturbation d'une boucle peut entraîner le grossissement de l'effet original ; cette réponse instable est connue sous le nom de polarité positive (+) de la boucle de rétroaction (*Reinforcing Loop*). Alternativement, une perturbation peut être contrée, ou résistante par le fonctionnement de la boucle. Cette réponse d'équilibrage est connue sous le nom de polarité négative (-) de la boucle de rétroaction (*Balancing Loop*).

Cette approche méthodologique – que nous avons qualifiée de *Dynamique des Systèmes Complexes* – nous l'avons appliquée à la description du système climatique (Diemer, Gladkykh, Spittler, Ndiaye, Dierickx, 2018⁸) mais également à l'analyse des Objectifs du Développement Durable (ODD) afin de souligner leur interaction. Dans le cas du système climatique, cette représentation permet aux apprenants de cerner les

⁸ Diemer A., Gladkykh G., Spittler N., Ndiaye A., Dierickx F. (2018), How to integrate Energy, Climate and Economics ? Workshop *Facts in Environmental and Energy Economics, Models and Practices, Past and Present*, CIRED Paris, 19-20 Octobre, 45 p.

enchaînements en cascade et donc de présenter l'arbre des causalités, l'arbre des conséquences et l'ensemble des boucles d'un système (Diemer, 2016⁹).

Figure 7 : Arbre causal des changements climatiques



Source : Diemer (2016, p. 9)

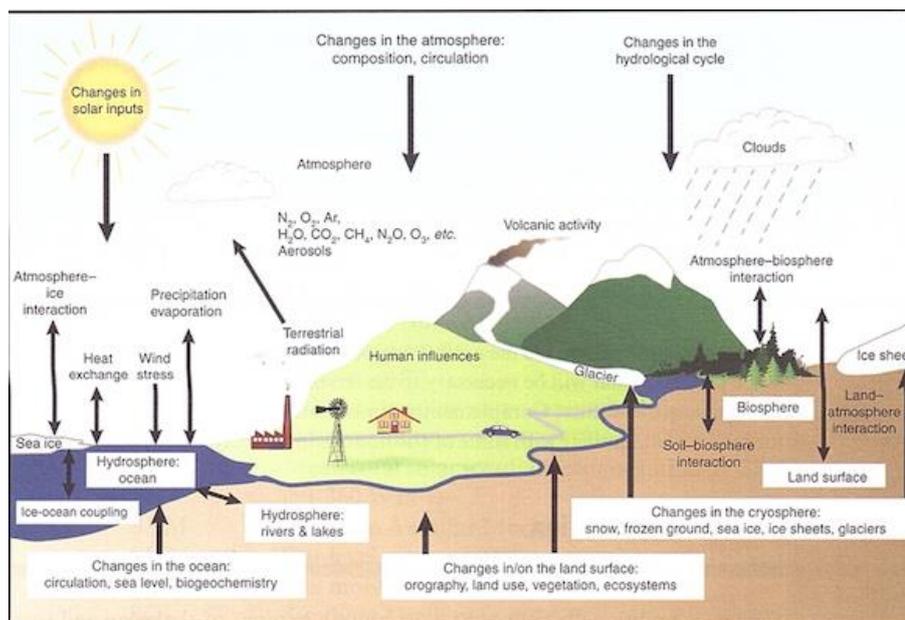
La description du système climatique renvoie à cinq composantes principales - l'atmosphère (l'enveloppe gazeuse entourant la Terre), l'hydrosphère (eau liquide, océans, lacs, eaux souterraines), la cryosphère (eau solide, glace de mer, glaciers, inlandsis), la surface terrestre et la biosphère (tous les organismes vivants), et toutes leurs interactions (IPPC, 2007).

Dans l'atmosphère, l'air sec est principalement composé d'azote (78,08 % en volume), d'oxygène (20,95 % en volume), d'argon (0,93 % en volume) et dans une moindre mesure de dioxyde de carbone (395 ppm ou 0,0395 % en volume). La fraction restante est constituée de divers constituants tels que le néon, l'hélium, le méthane et le krypton. De plus, une vapeur d'eau très variable est présente dans l'air. La teneur en eau peut être mesurée par le rapport entre la masse de vapeur et la masse d'air sec.

Les précipitations et la température sont les variables les plus importantes pour définir le climat d'une région. Les précipitations sont fortement influencées par la circulation atmosphérique à grande échelle qui transporte la vapeur d'eau horizontalement et verticalement. En particulier, les mouvements verticaux sont responsables d'importantes variations de température qui jouent un rôle important dans les processus de condensation et donc dans les précipitations.

Figure 8 : Les différentes composantes du système climatique

⁹ Diemer A. (2016), *Enjeux méthodologiques et économiques en matière de changements climatiques*, Conférence, Maison de la Science, Aubière, mardi 26 octobre, 23 p.



Source : IPCC, 2007

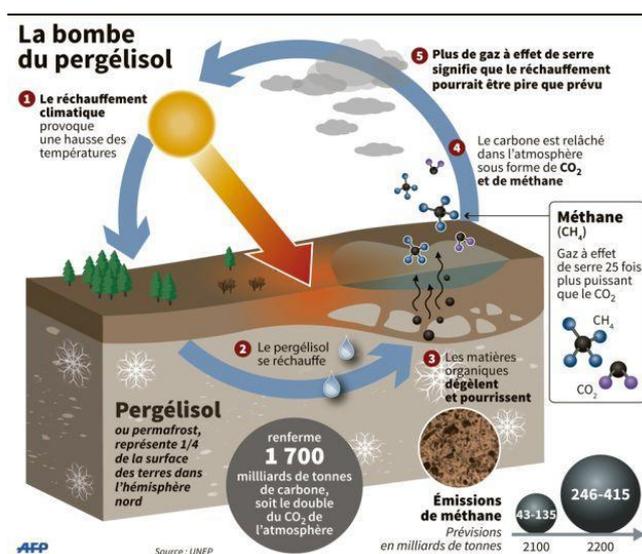
- Dans l'hydrosphère, les océans couvrent environ 71 % de la surface de la Terre et ont une profondeur moyenne d'environ 3 700 m. L'eau de mer est composée de 96,5 % d'eau et de 3,5 % de sels, particules, gaz et matières organiques dissous. Les plus importants de ces composants sont le chlorure et le sodium, qui représentent environ 85 % des matières dissoutes. La salinité est une variable clé en océanographie. Elle influence de nombreuses propriétés de l'eau de mer, comme la densité ou la température du point de congélation, qui passe de 0°C en surface pour l'eau douce pure à -1,8°C en général dans les océans polaires. L'équation d'état de l'eau de mer, qui donne la densité en fonction de la pression, de la température et de la salinité, est une expression non linéaire complexe. Elle montre que la densité augmente avec la salinité ainsi qu'avec la pression, alors qu'elle diminue avec l'augmentation de la température. Ainsi, on considère souvent que la température domine les changements de densité à haute température, alors que la salinité joue un rôle plus important à basse température. Cette contribution plus importante des changements de salinité est particulièrement évidente dans les régions recouvertes de glace de mer, car les variations de température de surface sont très faibles.

La circulation océanique est entraînée par le stress du vent à la surface et par les différences de densité. Dans les centaines de mètres supérieurs, l'influence du vent est dominante. En raison des fortes interactions entre l'océan et l'atmosphère, la température de la surface de la mer est proche de la température de l'air au-dessus de celle-ci. Les régions polaires, où la glace de mer isole l'océan de l'atmosphère froide, constituent une exception. La salinité de surface de la mer est fortement influencée par les flux d'eau douce en surface : un afflux net d'eau douce dilue le sel présent dans les eaux océaniques, entraînant une diminution de la salinité ; une évaporation nette

élimine l'eau de surface, tandis que le sel reste dans l'océan, augmentant la salinité. En conséquence, la salinité atteint son maximum dans les zones subtropicales en raison de l'évaporation importante et des faibles précipitations. La température et la salinité de l'eau de mer sont fortement modifiées en surface par les interactions avec l'atmosphère, ce qui entraîne la formation de diverses masses d'eau.

- La cryosphère est la partie de la surface de la Terre où l'eau est sous forme solide. Elle comprend la couverture de neige, la glace de mer, le sol gelé, la glace de lac et de rivière, les glaciers et les calottes glaciaires. Compte tenu de la répartition actuelle des continents, les surfaces terrestres aux latitudes élevées sont beaucoup plus grandes dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud. Par conséquent, la grande majorité de la couverture neigeuse se trouve dans l'hémisphère nord. La glace de mer, qui est un milieu en mouvement formé lorsque l'eau de mer gèle, ne couvre généralement pas toute la surface de l'océan dans une région donnée. La concentration de glace de mer est définie comme la fraction de la surface d'intérêt qui est effectivement recouverte de glace de mer. Une concentration de glace de 100 % correspond à une banquise continue, tandis qu'une valeur de 0 correspond à la haute mer. Comme la neige, le sol gelé de façon saisonnière couvre une grande partie des continents de l'hémisphère nord. Lorsque la température moyenne annuelle est inférieure à environ $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, le sol peut être gelé en permanence sous une couche active qui est gelée en hiver mais fond en été. Le sol gelé est appelé pergélisol, qui, selon les estimations, couvre plus de 20 % de la superficie terrestre de l'hémisphère Nord.

Figure 9 : Le pergélisol



Source : UNEP

Les calottes glaciaires sont formées par l'accumulation de couches de neige sur des dizaines de milliers d'années. À mesure que la neige tombe à la surface, la pression sur

les couches de neige plus anciennes augmente, les transformant en glace. Les nappes glaciaires (comme les glaciers) ne sont pas stagnantes et s'écoulent généralement lentement vers leurs marges. L'Antarctique est entouré de plaques de glace. Il s'agit de plates-formes flottantes faites de glace provenant du continent qui s'est écoulé le long de la côte jusqu'à l'océan.

La neige et la glace ont un grand albédo, c'est-à-dire qu'elles reflètent la majorité du rayonnement solaire entrant. Elles jouent donc un rôle majeur dans le bilan thermique global de la Terre. En stockant et en libérant la chaleur latente, elles affectent le cycle saisonnier de la température de surface. Elles sont également de bons isolants qui réduisent les pertes de chaleur de la surface sous-jacente (terre et océans) vers l'atmosphère froide en hiver. Plus généralement, la présence de glace de mer limite les échanges de chaleur et de neige entre l'océan et l'atmosphère.

Les calottes glaciaires stockent de grandes quantités d'eau sur la terre ferme. Toute modification de leur volume a donc un effet considérable sur le niveau de la mer et la salinité des océans. On estime que si toutes les nappes glaciaires fondaient complètement, compte tenu du fait que certaines nappes glaciaires sont échouées sous le niveau de la mer, le niveau de la mer augmenterait de plus de 60 cm.

- À la surface de la terre et dans la biosphère, le climat subit de nombreux changements. Par exemple, les chaînes de montagnes comme les Andes et les Rocheuses sont de grandes barrières aux vents d'ouest qui influencent le climat à l'échelle continentale (Walsh, 1994). Les montagnes jouent un rôle important à l'échelle de l'hémisphère en affectant les ondes planétaires et la circulation atmosphérique mondiale. La distance de la côte influence la température et l'aridité d'une région, ce que l'on appelle parfois la continentalité du climat local. La présence de frontières terrestres par rapport à l'océan affecte l'emplacement des forts courants et des détroits qui permettent les échanges d'eau entre les différents bassins. La forme et même l'existence d'une calotte glaciaire sont fortement conditionnées par le substrat rocheux sous-jacent. En outre, le type de végétation présente sur la terre ferme a également une influence critique sur le climat à toutes les échelles spatiales et temporelles. L'un des rôles les plus importants de la végétation terrestre est lié à son albédo. La végétation a généralement un albédo inférieur à celui du sol, et beaucoup plus petit que celui des déserts. C'est pourquoi les déserts subtropicaux comme le Sahara apparaissent comme des régions à albédo particulièrement élevé sur les cartes mondiales (Knoor et Schnitzler, 2006).

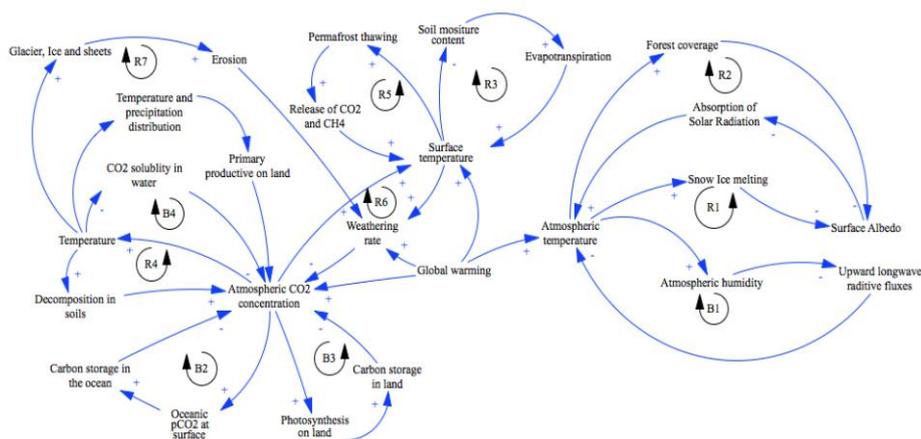
La biosphère terrestre a également un impact évident sur le cycle hydrologique (D'Odorico et al., 2010). Le stockage de l'eau est généralement plus important dans les sols couverts de végétation que sur les terres nues, où le ruissellement direct suit souvent les précipitations. L'eau stockée peut être absorbée plus tard par les racines des plantes et transférée dans l'atmosphère par évapotranspiration. Un autre effet de la couverture végétale est lié à la rugosité de la surface qui influence le stress à

l'interface atmosphère-terre et l'échange turbulent à la surface (Bala, Duffy, Taylor, 2008). Compte tenu de ce rôle climatique de la végétation, il est utile de résumer les variations de ses caractéristiques à travers le globe en définissant différents biomes, qui sont des régions avec des systèmes de végétation à grande échelle distincts (Allen, Tainter, Hoekstra, 2003). On considère généralement que les biomes naturels peuvent être classés selon leurs pourcentages typiques d'herbe et d'arbres en cinq groupes principaux : désert, prairie, arbustes, bois et forêt.

Si le système climatique inclut une analyse du comportement des cinq composantes principales (atmosphère, hydrosphère, cryosphère, surface terrestre et biosphère), de nombreuses perturbations peuvent influencer le système climatique. Le cadre traditionnel de compréhension du changement climatique global implique un forçage externe, une réponse par laquelle le système climatique s'oppose au forçage afin de retrouver l'équilibre, et des rétroactions qui amplifient ou freinent la réponse (Sherwood et al., 2015). Ces perturbations sont de différents types : changements dans la quantité de rayonnement solaire entrant, composition de l'atmosphère...

Pour comparer l'ampleur de ces perturbations et évaluer leur effet sur le climat, il est utile d'analyser leur impact sur l'équilibre radiatif de la Terre. Un forçage radiatif positif correspond à un apport d'énergie plus important dans le système (Goosse, 2015). Les principaux forçages radiatifs qui affectent le climat de la Terre peuvent être regroupés en différentes catégories. Au cours des 250 dernières années, l'évolution des concentrations de GES a joué un rôle dominant. La contribution la plus importante provient de la modification de la concentration atmosphérique de CO₂, mais on pourrait y ajouter l'influence du CH₄, du N₂O et des halocarbures. Si de nombreux aérosols atmosphériques sont naturels (ils peuvent être générés par l'évaporation de la mer, du vent, des forêts, des feux de prairie, de la végétation vivante ou des volcans), les activités humaines produisent également des aérosols par la combustion de combustibles fossiles ou de biomasse et par la modification du couvert superficiel naturel qui influence la quantité de poussière transportée par le vent. Parmi les aérosols anthropiques, les aérosols sulfatés et le carbone noir ont reçu une attention particulière en climatologie. Le sulfate est principalement produit par l'oxydation du dioxyde de soufre (SO₂) en phase aqueuse, la principale source anthropique étant la combustion de combustibles fossiles, en particulier le charbon. Le carbone noir est le résultat d'une combustion incomplète lors de la combustion de combustibles fossiles et de biomasse. Toutes les perturbations liées aux principales composantes du système climatique peuvent être reprises par des effets de rétroaction (boucles) et des retards.

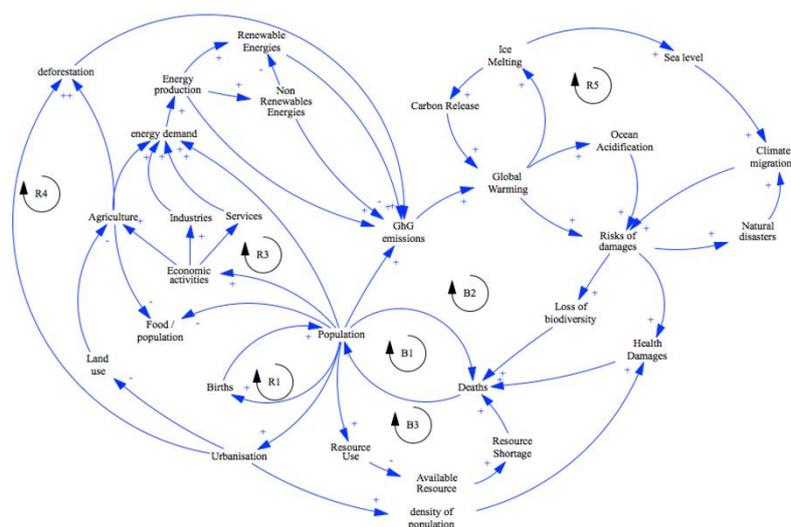
Figure 10 : La complexité du système climatique



Source : Diemer, Gladkykh, Spittler, Ndiaye, Dierickx (2018, p. 39)

Une fois le système climatique créé, rien ne nous empêche de chercher ses interactions avec le système énergétique et le système économique.

Figure 11 : La dynamique du système global



Source : Diemer, Gladkykh, Spittler, Ndiaye, Dierickx (2018, p. 40)

D'un point de vue pédagogique, cette approche s'apparente à un outil intellectuel que l'on retrouve en éducation au développement durable, les cartes conceptuelles. Toutefois, trois différences importantes méritent d'être signalées.

Premièrement, la dynamique des systèmes s'inscrit dans un cadre analytique plus large que les anglo-saxons appellent *Thinking System* (Penser système). Dans un ouvrage intitulé « *The Systems Thinking Playbook* », Linda Booth Sweeney et Dennis Meadows (2010) présentent cette approche comme un terme général utilisé pour représenter un ensemble de méthodes et d'outils qui se concentrent sur les systèmes - plutôt que sur les parties - pour définir et résoudre des problèmes complexes et pour favoriser un apprentissage et une conceptualisation plus efficaces. La pratique du

« Penser système » « *helps us to stop operating from crisis to crisis, and to think in a less fragmented, more integrated way* » (2010, p. 1). Les auteurs vont même jusqu'à définir le profil du « penseur système » (Diemer, 2017). C'est quelqu'un qui voit l'ensemble du tableau, qui change de perspectives pour entrevoir de nouveaux « *leverage points* » dans les systèmes complexes, qui recherche les interdépendances, qui considère que les modèles mentaux permettent d'accéder au futur, qui accorde de l'attention et du crédit au long terme, qui utilise une vision périphérique pour appréhender des relations complexes de cause à effet, qui s'intéresse à l'émergence des conséquences imprévues, qui se concentre sur la structure, qui accepte la tension du paradoxe et de la controverse sans essayer de les résoudre rapidement, qui cherche à rendre le système visible à travers des cartes mentales (de causalité) et des modèles informatiques, qui recherche les stocks ou les accumulations et les retards et l'inertie qu'ils peuvent créer, qui surveille les états d'esprit gagnant/perdant, sachant qu'ils aggravent généralement les choses dans les situations de forte interdépendance, qui se considère comme faisant partie du système, et non pas en dehors du système.

Deuxièmement, si elle constitue une excellente méthode pour appréhender les problèmes complexes, la dynamique des systèmes n'est qu'un moyen de penser système et de modéliser le système. Autrement dit, il convient de lui associer d'autres outils, notamment des cartes de controverses, des cartes d'acteurs ou une analyse de discours. En effet, pour aborder une question didactique, il convient de prendre en compte le système (les acteurs, leurs multiples interactions, le contexte...) dans sa globalité et de croiser différents points de vue (confrontation des experts, remise en cause des pseudo-vérités, développement de l'esprit critique). L'analyse de discours inscrite dans une séquence temporelle peut permettre de comprendre l'origine des controverses et les acteurs qui l'ont lancée.

Troisièmement, c'est la combinaison de la dynamique des systèmes et des cartes d'acteurs qui permet de comprendre les trajectoires que peut prendre une controverse ou un débat autour d'un enjeu de société. Il est alors possible de scénariser des séquences pédagogiques ou de mettre les apprenants en face de plusieurs scénarios qu'ils devront discuter.

Dans notre travail de recherche, nous nous sommes surtout penchés sur la méthode « dynamique des systèmes » pour appréhender le système climatique et cerner les enjeux des ODD, toutefois, cette méthode ne peut se suffire à elle-seule. Comme le rappelle Diemer (2019), « *Modéliser des phénomènes environnementaux et socio-économiques suppose de Penser (Système), de Cartographier (les acteurs) et de Scénariser (des trajectoires potentielles)* ».

7.2. Le modèle REDOC

La deuxième clé méthodologique de notre travail de recherche repose sur un modèle baptisé REDOC (pour REprésentations, Démarche pédagogique, Outils didactiques et Compétences), développé par l'Observatoire des Représentations du Développement Durable (OR2D) dans le cadre d'une étude réalisée pour le compte de l'IFADEM (Initiative Francophone pour la Formation des Maîtres), un opérateur de l'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) et de l'OIF (Organisation Internationale de la Francophonie). Cette étude visait à poser les bases d'une éducation au développement durable dans le cycle primaire de cinq pays d'Afrique (Bénin, Burkina-Faso, RDC, Niger, Togo). Comme le souligne Arnaud Diemer en préambule de l'étude, « un processus destiné à doter tous les participants de la scène éducative, qu'ils s'agissent des étudiants, des enseignants et d'autres intervenants, des moyens d'améliorer leurs pratiques grâce à des expériences éclairées et nourries de savoirs théoriques en cours » (Catroux, 2002).

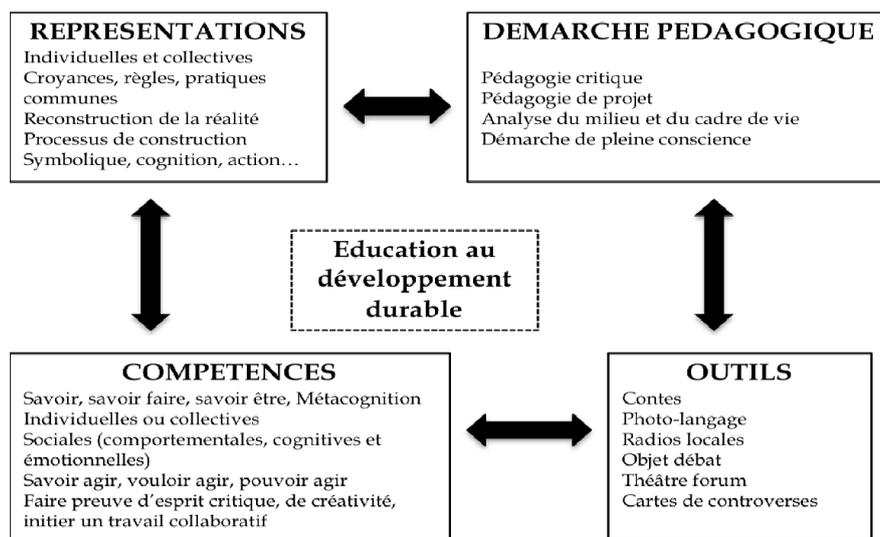
Dans le cadre de ce projet, les membres de l'OR2D ont associé à chacun de leurs déplacements (une semaine sur le terrain) dans les pays visés par l'IFADEM, un module de sensibilisation et de formation (2 jours) à l'éducation au développement durable introduisant des débats sur les représentations, des démarches pédagogiques, des outils didactiques et les compétences attendues. Grâce au réseau francophone de l'AUF et à l'aide des différents responsables chargés du projet IFADEM, il a été permis de réunir dans chaque pays, un groupe de 15 à 20 professeurs des écoles volontaires et désireux de se confronter à de nouvelles pratiques éducatives. De ce fait, tous les participants deviennent des acteurs consentants du processus de recherche.

D'une manière générale, le modèle REDOC a été conçu à partir de recommandations visant à implanter l'éducation au développement durable dans les systèmes éducatifs nationaux. L'EDD consistant à (i) intégrer dans l'enseignement et l'apprentissage les thèmes clés du développement durable, comme le changement climatique, la prévention des catastrophes, la biodiversité, la réduction de la pauvreté ou la consommation durable (déclaration de l'Unesco du 8 novembre 2012), (ii) à adopter des méthodes pédagogiques participatives visant à motiver et autonomiser les apprenants, pour qu'ils modifient leurs comportements et deviennent les acteurs du développement durable; (iii) à favoriser l'acquisition de compétences permettant aux apprenants de développer leur esprit critique, d'imaginer des scénarios prospectifs et de prendre des décisions communes.

La démarche induite par le modèle REDOC (Diemer, 2009 ; Kerneis, Marquat, Diemer, 2014) revient (1) à partir des représentations des individus ou des groupes d'individus via des techniques tels que les questionnaires, les entretiens, le focus groupe ou l'analyse de discours (utilisation du logiciel TROPES) ; (2) pour élaborer une *Démarche pédagogique* (cette dernière s'appuyant sur plusieurs composants : réflexion critique,

projet collectif et collaboratif, volonté d’agir, recensement des bonnes pratiques, analyse du milieu et du cadre de vie, pleine conscience...); (3) reposant sur un certain nombre d’Outils novateurs (conte, photo-langage, objet débat, radios locales, théâtre forum, cartes de controverses...); (4) destinés à faire émerger des Compétences (individuelles, collectives, cognitives, émotionnelles...).

Figure 12 : Cadre REDOC



Source : Diemer, Kerneis, Marquat (2014)

Nous n’irons pas plus loin dans la description de ce modèle, car elle est largement détaillée dans plusieurs articles qui constituent cette thèse. Toutefois, nous souhaiterions préciser les trois points suivants. Premièrement, le modèle REDOC s’apparente avant tout à un moyen mnémotechnique pour structurer un projet de recherche action. Il indique les étapes nécessaires pour produire un livret référentiel à destination des enseignants du primaire. En tant que modèle, il décrit, à la fois un schéma de pensée (s’inscrivant dans une logique de System Thinking) et une manière d’appréhender des phénomènes ou des objets complexes. Deuxièmement, notre travail de recherche n’a pas cherché à tester l’intégralité du modèle REDOC, mais plutôt à ancrer les principes d’une éducation aux changements climatiques en vue d’un développement durable (ECCDD) dans les représentations sociales et collectives. Une étape qui nous semble essentielle pour, à la fois, distiller des connaissances et développer un esprit critique et un processus d’auto-construction des ressources éducatives. La production du questionnaire entendait bien faire le point sur l’usage de concepts – développement durable – changements climatiques – Education au développement durable – Education aux changements climatiques. Troisièmement, le registre des savoirs mobilisés et la dynamique des systèmes complexes nous ont permis d’alimenter le modèle REDOC, notamment lorsqu’il s’est agi de réfléchir sur

les connaissances et les compétences attendues. Au terme de ce travail, nous n'avons pas rédigé d'article sur cette question cruciale des compétences, toutefois, les conclusions auxquelles nous parvenons, ont initié un projet d'article qui devrait voir le jour dans les semaines qui suivront la soutenance de cette thèse.

PUBLICATION DES ARTICLES

Tableau des articles publiés ou en cours de publication

	Thème	Titre article	Revue	Publication
Article 1	Comprendre le climat	Le climat, du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée	Revue Francophone du Développement Durable	Publié en mars 2017
Article 2	Comprendre la modélisation du climat via les IAM	Integrated assessment models : How integrate Economics, Energy and Climate	Chapitre 1 Integrated Assessment Models and others Climate Policy Tool: Challenges and Issues	Publication Juin 2019
Article 3	Analyser un modèle climatique particulier ayant des retombées économiques	Contributions of DICE and RICE to implement Integrated Assessment Models (IAM)	Chapter 6 Integrated Assessment Models and others Climate Policy Tool: Challenges and Issues (2019)	Publication en juin 2019
Article 4	Comprendre le passage de l'éducation à l'environnement à l'éducation au développement durable	Environmental Education to Education for Sustainable Development: Challenges and Issues	International Journal of Humanities and Social Science	Publié Janvier 2019
Article 5	Présentation d'une approche conceptuelle et méthodologique de l'EDD	Education for Sustainable Development: a conceptual and methodological approach	International Journal of Education	Publié en mai 2019
Article 6	Articuler EDD et ODD	De l'éducation au développement durable (EDD) aux Objectifs du Développement Durable (ODD), de nouvelles prescriptions pour les pays du Sud ?	Revue Francophone du Développement Durable	Publié en décembre 2017
Article 7	ECCDD Utilisation de REDOC dans le cas du Sénégal	Eduquer aux changements climatiques au Sénégal, une initiation au modèle REDOC via les représentations sociales	ERE	En cours de révision

Le climat, du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée (*Integrated Assessment Models*)¹⁰

¹⁰ Nous remercions les deux experts qui ont rapporté sur ce texte et qui nous ont permis d'améliorer la version proposée dans la Revue Francophone du Développement Durable.

Arnaud DIEMER, Abdourakhmane NDIAYE, Ganna GLADKYKH

Publication dans la Revue Francophone du Développement Durable, n°9, mars 2017, p. 7-56

Résumé

Le climat fait l'objet de nombreuses attentions de la part des scientifiques, notamment depuis que les travaux du GIEC ont confirmé l'hypothèse d'un réchauffement climatique dû aux activités humaines. Au-delà de cette conclusion, qui tendrait à remettre en cause les critiques émanant des climato-sceptiques, il convient de comprendre le processus qui a fait passer le climat, du stade de simples observations à celui de savoir scientifique. Un savoir, qui est de plus en plus utilisé de nos jours, pour construire des modèles intégrés (principalement autour du triptyque : climat, énergie et économie) susceptibles d'aider les institutions internationales et les grands décideurs politiques à prendre des décisions engageant l'humanité sur le long terme.

Mots Clés

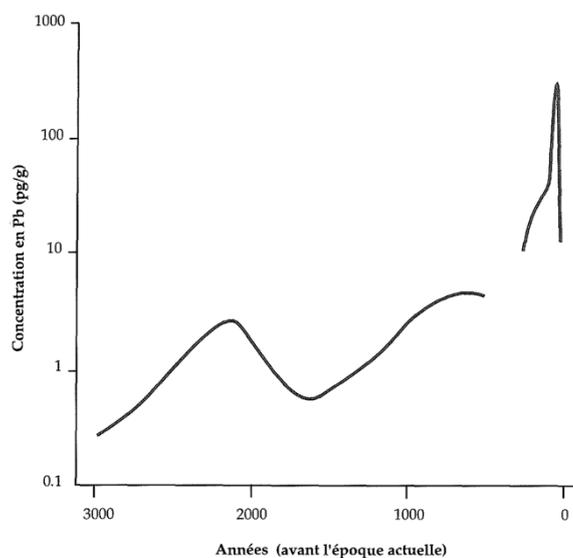
Climat, Développement durable, IAM, Modèles d'intégration assignée

Il y a encore trois siècles, l'homme vivait en parfaite harmonie avec la nature. Les atteintes qu'il portait à son intégrité, n'entraînaient pas de réactions visibles durant cette époque. L'introduction de la sélection génétique (animale/végétale), le début de la monoculture, la découverte de la machine¹¹ et de l'énergie du feu (Carnot, 1824) vont progressivement faire entrer l'agriculture et l'industrie dans une phase de conquête de la nature. Dès lors et de manière progressive, l'homme a pesé sur son environnement, la perte de la diversité biologique ou encore les changements climatiques en sont de puissants exemples

William Ruddiman (2005, 2009), paléo-climatologue à l'université de Virginie, avance ainsi que la déforestation massive liée à l'élevage et l'agriculture serait à l'origine du réchauffement climatique, et ce, bien avant l'ère industrielle. De leur côté, Claude Boutron et Jean Pierre Candelone (1993, 1995) ont fait un rapprochement entre l'exploitation du plomb, l'apogée de l'empire romain et le changement climatique. En étudiant les concentrations de plomb et ses isotopes dans les carottes de glace provenant de l'Arctique, ils ont mis en évidence la présence d'un étrange pic de concentration, s'élevant à quatre fois la teneur naturelle antérieure (Chanel et al., 1999). Pour aboutir à ce résultat, ils ont procédé par décomposition radiogénique du plomb, ce qui permet de dater ce pic à environ 2000 ans. Cette signature isotopique correspond à l'activité minière des romains. Ainsi, les romains et les grecs auraient émis vers l'atmosphère jusqu'à 4000 tonnes de plomb par an (Candelone et al., 1995). A la disparition de l'empire romain, cette concentration tombe à un niveau très bas, pour s'accroître ensuite avec le début de l'industrialisation en Europe.

¹¹ En 1712, l'anglais Thomas Newcomen, invente une machine permettant d'effectuer un pompage efficace des eaux souterraines dans les mines et ouvre l'ère de l'énergie.

Figure 1 : concentration du plomb (en pg/g de glace) dans la carotte glacière du Groenland central



Source : Candelone et al. (1995)

Si la capacité de l'activité humaine à altérer notre environnement est bien un phénomène ancien (Tainter, 2017), quelques exemples emblématiques vont alerter l'opinion dans les années 50, puis générer une prise de conscience dans les années 70.

C'est tout d'abord le fameux smog londonien, résultante de la combustion effrénée du charbon durant l'ère industrielle (et qui se traduit par un brouillard d'une rare intensité où se combinent des particules de poussière et des gouttelettes d'eau) qui réapparaît à Los Angeles dans les années 50. Dans *Closing Circle*, Barry Commoner (1971) n'hésitera pas à relier la crise environnementale aux gaz d'échappement émis par l'industrie automobile : « En 1953, à défaut d'une épuration de l'air, des constatations nouvelles permettaient d'expliquer plus clairement la situation. Des recherches avaient démontré que, pendant que l'industrie pétrolière diffusait environ 500 tonnes par jour d'hydrocarbures dans l'atmosphère, les voitures individuelles, les camions et les autobus en répandaient à peu près 1300 tonnes. En 1957, environ 80% des 2500 tonnes d'hydrocarbures diffusées chaque jour dans cette atmosphère provenaient de la circulation automobile. L'industrie automobile – le véritable coupable venait enfin d'être découvert » (1972, p. 70).

Ce sont ensuite les pluies acides qui font leurs premières victimes en Scandinavie, en Europe occidentale et en Amérique du Nord dans les années 60 et 70¹². Deux polluants

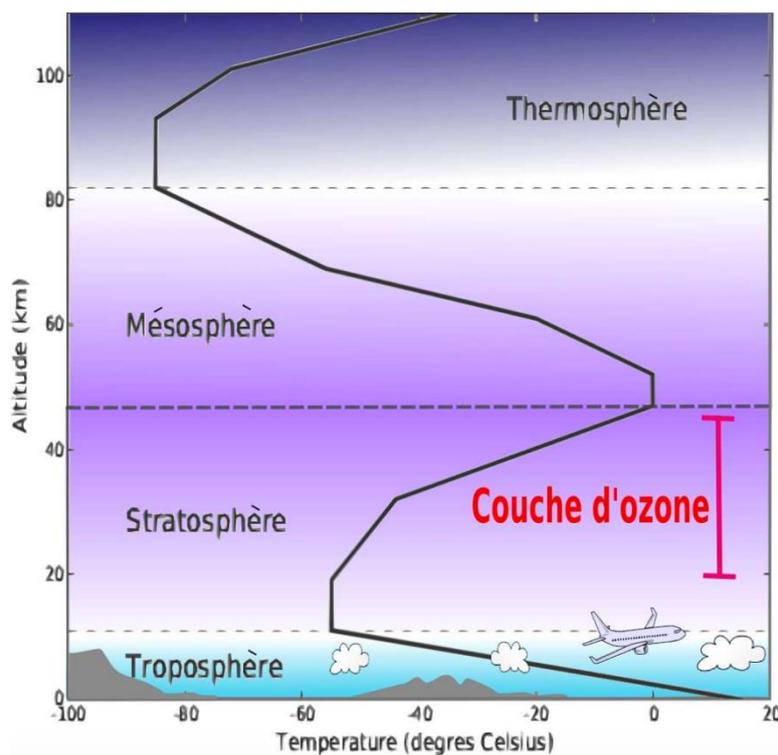
¹² Précisons que les pluies acides ont fait l'objet d'une prise de conscience dès le 19^{ème} siècle, suite au constat fait, qu'à proximité des usines, les forêts étaient victimes d'un phénomène de dépérissement.

atmosphériques communs acidifient les précipitations (Gambier, 1987): le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x). Lorsque ces substances sont émises dans l'atmosphère, elles sont susceptibles d'être transportées sur de grandes distances par les vents dominants avant de retomber sur terre sous forme de précipitations acides (pluie, neige, brouillard, poussière). Les poissons qui agonisaient dans les lacs d'Europe, ont, les premiers, donné l'alerte... il faudra cependant attendre 10 ans plus tard, pour que les pluies acides deviennent un véritable problème de société, à la suite de la disparition des millions d'hectares de forêts de conifères en Allemagne (Arnould, 2014). Ce sont les pluies acides et les problèmes de la couche d'ozone qui vont sensibiliser la communauté internationale à la cause écologique (Sommet de la Terre à Stockholm, 1972). On peut même considérer que la Déclaration de Stockholm a soulevé pour la première fois la question du changement climatique, en demandant aux gouvernements d'être attentifs aux activités qui pourraient entraîner un changement climatique et d'évaluer la probabilité et la magnitude des effets climatiques. La Conférence a ainsi proposé d'établir des stations pour surveiller les tendances à long terme des composants et des propriétés atmosphériques, qui pourraient causer des phénomènes météorologiques, notamment des changements climatiques. Ces programmes devaient être coordonnés par l'OMM pour aider la communauté mondiale à mieux comprendre l'atmosphère et à déterminer si le changement climatique était imputable à l'activité humaine. Cette prise de conscience doit être mise en relation avec les premières découvertes du fameux trou dans la couche d'ozone. En 1974, les chimistes Frank Rowland et Mario Molina tirèrent la sonnette d'alarme lorsqu'ils comprirent que le mécanisme chimique de destruction de l'ozone par des émissions d'oxyde nitrique (contre lesquelles Paul Crutzen avait déjà mis en garde en 1970) avaient un analogue avec les émissions de chlorofluorocarbones, les désormais célèbres CFC, qui conduisaient à la destruction des molécules d'O₃ *via* des atomes de chlore. Si les travaux des trois chercheurs virent leur bien-fondé reconnu en 1976 par l'Académie nationale des sciences américaine¹³ (de sorte que l'emploi des CFC comme gaz propulseur dans les aérosols fut banni en 1978 par le Canada, la Norvège et les Etats-Unis), il faudra attendre les observations de Joe Farman, Brian Gardiner et Jonathan Shanklin (1985) pour que la perte d'ozone au-dessus de l'Antarctique (publication dans *Nature*) alerte le grand public et invite les pays du monde entier à signer le Protocole de Montréal (1987) visant à réduire l'utilisation des produits dégradant la couche d'ozone (Jacquier, 2017).

Figure 2 : La couche d'Ozone

Les industriels ayant trouvé la parade (mise en place de cheminées très hautes), les pollutions furent très vite exportées loin de leurs sources et parcoururent d'énormes distances, portées par les vents.

¹³ Paul Cruzen, Frank Rowland et Mario Molina reçurent le prix Nobel de chimie en 1995.



Source : Futura planète

La couche d'ozone se trouve dans la partie supérieure de la stratosphère. Dans cette couche, les rayons ultraviolets issus du spectre solaire viennent exciter les molécules de dioxygène (O_2) qui, en se combinant avec un atome d'oxygène (O), forment de l'ozone (O_3) en grande quantité.

A cette liste des coupables et des responsables des changements climatiques, nous pourrions ajouter le bromure de méthyl, un pesticide qui libère du chlore et du brome, des gaz qui détruisent l'ozone avec une remarquable efficacité même si sa présence est faible dans l'atmosphère.

Si le changement climatique demeure un sujet de discussions et de controverses, il demeure une notion très difficile à définir de par la complexité et les incertitudes tant spatiales que temporelles qu'il recouvre. Malgré cela, il est possible de définir trois niveaux d'acceptation :

- Selon les météorologues et les climatologues : le changement climatique c'est lorsque « le climat global de la Terre ou l'ensemble des climats régionaux subissent une modification durable sur une durée de dix ans » (CNRS) ;

- Selon la Convention Cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) : son article I, définit les changements climatiques comme, « des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables » (CCNUCC, 1998, art I).

- Selon le Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC) : les changements climatiques sont « des variations statistiques indicatives de l'état

du climat ou de sa variabilité persistant pendant une période prolongée (généralement des décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, ou encore à la persistance des variations anthropiques de la composition de l'atmosphère ou de l'utilisation des sols » (GIEC, 2001)¹⁴ ;

Ainsi, le changement climatique est la conséquence du réchauffement atmosphérique observé depuis 150 ans. L'augmentation de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui accompagne l'augmentation de la température observée semble la cause la plus évidente. Si certains gaz se retrouvent naturellement dans l'atmosphère (la vapeur d'eau est à l'origine de près des trois quarts de l'effet de serre total, le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone), il semble que l'activité humaine ait largement contribué à leur concentration, c'est le cas du dioxyde de carbone émis par les industries du transport, du bâtiment, de l'extraction des ressources naturelles..., du méthane relatif au secteur agricole (production d'origine animale), des hydrochlorofluorocarbures (HCHC - 22, le fréon) utilisés comme gaz réfrigérant et agent propulseur dans les aérosols, des chlorofluorocarbures (CFC) utilisés dans l'industrie du froid et des nettoyeurs industriels, du tétrafluorométhane (CF₄), un gaz réfrigérant ou encore de l'hexafluorure de soufre (SF₆) utilisé dans l'industrie métallurgique et celle des semi-conducteurs. Ces gaz ont pour la plupart, étaient visés par le protocole de Kyoto (directive 2003/87/CE) - dans le cas du SF₆, son potentiel de réchauffement global (PRG) serait près de 22800 fois supérieur à celui du CO₂¹⁵ (ce qui en fait potentiellement le plus puissant gaz à effet de serre sur Terre). Ils constituent cependant un véritable défi scientifique et sociétal pour l'espèce humaine. Scientifique car il convient de cerner avec précision leur niveau de concentration, leur durée de vie et leur vitesse de propagation. Sociétal, car ils ont de puissants effets sur la santé humaine et animale, la perte de biodiversité ou encore la recrudescence des catastrophes naturelles. D'une certaine manière, on peut considérer que le climat accède au statut de savoir scientifique (le réchauffement climatique est un effet physique dû à l'effet des gaz à effet de serre, il se manifeste partout, il est à l'origine du changement climatique et du dérèglement climatique). Comme tout savoir, il génère de nombreux débats au sein de la communauté scientifique, s'imisce

¹⁴ L'histoire du GIEC pourrait faire elle-même l'objet d'une controverse. En effet, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat a été créé en 1988 par une décision du G7 (États-Unis, Japon, Allemagne, France, Grande-Bretagne, Canada, Italie) sous la pression de Ronald Reagan et Margaret Thatcher. Ces derniers voulaient ainsi éviter que l'UNESCO (agence de l'ONU), soupçonnée de militantisme écologique, ne mette la main sur l'expertise climatique (Huet, 2014). D'une certaine manière, la création du GIEC s'inscrit dans le prolongement des inspirations libérales et mondialistes des années 80 (Accord de Washington en 1985). Or les rapports du GIEC (dont les résumés sont approuvés par les délégations gouvernementales) sont devenus au fil du temps difficilement contestables par les pouvoirs publics, ce qui leur confère une certaine autorité scientifique et surtout une capacité à faire bouger les lignes diplomatiques.

¹⁵ A cela s'ajoute sa durée de vie dans l'atmosphère, 3200 ans selon le 4^e rapport du GIEC (chapitre TS.2.5).

dans les grilles de lecture des scientifiques (théories et paradigmes) ou encore ouvrent des pistes de réflexion au regard des outils mobilisés (notamment les modèles climatiques). L'article que nous proposons, entend faire le point sur ces trois aspects du savoir, et revendiquent une place plus importante du climat dans l'éducation au développement durable. Objet de controverses ou de questions socialement vives, le climat doit faire sa révolution et poser les bases d'une véritable éducation aux changements climatiques.

Le climat, un savoir ?

Le savoir est généralement défini comme « *l'ensemble de connaissances ou d'expériences plus ou moins systématisées, caractérisé par un objet et une méthode déterminés, fondé sur des relations objectives, vérifiables ou universellement acceptées à un moment donné de l'histoire* » (CNRS, Rapport du COMETS, 1996). Cette définition nous ramène à deux interrogations : 1° la question du savoir ; 2° la définition de l'objet, de la méthode et de relations¹⁶.

La question du savoir

La question du savoir renvoie à trois approches interdépendantes : l'histoire, l'épistémologie et la didactique. L'histoire montre que les savoirs scientifiques sont des instruments pour résoudre des problèmes, ils ne sont pas un produit achevé mais un processus dans le temps. Elle donne une image constructiviste des savoirs, qui va à l'encontre d'une vision dogmatique des disciplines. L'histoire permet d'étudier les obstacles épistémologiques et didactiques dans la construction des savoirs enseignés. Parce que les savoirs sont liés dans les processus historiques, l'histoire favorise aussi une approche interdisciplinaire des champs conceptuels. Enfin, l'histoire permet de connaître le contexte social et culturel de la construction des savoirs. Cette approche contribue fortement à donner une autre image des sciences, et elle lutte contre une vision ethnocentrique de la connaissance scientifique. Dès lors, deux perspectives se dessinent à nous : (1) ancrer l'étude des phénomènes de construction (production) et de diffusion des savoirs scientifiques dans ce qui relève des disciplines elles-mêmes, à partir d'une initiation aux techniques et théories propres aux trois domaines (didactique, historique et épistémologique). (2) Passer de l'acquisition et de la maîtrise des savoirs (historiques, épistémologiques et didactiques) à l'enseignement et la diffusion des savoirs scientifiques dans les secteurs éducatifs ou industriels, tant privés que publics.

¹⁶ Cette partie a fait l'objet de séminaires au sein d'une ANR « *La théorie de l'équilibre général en tant que savoir* », coordonnée par Jean Sébastien Lenfant. Nous tenons à remercier tous nos collègues (Jérôme Lallement, Annie Cot, Pascal Bridel, Marion Gaspard, Roberto Baranzini...) qui ont participé à ces discussions. Le fruit de ces discussions a pu être incorporé à nos recherches et a enrichi notre réflexion.

La production des savoirs

L'idée de production des savoirs scientifiques repose sur trois constats.

- D'abord sur le fait que ce que nous mettons sous le vocable de science n'est en rien un « objet » bien circonscrit et stable dans le temps mais un ensemble non homogène et coordonné de discours, de disciplines, de réalités institutionnelles, de pratiques, de productions (d'écrits, de techniques, de standards, de procédures), de valeurs et de normes (épistémologiques tout autant que morales et sociales), de modes d'insertion politique comme de sociabilités (salons...groupes).

Le savoir se construit progressivement dans le temps, se raffine et se nuance, se diversifie et se spécialise, se relativise en même temps qu'il se généralise. Les erreurs et les crises font partie de sa constitution. Aussi enveloppe-t-il de manière intrinsèque, quoique souvent implicite, une réflexion sur ses critères d'objectivité, sur les notions de vrai et de faux, de certain et d'incertain, d'expérience, de réalité, d'intuition et de démonstration, etc. Il enveloppe aussi un pari sur son utilité, immédiate ou future, et par là ouvre autant sur sa mise en oeuvre technologique que sur le champ d'interrogations afférent à son rapport à la société. Ces interrogations croisent dans des proportions variables l'éducation, l'économie, la politique, l'écologie, la sociologie, le droit, l'éthique, etc.

- Ensuite sur le fait que chaque moment historique voit une articulation particulière de ces éléments, et une articulation de ces éléments sur une forme de compromis social, de pratiques de production et de gestion politique. La science est toujours prise dans des formes sociales et politiques données, elle dépend et contribue à modeler l'existence individuelle et collective par ses actes, des formes d'organisation comme des valeurs sociales.

- Enfin sur le fait qu'il faille s'intéresser plus spécifiquement aux rapports entre production et lieux d'élaboration des savoirs. Il s'agit d'une réflexion sur le processus conjoint d'élaboration locale des savoirs scientifiques, les opérations de localisation, et de constitution de lieux de savoir. Ce qui revient à saisir les dynamiques sociales et culturelles qui sont à l'oeuvre pour permettre la discussion, la mise à l'épreuve des connaissances, la validation, mais aussi l'institutionnalisation, l'incorporation, voire la mobilisation publique, des savoirs. L'axiome (histoire des sciences) qui affirme que tout universel de la science se constitue avant tout localement, laisse cependant intact les dispositifs, les configurations, les institutions qui rendent possible la stabilisation des énoncés scientifiques et leurs circulations.

La diffusion des savoirs

Le savoir se bâtit sur un fond de problèmes scientifiques et de questions méthodiques ou philosophiques plus ou moins faciles à identifier sinon à traiter, et d'interrogations

socio-politiques plus ou moins clairement énoncées, difficiles à trancher en dehors de choix définissant des priorités.

La diffusion des savoirs a au moins trois dimensions : la diffusion des contenus scientifiques, la diffusion des contextes méthodique et épistémologique de construction de ces contenus, la diffusion des interrogations socio-politiques liés à cette construction. Bien entendu, ces trois dimensions sont concomitantes et solidaires entre elles, mais solidaires aussi d'une mise en perspective historique, consubstantielle à chacune des trois dimensions.

Il est clair que la diffusion des savoirs ne vise pas uniquement à transmettre de l'information, c'est-à-dire à renseigner de façon ponctuelle et plus ou moins extérieure, plus ou moins schématique, plus ou moins simplifiée sur les segments immédiatement appréhendables ou « intéressants » (par leur nouveauté, leur caractère paradoxal, leur potentiel d'applications, leur mise en cause des paradigmes et attitudes culturels reçus, etc.) des dernières découvertes. Elle vise tout autant à favoriser une véritable acculturation scientifique de la société (tenant compte de divers publics et à différents niveaux de technicité). Il s'agit là d'abord de réduire la distance entre « savant » et profane, à fin d'éviter une trop grande fracture entre les « nantis » du savoir et les démunis ; puis de contribuer à développer sens critique et jugement, grâce auxquels les individus se constituent leurs propres repères de vie, de pensée, d'action et d'adaptation à un environnement de moins en moins stable et saisissable. Elle vise enfin à ce que se forme une opinion éclairée et responsable des citoyens sur les problèmes de société (choix pédagogiques, politiques, économiques, écologiques, éthiques, etc.) posés par le développement et l'expérimentation scientifiques.

Diffuser les savoirs relève donc moins du devoir d'informer que de la tâche, qui incombe d'abord aux scientifiques eux-mêmes, de faire aux acquis scientifiques leur place dans l'éducation et la culture, et d'améliorer ainsi les conditions mêmes de réception de toute information scientifique. Dans une « société de communication », diffuser les savoirs ne peut se réduire à transmettre des informations, c'est plutôt construire une coopération active entre les différents acteurs : producteurs, transmetteurs, récepteurs. Dans ce vaste champ, se pose ainsi la question des modalités de diffusion d'un savoir scientifique dans un contexte interculturel. Cette approche repose sur une exigence double. D'une part, il existe des pratiques multiples d'accès à la connaissance. D'autre part, la dimension internationale de la connaissance¹⁷ constitue une position intéressante pour traiter de différentes logiques institutionnelles, linguistiques et culturelles.

¹⁷ A l'heure où les sciences de l'éducation sont confrontées à l'émergence *des éducations à* (éducation aux médias, éducations à la santé, éducation à la biodiversité, éducation au développement durable, éducation à l'environnement, éducation aux changements climatiques...), ce point nous paraît crucial. Il pourrait signifier que nous avons choisi de multiplier les objets de recherche sans pour autant définir les caractéristiques et les enjeux de la co-construction des savoirs.

La question de l'objet, de la méthode et des relations introduites

La question de l'objet du savoir est étroitement liée à celles de la méthode utilisée et des relations introduites. Dans le cas qui nous préoccupe, l'objet du savoir est le climat. On peut réduire cet objet à une définition bien précise et une période déterminée. Toutefois, il convient d'apporter quelques précisions...

1° Une définition ne rend pas compte de la construction du savoir. Construire un savoir, c'est partir d'une idée, d'un projet, il convient donc de préciser ses finalités, ses objectifs... Cette étude est nécessaire pour poser les bases de la production de savoirs, mais pas suffisante. Il faut également un point d'arrivée !

2° Définition et construction du savoir nous renvoient à des perspectives totalement différentes. La définition précise les limites de la discussion alors que la construction nous oblige à suivre un itinéraire en étoiles, d'où la simple question : où s'arrête toute discussion sur le climat ?

3° Il faut dissocier deux termes : objet et objectif. L'objet introduit le problème de la définition, du champ d'application, du réalisme ou de l'abstraction des idées... L'objectif se traduit par un (des) but (s), une finalité... Question : est-ce que les objectifs ont été atteints ? Est-ce que cela suffit pour remettre en cause un savoir ?

Dans la suite de cet article, nous considèrerons que l'objet climat introduit le problème du réchauffement climatique, que les méthodes et les relations introduites visent à confirmer cet état de fait. L'objectif doit ainsi conduire au développement d'une théorie du climat : concepts, modèles, études des propriétés, lois...

Le débat sur le réchauffement climatique

Si le changement climatique est aujourd'hui associé à un enjeu de sociétés (Euzen, Laville, 2017) ou encore à une menace pour la démocratie (Laramée de Tanneberg, 2017), il n'en a pas toujours été ainsi. L'un des précurseurs de la science climatique, Svant August Arrhenius - ayant élaboré une théorie (1896) qui liait l'augmentation du CO₂ atmosphérique à une élévation des températures terrestres (en raison d'un effet de serre dû à la vapeur d'eau et d'acide carbonique) - n'hésitait pas à avancer dans son ouvrage « *Worlds in the making, the evolution of the Universe* » (1908) que le réchauffement climatique devait être une chance pour l'humanité, avec la conquête de nouveaux espaces agricoles notamment au Grand Nord canadien et en Sibérie. Par cette libération de nouvelles terres fertiles, il était possible de répondre à la croissance exponentielle de la population, de réduire la famine et de combattre l'extrême pauvreté dans le monde.

Près d'un siècle plus tard, le Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC) publiait son quatrième rapport (2007). Ce dernier est

la synthèse des conclusions de trois groupes de travail que compte le GIEC. Le bilan présente des chiffres précis : « doubler la concentration en Co₂ par rapport à 1750 (phase préindustrielle) se traduit par une hausse de 3,2 à 4°C. La teneur moyenne atteinte en 2007 est de 385 ppm (particules par million) et augmente en moyenne de 2,4 ppm par an. Pour ne pas dépasser ce plafond de 2°C de hausse des températures, la teneur devrait rester sous 400ppm, niveau atteint en 2005, au rythme des années 2000 » (GIEC, 2007, 4e rapport p. 2-22).

Pas d'équivoque, le débat sur le climat ou plus précisément le devenir climatique dépend des taux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) puis de la concentration ou teneur qui en découle dans l'atmosphère. C'est cette relation entre émissions et concentration relativement bien connue et dépendant de l'évolution climatique (relativement bien documentée), qui est source d'incertitudes, allant jusqu'à faire émerger un courant de pensée : les climato sceptiques (en France, notamment).

Dans son ouvrage *l'imposture climatique ou fausse écologie*, paru en 2010 aux éditions Plon, Claude Allègre le plus célèbre des climato sceptiques français, soutient trois arguments pour s'opposer à la dramatisation climatique. Premièrement, il doute que « le gaz carbonique d'origine anthropique soit l'unique responsable du réchauffement climatique », il soutient que « les causes sont multiples... » (Allègre, 2010, chapitre I). Deuxièmement, il « peine à croire que l'on puisse prédire avec tant de précision le temps qu'il fera dans un siècle alors qu'on ne peut pas prévoir celui qu'il fera dans une semaine » (Allègre, 2010, chapitre II). Troisièmement, il « ne pense pas que la notion de température moyenne de la terre soit un paramètre valable pour décrire un climat tant la variabilité géographique est considérable... » (Allègre, 2010, chapitre IV).

Ces arguments nous permettent d'insister sur les trois points suivants : (i) il y a réchauffement climatique même si le soleil est un élément parmi tant d'autres, (ii) s'il est difficile de prédire avec précision le temps, il est possible de cerner les grandes conséquences climatologiques planétaires ; (iii) l'augmentation moyenne de la température présente des variations régionales importantes, hausse et refroidissement rythment la machine climatique. Cette vision est celle du GIEC et de de la plupart des scientifiques du climat qui soutiennent que le réchauffement climatique est très probablement d'origine anthropique.

Notons que le débat sur le réchauffement climatique (depuis l'adoption du protocole de Kyoto) porte autant sur son origine, ses causes et ses manifestations que sur les moyens à mettre en œuvre pour réduire les gaz à effet de serre.

Les activités humaines ont des conséquences plus ou moins irréversibles sur l'environnement, et ce depuis le début du 19^e siècle, plus précisément vers les années 1850 avec les rejets par leur volume, leur complexité et leur pérennité qui proviennent des industries extractives. Puis au début et au milieu du 20^e siècle, la toxicité et la dangerosité de ces rejets deviennent une nuisance collatérale au développement humain.

Les pluies acides : premières pollutions révélées

La principale cause des pluies acides est le rejet dans l'atmosphère de dioxyde d'azote (NO₂) et de dioxyde de soufre (SO₂) par les activités industrielles (aciéries), les centrales thermiques et les transports (les voitures). Dans la plupart des pays industriels, Europe du Nord et de l'Est, Japon, Etats-Unis, ces pluies répandent dans les sols des substances nitrifiées corrodant les métaux et rendant abiotiques les cours d'eau et les lacs qui ne contiennent pas assez de calcium dissous pour neutraliser leur acidité.

L'eutrophisation ou « la mort de l'eau par asphyxie »

L'eutrophisation désigne un processus naturel d'augmentation de la production de matières organiques accompagnant l'évolution d'un écosystème aquatique sur des temps géologiques (Lacaze, 1998). Il peut également désigner un processus résultant des activités anthropiques et agissant sur des échelles de temps courtes (Pinay, 2017). Les écosystèmes aquatiques étant régis par des équilibres dynamiques, l'eutrophisation correspond à un déséquilibre de fonctionnement, déclenché par un changement dans les quantités et/ou les proportions des entrants (azote, phosphore...). De multiples facteurs sont à l'origine de l'évolution de l'eutrophisation, l'augmentation de la population mondiale, les concentrations urbaines, les processus industriels (complexes chimiques), la production d'énergie (notamment le rejet des eaux de refroidissement des centrales thermiques), l'intensification de l'agriculture (usage de pesticides, d'azote, rejets de nitrate), l'extraction des ressources naturelles (phosphore) ont entraîné une augmentation des flux et des concentrations en nutriments dans les milieux aquatiques. Ces phénomènes ne sont pas nouveaux, ils ont été observés tout au long du 20^e siècle dans les grands bassins industriels et les zones d'urbanisation. De nos jours, ces observations sont associées au déversement dans les cours d'eau et les nappes phréatiques d'importantes quantités de nitrates et de phosphates, à l'origine de la prolifération d'algues vertes (Fléchet, 2017). Si l'agriculture intensive est souvent montrée du doigt (Chauveau, 2017), le réchauffement climatique - par l'élévation progressive des températures ou une intensité plus marquée des épisodes pluvieux - amplifie les risques d'eutrophisation (Beaugrand, Goberville, 2010). Les transferts au sein des bassins-versants (les phénomènes de crues génèrent une érosion des sols, qui accentue les transports de sédiments riches en azote et en phosphate dans les écosystèmes), la physico-chimie des milieux (oxygène, pH, phosphore, métaux lourds, azote), la production de biomasse, la dynamique des réseaux trophiques, la métabolisation des nutriments dans les milieux aquatiques sont tous susceptibles d'être modifiés par les changements

climatiques. Ces phénomènes sont suffisamment importants pour que les travaux scientifiques (notamment de modélisation) commencent à proposer des scénarios sur les évolutions futures (modification des facteurs de forçage des analyses de risques d'eutrophisation

La pollution marine et océanique : un phénomène d'origine humaine longtemps négligé

La notion de pollution marine englobe celle de l'eau mais également celle des sédiments marins, et plus généralement toutes les atteintes aux écosystèmes marins causées par les rejets de substances nuisibles (pétrole, produits chimiques...). En France, la loi Grenelle II (2010) a donné une définition de la pollution maritime, il s'agit de « *l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de déchets, de substances, ou d'énergie, y compris de sources sonores sous-marines d'origine anthropique, qui entraîne ou est susceptible d'entraîner des effets nuisibles pour les ressources vivantes et les écosystèmes marins, et notamment un appauvrissement de la biodiversité, des risques pour la santé humaine, des obstacles pour les activités maritimes, et notamment la pêche, le tourisme et les loisirs ainsi que les autres utilisations de la mer, une altération de la qualité des eaux du point de vue de leur utilisation, et une réduction de la valeur d'agrément du milieu marin* » (Section 2, sous-section 1).

Le dégazage et les marées noires, formes récurrentes les plus choquantes de la pollution océanique, déversent plus de 3 millions de tonnes par an, soit 1 tonne pour 1000 tonnes extraites et transportées. Longtemps négligée, cette pollution inquiète aujourd'hui la communauté internationale qui se mobilise par l'imagerie satellite pour contrôler l'environnement marin.

Paradigmes et théories scientifiques, une autre lecture du climat

Le champ épistémologique qui parcourt les sciences ne mentionne pas la science climatique. Cela ne signifie pas que les scientifiques ont délaissé cette question, mais juste que la science du climat apparaît timidement sous l'effet d'un quelconque rationalisme ou déterminisme, de quelques problèmes scientifiques non résolus ou encore d'intérêts pratiques. L'émergence de toute science se fait à l'occasion d'un problème, d'une exigence, ou d'un obstacle d'ordre théorique ou pratique (au 19^e siècle, la psychologie se constitue comme science suite aux nouvelles normes que la société industrielle impose aux individus). Dans le cas du climat, le phénomène de l'effet de serre (dévoilé dès la fin du 19^e siècle) a joué un rôle important, notamment celui de souligner la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique. Les historiens ont apporté leurs contributions à cette question (Testot, 2012, Mouhot, 2014 ; White, Pfister et Mauelshagen, 2017). Emmanuel Le Roy Ladurie (2004-2009) a publié son *Histoire humaine et comparée du climat*, dont les trois tomes (Canicules et glaciers,

disettes et révolutions, réchauffement de 1860 à nos jours) soulignent comment les fluctuations du climat ont contribué dans le passé à l'effondrement de certaines civilisations et comment nos sociétés complexes seront amenées à réagir face au stress climatique. Sam White (2012) a souligné que, par le passé, les sociétés agraires avaient été très vulnérables aux fluctuations climatiques, il évoque même l'idée d'une crise globale lorsqu'il mentionne le Petit Âge glaciaire dans l'Hémisphère Nord au XVIIe siècle (White, 2011). Enfin John Mc Neill (2010) considère qu'en étudiant la manière dont les sociétés ont pu réagir aux situations extrêmes, cela permettrait d'anticiper les impacts sociaux des risques climatiques à venir¹⁸.

Selon Laurent Testot et Jean François Mouhot (2014), l'histoire du climat couvre trois champs : « *une climatologie historique pure, vouée à reconstituer les climats du passé ; une climatologie historique de crise, étudiant les impacts des variations climatiques sur les sociétés ; et un dernier champ, étudiant le présent réchauffement planétaire* ». Dans ce dernier cas, il s'agit de comprendre le processus par lequel l'humanité prit conscience de sa responsabilité (Mouhot, 2014), rechercha les causes (impacts de la révolution industrielle) et agit en conséquence (c'est peut-être ici que l'immobilisme est le plus flagrant).

C'est dans cette perspective que l'homme est amené à mobiliser des groupes d'objets, des énoncés d'hypothèses, des jeux de concepts, des séries de choix théoriques, pour faire basculer un concept du côté de la connaissance. Tous ces éléments permettent, non de constituer une science à première vue, mais deviennent ce à partir de quoi se bâtissent les propositions cohérentes, se développent des descriptions plus ou moins exactes, s'effectuent des vérifications et se déploient des théories.

Ces éléments, transformés de manière régulière par une pratique discursive, sont indispensables à la constitution d'une science et à la formulation d'un savoir. « *Un savoir, c'est ce dont on peut parler dans une pratique discursive qui se trouve par-là spécifiée : le domaine constitué par les différents objets qui acquerront ou non un statut scientifique* » (Foucault, 1969, p. 246). Ils soulèvent également la question de la valeur heuristique d'une théorie ou d'un paradigme. Ce point a été largement analysé par Thomas Kuhn dans son ouvrage *La structure des révolutions scientifiques* (1962). En se consacrant à explorer des domaines en lien avec l'histoire des sciences, Kuhn s'est trouvé en face de problèmes imprévus : « *le nombre et l'ampleur des divergences avouées opposant les spécialistes des sciences sociales au sujet de la nature des méthodes des problèmes scientifiques légitimes* » (Kuhn, 2008, p. 10-11).

¹⁸ « *Sans rien vouloir de tel, la race humaine a lancé la terre dans une expérience gigantesque non maîtrisée. C'est là, à mon avis, le trait majeur du xx^e siècle, un trait qui, à l'avenir, devrait apparaître plus important encore que la Seconde Guerre mondiale, l'aventure communiste, l'expansion de l'alphabétisation de masse, l'extension de la démocratie ou l'émancipation croissante des femmes* » (2010, p. 28).

En voulant découvrir l'origine de ces différences et contribuer à la recherche scientifique de son époque, Kuhn mit en avant la notion de paradigmes. Les paradigmes sont « *des découvertes scientifiques universellement reconnues qui, pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions* » (2008, p. 11). Quelques pages plus loin, Kuhn introduit l'idée de science normale et de science ordinaire : « *Les hommes dont les recherches sont fondées sur le même paradigme adhèrent aux mêmes règles et aux mêmes normes dans la pratique scientifique. Cet engagement et l'accord apparent qu'il produit sont des préalables nécessaires de la science normale, c'est-à-dire de la genèse et de la continuation d'une tradition particulière de recherche* » (2008, p. 30).

La notion de paradigme est donc associée à celle de communauté scientifique dont les liens peuvent être matérialisés par un accord, une convention ou le partage d'idées communes. Ce point est important, il implique que le savoir relève d'une activité scientifique communautaire, et non du travail isolé d'un chercheur (ou de plusieurs) qui se confronte au monde réel (afin de lui arracher tous ses secrets). Le recherche de connaissances nouvelles est ainsi orientée dans un certain sens (celui qui a été retenu par le groupe), elle suppose la collaboration et une certaine complicité des personnes à l'intérieur du groupe.

La distinction entre science normale et science ordinaire insiste sur le fait que les différents états du savoir sont soumis à des normes, des conventions, des règles codifiées et des représentations partagées par le groupe. Les différents membres de la communauté scientifique doivent ainsi se conformer aux normes du paradigme de la connaissance. Il peut s'agir d'un ensemble de faits, de théories et de méthodes rassemblés par les savants qui s'efforcent d'ajouter tel ou tel élément à un ensemble particulier. C'est ce processus fragmentaire dans lequel se rajoutent des éléments, séparément ou en combinaison, qui constitue un fond commun (la connaissance scientifique) et rythme le développement scientifique. Ce processus non cumulatif des différentes contributions individuelles pour constituer une science est « *la révolution historiographique* » dans l'étude de la science (Kuhn, 2008, p. 19).

En abordant l'une des fonctions normatives des paradigmes : la fonction cognitive, Thomas Kuhn étudie le rôle du paradigme en tant que véhicule d'une théorie scientifique. « *Son utilité est de renseigner les scientifiques sur les entités que la nature contient ou ne contient pas et sur la façon dont elles se comportent. Ces renseignements fournissent une carte dont les détails sont élucidés par les travaux scientifiques plus avancés* » (Kuhn, 2008, p. 155). Notons que cette carte est aussi essentielle au développement continu de la science que l'observation et l'expérimentation du fait de la complexité et de la variété de la nature. Les paradigmes deviennent alors par l'intermédiaire des théories qu'ils incorporent, un élément constituant de l'activité du chercheur. Le rôle des paradigmes est de « *fournir aux scientifiques non seulement une carte, mais aussi certaines directives essentielles à la réalisation d'une carte. En apprenant un paradigme*

l'homme de science acquiert à la fois une théorie, des méthodes et des critères de jugement, généralement en un mélange inextricable » (Kuhn, 2008, p. 155).

Généralement, l'adoption d'un nouveau paradigme entraîne le déplacement significatif des critères qui déterminent la légitimité des problèmes et des solutions proposées. C'est exactement ce que nous constatons avec la « communauté scientifique » du GIEC qui a fait du changement climatique, son paradigme (les conséquences désastreuses sont bien identifiées, la solution réside dans une limitation de l'effet de serre anthropique.) C'est pourquoi les modèles du GIEC servent de base de travail aux Parties et autres décideurs lors des conférences internationales (les fameuses COP).

En effet, ce paradigme, qui implique l'idée d'un modèle à suivre, semble particulièrement bien adapté pour décrire ce qui se passe dans la science climatique. Sa fonction d'actualisation n'est pas simplement « *prise de possession de la pensée par elle-même* », elle suggère également « *une actualisation exigée par le sens de ce qui est posé* » (Cavaillès, 1994, p. 509). Elle pose ainsi « *un rapport qui en tant que tel ne s'affirme que dans la singularité de réalisation de l'enchaînement, mais ne réclame cette singularité de quiconque, donc, tout en la posant, la supprime et révèle par là un principe interne de variation* » (Cavaillès, 1994, idem). L'étude historique du climat, révèle un ensemble d'illustrations répétées et presque standardisées de différentes théories, dans leurs applications conceptuelle, instrumentales et dans celles qui relèvent de l'observation.

Par-là donc, nous affirmons avec Cavaillès qu'il n'y a pas diverses sciences, ni divers moments d'une science, non plus immanence d'une science unique aux multiples disciplines variées, mais celles-ci se conditionnent entre elles de telle façon que les résultats comme la signification de l'une exigent, en tant qu'elle est science, l'utilisation des autres ou l'insertion commune dans un système¹⁹.

Le changement climatique, en tant que science et savoir, se présente ainsi comme un nouveau paradigme, qui vise à articuler des phénomènes observés (exemple de l'effet de serre) à des théories déjà fournies par les autres sciences ou en état d'élaboration. De ce fait, comme le souligne Kuhn (2008, p. 144), « *sans adhésion à un paradigme, il ne pourrait y avoir de science normale* » (Kuhn, 2008, p.144). Cette acceptation est une fin pour toutes les recherches, qui du reste vont permettre à la science de

¹⁹ C'est ce qui explique aujourd'hui l'intérêt grandissant pour la théorie des systèmes dynamiques (*System Dynamics*) et la modélisation des questions environnementales. Le premier livre sur la modélisation globale, attirant l'attention de la communauté scientifique internationale fût *The Limits to Growth* (les limites de la croissance) commandé à ses auteurs par le Club de Rome. Sa publication en 1972 s'inscrit dans la droite lignée des ouvrages proposés par J.J Forrester (*Industrial Dynamics, Urban Dynamics, World Dynamics*). La dynamique des systèmes repose sur une approche stocks - flux, des boucles d'amplification (mouvement exponentiel) et de régulation, et la détermination des limites du système. Dans le cas de *Limits to growth*, ce rapport a initié une large discussion tant académique que publique sur la viabilité de la société de croissance, le problème de la population et de son alimentation, l'épuisement des ressources de la planète, les phénomènes de pollution.

progresser. C'est en poursuivant ce but que la « communauté scientifique » du GIEC s'est formée en 1988 dans la foulée des débats internationaux sur le climat. Par ses rapports successifs, le GIEC se présente aujourd'hui comme une institution reconnue dans le paysage scientifique et comme le garant d'un certain savoir. Ajustement après ajustement, ses travaux ont affiné et précisé le contenu de ce paradigme. Selon Kuhn, « c'est à des opérations de nettoyage que se consacrent la plupart des scientifiques durant toute leur carrière. Elles constituent ce que j'appelle la science normale » (ibid)). Généralement, les changements produits par un nouveau paradigme sont radicaux, ils introduisent des concepts, font évoluer les méthodes et modifient les conceptions ontologiques sous-jacentes.

Plus largement, le changement de paradigme donne une nouvelle représentation du monde, ce que Kuhn désigne par des « révolutions dans la vision du monde » (Kuhn, 2008, p. 157). Le repérage de la vision du monde que les individus ou les groupes portent en eux et utilisent pour agir ou prendre position est indispensable pour comprendre la dynamique des interactions sociales d'une part et des interactions entre les pratiques sociales et leurs conséquences sur notre environnement d'autre part. Ainsi l'acceptation du changement climatique comme paradigme nous permet de donner du sens à nos conduites ou pratiques sociales, et de comprendre la réalité du système climatique, à travers son propre système de fonctionnement.

Reste à établir un pont entre le changement climatique dans sa version paradigmatique et les représentations sociales qui structurent toutes les pratiques humaines. Selon Abric (2016), les représentations sociales présentent quatre fonctions importantes : « les fonctions de savoir qui permettent de comprendre et d'expliquer la réalité, les fonctions identitaires qui définissent l'identité et permettent de sauvegarder l'identité du groupe, les fonctions d'orientations qui guident les comportements et les pratiques et les fonctions justificatrices qui permettent a posteriori de justifier les prises de position et les comportements » (Abric, 2016, p. 20-23). L'analyse de ces représentations sociales est indispensable lorsqu'il s'agit de faire émerger des modèles éducatifs en lien avec la science du climat (c'est le cas notamment du modèle REDOC, Diemer, 2015)²⁰.

Pour conclure sur ce point, nous pouvons considérer que si la science est une méthode de connaissance et un savoir constitué, alors il n'y a qu'un pas à faire pour ériger le changement climatique en véritable savoir scientifique et poser les bases d'un nouveau paradigme pour le troisième millénaire. Cette épistémologie du climat revient à présenter une histoire scientifique du changement climatique.

Histoire scientifique du changement climatique

²⁰ REDOC : Représentations, Démarches et Outils pédagogiques, Compétences

Depuis des milliers d'années, le climat de notre planète Terre varie selon les époques et les lieux (Ladurie, 2004-2009). Ces changements sont généralement observés sur de longues périodes et permettent d'atténuer la perception de l'homme sur le climat. Cependant, depuis le milieu du 19^e siècle, nous assistons à une accélération de ces changements et à l'apparition de véritables crises du climat (White, 2014). Ces observations ont amené l'homme à s'interroger sur la réalité de ces changements, leurs causes, leur devenir et plus encore sur leurs impacts immédiats et lointains sur les modes de vie, les écosystèmes et l'économie. Face à ces diverses interrogations et « *pour mettre l'accent sur le caractère nécessaire de la science* » (Bolzano, in Cavallès, 1994, p.19), les scientifiques ont apporté des réponses, qui restent encore aujourd'hui partielles et sujettes aux controverses. Malgré cela, notre compréhension du système climatique s'affine de plus en plus, au point de générer certaines certitudes.

- Ainsi, nous savons que les conditions atmosphériques changent en permanence. La météorologie est la science qui étudie ces modifications dans un temps relativement court (quelques jours). Elle se fonde pour les étudier sur les variations des phénomènes atmosphériques que sont les nuages, les dépressions, les précipitations, etc., en utilisant des données précises, comme la température, l'humidité, etc. La succession de ces conditions météorologiques relève désormais du domaine de la climatologie. Contrairement à la météorologie, les études des climatologues se déroulent sur le long terme et s'appuient sur des statistiques basées sur au moins trente ans. Grâce à cela, nous pouvons alors définir le climat d'une région : par exemple continental, tropical, sahélien, etc.

- Nous entendons par « *système climatique* » le climat global de la Terre et les climats régionaux dont les éléments forment un système complexe, à l'échelle de la planète et constitué de toute une série d'interactions entre différents éléments que sont : *l'atmosphère* (interactions entre les vents, la composition de l'atmosphère), *la lithosphère* (position des continents, Albédo, etc.), *l'hydrosphère* (courants océaniques, températures et composition des mers, lacs, etc.), *la cryosphère* (création de courants océaniques froids profonds, Albédo, etc.) et *la biosphère* (influence sur la composition de l'atmosphère et des océans).

Ce système climatique évolue dans le temps sous l'effet de ses propres « *éléments dynamiques* » et de « *forçage (contraintes) externes* » (Deblonde, 2011, p. 70). Il s'agit entre autres, des éruptions volcaniques, des variations solaires ou anthropiques, de la modification de la composition de l'atmosphère et des changements d'affectation de temps. Parler de changement climatique revient à admettre que tout ce système subit une modification durable (au moins dix ans). La réorganisation fondamentale de la circulation océanique, la déglaciation rapide ou la fonte du pergélisol, sont donc suffisants pour entraîner la perturbation de notre système et occasionner des dommages importants.

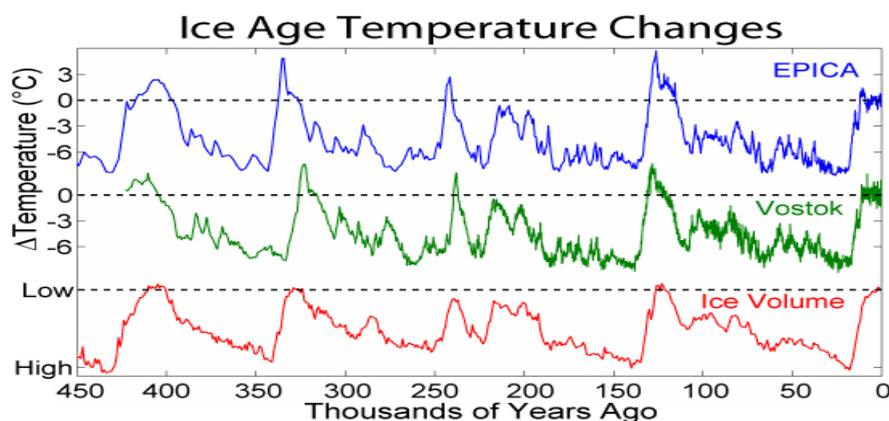
La variabilité du climat

La compréhension du changement climatique passe par une série d'étapes permettant de cerner ce que l'on appelle variabilité du climat. Pour apprécier la variabilité de notre climat depuis des milliers d'années les scientifiques utilisent des indicateurs : les indicateurs dendrochimiques et les indicateurs dendrométriques pour l'appréciation de l'épaisseur des cernes de croissances des arbres qui augmentent en cas de chaleur (Becker et al 1989). Les premiers se focalisent sur l'analyse des minéraux dans les cernes tandis que les seconds s'intéressent à leur composition, leurs propriétés et leur croissance. Pour l'essentiel, la compréhension des différents mécanismes impliqués dans l'évolution naturelle du climat au cours des derniers grands cycles de périodes glaciaires et interglaciaires, dépend fortement du comportement des carottes de glace.

Plusieurs fois, notre système climatique a connu différents cycles climatiques de réchauffement puis de refroidissement. Ces modifications se caractérisent par la différence de leur durée (de quelques milliers à plusieurs millions d'années) mais aussi par leur amplitude. Nos connaissances sur les climats récents de l'ère quaternaire (de -1,8 millions d'années à aujourd'hui), sont possibles grâce aux prélèvements effectués par les scientifiques sur les carottes de glace en Antarctique et récemment sur les carottes de glace de quelques montagnes de haute altitude comme les Andes (Pérou et Bolivie), le Mont Kilimandjaro (Tanzanie) et les Chaînes de l'Himalaya (Asie). Ce travail a permis d'avoir des informations sur les moyennes annuelles de la composition de l'atmosphère, de la température terrestre, des précipitations, des vents et des activités volcaniques et toutes les reconstitutions de températures sont possibles grâce à cette méthode.

Ces observations montrent les variations de températures terrestres durant les quatre périodes glaciaires et interglaciaires selon les climatologues. La concentration de CO₂ et les activités humaines ont vraisemblablement impacter ces variations. Mais nous devons associer à ce réchauffement d'autres facteurs internes.

Figure 3 : Changements de la température terrestre selon l'âge de la carotte glaciaire



Source : ROHDE (2006)

Les scientifiques (les climatologues et les météorologues) avancent généralement quatre facteurs : l'insolation, les paramètres de Milankovič, l'Albédo, le phénomène El Niño.

- Pour les météorologues, l'insolation, désigne « l'exposition d'un objet au rayonnement solaire direct. Cette exposition est correctement révélée par la présence d'ombres portées nettement dessinées, on considère alors que la production de telles ombres est possible lorsque l'éclairement de l'objet par le soleil a une valeur au moins égale à 120 watts par mètre carré, ce qui permet de déterminer à chaque instant s'il y a insolation ou non » (site de Météo-France, 08/12/2016).

- La théorie astronomique du climat est associée à celle proposée en 1924 par le Yougoslave Milankovič. Cette théorie explique les variations de l'ensoleillement des différentes régions sur Terre suite à l'évolution du mouvement de la Terre autour du soleil. La théorie de Milankovič, appelée aussi *les paramètres ou cycles de Milankovič*, correspond à trois phénomènes orbitaux - l'excentricité, l'obliquité et la procession - affectant certaines planètes du système solaire. La terminologie de « *paramètres de Milankovič est un outil de travail dans le cadre de la théorie astronomique des paléoclimats* » (Hays et al, 1976).

- La théorie astronomique du climat nous précise que l'Albédo est une valeur physique qui permet de connaître la quantité de lumière solaire incidente réfléchiée par une surface. Elle est une grandeur adimensionnelle car elle permet de décrire une caractéristique physique sans dimension ni unité explicite. C'est donc un baromètre des variations climatiques qui influe sur la connaissance de l'amplitude de l'effet de serre en opposant une rétroaction positive sur la température en surface et des océans en fonction de la variation du volume des glaces. Il est aujourd'hui admis que la fonte des glaces et la déforestation massive ont entraîné une modification de l'Albédo qui à son tour, a contribué à modifier les échanges d'énergie de la planète.

- Constituée d'évènements chauds (*El Niño*) et froids (*La Niña*), la variation australe ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) est l'un des grands évènements perturbateurs du climat à l'échelle internationale. Pour les chercheurs en géophysique et en océanographie spatiales, ce phénomène se traduit par un réchauffement des eaux de la surface à l'est de l'océan Pacifique tropical où se concentrent habituellement des eaux relativement froides (26°C environ).

Changements climatiques et méthodes d'observations

Pour connaître l'évolution du climat, il est important de disposer de méthodes d'observations globales de toutes les composantes du système climatique (atmosphère, océans, terres émergées et glaces) sur de longues périodes. Généralement, ces méthodes se basent sur les mesures directes ou sur la télédétection à partir de satellites ou d'autres plates-formes. Les observations de « *l'ère instrumentale*

ont débuté vers le milieu du XIXe siècle pour certaines variables telles que la température » (GIEC, 2013) tandis que les observations par « satellites remontent au milieu des années 1970 » (Rapport de l'Académie des sciences de Paris 2010). Ainsi, la reconstitution des climats du passé se fait grâce aux archives paléo-climatiques. Ces dernières permettent aux scientifiques d'étendre leur enregistrement sur plusieurs centaines, voire plusieurs millions d'années avant notre ère.

La variation de la température à la surface de la Terre

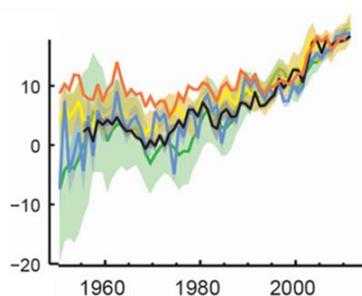
Des variations cycliques naturelles rythment l'évolution du climat. Nous avons les périodes glaciaires « froides » et interglaciaires « chaudes ». Cependant une analyse sur le long terme montre que les changements climatiques s'accroissent. Cette variabilité s'explique par la combinaison de multiples facteurs (facteurs astronomiques et autres facteurs naturels : volcans etc.). La tendance linéaire de la moyenne des données de température de surface combinant les Terres émergées et les océans, « indique un réchauffement de 0,85 (0,65 à 1,06) C° au cours de la période 1880-2012, pour laquelle existe plusieurs données indépendantes » (GIEC, 2013). Ainsi, « depuis 1400 ans, les années 1983 et 2012 constituent probablement la période de 30 ans la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord (GIEC, 2013) ». Ceci fait dire à Casty et al. (2005) que « globalement, durant les 100 dernières années, la décennie 90, est probablement celle qui est la plus chaude » (Casty, et al, 2005).

La variation de la température des océans

Nous savons que depuis 1950, jusqu'à 700m de profondeurs, les bateaux de commerce ou les navires océanographiques prélevaient les températures des océans. Durant la période 1971-2010, considérée comme relativement bien documentée, avec l'utilisation du système de bouées profitantes Argos, nous observons que plus de « 60% de l'augmentation nette d'énergie absorbée par le système climatique est emmagasinée dans l'océan superficiel (0-700m) et environ 80% dans l'océan en dessous de 700m » (GIEC, 2013). Pour le groupe d'experts de l'académie des sciences de Paris, il n'y a aucun doute, « le contenu d'énergie thermique de l'océan a donc aussi augmenté surtout depuis le début de 1980 » (Rapport de l'Académie des Sciences de Paris, 2010).

Figure 4 : évaluation de la moyenne globale du contenu thermique de l'océan superficiel

En 10^{22} joules



Source : d'après Giec, 1^{er} groupe de travail, 2013

La cryosphère

La cryosphère désigne toute les parties de la surface de la Terre où l'eau est à l'état solide (glace et neige). Elle inclut les banquises, les lacs et rivières gelés, les régions recouvertes de neige, les glaciers et les sols gelés (de façon temporaire ou permanente) (*Kit pédagogique sur les changements climatiques*). Les dernières données des experts du GIEC montrent qu'« au cours des deux dernières décennies, la masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique a diminué, les glaciers, presque toutes les régions du globe ont continué à se réduire et l'étendue de la banquise arctique et celle du manteau neigeux de l'hémisphère Nord au printemps ont continué à diminuer » (GIEC, 2013). Dans l'hémisphère sud, spécifiquement le cas du Kilimandjaro, la première étude sur le Mont Kibo remonte en 1912. En 2001, les chercheurs de l'AAAS (*American Association for the Advancement of Science*) ont rapporté l'existence de modifications considérables du volume de la calotte blanche du Kilimandjaro. Ils ont estimé que 82% de cette calotte glaciaire, telle qu'observée en 1912, avait aujourd'hui disparu, et que la glace elle-même s'était affinée, perdant jusqu'à un mètre dans une des zones affectées : « Si la tendance de cette diminution se confirme, dans les prochaines quinze années, la majorité des glaciers du Mont pourrait disparaître » (AAAS, 2001, GIEC, 2001).

Le niveau moyen des océans

Le niveau des mers est une des composantes du système climatique, c'est un indicateur qui intègre plusieurs autres éléments : océan, glace, glace continentale, eaux continentales. Avant 1992, les scientifiques utilisaient le marégraphe pour mesurer le niveau des mers le long des côtes continentales et de quelques îles. « Le niveau des océans, en moyenne annuelle sur toute la planète, s'est élevé à un rythme de 0,7mm/an entre 1870 et 1930 et environ 1,7mm/an après 1930 » (Rapport Académie des sciences, de Paris 2010). D'après le GIEC, « depuis le milieu du XIXe siècle, le rythme d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au rythme moyen des deux derniers millénaires » (degré de confiance élevé, GIEC 2013).

Les indicateurs biologiques

Ils représentent l'ensemble des déplacements des populations animales terrestres ou marines et l'évolution de l'activité agricole à travers les époques. Ils montrent aussi « *la survenue d'un réchauffement climatique même s'il est très difficile à les quantifier* » (Rapport de l'Académie des sciences de Paris, 2010). En résumé, il existe bel et bien des facteurs et des indicateurs internes d'un réchauffement climatique : « *...depuis la seconde moitié du XIXe siècle, plusieurs indicateurs indépendants montrent sans ambiguïté un réchauffement climatique, post- Petit âge glaciaire, modulé dans le temps, avec une augmentation de 1975 à 2003* » (ibid).

Les facteurs du réchauffement climatique

L'effet de serre est un processus naturel de réchauffement de l'atmosphère. Il est indispensable à la vie sur Terre. Les principaux gaz à effet de serre naturel sont la vapeur d'eau (H₂O) et le gaz carbonique (CO₂), la première est responsable de la moitié de l'effet de serre naturel tandis que le second y contribue au quart. D'autres gaz participent aussi à l'effet de serre naturel mais de manière faible (1%) : le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone.

Parallèlement, les activités humaines produisent des quantités importantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. « *Ces gaz d'origine anthropique sont probablement responsables des tendances climatiques observées depuis 1975* » (CNRS, cahiers 2016).

Il s'agit :

- du dioxyde de carbone (CO₂) produit en quantité par la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), utilisées pour les transports et le chauffage, et d'une façon moindre, la déforestation. « *Sa concentration augmente continuellement depuis le milieu du XIXe siècle, en raison principalement des activités industrielles, passant de 280ppm vers 1870 à 388 ppm en 2009* » (Rapport Académie des Sciences de Paris, 2010). Les experts du GIEC nous confirment cette augmentation, « *les émissions de CO₂ dues à l'utilisation de combustion de fossiles et à la production de ciment étaient de 8,3 (7,6-9,0) GtC/an en moyenne sur 2002- 2011* » (GIEC, 2013).

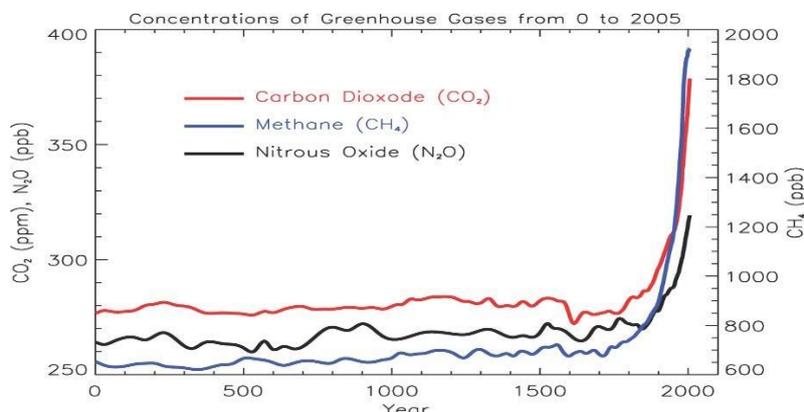
- du méthane (CH₄) issu de la digestion des ruminants, des décharges et des pertes lors de l'extraction, le transport et l'utilisation du gaz naturel, et du pergélisol. « *Sa concentration s'est accrue de 140% sur la même période* » (Rapport de l'Académie des sciences de Paris, 2010).

- du protoxyde d'azote (N₂O) qui entre dans la composition des engrais. Il renvoie aux activités agricoles, à la production d'aliments pour le bétail et à certains procédés chimiques comme la production d'acide nitrique. « *Sa concentration a aussi augmenté de 20%* » (Rapport de l'Académie des sciences de Paris, 2010).

L'augmentation de l'effet de serre induit pour l'ensemble de ces trois composantes est de 2,3 W/s (idem). Le GIEC est catégorique avec un degré de probabilité très élevé : «

les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800.000 ans » (GIEC, 2013).

Figure 5 : l'évolution de la concentration de gaz à effet de serre depuis 1750



Source : GIEC (2005)

- Enfin, il faut ajouter à ces trois composantes, « les halocarbures ou gaz industriels (qui n'existent pas à l'état naturel) dont les plus célèbres CFC utilisée pour fabriquer certains produits ou gaz réfrigérants ou propulseurs » (CCNUCC, 1998).

La radiation et les cycles d'activités du soleil jouent également un rôle important. La luminosité du soleil, la distance de la Terre au Soleil et de l'orientation de l'axe de rotation de la Terre déterminent la radiation solaire reçue par la Terre. Ces paramètres varient en raison de perturbations gravitationnelles exercées par la Lune et les autres planètes. Les climatologues estiment que le forçage correspondant est de l'ordre de 0,2 W/m², 10 fois plus faible que celui dû à l'augmentation de l'effet de serre anthropique. Par « activité du Soleil », les scientifiques désignent les phénomènes associés au champ magnétique du Soleil et aux éjections de matières et de particules de haute énergie (taches solaires, éruption et vent solaire par exemple). L'activité solaire varie périodiquement avec des cycles d'environ 11 ans et 23 ans. Toutefois, ces mêmes scientifiques notent qu'il y a une très faible variation de cette irradiance, de l'ordre d'un millième, associée au cycle d'activité. Ainsi, ces deux phénomènes (la radiation et le cycle d'activité du soleil) ne peuvent pas être les facteurs dominants du réchauffement de la Terre.

Des connaissances sur les climats du passé

Pour avoir des connaissances sur les climats du passé, les scientifiques se fondent sur un ensemble d'indicateurs :

- les indicateurs géologiques (géochronologie, paléo températures, sédiments, charbons, fossiles),

- l'observation directe des bulles d'air de l'atmosphère du passé piégées dans les carottes de glace extraites des calottes du Groenland et de l'Antarctique ainsi que leur analyse chimique très précise, indicateurs qui couvrent 800000 ans en Antarctique et 123000 ans au Groenland,

- l'observation, l'analyse statistique, la géochimie isotopique sur sédiments et sur les microfaunes marines. (Rapport Académie des sciences de Paris, 2010).

Ces observations et ces études de processus de rétroaction, nous donnent une compréhension significative des changements récents concernant le système climatique. A cela s'ajoutent « *la modélisation des mécanismes du climat* » (Dalmedico, 2007, p. 7) et « *la définition de tests* » qui peuvent être utilisés pour « *la validation des modèles climatiques* » (Rapport Académie des Sciences de Paris, 2010).

Modèles et scénarios climatiques

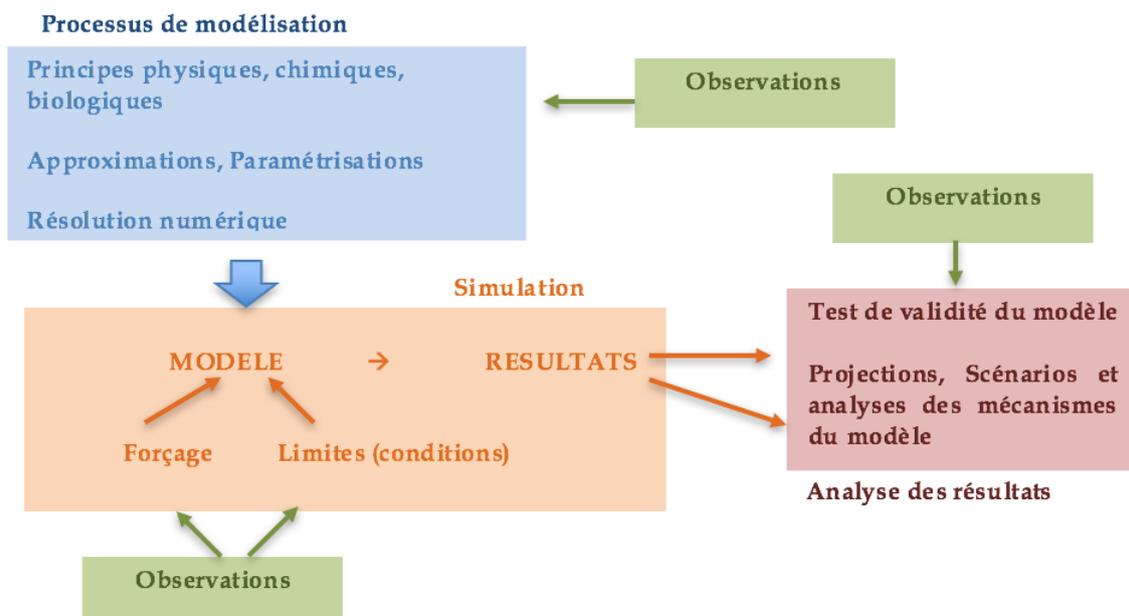
Depuis le début des années 1960, les modèles et les scénarios se sont imposés sur la scène scientifique internationale (Le Treut, 2009). Par modèle, il faut entendre plusieurs choses. Pour Hervé Le Treut (Institut Simon Laplace de Paris, ISLP), le mot modèle « *désigne une approche scientifique très générale, consistant à définir une représentation simplifiée du monde réel nécessairement réductrice, mais suffisante pour permettre un travail de réflexion, de compréhension voire de prévision* » (Le Treut, 2017). Jean-Charles Hourcade le définit quant à lui « *comme un langage de communication entre disciplines, comme un langage en négociation entre acteurs séparés par des divergences d'intérêts et de visions du monde et, aussi, comme un outil de détermination des paramètres objectifs permettant de définir les bonnes politiques* » (2007, p. 14). En effet, nos décisions sont souvent basées sur des abstractions et des généralisations, lesquelles renvoient directement à nos représentations du monde. Les modèles mentaux peuvent prendre la forme de *Systems Thinking* (Sweeney, Meadows, 2010).

Pour pouvoir « communiquer » ce modèle mental, il faut utiliser un médium, c'est-à-dire un moyen de communication. Les mots sont *le médium* le plus connu et utilisé. A chaque fois que nous utilisons des mots pour décrire un modèle, nous sommes en face d'un « modèle verbal ». Par exemple, des livres comme « *le Politique* » d'Aristote (-384 A J-C, -322 A J-C), « *le Capital* » de Karl Marx (1867) ou bien « *la Quête du bonheur dans les deux mondes* » d'Ahmadou Bamba (1887) sont des modèles verbaux. Toutefois, l'interprétation d'un même modèle verbal par des personnes différentes produit très souvent des modèles mentaux différents. A ce sujet, Hervé Le Treut avance que « *le modèle recouvre des approches différentes qui d'un extrême à l'autre, peuvent être purement conceptuelles, s'écrivant avec des mots sans aucun recours mathématiques ou au contraire purement statistiques et s'écrivant avec des chiffres sans le soutien d'aucune idée explicative* » (Le Treut, www.climat-en-question.fr).

Les modèles mathématiques sont également sur des modèles mentaux. Mais à la différence des modèles verbaux, ils utilisent des symboles mathématiques. Les modèles informatiques sont aussi des modèles mentaux mais ils utilisent le langage informatique, c'est ce qui permet aux ordinateurs de livrer des conclusions à partir d'hypothèses. Généralement, un modèle informatique est utilisé lorsque la situation ou le système en cours de modélisation est complexe et qu'il est impossible de l'englober dans des mots ou dans de simples équations.

C'est peut-être ce qui explique les malentendus et les controverses qui en résultent lors des négociations sur le climat. Aujourd'hui, nous pouvons dire que les modèles ont un statut privilégié dans la communauté scientifique, les sciences de la nature, les sciences économiques et de gestion, les sciences et même les sciences politiques se sont pliées au jeu de la modélisation climatique (usage de la théorie des jeux dans le cas de négociations sur le climat). La modélisation du climat a la particularité d'inscrire le climat dans une démarche scientifique, elle s'appuie sur des lois physiques pour proposer une explication de l'évolution des systèmes naturels, et prospective, elle confère à la notion de scénario, un rôle prééminent dans la science climatique. Un scénario est « *une prédiction numérique constitués de savoirs quantitatifs sur le futur éloigné de notre planète et celui de nos sociétés* » (Dalmedico et al, 2007, p. 7). Dans l'activité des modélisateurs du climat, les scénarios jouent le rôle d'inputs dans leurs modèles. De plus en plus de scénarios (part des énergies renouvelables, diminution de l'usage de la voiture...) prennent place dans la structure du modèle. Par leur conception, ces scénarios participent ainsi à l'émergence de nouvelles générations de modèles : les modèles intégrés ou les modèles couplés car en réalité il s'agit de coupler des modèles d'activités humaines (usage des sols, demande et consommation en énergie...) et des modèles de l'univers (atmosphère, les océans ...). Une telle conception pousse certains chercheurs comme Michel Armatte à définir aussi les scénarios comme des « *actes d'imagination raisonnée* » ou des « *moyens de coordination et sélection des futurs possibles* » (Armatte, 2007, p. 75) Ainsi dans la fabrication des modèles du futur s'établit une relation d'interdépendance entre modèles et scénarios : les scénarios interviennent dans la modélisation et les modèles produisent les scénarios.

Figure 6 : Modéliser le système climatique



Source : adapté de Goosse (2015)

Histoire de la modélisation des changements climatiques

Les modèles numériques de climat constituent à ce jour, les seuls instruments capables de nous projeter vers l'avenir du climat de notre planète : « Depuis la publication du quatrième rapport d'évaluation, les modèles climatiques ont progressé, et, ce sur la base des données concernant l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le forçage radiatif positif, le réchauffement observé et la compréhension du système climatique » (GIEC, 2013). Aujourd'hui, ces modèles ouvrent (observations et prévisions) et concluent (prises de décision) tout débat sur la question du changement climatique. Au début des années 1990, les climatologues sur la base de leurs simulations ont cherché à alerter le public et les politiques sur le risque de réchauffement global. Les modèles numériques du climat constituent la pièce maitresse de l'expertise climatique et fournissent périodiquement, pour les rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), des projections de climats futurs sur la base de différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre.

Ces scénarii, fortement médiatisés, reposent sur des fourchettes chiffrées de hausses de la température à la surface du globe et sont soumis au feu des critiques. Ils sont ainsi devenus des « objets de controverses » sur le changement climatique, des controverses de type scientifique et des controverses de type politique. En effet, l'action politique a besoin des données de la science climatique pour justifier ses prises de décisions et imaginer un futur possible, tandis que la science climatique a besoin d'un cadre juridique et institutionnel pour asseoir sa légitimité. Face aux incertitudes liées au changement climatique, les modèles suscitent étonnement et méfiance, ils soulèvent même différentes interrogations : peut-on prédire l'avenir sur la seule base

de la puissance des ordinateurs ? Les projections à long terme des modèles numériques sont-elles suffisantes pour susciter l'action parmi les acteurs socio-économiques et politiques ?

Si les premiers modèles du climat apparaissent dans les années 50, des projets sont déjà présents au tout début du XXe siècle. Dès 1904, le physicien norvégien Vilhelm Bjerknes propose dans un article intitulé « *The problem of Weather Prediction, as Seen From the Standpoints of Mechanics and Physics* » de rattacher l'atmosphère à un ensemble de variables que l'on pourrait relier sous forme d'équations :

“The state of the atmosphere at a particular time will be determined, in a meteorological sense, when we can determine the air speed, density, pressure, temperature, and humidity at every point. The wind velocity will be represented by three scalars, the three wind speed components, so that, as a result, we need to be concerned with the calculation of seven unknown quantities. To calculate these quantities, we set up the following equations:

- 1. The three hydrodynamic equations of motion. These are differential equations representing relationships between the three wind speed components, the density, and the pressure.*
- 2. The equation of continuity, which states the principle conservation of mass during motion. This relationship is also expressed by a differential equation, more precisely a relationship between the wind speed components and air density.*
- 3. The equation of state for the atmosphere, which is an infinite series involving the density, pressure, temperature, and the humidity of a given air mass.*
- 4. The two major principles of the mechanical theory of heat, which state, in two differential equations, how, as a result of ongoing condition changes, the energy and entropy of a chosen airmass are altered. In addition, these equations introduce no new unknown quantities into the problem, because the energy and entropy express themselves through the same transformations that are found in the equations of state, and tie the changes in these variables with the changes of other known quantities. The other inputs are: firstly, the work done by the air mass, which is determined by the same transformations which are found in the dynamic equations; secondly, the externally determined heat quantities, which will be obtained from physical data concerning radiant energy transfer and the heating of the air caused by the motion of the earth” (Bjerknes, 1904, II).*

Dans un système de 7 équations à 7 inconnues, il était possible d'éliminer une inconnue à l'aide de l'équation d'état, toutefois, malgré cette simplification, il s'agissait toujours d'intégrer un système de 6 équations aux dérivées partielles avec 6 inconnues. Pour Bjerknes, la conclusion était sans équivoque: « *It's not possible to obtain a rigorous mathematical integration of this system of equations. Even the calculation of the motion of three objects, which are mutually influenced according to simple Newtonian law, goes substantially beyond today's mathematical tools... The exact analytic solution would not be what we need, even if we were able to obtain it* ” (ibid). Il convenait donc d'abandonner toute pensée d'une solution analytique. Le problème du prévisionniste “météo” devait être

envisagé sous une forme pratique: « *the initial state of the atmosphere is represented by a number of tables, which specify the division of the seven variables from layer to layer in the atmosphere. With these tables as the initial values, one can specify similar new tables which represent the new values from hour to hour. Graphical or mixed graphical and numerical methods are needed in order to solve the problem in this form, whether from the partial differential equations, or from the physical/ dynamic principles which underlie the equations. The effectiveness of such methods can't be questioned on an a priori basis. Everything depends on successfully separating a single overwhelmingly difficult problem into a series of sub problems, none of which present impossible difficulties* » (ibid).

Quelques années plus tard (1916 - 1918), le britannique Lewis Fry Richardson²¹ développa des techniques de prévisions pour résoudre les équations du mouvement atmosphérique. En utilisant crayons, papiers, règles de calculs et tables logarithmiques, il calcula manuellement les changements dans la pression et le vent en deux points, à partir d'une analyse de l'état de l'atmosphère à 7.00 GMT, le 20 mai 1920. Sa méthode²² de résolution des équations du mouvement atmosphérique, les calculs et sa prévision furent décrits dans un ouvrage *Weather Prediction by Numerical Process* (WPNP) publié par Cambridge Press en 1922²³.

Dans la préface de cet ouvrage, Richardson n'hésitait pas à rappeler la dette qu'il avait envers Bjerknes: "*The extensive researches of V. Bjerknes and his School are pervaded by the idea of using the differential equations for all that they are worth. I read his volumes on Statics and Kinematics soon after beginning the present study, and they have exercised a considerable influence throughout it*" (Richardson, WPNP, 1922, préface). Pour résoudre le problème posé par Bjerknes, Richardson a supposé que l'état de l'atmosphère à n'importe quel point pouvait être spécifié par sept chiffres : pression, température, densité, teneur en eau et vitesse vers l'est, vers le nord et vers le haut. Il a ensuite formulé une description de l'atmosphère en termes de sept équations différentielles. Pour les résoudre et les simplifier, il a considéré qu'il était nécessaire de partir d'une situation météorologique avec un nombre important de données terrestres et d'altitude sur l'ensemble du globe. Richardson a découpé le globe en une grille rectangulaire de 200 km², ce qui donnait 32 000 colonnes sur la carte complète du globe. Il a ensuite estimé 2000 colonnes de calcul actives pour la planète (Heidorn, 2004) et imaginé que pour des pas de temps de trois heures, il faudrait 32 personnes

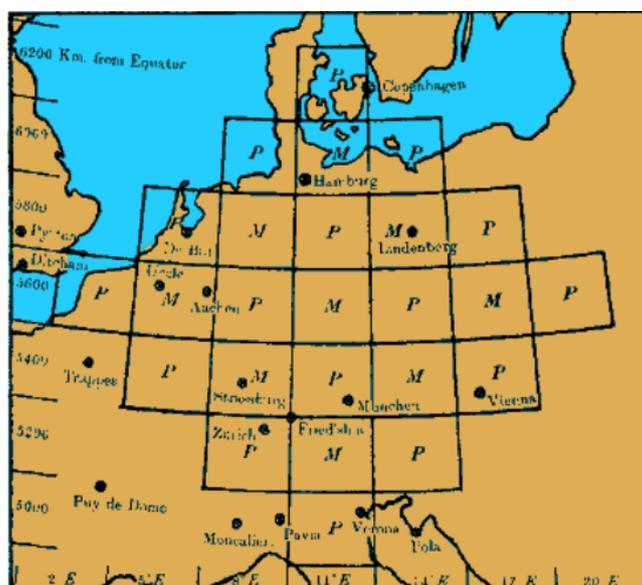
²¹ Depuis 1997, la médaille *Lewis-Fry-Richardson* est une récompense offerte par la Société Européenne de Géophysique) pour une contribution exceptionnelle à la géophysique non linéaire.

²² "*Whereas Prof. Bjerknes mostly employs graphs, I have thought it better to proceed by way of numerical tables. The reason for this is that a previous comparison of the two methods, in dealing with differential equations, had convinced me that the arithmetical procedure is the more exact and the more powerful in coping with otherwise awkward equations*" (Richardson, WPNP, 1922 p. viii).

²³ A peine trois ans après la publication de la *théorie des fronts météorologiques et de la cyclogénèse des latitudes moyennes* par Vilhelm et Jacob Bjerknes.

(qu'il appelle « *computers* ») pour effectuer deux calculs pour chaque point de la carte afin de suivre les changements climatiques.

Figure 7 : Map Grid de Richardson



Source : Richardson (1922)

Ainsi (32 x 2000), 64 000 personnes (*individual computers*) étaient nécessaires pour que la prévision soit émise avant que l'événement n'intervienne : "Imagine a large hall like a theater except that the circles and galleries go right round through the space usually occupied by the stage. The walls of this chamber are painted to form a map of the globe. The ceiling represents the north polar regions, England is in the gallery, the tropics in the upper circle, Australia on the dress circle and the antarctic in the pit. A [sic] myriad computers are at work upon the weather of the part of the map where each sits, but each computer attends only to one equation or part of an equation. The work of each region is coordinated by an official of higher rank. Numerous little 'night signs' display the instantaneous values so that neighbouring computers can read them... From the floor of the pit a tall pillar rises to half the height of the hall. It carries a large pulpit on its top. In this sits the man in charge of the whole theatre; he is surrounded by several assistants and messengers. One of his duties is to maintain a uniform speed of progress in all parts of the globe. In this respect, he is like the conductor of an orchestra in which the instruments are slide rules and calculating machines. But instead of waving a baton he turns a beam of rosy light upon any region that is running ahead of the rest, and a beam of blue light upon those who are behindhand " (Richardson, WPNP, 1922). D'une certaine manière, on peut considérer que Richardson essaya de montrer que le calcul permettait d'effectuer des prévisions météorologiques à une époque où les calculateurs électroniques n'existaient pas encore, un avènement qu'il appelait de tous ses vœux: « *Perhaps some days in the dim future it will be possible to advance the computations faster than the weather advances and at a cost less than the saving to mankind due to the information gained. But that is a dream* " (Richardson, WPNP, 1922, p. vii). Il faudra attendre les années 40 pour que le rêve de Richardson voit le jour. En 1945, le

mathématicien américain d'origine hongroise, John Von Neuman fait de la météorologie son domaine de prédilection. Engagé dans les simulations d'explosion de l'arme nucléaire, Von Neuman considère que la modélisation du climat peut mener à un contrôle du temps, qui pourrait être lui-même utilisé comme une arme de guerre. Ainsi « *Soviet Harvest, for example, might be ruined by a U.S induced drought* » (Randall, 2000, p. 69). Avec des fonds de l'US Weather Bureau, de la Navy et de Air Force, Von Neumann parvient à réunir un groupe de météorologistes à l'Institut for Advanced Study (IAS) de Princeton. En 1946, le *Meteorological Project* est ainsi lancé. Jule Charney, un météorologue de l'énergie qui a travaillé avec Carl Gustaf Rossby (Université de Chicago) et Arnt Eliassen (Université d'Oslo) est invité à prendre la direction du projet. Ce dernier fit sa première prévision opérationnelle du temps sur un ENIAC en 1950 (Harper, 2008). Le modèle reposait sur une division de l'atmosphère en un ensemble de cellules (en réseau) et employait des méthodes de différence finie pour résoudre numériquement des équations différentielles. Les prévisions de 1950, couvrant le Nord des Etats-Unis, utilisaient un maillage à deux dimensions avec 270 points sur 700 kms. Le pas de temps était de 3heures (comme pour Richardson). Les résultats furent assez bons pour justifier la poursuite du projet (Charney et al., 1950).

L'intérêt scientifique de ces recherches fût double. D'une part, elles ont permis de tester des hypothèses sur les mécanismes climatiques en calculant des prévisions susceptibles d'être confrontées aux données. D'autre part, elles ont permis d'admettre que l'amélioration de la prévision du temps passe par une meilleure compréhension des mécanismes généraux du climat. Cette situation privilégie ainsi les scientifiques de Princeton à développer, à côté des modèles de prévision, *des modèles de circulation générale* (Global Circulation Models, GCM) dont l'objectif est de reproduire les propriétés moyennes des mouvements de l'atmosphère. Ces derniers sont les générateurs des modèles du climat que nous connaissons actuellement. Le premier modèle numérique de circulation générale de l'atmosphère fût proposé par Norman Phillip (1955). Sa méthodologie est basée sur des formulations simplifiées des équations de la dynamique, pour lesquelles il parvenait à reproduire les grands traits de la circulation à l'échelle du globe (courants, jets, dépressions...). Désormais, la circulation de l'atmosphère constitue l'un des thèmes majeurs dans la recherche des météorologues.

Ce succès historique a entraîné une nouvelle ère dans la modélisation du climat avec la convergence entre les modélisations du climat et celles de la prévision du temps. Les modèles météorologiques, d'abord régionaux, puis hémisphériques, deviennent sphériques et sont donc capables de reproduire la circulation de l'atmosphère sur tout le globe. Les modèles de circulation générale sont de véritables modèles du climat, ils intègrent des représentations de surfaces qui leur permettent de retrouver les températures et de faire des projections à long terme.

Ces modèles de circulation générale (GCM) seront utilisés à la fois pour prévoir le temps et pour étudier le climat. En effet, quel que soit leur utilisation (prévision à court terme ou modélisation du climat), ces modèles ont des fondements similaires. Ils cherchent à simuler les mouvements de l'atmosphère en se basant sur les lois de la physique. Ici, le processus de modélisation comprend deux phases : (1) l'atmosphère est représentée par un maillage à trois dimensions ; (2) l'ordinateur calcule pour chaque maille et à chaque pas de temps, les variables caractérisant l'état de l'atmosphère (température, pression, vent, humidité...) à partir de leur valeur au pas de temps précédent en résolvant les algorithmes constituant le modèle. Cette deuxième phase suit elle-même deux étapes distinctes : (i) une partie dynamique qui décrit les mouvements des masses d'air dont les algorithmes sont tirés des équations de la mécanique des fluides et (ii) une partie physique décrivant les échanges verticaux entre l'atmosphère et l'espace, et entre l'atmosphère et les surfaces océaniques et continentales.

Tous les éléments qui ne sont pas pris en compte par le maillage, et dont on peut estimer statistiquement leurs effets climatiques tels que les processus physiques (la convection, l'évaporation, la turbulence), chimiques (condensation, précipitations...) ou encore biologiques sont paramétrés.

Ainsi, avec l'avènement du calculateur numérique, météorologues et climatologues parviennent à modéliser la circulation de l'atmosphère terrestre à trois dimensions (3D), en utilisant les lois de la dynamique des fluides et de la chimie de l'atmosphère pour simuler les données météorologiques disponibles sur une grille de calcul et projeter leur évolution dans le temps.

Evolution des modèles numériques de climat

Depuis le début des 1980, l'évolution de la modélisation a connu successivement trois dynamiques : scientifique, technique et sociale.

La dynamique scientifique s'est développée aux Etats-Unis dans les années 1950 comme nous l'avons déjà indiqué auparavant, puis s'est disséminée en Suède et au Royaume-Uni. Les ordinateurs (dont la puissance de calcul a augmenté de manière exponentielle) et l'observation par satellite (dotée de moyens considérables) ont révolutionné la modélisation du climat. Ces progrès instrumentaux attirent de jeunes chercheurs issus d'autres champs disciplinaires (comme le mathématicien Von Neumann de Princeton) dans les recherches sur le climat. La portée hautement scientifique de la prévision météorologique et de la modélisation du climat a entraîné une rapide évolution des sciences de la Terre (océanographie, géophysique, sismologie, paléoclimatologie). En 1957, l'une d'elles, la tomographie sismique (enregistrement annuelle des ondes sismiques lors des tremblements de terre), obtient ses lettres de noblesse sur la scène internationale (année géophysique internationale)

en développant de nouvelles techniques d'investigation telles que les méthodes de datation isotopiques (connaissance du temps géologique). Ces sciences bénéficient de nouveaux programmes de recherches sur la cartographie magnétique des océans, via l'installation des réseaux de mesures météorologiques.

Cette dynamique technique permet le rapprochement entre la climatologie et la paléoclimatologie au cours de la décennie 1970-1980, avec une série de découvertes majeures parmi lesquelles la mise en évidence des cycles glaciaires (à partir des carottes sédimentaires), la confirmation des théories sur l'origine astronomique de ces cycles, la révélation de la rapidité des variations climatiques (par des carottages dans les glaces). Ces différentes recherches ont permis de valider les résultats de certains modèles et ont ouverts la voie à la prise en compte de la dimension sociale du climat.

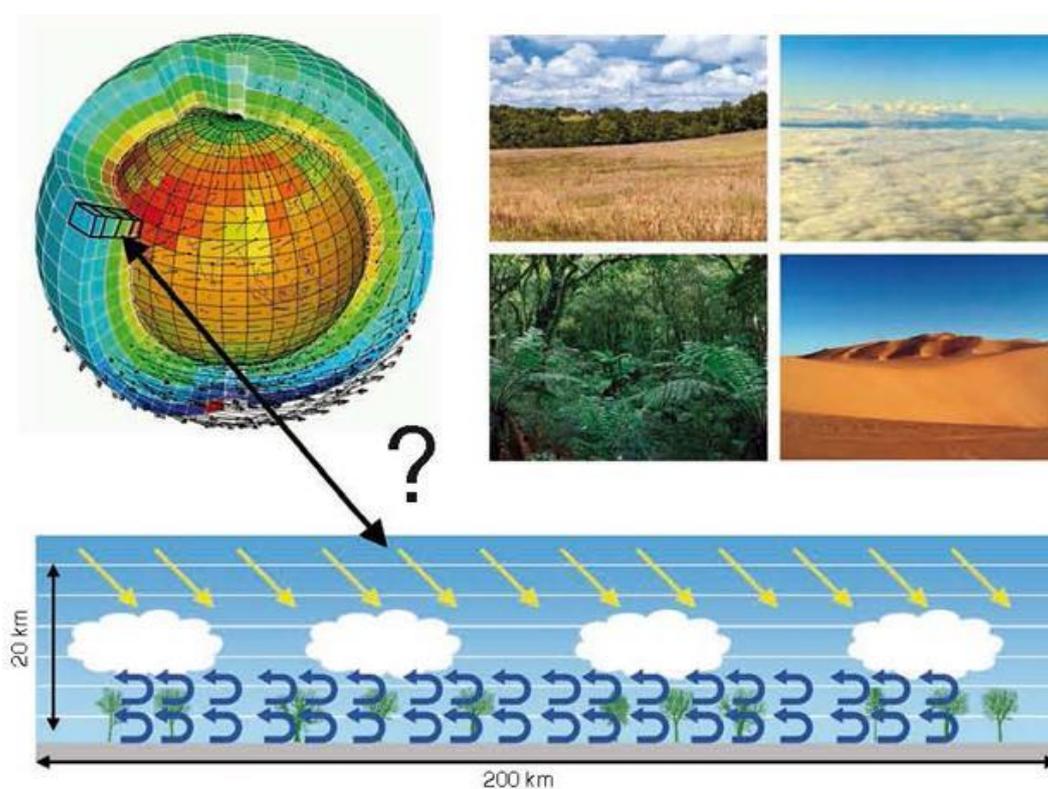
Les nombreuses alertes sur les pollutions urbaines, marines ou océanique des années 1960-1970, ont complètement transformé les représentations des populations sur la nature, les sciences et de leurs progrès technologiques. « *En quelques années la technologie est perçue non plus comme porteuse de bien-être et de savoir, mais comme une source de risques, tandis que l'environnement apparaît vulnérable et menacé par l'homme* » (Guillemot, 2007, p. 98). Notre climat, jadis stable, occupe le devant de la scène par la mobilisation des organisations de la société civile (OSC), les risques qu'encourent notre environnement sont de véritables challenges pour l'expertise mondiale. En effet, à côté des traditionnels pics de pollution atmosphérique, l'humanité doit faire face à d'autres dangers : les pluies acides, le trou d'ozone, l'hiver nucléaire, la sécheresse au Sahel, les inondations...

Au cours de la décennie 90 et 2000, la prise en compte de l'effet de serre et les travaux remarquables des paléo-climatologues sur les corrélations étroites entre température de l'air et les taux de gaz à effet de serre, ont beaucoup contribué à la riposte internationale face au changement climatique. La modélisation du climat se diversifie et se complexifie. Modéliser le climat revient à développer un modèle en le validant à l'aide d'observations du climat réel mais également à chercher à comprendre le véritable climat.

C'est dans ce contexte que les paramétrisations (physiques) sont devenues une étape importante dans l'acte de modélisation (Jeandel, Mosseri, 2011). Les paramétrisations physiques sont une technique utilisée dans les modèles numériques d'atmosphère pour prédire les effets collectifs des phénomènes d'échelle fine localisés à l'intérieur d'un point de grille, en fonction des conditions de longue échelle. Dans les premières générations des modèles de circulation générale de l'atmosphère, la dynamique de l'atmosphère y est décrite à l'échelle de mailles par les algorithmes tirés de la dynamique des fluides. Or, les processus physiques d'échange avec l'atmosphère s'y déroulent à des échelles inférieures à la maille des modèles. Cela signifie que si certaines caractéristiques des processus physiques sont inférieures à la maille des

modèles (dans les nuages, la condensation des gouttes d'eau est de l'ordre d'un micron), elles doivent être représentées par des jeux de paramètres à l'échelle de la maille. L'objet d'une paramétrisation est donc « de représenter l'impact d'un processus particulier sur l'évolution temporelle des variables d'état du modèle, à savoir les valeurs moyennes de la température, de l'humidité ou du vent. Cette paramétrisation repose sur une description approximative des caractéristiques moyennes de ce processus au sein d'une colonne du modèle. Cette description fait intervenir de nouvelles équations internes à la paramétrisation, qui caractérisent l'état du processus : intensité de la turbulence dans une maille du modèle, fraction de la maille couverte par les nuages... » (Hourdin, 2011, p. 162).

Figure 8 : Colonne d'un modèle de climat



Source : Hourdin (2011, p. 163)

De ce fait, la plupart des modèles de circulation générale d'atmosphérique disposent de deux modules : un module dynamique qui résout les équations primitives (les équations de Navier-Stokes décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus, loi des gaz parfaits, approximation hydrostatique), un module physique qui comprend les paramétrisations des processus sous-mailles. L'une des paramétrisations les plus classiques, utilisée dans la modélisation du climat, est celle de la diffusion turbulente. Les mouvements de petite échelle turbulents sont plus importants près de la surface où ils sont soumis au forçage du vent et au forçage thermique.

De nos jours, ce sont notamment ces paramétrisations physiques qui alimentent le débat sur les controverses du changement climatique (Le Treut, 2014). De ce fait, « *si l'organisation à grande échelle du climat est bien comprise et bien modélisée, les représentations des phénomènes de petite échelle recèlent des approximations et des imperfections qui sont responsables de la dispersion et des incertitudes des prévisions en matière de changement climatique* » (Le Treut, 2015). A cela s'ajoute le fait qu'il n'existe pas à ce jour de méthode universelle de paramétrisation. Les pratiques sont fortement corrélées aux mécanismes physiques à décrire, à la connaissance qu'en ont les scientifiques et aux objectifs visés (Jaendel, Mosseri, 2011).

De ce point de vue, les apports des paléo-climatologues sont de plus en plus déterminants dans le processus de validation des modèles. En effet, dans le grand livre de l'Histoire de la Terre, les géologues ont appris à décrypter l'information paléo-climatique, d'abord dans les roches et les sédiments, puis dans de nombreux supports biologiques. Cela permet de reconstituer des climats anciens aux échelles de temps utilisées en géosciences, de la centaine de millions d'années à l'échelle des générations humaines. Ces archives des paléoclimats apportent depuis quelques années, une nouvelle dynamique dans l'activité des modélisateurs. La modélisation du climat est profondément transformée par le couplage et l'intégration d'un nombre croissant de milieux, d'interactions et de phénomènes dans les nouveaux modèles : les modèles du Système Terre (exemple du projet MISSTERRE, Braconnot, Planton, 2014, modèle Système Terre de l'IPSL, Dufresne, 2018).

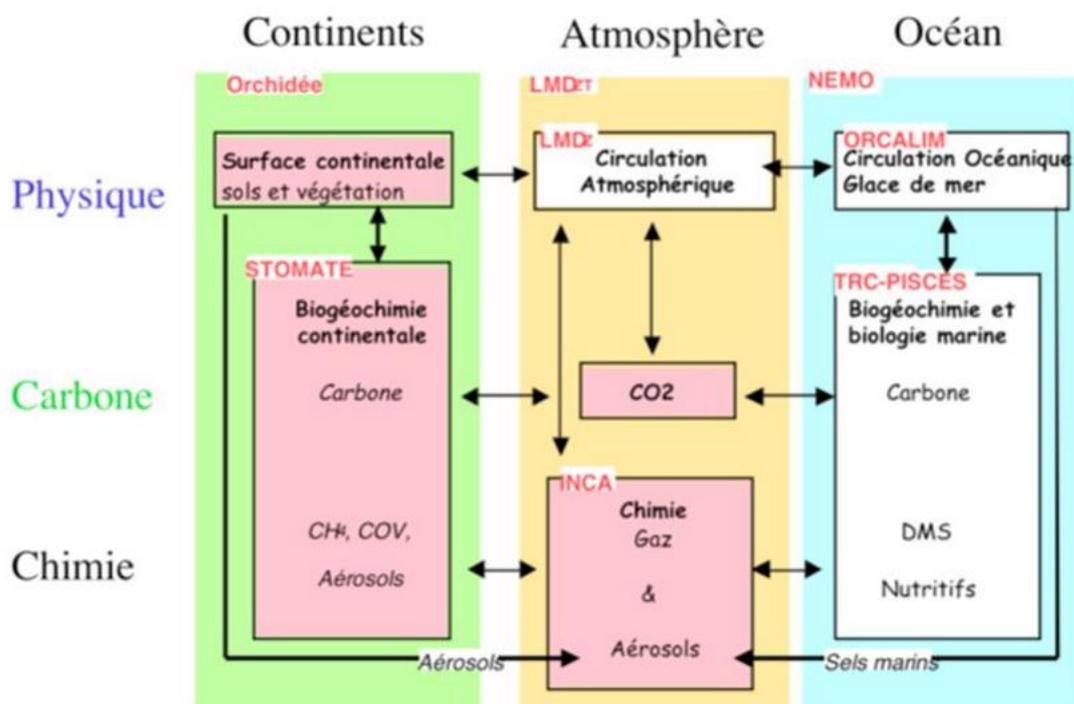
Concrètement, il s'agit pour les climatologues de coupler différents modèles qui prennent en compte tous les éléments et toutes les rétroactions qui influencent notre climat à long terme. Le premier couplage a été celui de l'atmosphère et de l'océan²⁴. Ce dernier a une influence essentielle sur le climat à long terme notamment dans la redistribution de la chaleur et de son évolution.

Grâce à la révolution du numérique, des modèles globaux d'océans 3D ont été couplés aux modèles d'atmosphère. Ce couplage océan-atmosphère requiert un travail scientifique et informatique très complexe et basé sur une réflexion approfondie sur les échanges physiques entre ces deux milieux. Ainsi pour éviter de tomber sur des modèles couplés présentant des « dérives », les modélisateurs ont recours à « des techniques appelées ajustements de flux », qui permettent d'ajuster en permanence les échanges à la surface océanique pour parvenir à des prédictions acceptables (Guillemot, 2007, p. 106). C'est ainsi que depuis 1992, le GIEC propose plusieurs scénarios possibles d'évaluation de la concentration des gaz à effet de serre dans

²⁴ Dans le cas du modèle intégré du système climatique de l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace), les diverses parties sont composées : (1) d'un modèle d'atmosphère (LMDZ), d'un modèle d'océan, de glace de mer et de biogéochimie marine (NEMO), d'un modèle de surfaces continentales (ORCHIDEE) de modèles de chimie troposphérique (INCA) et stratosphérique (REPROBUS). Le couplage entre les modèles atmosphérique et océanique est réalisé à l'aide du coupleur OASIS, développé au CERFACS.

l'atmosphère afin de simuler les climats futurs. L'emprise du changement climatique ne se limite pas seulement aux travaux du GIEC, elle se manifeste également au travers des projets de recherches européens, ou mondiaux dans lesquels les scénarios jouent un rôle déterminant.

Figure 9 : Modèle Système Terre de l'IPSL



Source : Dufresne (2017)

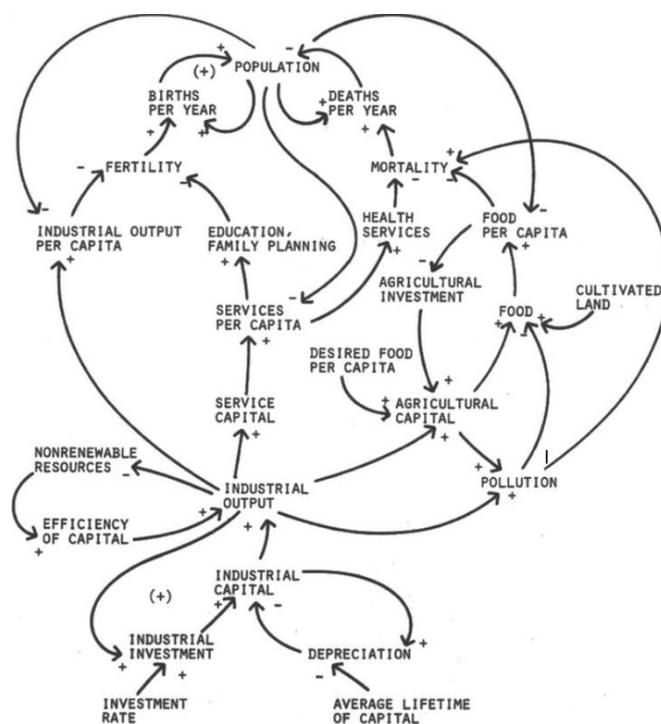
Les modèles à intégration assignée (*Integrated Assessment Models*) symbolisent depuis quelques années, cette nouvelle génération de modèles qui entend intégrer énergie, climat et économie de manière à proposer aux décideurs politiques, les scénarios les plus probables.

La génération des modèles à intégration assignée

Depuis les travaux pionniers de Forrester (1965, 1969) et de Meadows (1972) – modèles WORLD 2 et WORLD 3 conçus au MIT – jusqu'aux modèles développés par les experts du GIEC (2001, 2015, 2018), la modélisation en matière de prospective environnementale globale (Matarasso, 2003) est devenue de plus en plus intégrée. De nos jours, les *Integrated Assessment Models* (IAM) – que l'on peut traduire par *modèles d'évaluation intégrée* – constituent de puissants outils de réflexion, de simulation et d'aide à la décision, notamment lorsqu'il s'agit d'intégrer le système climatique, le système énergétique (à l'origine des gaz à effet de serre) et le système économique.

Les modèles WORLD 2 et WORLD 3 peuvent être présentés comme les premiers modèles IAM (Diemer, 2015, 2004 ; Blanchard, 2007 ; Matarasso, 2007), même si la méthode – *System Dynamics* (la dynamique des systèmes) – importe plus que le processus d’intégration. Ces modèles ont cherché à analyser les interdépendances et les interactions entre cinq variables « critiques » : l’explosion démographique, la production alimentaire, l’industrialisation, l’épuisement des ressources naturelles et la pollution (Diemer, Figuière, Pradel, 2013). Ces cinq variables auraient la particularité d’évoluer selon une progression géométrique, de nature exponentielle. La dynamique des systèmes met ainsi « en évidence les nombreuses relations entre éléments, formant des boucles avec couplage, et pour certaines à effets décalés dans le temps » (Meadows et ali., 1972, p. 153).

Figure 10 : Diagramme de boucles dans World 3



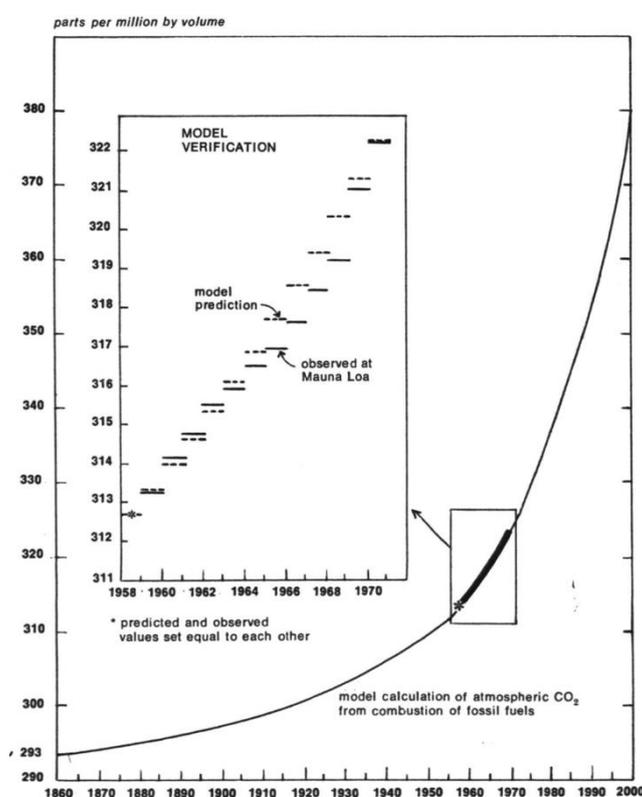
Source : Meadows et al. (1972)

Une boucle positive amplifie le système (*Reinforcing Loop*) et apparaît à chaque fois que l’on rencontre une quantité variant exponentiellement. Dans une boucle positive, toute séquence de relations de cause à effet aboutit fatalement à son point de départ, tout accroissement donné à l’un des éléments quelconques de la boucle amorcera une suite logique de modifications dont le résultat final se traduira par une augmentation encore plus grande de l’élément de départ. Dans une boucle négative, toute séquence vise à maintenir à un niveau constant une fonction qui tend à croître ou à décroître. Elle agit donc en sens inverse de la variation de la fonction. La boucle négative (*Balancing Loop*) a un rôle régulateur. Les cinq variables sont reliées les unes entre elles par un réseau de relations et de boucles. Ainsi, la hausse de la population engendre un besoin de

nourriture (boucle positive), qui demande elle-même des investissements et une production, cette dernière va utiliser des ressources naturelles, générer des déchets et de la pollution, celle-ci pouvant provoquer une hausse de la mortalité et donc une baisse de la population (boucle négative).

Notons ici que dans le rapport *Limits to Growth* de 1972, le système climatique ne fait pas partie du modèle (Diemer, 2004, 2015). La variable pollution est appréhendée par la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Meadows et al. (1972, p. 71) introduisent ici une boucle positive : plus la production industrielle augmente, plus l'énergie fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) est sollicitée ; ce qui libère du CO₂ dans l'atmosphère et provoque une hausse de la mortalité.

Figure 11 : Concentration de CO₂ dans l'atmosphère



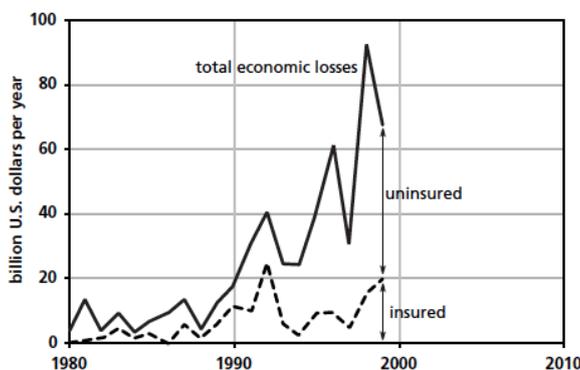
Source : Meadows et al. (1972, p. 72)

Il faudra attendre la parution de *Beyond The Limits* (1992) pour que le climat soit explicitement intégré dans la dynamique des systèmes. Mais là encore, il se trouve disséminé dans le chapitre 3 (*The Limits : Sources and Sinks*) consacré à la pollution et aux déchets. Si le changement climatique à l'échelle globale est bien présenté comme le nouvel enjeu des prochaines années (les preuves scientifiques du réchauffement climatique s'accumulent), son analyse continue d'alimenter les débats sur la croissance : « Many scientists believe that the next global limit humanity will have to deal with is the one called the greenhouse effect, or the heat trap, or global climate change » (1992, p. 92). Ainsi, le changement climatique global ne peut être détecté dans le court terme, mais

bien sur des dizaines d'années. A ces observations de longue période, il faut ajouter trois types d'incertitudes : 1° Quelles seraient les températures globales sans interventions humaines ? Une réduction de la croissance n'est peut-être pas suffisante pour réduire les concentrations de CO₂ si ces dernières augmentent naturellement sur le long terme ; 2° Quelles sont les conséquences du réchauffement climatique sur les précipitations, les vents, les écosystèmes et les activités humaines à des endroits particuliers de la Terre ? 3° Comment appréhender toutes les boucles associées aux flux de carbone et d'énergie. La modélisation d'un tel système est complexe et des boucles de régulation peuvent très bien intervenir pour stabiliser les émissions de CO₂ (les océans peuvent en absorber une partie).

La parution de *Limits to growth, the 30 years update* (2004), mérite que l'on s'y attarde quelque peu, car le climat génère de nombreuses boucles dans World 3. Le rapport n'hésite pas à cibler les économistes, les principaux climato-sceptiques et à souligner les conséquences du changement climatique sur les activités économiques, et donc par conséquent sur la croissance économique : « *More scientists, and now many economists as well, believe the next global limit humanity will have to deal with the greenhouse effect, or global climate change... Even some economists – a group well known for its skepticism about environmentalist alarmism – are becoming convinced that something unusual and significant is going on in the atmosphere, and that it may have human causes*” (2004, p. 113-115).

Figure 12: Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters

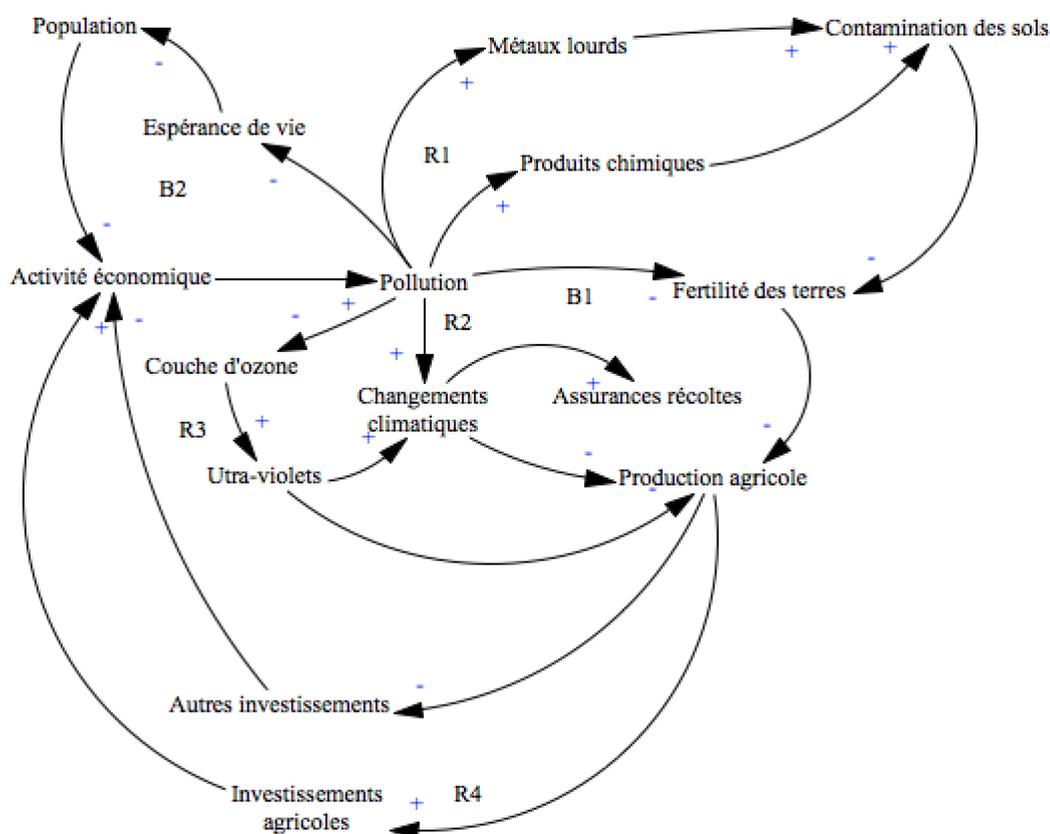


Source : Meadows et al. (2004, p. 117)

Les changements climatiques occasionnent des pertes économiques qui remettent en cause la viabilité des systèmes d'assurances (les années 1990 et 2000 marquent une rupture de tendance, la part des dommages ne donnant lieu à aucun remboursement s'envole). Le scénario 2 (*Global Pollution Crisis*) introduit à lui-seul les effets dommageables de la pollution et du changement climatique. La boucle positive se présente de la manière suivante : une hausse de la pollution réduit la fertilité des terres, qui elle-même réduit la production agricole, les investissements se déplacent dans le secteur agricole pour maintenir la production de nourriture et diminuent dans les autres secteurs, la pollution entraînant une baisse de l'espérance de vie et une hausse

de la mortalité. Cette boucle est renforcée par trois effets : la contamination des terres par les métaux lourds et les produits chimiques, les changements climatiques qui altèrent la production agricole de façon aléatoire et récurrente et les radiations d'ultra-violet relatives à la diminution de la couche d'ozone.

Figure 13 : Boucles positives et négatives du scénario « Hausse de la pollution »



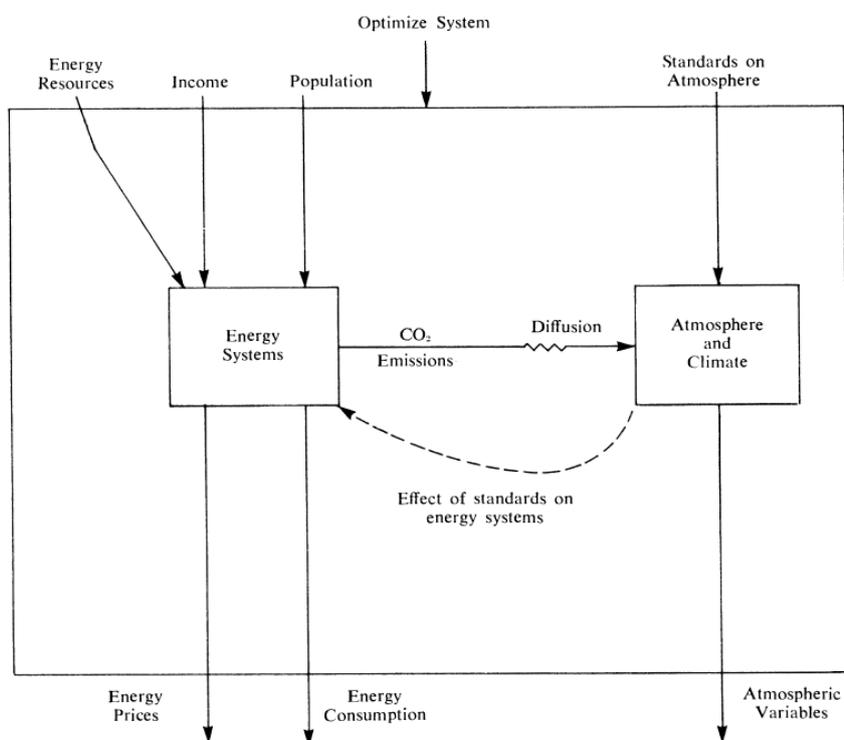
Il ne va pas sans dire que ces travaux ont soulevé de larges critiques de la part des économistes (Matarasso, 2007, Diemer, 2015), William Nordhaus (1972, 1973) sera le principal artisan de cette fronde. Dans un article co-écrit avec James Tobin et intitulé « Is Growth Obsolete ? », Nordhaus entend répondre au rapport *Limits to Growth* (« We mention this point now because we shall return later to the ironical fact that the antigrowth men of the 1970s believe that it is they who represent the claims of a fragile future against a voracious present », 1972, p. 4) en mobilisant la théorie autour de trois questions : 1° la mesure de la croissance économique ; 2° le lien entre croissance et ressources naturelles ; 3° le lien entre taux de croissance de la population et bien être économique. Un an plus tard, Nordhaus (1973) récidive avec pour cible, l'ouvrage *World Dynamics* de Forrester. Le titre « *World Dynamics Measurement without data* » et le contenu de l'article sont sans équivoque « What is the overall impression after a careful reading of *World Dynamics*? First, the dynamic theory put forward in the work represents no advance over earlier work... Second, the economic theory put forth in *World Dynamics* is a major retrogression from current research in economic growth theory... Third, Forrester has made no

effort in World Dynamics to identify any relation between his model and the real world... Fourth, the methodology of modelling in World Dynamics differs significantly from other studies of economic systems... Fifth, the predictions of the world's future are highly sensitive to the specification of the model... Sixth, there is a lack of humility toward predicting the future" (1973, p. 1183).

C'est dans ce contexte que Nordhaus va engager ses recherches « *Resources as a constraint to growth* » (1974), dans la gestion des ressources énergétiques, puis prendre en compte l'impact de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Il en conclut qu'en supposant que "10 percent of the atmospheric CO₂ is absorbed annually (G. Skirrow), the concentration would be expected to rise from 340 ppm in 1970 to 487 ppm in 2030 - a 43 percent increase" (1974, p. 26). Cet article constitue une première tentative de modélisation intégrée du climat. Elle est certes rudimentaire (seule la variable CO₂ est prise en compte), toutefois elle traduit bien les débats des années 70. Sur fond de crise énergétique, Nordhaus entendait bien développer un modèle énergétique mondial, susceptible d'être couplé avec un modèle climatique. Nordhaus (1976, 1977) présentera ce cadre théorique dans deux articles, l'un présenté à la Cowles Commission (*Strategies for the Control of Carbon Dioxide*, 1976), l'autre publié dans *The American Economic Review* (*Economic Growth and Climate : The Carbon Dioxide Problem*, 1977).

La figure 14 donne un aperçu du modèle utilisé par Nordhaus (1977) pour étudier les stratégies de contrôle des émissions de dioxyde de carbone. Le bloc « système énergétique » est un système combinant les mécanismes du marché et des politiques économiques. Les variables déterminantes sont l'énergie, les ressources naturelles, le revenu et la population. L'interaction de l'offre et de la demande conduit à une trajectoire d'optimisation inter-temporelle des prix et de la consommation. Pour prendre en compte des externalités telles que le cycle du dioxyde de carbone, Nordhaus propose de prendre en compte les émissions et la distribution du CO₂. Cette étape l'amène à imposer des normes standards sur les concentrations atmosphériques (côté droit de la figure). En imposant de telles normes, il devient possible de fermer la boucle et de forcer le système énergétique à agir sur la structure de l'offre et la demande. Nordhaus examine deux stratégies permettant de maintenir les concentrations atmosphériques de CO₂ à un niveau raisonnable. La première stratégie consiste à réduire les émissions de dioxyde de carbone. Cela revient à remplacer les carburants à haute teneur en CO₂ par des carburants à basse teneur en CO₂. La deuxième stratégie consiste à compenser les effets des émissions de dioxyde de carbone ou à utiliser de nouveaux procédés industriels (écotechnologies) pour « aspirer » le dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Afin d'éviter « *the odor of science-fiction* » (1977, p. 343), Nordhaus privilégiera la première stratégie en cherchant à optimiser le système à partir des normes standards.

Figure 14 : *Modèle d'optimisation du système énergie - environnement*



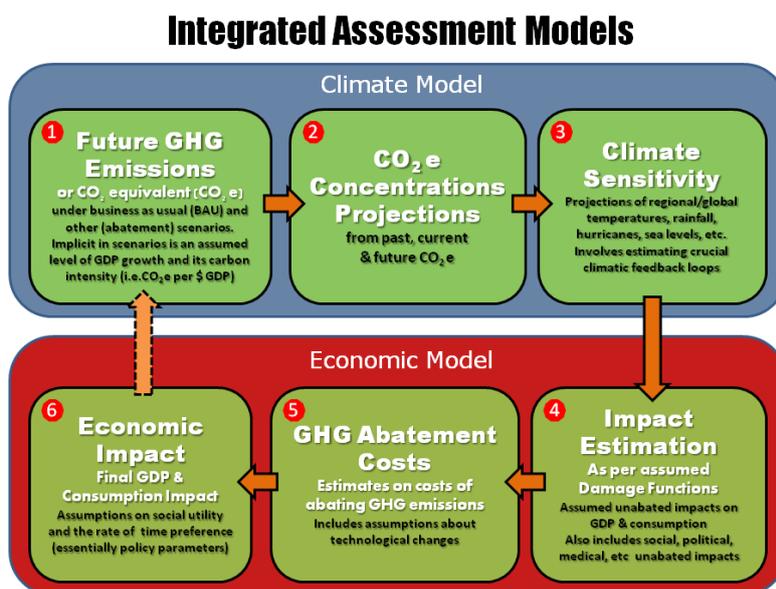
Source : Nordhaus (1977, p. 343)

Il faudra attendre les années 90 pour que la famille des modèles DICE (*Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy*) et RICE (*Regional Integrated Model of Climate and the Economy*) voit le jour (Nordhaus, 1992, 1994). Le modèle DICE est un modèle d'optimisation (modèle de Ramsey, 1920) dynamique cherchant à estimer la trajectoire optimale de réduction des GES (Diemer, 2004, 2015). La trajectoire optimale peut être interprétée comme la voie la plus efficace pour ralentir le changement climatique, compte tenu des intrants et des technologies (Veille-Blanchard, 2007). Elle peut être également interprétée comme un équilibre de marché concurrentiel dans lequel les externalités sont corrigées en utilisant les prix sociaux appropriés pour les GES. Dans le modèle DICE, les émissions comprennent tous les GES, toutefois celles associées au CO₂ sont privilégiées. Les émissions de GES, qui s'accumulent dans l'atmosphère, peuvent être contrôlées par une augmentation des prix des intrants (comme l'énergie) ou des produits à forte intensité de GES. Le changement climatique est appréhendé par la température moyenne à l'échelle globale de la terre, variable utilisée dans la plupart des modèles climatiques actuels. Les impacts économiques du changement climatique sont supposés augmenter dans l'augmentation de température réalisée.

En l'espace de deux décennies, le modèle DICE a rencontré un énorme succès. Trois raisons peuvent être avancées ici. La première réside dans les multiples révisions proposées par Nordhaus : une version intermédiaire (Nordhaus, 2008) et une version réactualisée (Nordhaus 2017). Au final, le modèle DICE a fait l'objet de nombreuses itérations, incorporant des résultats économiques et scientifiques récents et des données économiques et environnementales mises à jour. La seconde repose sur une description détaillée du modèle (Nordhaus, Sztorc, 2013) avec la mise à disposition du public du manuel DICE et la possibilité de faire des simulations. La troisième concerne la médiatisation de DICE via les publications et travaux du GIEC (dès 1995) et de nombreuses agences de l'énergie (dont l'agence américaine).

A cela, nous ajouterons une quatrième raison qui pèse aujourd'hui sur la manière d'appréhender les *Integrated Assessment Models* (IAM). Le modèle DICE a initié une manière de penser l'intégration, que l'on peut résumer par le processus suivant : intégration des émissions de CO₂, impacts sur les activités économiques, mesures de politiques économiques. De ce fait, le triptyque (Climat, Energie, Economie) constitue aujourd'hui la trame principale des modèles d'assignation intégrée (Ha-Dong, Matarasso, 2006 ; Gladkykh, Spittler, Dierickx, 2017).

Figure 15 : Exemple de couplage du système climatique et du système économique



Source : deconstructingrisk.com

Bien entendu, les travaux en matière de modèles intégrés ne se limitent pas au modèle DICE, d'autres modèles ont vu le jour dans les années 90, ICAM (Dowlatabadi, Morgan, 1993), IMAGE (Alcamo, 1994), MERGE (Manne et al., 1995), MiniCAM (Edmonds et al., 1996) ... Certains comme IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environmental) se présentent même dans la droite lignée de WORLD 2 et WORLD 3, en adoptant une architecture construite autour des principaux *drivers*

(population, économie, politiques, technologie, style de vie et ressources) de l'écosystème humain et de l'écosystème terre. Ainsi, à côté de modèles petits, simplifiés et ancrés dans une discipline (DICE et la science économique), il existe des modèles globaux, complexes et interdisciplinaires (WORLD 3, IMAGE) Ces deux grandes familles de modèles ont contribué à enrichir les débats autour de l'approche intégrée du changement climatique, chacune présentant ses forces et ses faiblesses (Diemer, 2004, 2015).

Les années 2000 sont d'ailleurs marqués, non pas par une rivalité entre modèles (bien que cette dernière existe bien), mais plutôt par une réflexion sur les processus d'intégration (Matarasso, 2003) et d'évaluation (Schwanitz, 2013) des IAM (Pearson, Fisher-Vanden, 1997). Ceci est particulièrement visible via les définitions qui fleurissent en de nombreux endroits. L'évaluation intégrée peut être ainsi définie comme « un processus interdisciplinaire et participatif visant à combiner, interpréter et communiquer des connaissances issues de diverses disciplines scientifiques, afin de permettre la compréhension de phénomènes complexes » (Parker, 2002). Elle vise à construire la meilleure réponse possible, en l'état de la recherche, aux questions posées par les décideurs sur des problèmes environnementaux (Kieken, 2003). Cet objectif est généralement atteint en intégrant les travaux en cours de diverses disciplines dans un processus d'interaction incluant des chercheurs, des gestionnaires et des parties prenantes. La mise en circulation et le partage des connaissances entre les communautés sont assurés par la mise en œuvre de trois familles d'outils complémentaires : (1) les modèles informatiques d'évaluation intégrée conçus comme des cadres méthodologiques de travail interdisciplinaire et le moyen d'intégrer des connaissances venant de disciplines variées ; (2) des scénarios essentiellement qualitatifs permettant de prendre en compte ce qui n'est pas modélisable ; (3) des méthodes participatives impliquant des parties prenantes autres que scientifiques et politiques (il s'agit ici d'améliorer l'acceptabilité des décisions par une meilleure compréhension des enjeux ; de légitimer le processus de décision par l'implication précoce des acteurs concernés ; d'introduire des connaissances non expertes des enjeux).

Bien entendu, ces modèles numériques interdisciplinaires destinés à étudier les questions d'impact, d'adaptation et de changement climatique, manquent encore de robustesse. Si chaque discipline apporte bien des connaissances sur une part des processus qui déterminent l'évolution du système Terre - Société, leur mise en interaction pose un certain nombre de problèmes. Ainsi les *Modèles de Circulation Générale* (MCG) des climatologues ne permettent pas d'étudier avec précision les stratégies de réduction d'émissions de gaz à effet de serre... Il convient donc de se tourner vers le système énergétique afin de cerner les technologies de production et de transformation de l'énergie... Ces dernières devant être à leur tour insérées dans un modèle macroéconomique, destiné à comprendre les grands équilibres monétaires et

financiers qui régulent l'économie. Pour répondre à ces limites, les modélisateurs ont développé une approche modulaire, basée sur le couplage de modèles existants, eux-mêmes rattachés à un découpage disciplinaire. L'intégration repose ainsi sur la division suivante : (1) Modèles du climat (plus ou moins complexes), (2) Modèles des systèmes énergétiques, (3) Modèles macroéconomiques de l'activité mondiale, (4) Modèles du cycle du carbone (souvent reliés à usage des sols). Ces couplages engendrent une multitude d'enjeux (selon que les modules sont résolus simultanément ou successivement ou selon la finesse des différentes représentations des modules), qui supposent la création d'un véritable réseau de modélisateurs, d'utilisateurs et de décideurs à l'échelle des IAM. C'est à ce prix que nos comportements à l'égard du changement climatique susciteront les inflexions nécessaires.

Conclusion

L'Anthropocène, oui nous y sommes depuis un quart de millénaire. C'est par ce que nous y sommes qu'il nous faut l'adopter, l'appriivoiser et s'y adapter. Elle représente notre condition humaine. C'est notre époque géologique et elle témoigne de notre histoire, comme le rappelle Paul Crutzen : « *il faut ajouter un nouvel âge à nos échelles stratigraphiques pour signaler que l'Homme, en tant qu'espèce, est devenu une force d'ampleur tellurique. Après le Pléistocène, qui a ouvert le Quaternaire il y a 2,5 millions d'années, et l'Holocène, qui a débuté il y a 11500 ans, il semble approprié de nommer Anthropocène l'époque géologique présente, dominée par à de nombreux titres par l'action humaine* » (Crutzen, 2002, p. 23). L'Anthropocène est le signe de notre puissance, la civilisation humaine, mais aussi de nos principales faiblesses. La terre, c'est une atmosphère altérée par des milliards de tonnes de gaz à effets de serre que nous nous avons déversées en brûlant charbon et pétrole ; c'est un tissu vivant appauvri, artificialisé et imprégné par une foule de nouvelles molécules chimiques de synthèse qui modifient jusqu'à notre descendance ; c'est un monde plus chaud et plus lourd de risques et de catastrophes, avec un couvert glaciaire réduit, des mers plus hautes, des océans plus chauds, des climats plus dérégés et des espèces (faune et flore) en voie de disparition. Face à ces turbulences, les experts du climat cherchent à imaginer notre futur à l'aide de modèles numériques et de scénarios plus ou moins complexes. Cette pensée complexe s'inscrit de plus en plus dans l'interdisciplinarité (et même la transdisciplinarité), principale planche de salut en attendant l'émergence d'une véritable éducation aux changements climatiques. En effet, si le climat est un savoir scientifique, si les modèles (numériques) constituent des outils d'aide à la décision et si les décideurs politiques sont à la recherche de solutions pour sauver la planète, il semble bien que la réponse au défi du changement climatique soit à la croisée des enjeux scientifiques, pédagogiques et civiques. Ce sens du collectif et de la solidarité ne pourra être incarné que par une co-

construction du savoir, au sein même d'une éducation au changement climatique pour un développement durable.

Références bibliographiques

ABRIC J.C. (1994), *Pratiques sociales et représentations* PUF, Paris

ACADEMIE DES SCIENCES DE PARIS (2010), « *Le changement climatique* », Rapport sur le site académie des sciences de Paris (consulté le 5 novembre 2016).

ALCAMO J. (1994), *IMAGE 2.0, Integrated Modelling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Publishers.

ALCAMO J., SHAW R., HORDIJK L. (1990), *The RAINS Model of Acidification: Science and Strategies in Europe*, Dordrecht, Netherlands, Kluwer.

ALLEGRE C. (2010), *Imposture climatique ou fausse écologie*, Ed. Plon.

AMBROSI P., COURTOIS P. (2004), « Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire », *Natures, Sciences et Sociétés*, vol 12, p. 375 – 386.

ARNOULD P. (2014), *Au plaisir des forêts, Promenade sous les feuillages du monde*, Fayard.

BARKER T., SERBAN-SCRIECIU S. (2010), "Modeling Low Climate with E3MG: Towards a New Economics Approach to Simulating Energy-Environment-Economy System Dynamics", *The Energy Journal*, vol 31, Special Issue, January, p. 137 – 164.

BEAUGRAND G., GOBERVILLE E. (2010), « Les conséquences des changements climatiques en milieu océanique », *VertigO*, hors-série n°8, octobre.

BECKER M. (1989), "The role of climate on present and past vitality of silver fir in forest in the Vosges Mountains of north-eastern France", *Can. For.Res.*, vol 19, p. 1110-1117.

BJERKNES V. (1904), « The Problem of Weather Prediction, as Seen From The Standpoints of Mechanics and Physics », translated from the original german by Allen R. Greenberg, NOS, *Meteorologische Zeitschrift*, January.

BLANCHARD E.V. (2011), « L'origine des modèles intégrés du changement climatique », *Recherches internationales*, n°89, janvier-mars, p.181-211.

BOUSTRON C.F, CANDELONE J.P, HONG S. (1993), « Le plomb dans les neiges et les glaces du Groenland », *Pollution atmosphérique*, Juillet-Septembre, p. 128-131.

BRACONNOT P., PLANTON S. (2014), *Miss TERRE, Modélisation Intégrée du SyStème TERRE*, LEFE, 13-15 janvier, Toulouse, 19 p.

CANDELONE JP, HONG S, PELLONE C, BOUTRON CF. (1995), "Post-industrial revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metal as documented in central Greenland snow and ice", *Geophysic Res*, vol 100, p. 16605-16616.

CARNOT S. (1824), *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Chez Bachelier, Paris.

CASTY C., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J., BHOM R. (2005), "Temperature and precipitation variability in Europe Alps since 1500", *Inter Journal of Climatologie*, vol 25, p. 1885-1880.

CAVAILLES J. (1994), *Oeuvres complètes de philosophie des sciences*. Hermann Editeurs des arts et des sciences Paris.

CHANEL O. et ali. (1999), *Plomb dans l'environnement : quels risques pour la santé ?* INSERM, 451 p.

CHAUVEAU L. (2017), « Eutrophisation des eaux : ça ne s'arrange pas », *Science et Avenir*, 21 septembre.

COMMONER B. (1972), *L'encerclement, problèmes de survie en milieu terrestre*, Seuil.

COUSTAROUX M. (2013), *Génie Mathématiques et Modélisation, option Statistiques*, INSA-INRA- Toulouse.

CRUTZEN P.J (2002), « Geology of Mankind », *Nature*, vol 415.

DALMEDICO D.A. (2007), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.

DENHEZ F. (2008), *Une brève histoire du climat*, L'œil neuf.

DIEMER A., DIERICKX F., GLADKHYK G., MORALES M., PARRIQUE T., TORRES J. (2017), *European Union and Sustainable Development*, Editions Oeconomia.

DIEMER A. (2015), *Le développement durable et les économistes*, Editions Oeconomia.

DIEMER A., MARQUAT C. (2014), *Education au développement durable : enjeux et controverses*, De Boeck.

DIEMER A., FIGUIERE C., PRADEL M. (2013), *Ecologie politique vs écologie industrielle, quelles stratégies pour le développement durable*, Editions Oeconomia.

DIEMER A. (2004), « Le développement durable et la dynamique des systèmes », *document de travail*, n°2004/05, HERMES, Université de Reims, 24 mai, 12 p.

DUFRESNE J.L (2017), « *Calcul intensif et climat* », Pôle de modélisation, Institut Pierre Simon Laplace, « Penser Pétaflops », 27 p.

DOWLATABADI H., MORGAN M.G (1993), « Integrated Assessment of Climate Change », *Science*, vol 259, (5103).

EUZEN A., LAVILLE B., THIEBAULT S. (2017), *L'adaptation au changement climatique, une question de sociétés*, CNRS Société.

FARMAN J.C, GARDINER B.G, SHANKLIN J.D (1985), « Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO_x/NO_x Interaction », *Nature*, vol 315, p. 207 – 210.

FLECHET G. (2017), “Quand les systèmes saturent”, *CNRS Le Journal*, 16 octobre.

FOUCAULT M. (1969), *L'archéologie du savoir*, Paris Gallimard.

GAMBIER Y. (1987), « Problèmes terminologiques des pluies acides : pour une socio-terminologie », *META*, vol 32, n°3, septembre, p. 314 – 320.

GLADKYKH G., SPITTLER N., DIERICKX F. (2017), “Renewable Energy: Characteristics and Representation in Macroeconomic Energy-Climate Models sources for climate change models” in Diemer A. et al. (eds), *European Union and Sustainable Development*, Editions Oeconomia.

GIEC (2013), « *Changements climatiques, les éléments scientifiques, résumé à l'intention des décideurs* », Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évaluation du climat.

GIEC (2007), *26th session of the IPCC*, Bangkok, April 30-May 4, Geneva Switzerland.

GIEC (2001), *Bilan des changements climatiques : les éléments scientifiques*, PNUD-OMM, Groupe de travail I.

GOOSSE H. ((2015), *Climate System Dynamics and Modelling*, Cambridge University Press.

GUILLEMOT H. (2009), « Comment évaluer un modèle numérique du climat », *Revue anthropologique des connaissances*, vol 3, n°2, p. 273 – 293.

GUILLEMOT H. (2006), « Les modèles numériques du climat » in Dahan A. (ed), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte.

HA-DONG M., MATARASSO P. (2006), « Comment intégrer l'économie, l'énergie et le climat ? », *Pour la Science*, dossier 52, p. 92 – 97.

HARPER K.C (2008), *Weather by the numbers, the genesis of modern meteorology*, MIT.

HAYS J.D., IMBRIE J., SHACKELTON N.J. (1976), “Variations in the Earth's orbit”, *pacemakers of the ice age Science*, 192, p. 1121-1132.

HEIDORN K.C (2004), « L.F Richardson: Building the Forecast Factory”, *The Weather Doctor's Weather Almanach*.

HOURCADE J.C, LE TREUT H. (2002), *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution*, CIRED, LMD, SMASH, Rapport de Synthèse, Juillet, 29 p.

HOURDIN F. (2011), « Les paramétrisations physiques » in Jeandel C. et Mosseri R. (dir), *Le climat à découvert*, Editions CNRS, p. 162 - 165.

HUET S. (2014), « Comment cette structure a imposé son autorité scientifique », *Libération*, 2 novembre.

JACQUIER M.C (2017), « Le trou de la couche d’ozone est bien en train de disparaître », *Futura Planète*, 15 septembre.

JEANDEL C., MOSSERI R. (2011), *Le climat à découvert*, Editions CNRS.

KELLY D.L, KOLSTAD C.D (1999), « Integrated Assessment Models For Climate Change Control » in Folmer H. and Tietenberg T. (eds), *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*, Cheltenham, UK, Edward Elgar.

KIEKEN H. (2003), « Genèse et limites des modèles d’évaluation intégrée », *Annales des Ponts et Chaussées*, n°107-108, p. 84 - 91.

KUHN S.T (2008), *La structure des révolutions scientifiques*, Paris Flammarion.

LACAZE J.C (1998), *L’eutrophisation des eaux marines et continentales*, Ellipses.

LASKAR J., ROBUTEL P. (1993), “The chaotic obliquity of the planets”, *Nature*, 361, p. 608-612.

LE TREUT H. (2017), *Comment fonctionne le climat ?* Disponible en ligne, www.climat-en-question.fr

LE TREUT H., MAGNAN A. (2014), *changement climatique, tous vulnérables ?* Editions Rue d’Ulm.

LE TREUT H. (2009), *Nouveau climat sur la terre, comprendre, prédire, régir*, Flammarion.

LE TREUT H. (2005), *Evolution climatique : les modèles et leurs limites*, dossiers CNRS accessible www.cnrs.fr/cv/dossiers/divers/pdspm/idp2005/05/Letreut/pdf (consulté le 20/11/2016).

LE TREUT H., JANCOVICI J.M (2001), *L’effet de serre, allons-nous changer le climat ?* Flammarion.

MANNE A.S, MENDELSON R., ROCHELS R.G (1993), “MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GhG Reduction Policies”, *Energy Policy*, vol 23, p. 17 - 34.

MANNE A.S, ROCHELS R.G (1990), “CO2 Emission Limits, An Economic Cost Analysis for the USA”, *Energy Journal*, vol 12, p. 87 - 107.

MARECHAL J.F (2014), « Les politiques dans l’impasse », *Sciences Humaines*, n°258, avril.

MATARASSO P. (2007), « La construction historique des paradigmes de modélisation intégrés : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission » in Dalmedico A.D (ed), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.

MATARASSO P. (2003), « Evaluation intégrée et modélisation du changement climatique », *Annales des Ponts et Chaussées*, p. 71 - 79.

McNEILL J.R (2010), *Du nouveau sous le soleil, une histoire de l'environnement mondial au XXe siècle*, Seyssel Champ Vallon, *L'environnement a une histoire*, 523 p.

MEADOWS D., BOOTH-SWEENEY L. (2010), *The Systems Thinking Playbook*, Chelsea Green Publishing.

MEADOWS D.H, RANDERS J., MEADOWS D. (2004), *Limits to Growth, The 30-year Update*, Chelsea Green Publishing.

MEADOWS D.H, MEADOWS D.L, RANDERS J. (1992), *Beyond the Limits*, Earthscan Publications Limited.

MEADOWS D.H, MEADOWS D.L, RANDERS J., BEHRENS III W.W (1972), *The Limits to growth*, Universe Books Publishers.

MONMONIER M. (1999), *Air Apparent: How Meteorologists Learned to Map, Predict and Dramatize Weather*, The University of Chicago Press.

MOUHOT J.F (2014), « Peut-on tirer des leçons du passé ? », *Sciences Humaines*, n°258, avril.

MOUHOT J.F, TESTOT L. (2014), « Le froid, le chaud et l'histoire », *Sciences Humaines*, n°258, avril.

MORIN E. (2005), *Introduction à la pensée complexe*. Editions du Seuil.

NORDHAUS W. (2017), « Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the Dice Model, 1992 - 2017 », *Cowles Foundation Discussion Paper*, n° 2084, 22 p.

NORDHAUS W. (2016), « Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies », *Cowles Foundation, Discussion Paper*, n°257, 44p.

NORDHAUS W., BOYER J. (1999), « Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming », Chapter 1, Yale University, October 25, 10 p.

NORDHAUS W. (1998), *Economics and Policy Issues in Climate Change*, Resources for the Future, New York.

NORDHAUS W. (1992), « An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases », *Science*, vol 258, November, p. 1315 - 1319.

NORDHAUS W. (1991), "To Slow or not to slow: The Economics of the Greenhouse Effect", *Economic Journal*, vol 101, p. 920 – 937.

NORDHAUS W. (1977), "Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem", *The American Economic Review*, vol 67, n°1, p. 341 – 346.

NORDHAUS W. (1974), « Resources as a Constraint on Growth », *American Economic Review*, vol 64, n°2, May, p. 22 – 26.

NORDHAUS W. (1973), « The allocation of energy resources », *Cowles Foundation Papers*, n° 401.

NORDHAUS W. (1973), "World Dynamics, Measurement Without Data", *The Economic Journal*, vol 83, n° 332, p. 1156 – 1183.

NORDHAUS W., TOBIN J. (1972), "IS Growth Obsolete?", in Nordhaus W., Tobin J. (eds), *Economic Research, Retrospect and Prospect*, vol 5, *Economic Growth*, NBER, p. 1 – 80.

NASA (2005), *NASA's Earth Observatory* on December 20, 2002, under the title "Melting Snows of Kilimanjaro", March 25th.

ORAKES N., CONWAY E.M (2012), *Les marchands de doute*, Editions le Pommier.

PARSON E.A, FISHER-VANDEN K. (1997), "Integrated Assessment Models of Global Climate Change", *Annual Review of Energy and Environment*, vol 22, p. 589 – 628.

PATRICK J. (2015), « Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn. *Philosophie, science et société* (en ligne) [http// www.philosophies.com](http://www.philosophies.com) (consulté 20 novembre 2016).

PENAY G. (2017), *Eutrophisation : Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité*, Colloque de restitution ESCO – eutrophisation, synthèse, novembre, 144 p.

RANDALL D.A (2000), *General Circulation Model Development*, Academic Press.

RICHARDSON L.R (1922), *Weather Prediction By Numerical Process*, Cambridge University Press.

ROHDE R.A (2006), Global warming, [http ://www.globalwarming.com](http://www.globalwarming.com) (consulté le 26/05/2015).

RUDDIMAN W.F (2009), *La charrue, la peste et le climat*, Randall.

RUDDIMAN W.F (2005), *Plows, Plaques and Petroleum*, Princeton University Press.

SCHNEIDER S., LANE J. (2005), "Integrated Assessment Modeling of Global Climate Change: Much Has Been Learned – Still a Long and Bumpy Road Ahead", *The Integrated Assessment Journal*, vol 5, n°1, p. 41 – 75.

SCHWANITZ V.J (2013), "Evaluating Integrated Assessment Models of Global Climate Change", *Environmental Modeling and Software*, vol 50, p. 120 – 131.

SITE CNRS/GRENOBLE, Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (consulté le 8/12/2016).

STEHFEST E., VAN VUUREN D., KRAM T., BOUWMAN L. (2014), *Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0*, PBL Publishers.

TANNENBERG V.L (2017), *Le changement climatique, une menace pour la démocratie*, Buchet - Chastel.

TESTOT L. (2012), *L'histoire du climat*, Les grands dossiers des sciences humaines, n°25.

TOL R.S.J, FANKHAUSER S. (1998), "On the Representation of Impact in Integrated Assessment Models of Climate Change", *Environmental Modeling and Assessment*, vol 3, p. 63 - 74.

UNFECC (2017), *Protocole de Kyoto à la Convention cadre des Nations-Unies pour le Changement Climatique, 1998* (unfecc.org).

VASQUEZ T. (2002), *Weather Forecasting Handbook*, 5th Edition, Weather Graphics Technologies, Austin.

VIEILLE-BLANCHARD E. (2007), "Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles », in Dalmedico D.A. (ed), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte

WHITE S. (2011), *The Climate Rebellion in the Early Modern Ottoman Empire*, Cambridge University Press.

WHITE S. (2014), « Crises climatiques, 15 000 ans d'histoire », *Sciences Humaines*, n°258, avril.

WHITE S., PFISTER C., MAUELSHAGEN F. (2017), *Palgrave Handbook of Climate History*, Palgrave McMillan.

Integrated Assessment Models (IAM) *How to integrate Energy, Climate and Economics?*

Arnaud DIEMER, Ganna GLADKYKH, Nathalie SPITTLER
Abdourakhmane NDIAYE, David COLLSTE, Florian DIERICKX
Université Clermont Auvergne, CNRS, IRD, CERDI, F-63000 Clermont-Ferrand, France.

Chapitre 1 du livre *Integrated Assessment Models and Others Climate Policy Tools: Challenges and Issues*, Editor Oeconomia, June 2019

Abstract

Economics, energy and climate are the three main building blocks of the integrated assessment models (IAM), and they belong to the same system, a global integrated system in which loops and time delays show the main dynamics - a methodology well known as system dynamics (SD). In IAMs, the laws of nature and human behavior are reduced to their essentials to understand how increased Greenhouse Gases (GHGs) affect temperature, and how temperature causes economic damage. IAMs are usually associated with three purposes : assess climate change control policies ; constructively force multiple dimensions of the climate change problem into the same framework ; quantify the relative importance of climate change in the context of other environmental and non-environmental problems facing mankind. This article reviews several IAMs - World3, DICE, IMAGE, MESSAGE, GEM-E3, and REMIND, to understand their structure, goals, policy evaluation or policy optimization and dynamics. We aim to identify the future challenges for the IAM community.

Keywords

Climate, Economics, Energy, Feedback Loops, IAM, System Dynamics

From the pioneering work of Forrester (1965, 1969) and Meadows (1972) with the World 2 and World 3 models based on system dynamics methodology, to the models developed by IPCC experts (2001, 2015), modeling from a global environmental prospective (Matarasso, 2003) has become increasingly integrated. In the 1990's, some models were developed to combine different key elements of biophysical, social, and

economic systems into one integrated system (Dowlatabadi, Morgan, 1993, 1995). What we call today Integrated Assessment Models (IAMs) became powerful tools for thinking, simulation and decision support.

Kelly and Kolstad (1999, p. 3) defined an integrated assessment model as “*any model which combines scientific and socio-economic aspects of climate change primarily for the purpose of assessing policy options for climate change control*”. Integrated assessment induces an “*interdisciplinary and participatory process of combining, interpreting and communicating knowledge from various scientific disciplines to enable understanding of complex phenomena*” (Parker, 2002).

Weyant et al (1996) gave three purposes for integrated assessment: (1) Assess climate²⁵ change control policies, (2) Constructively force multiple dimensions of the climate change problem into the same framework, (3) Quantify the relative importance of climate change in the context of other environmental and non-environmental problems facing mankind. The final goal of integrated assessment is to build the best possible response²⁶, with present knowledge, to the questions asked by decision makers about environmental issues (Kieken, 2003). This goal is usually achieved by integrating work from various disciplines into an interactive process that includes researchers, managers, and stakeholders. The release and sharing of knowledge between communities is ensured by the implementation of three kinds of complementary tools²⁷: (1) Integrated assessment computer models designed as methodological frameworks for interdisciplinary work which are the means to integrate knowledge from a variety of disciplines, (2) Qualitative scenarios to take into account what is not modellable, (3) Participatory methods involving stakeholders other than scientists and politicians, with the aim of improving the acceptability of decisions through a better understanding of the issues, legitimizing the decision-making process through the early involvement of stakeholders, and introducing non-expert knowledge of the issues).

IAMs are usually divided into two categories: policy optimization IAMs and policy evaluation IAMs. Policy optimization IAMs search for the optimal policy. They can be split into three principal types: (i) Cost/benefit models which try to balance the costs

²⁵ If energy system and macroeconomic structure have been usually connected, the integration of climate in a global system is a recent practice. Climate has been invited to the debate following the various IPCC reports (1990, 2018) and the controversies related to global warming.

²⁶ Pearson and Fisher-Vanden (1997, p. 593) considered that IAMs brought four broad contributions : evaluating potential responses to climate change ; structuring knowledge and characterizing uncertainty ; contributing to broad comparative risk assessment ; and contributing to scientific research.

²⁷ Rotmans and Dowlatabadi (1998) noted that current integrated assessment research used one or more of the following methods : (i) computer-aided IAMs to analyze the behavior of complex systems, (ii) simulating gaming in which complex systems are represented by simpler ones with relevant behavioral similarity; (iii) scenarios as tools to explore a variety of possible images of the future; (iv) qualitative integrated assessments based on a limited heterogeneous data set, without using any models.

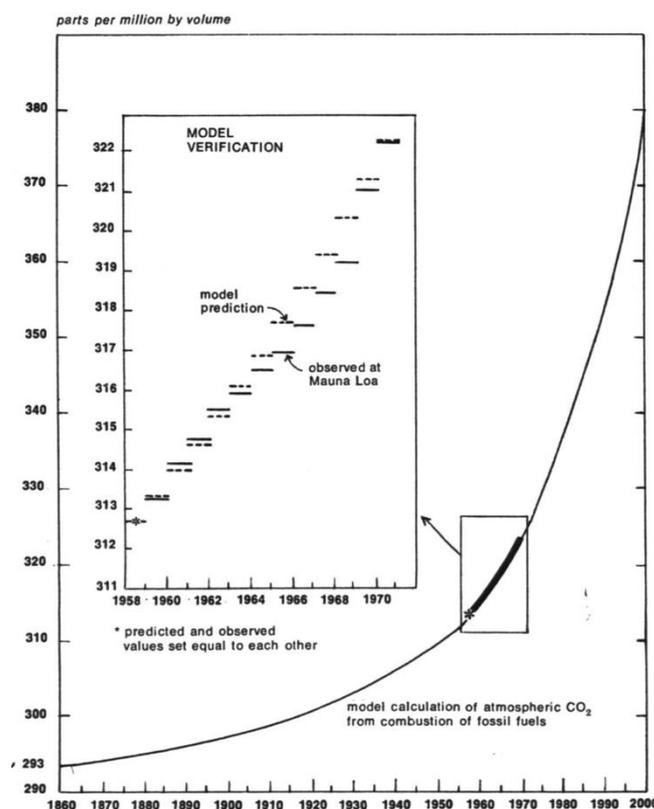
and the benefits of climate policies, (ii) Target based models which simulate the effect of an efficient level of carbon abatement in the world economy, (3) Uncertainty based models which deal with decision making under conditions of uncertainty (Manne, Richels, 1992 ; Nordhaus, 1994). Many policy optimization models start with a market economy in which the regulatory instrument is a tax and then convert the model to an equivalent problem which finds the optimal emissions. Such models maximize the weighted sum of utilities where the weights are adjusted until individual budgets balance (which is equivalent to a Pareto Optimum (second welfare theorem)), or start with optimal emissions and convert the results into a tax. So optimization models are standardized and provide a description of the world, given the assumptions of the equivalence theorems. Policy evaluation IAMs are well-known as simulation models. They include deterministic projection models in which each input and output takes a single value, and stochastic projection models in which at least some inputs and outputs take a range of values. Policy evaluation models take actions by agents and governments as given, provided by policy proposals, assumption, observation and expert opinion.

In this article, we propose to review 6 IAMs (World 3, DICE, IMAGE, MESSAGE, GEM-E3 and REMIND) to understand how these models are able to integrate Energy, Climate and Economics. We will resume their main results in a table to present goals, structure, policy evaluation, policy optimization, and dynamics associated with the models. We will identify the future challenges for research design and policy decisions.

1. World 3 - the first design of an IAM ?

In the 1972 *Limits to Growth* report, the climate system is not part of the model. The pollution variable is captured by the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Meadows et al (1972, p. 71) introduced a positive loop : the more industrial production increases, the more fossil energy (coal, oil and natural gas) is used ; this releases CO₂ into the atmosphere and causes an increase in mortality.

Figure 1: Concentration of CO₂ in the Atmosphere



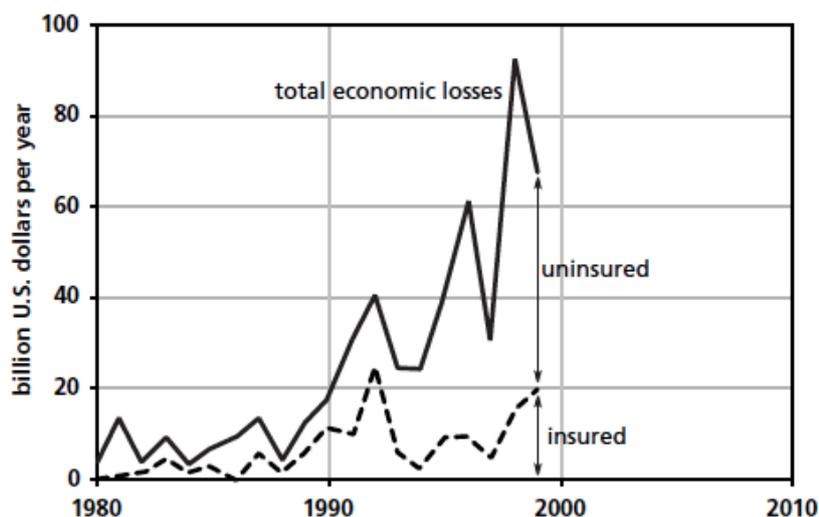
Source : Meadows et al. (1972, p. 72)

It would be necessary to wait for the publication of *Beyond The Limits* (1992) for climate to be explicitly integrated into system dynamics, but it was only mentioned in Chapter 3 (The Limits : Sources and Sinks) on pollution and waste. While global climate change is clearly presented as the new challenge for the coming years (scientific evidence of global warming is accumulating), its analysis continues to feed into the growth debates : "*Many scientists believe that the next global limit humanity will have to deal with is the one called the greenhouse effect, or the heat trap, or global climate change*" (1992, p. 92). Thus, global climate change cannot be detected in the short term, but over decades. To these long-term observations, three types of uncertainties must be added : 1. What would the global temperatures be without human intervention ? A reduction in growth may not be sufficient to reduce CO₂ concentrations if they increase naturally in the long term, 2. What are the consequences of global warming on precipitation, winds, ecosystems and human activities at particular locations on Earth ? 3. How to understand all the loops associated with carbon and energy flows. The modelling of such a system is complex and control loops can be used to stabilize CO₂ emissions (the oceans can absorb some of them).

The publication of *Limits to growth, the 30 years update* (2004), deserves attention, as the climate generates many loops in World 3. The report does not hesitate to target economists, the main climate skeptics and to highlight the consequences of climate change on economic activities, and therefore on economic growth: "*More scientists, and now many economists as well, believe the next global limit humanity will have to deal with the*

greenhouse effect, or global climate change... Even some economists - a group well known for its skepticism about environmentalist alarmism - are becoming convinced that something unusual and significant is going on in the atmosphere, and that it may have human causes" (2004, p. 113-115).

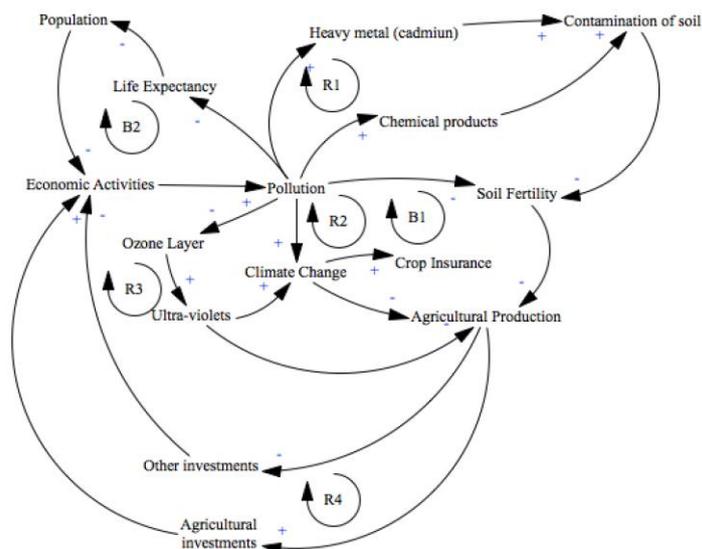
Figure 2 : Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters



Source : Meadows et al. (2004, p. 117)

Climate change is causing economic losses that call into question the viability of insurance systems (the 1990s and 2000s marked a break in the trend, with the share of damage not giving rise to big reimbursement increases). Scenario 2 (Global Pollution Crisis) introduces the damaging effects of pollution and climate change. The positive loop is as follows : an increase in pollution reduces land fertility, which in turn reduces agricultural production, investments move to agricultural sector to maintain food production and decrease in other sectors, pollution leads to lower life expectancy and increased mortality. This loop is reinforced by three effects : land contamination by heavy metals and chemicals, climate change that randomly and repeatedly alters agricultural production, and ultraviolet radiation related to ozone depletion.

Figure 3 : Positive and negative loops in the scenario "more pollution"



This work has been widely criticized by economists, William Nordhaus (1972, 1973) was the main architect of this critique. In an article co-written with James Tobin entitled "Is Growth Obsolete ? ", Nordhaus responded to the report : (« *We mention this point now because we shall return later to the ironical fact that the antigrowth men of the 1970s believe that it is they who represent the claims of a fragile future against a voracious present* », 1972, p. 4) by mobilizing theory around three questions : 1. The measurement of economic growth, 2. The link between growth and natural resources, 3. The link between population growth rates and economic well-being.

A year later, Nordhaus (1973) repeated his critique, targeting Forrester's *World Dynamics*. The title "World Dynamics Measurement without data" and the content of the article are unequivocal. « *What is the overall impression after a careful reading of World Dynamics ? First, the dynamic theory put forward in the work represents no advance over earlier work... Second, the economic theory put forth in World Dynamics is a major retrogression from current research in economic growth theory... Third, Forrester has made no effort in World Dynamics to identify any relation between his model and the real world... Fourth, the methodology of modelling in World Dynamics differs significantly from other studies of economic systems...Fifth, the predictions of the world's future are highly sensitive to the specification of the model... Sixth, there is a lack of humility toward predicting the future* » (1973, p. 1183).

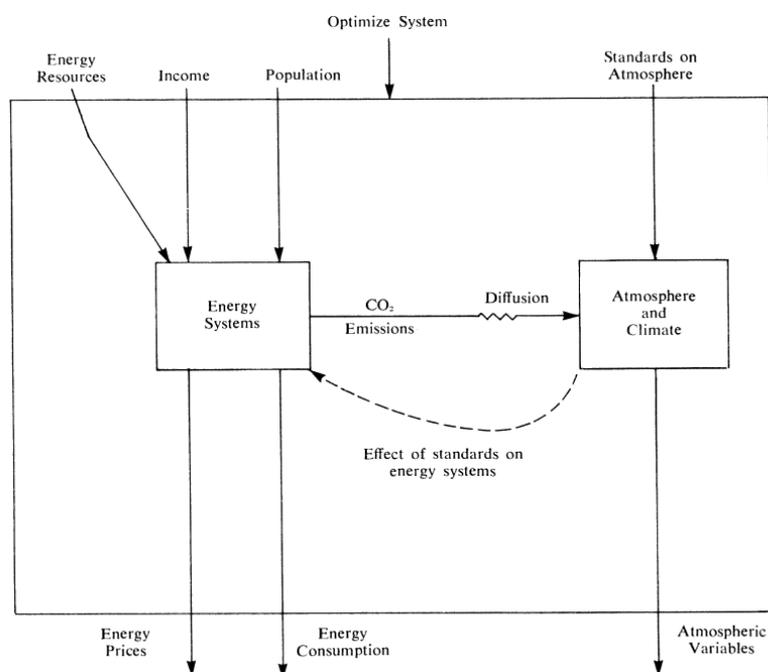
2. DICE - the Carbon Dioxide Problem

It is in this context that Nordhaus would undertake his research "Resources as a constraint to growth" (1974), into the management of energy resources, and then take into account the impact of CO₂ concentration in the atmosphere. He concludes that assuming that "10 percent of the atmospheric CO₂ is absorbed annually (G. Skirrow), the concentration would be expected to rise from 340 ppm in 1970 to 487 ppm in 2030 - a 43 percent

increase" (1974, p. 26). His paper is a first attempt at integrated climate modelling. It is rudimentary (only the CO₂ variable is taken into account), but it does reflect the debates of the 1970s. Against the backdrop of the energy crisis, Nordhaus intended to develop a global energy model that could be coupled with a climate model. Nordhaus presented this theoretical framework in two articles, one presented to the Cowles Commission (Strategies for the Control of Carbon Dioxide, 1976), the other published in *The American Economic Review* (Economic Growth and Climate : The Carbon Dioxide Problem, 1977).

Figure 4 provides an overview of the model used by Nordhaus to study carbon dioxide emission control strategies.

Figure 4 : Optimization model of energy and environmental system



Source : Nordhaus (1977, p. 343)

The "energy system" block is a system combining market mechanisms and economic policies. The key variables are energy, natural resources, income, and population. The interaction of supply and demand leads to a trajectory of optimization of prices and consumption over time. To take into account externalities, such as the carbon cycle, Nordhaus proposes to take into account CO₂ emissions and distribution. This step leads to the imposition of standards on atmospheric concentrations (right side of the figure). By imposing such standards, it becomes possible to close the loop and force the energy system to act on the structure of supply and demand. Nordhaus is examining two strategies to keep atmospheric CO₂ concentrations at a reasonable level. The first strategy is to reduce carbon dioxide emissions. This means replacing high CO₂ fuels with low CO₂ fuels. The second strategy is to offset the effects of carbon dioxide emissions or use new industrial processes (environmental technologies) to

"suck" carbon dioxide from the atmosphere. In order to avoid "*the odor of science fiction*" (1977, p. 343), Nordhaus favors the first strategy by seeking to optimize the system based on standards.

It was not until the 1990s that the DICE (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy) and RICE (Regional Integrated Model of Climate and the Economy) family of models was born (Nordhaus, 1992, 1994). The DICE model is a dynamic optimization model (Ramsey, 1920) which seeks to estimate the optimal GHG reduction trajectory. The optimal trajectory can be interpreted as the most effective way to slow climate change, taking into account inputs and technologies (Veille-Blanchard, 2007). It can also be interpreted as a competitive market balance in which externalities are adjusted using appropriate social prices for GHGs. In the DICE model, emissions include all GHGs, however, those associated with CO₂ are preferred. GHG emissions, which accumulate in the atmosphere, can be controlled by increasing the prices of inputs (such as energy) or GHG-intensive products. Climate change is captured by the overall average global temperature, a variable used in most current climate models. The economic impacts of climate change are assumed to increase as the temperature increases.

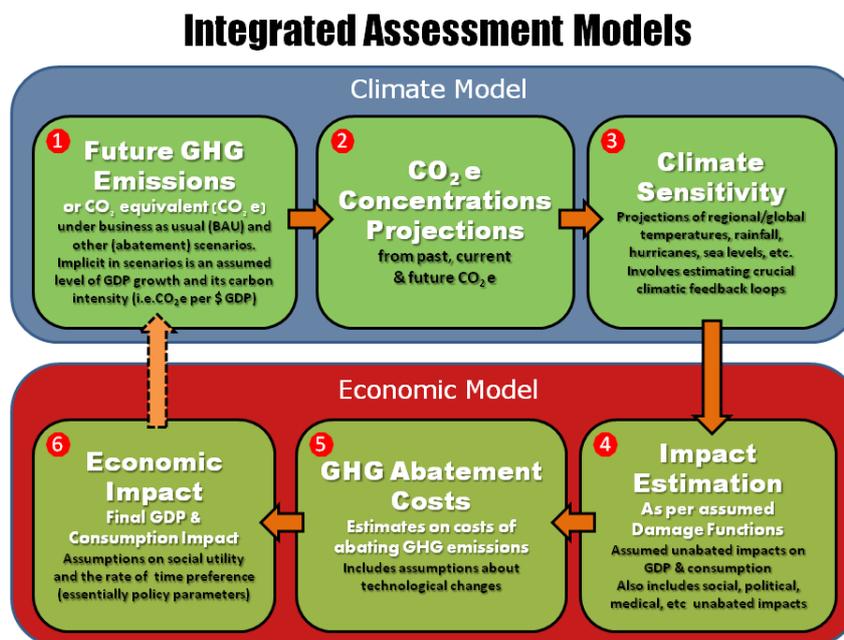
In the space of two decades, the DICE model has been a huge success, for which three reasons can be given. The first reason is the multiple revisions proposed by Nordhaus: an intermediate version (Nordhaus, 2008) and an updated version (Nordhaus 2017). The DICE model has been iterated many times, incorporating recent economic and scientific results and updated economic and environmental data. The second reason is based on a detailed description of the model (Nordhaus, Sztorc, 2013) with the availability of the DICE manual and the possibility of carrying out simulations. The third reason is the media coverage of DICE through the publications and work of the IPCC (since 1995) and many energy agencies (including the US agency).

To this, we add a fourth reason that affects the way Integrated Assessment Models (IAM) are approached today. This fourth reason is that the DICE model has initiated a way of thinking about integration, which can be summarized by the following process : integration of CO₂ emissions, impacts on economic activities, economic policy measures. As a result, Climate, Energy, and Economics are now the main building blocks for integrated assignment models (Ha-Dong, Matarasso, 2006 ; Gladkykh, Spittler, Dierickx, 2017).

Integrated models are not limited to the DICE model, other models emerged in the 1990s - ICAM (Dowlatabadi, Morgan, 1993), IMAGE (Alcamo, 1994), MERGE (Manne et al, 1995), MiniCAM (Edmonds et al, 1996). Some like IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environmental) even follow in the footsteps of World 2 and World 3, adopting an architecture built around the main drivers (population,

economy, politics, technology, lifestyle and resources) of the human and earth ecosystems. Thus, alongside small, simplified and discipline-based models (DICE and economics), there are global, complex and interdisciplinary models (World 3, IMAGE). These two main families of models have contributed to enriching the debate about the integrated approach to climate change, each with its strengths and weaknesses.

Figure 5 : Coupling climate system and economic system



Source : deconstructingrisk.com

The 2000s were marked, not by rivalry between models (although it does exist), but by a reflection about the processes of integration (Matarasso, 2003) and evaluation (Schwanitz, 2013) of IAMs (Pearson and Fisher-Vanden, 1997). This is particularly visible through the many definitions which have been used. Integrated assessment can thus be defined as "an interdisciplinary and participatory process aimed at combining, interpreting and communicating knowledge from various scientific disciplines to enable the understanding of complex phenomena" (Parker, 2002). It aims to build the best possible response, in the current state of knowledge, to questions asked by decision-makers on environmental issues (Kieken, 2003). This objective is generally achieved by integrating the ongoing work of various disciplines into an interactive process that includes researchers, managers, and stakeholders. The circulation and sharing of knowledge between communities is ensured by the implementation of three families of complementary tools: (1) Computer models of integrated assessment designed as a methodological frameworks for interdisciplinary work and the means of integrating knowledge from various disciplines, (2) Essentially qualitative scenarios to take into account what is not modellable, (3) Participatory methods involving stakeholders other than scientific and political (the aim here is to improve the acceptability of

decisions through a better understanding of the issues; to legitimize the decision-making process through the early involvement of the actors concerned; to introduce non-expert knowledge).

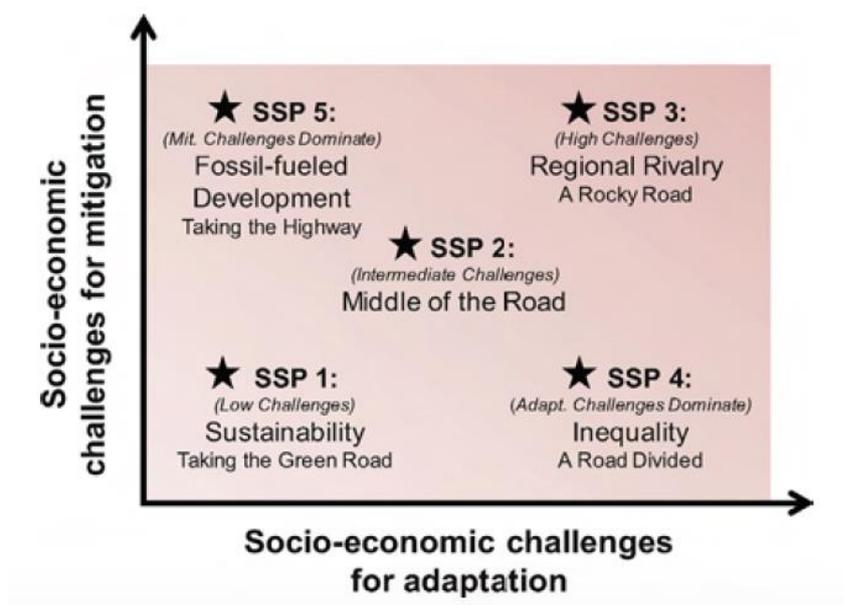
These interdisciplinary computerized models, designed to address issues of climate impact, climate adaptation and climate change, are still not robust. While each discipline provides some knowledge about the processes which determine the evolution of the Earth/Society system, their interaction poses a number of problems. For example, climatologists' General Circulation Models (GCMs) do not allow us to study in detail the strategies for reducing greenhouse gas emissions. It is therefore necessary to look at the energy system in order to identify energy production and transformation technologies. These technologies must, in turn, be included in a macroeconomic model, designed to understand the major monetary and financial balances that regulate the economy. To address these limitations, the modelers have developed a modular approach, based on the coupling of existing models, which are themselves based on a discipline. Integration is based on the following : (1) Climate models (more or less complex), (2) Energy system models, (3) Macroeconomic models of global activity, (4) Carbon cycle models (often related to land use). These couplings generate a multitude of challenges (depending on whether the modules are solved simultaneously or successively or according to the finesse of the different representations of the modules), which demand the creation of a real network of modelers, users, and decision-makers at the IAM level. This is the price to pay for the necessary changes in our behavior with regard to climate change.

3. MESSAGE - Shared Socioeconomic Pathways

The IIASA IAM framework is a combination of five different models – The energy model MESSAGE, the land use model GLOBIOM, the air pollution and GHG model GAINS, the aggregate macro-economic model MACRO, and the climate model MAGICC. These five models provide inputs, drivers and dynamics to describe alternatives futures for societal development. Scenarios of global development focus on the uncertainty of the future conditions of society, describing future societies that can be combined with climate change projections and climate policy assumptions to produce integrated scenarios to explore climate mitigation, climate adaptation and residual climate impacts in a consistent framework. Society's development scenarios consist of qualitative and quantitative components (Raskin et al, 2005). Quantitative components introduce assumptions for variables such as population, economic growth (GDP), technological progress, food, etc which are quantified and used as inputs to model energy use, land use, GHG emissions (Rothmans et al, 2007). Qualitative storylines describe the evolution of society such as quality of institutions, environmental awareness, and political stability to “*provide a certain logic to the multiple assumptions and to help to define possible developments for those areas where formal modeling*

is not meaningfully possible due to ignorance and complexity” (Van Vuuren et al, 2012, p. 888). If the process to develop a new set of integrated scenarios describing climate, society and environmental change, is still happening, a few researchers (Krieger et al, 2012, O’Neill et al, 2014, Kriegler et al, 2014, Riahi et al, 2017 ; O’Neill et al, 2017; Van Vuuren et al, 2017, Bauer et al, 2017) have introduced alternative pathways of future development of society called *shared socioeconomic pathways (SSPs)*²⁸. A conceptual framework has been produced for the development of SSPs (O’Neill et al, 2014, 2015) and for the combination of Integrated Assessment Model (IAM) scenarios based on SSPs with future climate change outcomes and climate policy assumptions, to produce integrated scenarios and support other kinds of integrated climate change analysis. SSPs describe plausible alternative changes in aspects of society such as demographic, economic, technological, social, governance’ and environmental factors.

Figure 6 : Five shared Socioeconomics Pathways



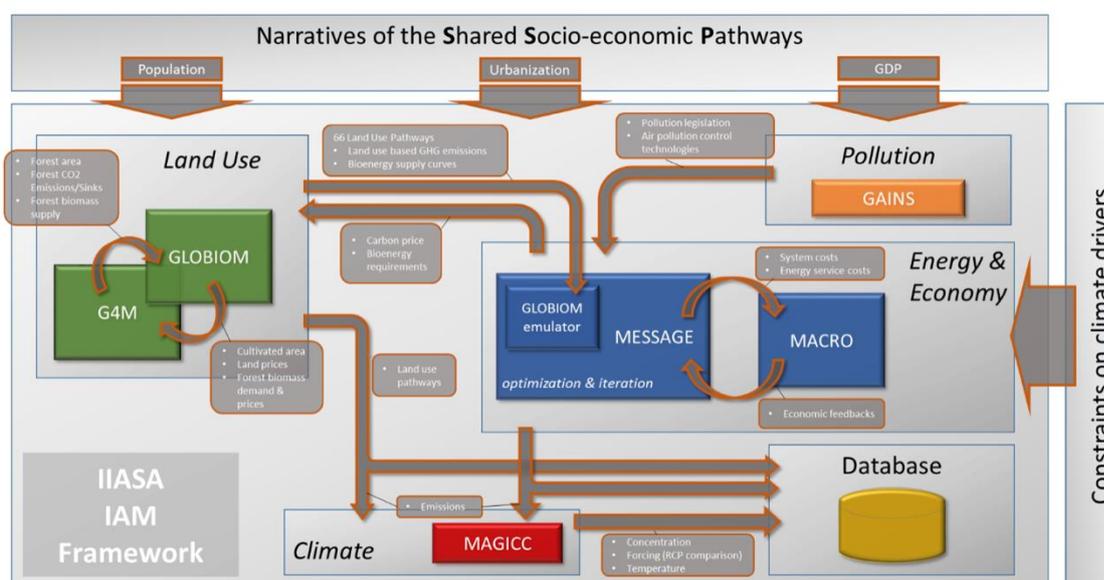
Source : O’Neill et al (2014, p. 391 ; 2015, p. 2)

Five shared socioeconomic pathways have been proposed to represent different combinations of challenges to climate change mitigation and to climate adaptation (O’Neill et al, 2014, 2015) : SSP1 (Sustainability : taking the green road), SSP2 (Middle of road), SSP3 (High challenge: Regional Rivalry, a rocky road), SSP4 (Adaptation challenges Dominate: Inequality, a road divided), SSP5 (Mitigation challenges dominate: fossil fueled development, taking the highway).

²⁸ “We define SSPs as reference pathways describing plausible alternative trends in the evolution of society and ecosystems over a century timescale, in the absence of climate change or climate policies » (O’Neill, 2014, p. 387 – 388).

From these five SSPs, three following narratives have been introduced into the IIASA – IAM framework : SSP1 (sustainability), SSP2 (middle of the road) and SSP3 (regional rivalry, a rocky road).

Figure 7: Narratives of the Shared Socio-economic Pathways in IAM



Source : <http://data.ene.iiasa.ac.at/message-globiom/overview/index.html>

MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) represents the core of the IIASA (International Institute of Applied Systems Analysis) IAM framework. It was developed in the 1980s. While it is possible to use the model on a global scale it has also been applied to various national energy systems. The model is a technology-rich bottom-up energy system model, which is very detailed on the supply side but not on the demand side. It is used for modelling the supply side and its general environmental impacts, planning medium-to long-term energy systems, and analyzing climate change policies on a national level or for global regions. This is possible because the model has been developed further and many hybrid versions exist. Some important aspects of energy system modelling have been integrated into MESSAGE (i.e. Stochastic MESSAGE, Myopic MESSAGE, MESSAGE-Access), while other relevant models are linked to it to some extent (i.e. from soft to hard link). The various hybrids of MESSAGE make it possible to apply MESSAGE for a broad range of future scenario and policy analysis. The following hybrids exist :

(i) MESSAGE-MACRO : MACRO is a general equilibrium model (it was derived from GLOBAL 2100 and MERGE models) which maximizes the over time utility function of a single representative producer/consumer in each world region and evaluates energy demand. The main variables of the model are capital stock, available labor, and energy inputs, which together determine the total output of an economy

according to a CES (Constant Elasticity of Substitution) production function. MACRO's production function includes seven energy service demands which are provided by MESSAGE (residential/commercial thermal, residential/commercial specific, industrial thermal, industrial specific, industrial feed stock, transportation, non-commercial biomass). The primary drivers of future energy demand in MESSAGE are forecasts of total population size and GDP at purchasing power parity exchange rates, denoted as GDP (PPP).

(ii) MESSAGE-MAGICC : MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse gas Induced Climate Change) covers several aspects related to climate change processes. These CLDs do not offer an exhaustive representation of GE3M dynamics. More precisely, MAGICC is a reduced-complexity coupled global climate and carbon cycle model which calculates projections for atmospheric concentrations of GHGs and other atmospheric climate drivers, like air pollutants, together with consistent forecasts of radiative forcing, global annual mean surface air temperature, and ocean heat uptake. Through the link to MESSAGE it is possible to investigate the impact of different energy pathways on the economic and energy system.

(iii) Linkages to models such as the agricultural model GLOBIOM (Global BIOSphere Management) and the air pollution one GAINS (Greenhouse gas - Air pollution Interactions and Synergies) permit the assessment of other possible effects of energy system developments in other relevant fields. GLOBIOM is a partial equilibrium model which shows the competition between different land use based activities including the agriculture, forestry, and bioenergy sectors. Production adjusts to meet demand for 30 economic regions. GAINS²⁹ was launched in 2006 as an extension of the RAINS model, which is used to assess cost-effective response strategies for combating air pollution (fine particles and ground level ozone). GAINS gives the historic emissions of 10 air pollutants and 6 GHGs for each country based on data from international energy and industrial statistics. The model may be used in two ways: (i) scenario analysis mode - it follows emission pathways from source to impact; (ii) optimization mode - it identifies where emissions can be reduced most cost effectively.

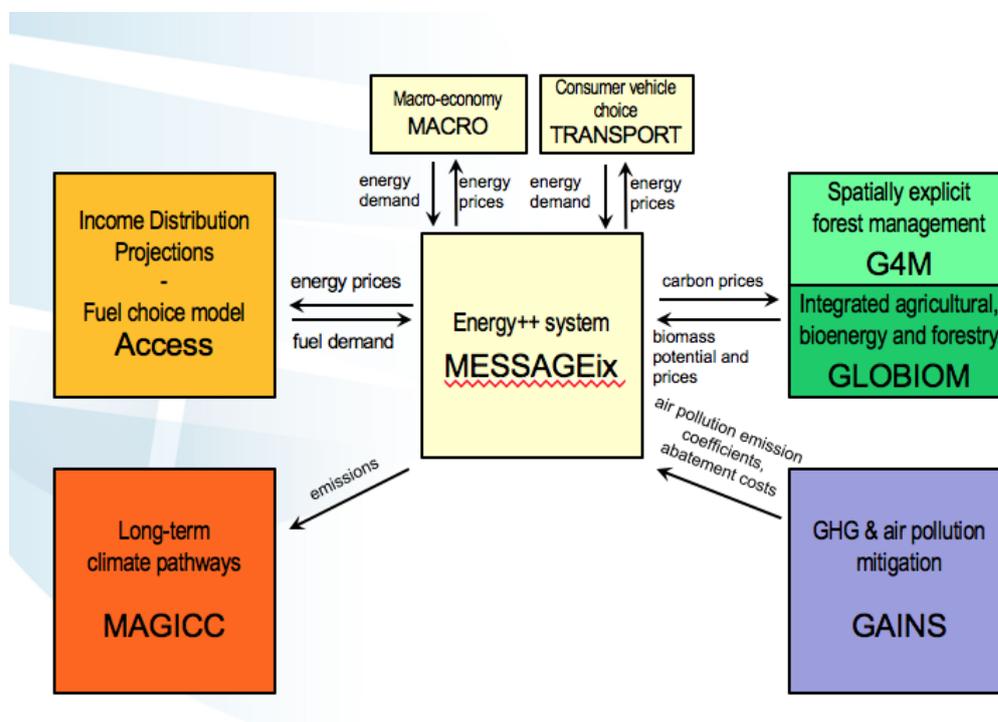
Today, GAINS tools offer three ways to explain policy interventions which have multiple benefits : (1) Cost simulation, (2) Cost-effectiveness analysis to identify lowest-cost packages of measures, (3) Cost-benefit assessments that maximize net benefits of policy interventions.

Despite MESSAGE being originally developed as a bottom-up, technology-rich, supply-side focused model it is used for a wide range of integrated assessments. These

²⁹ GAINS is used for policy analyses under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) e.g. for the revision of the Gothenburg Protocol, and by the European Commission for the EU Thematic Strategy on Air Pollution and the air policy review.

assessments are possible because of the continuous development of the model as well as its linkages to other models, covering important aspects related to sustainable (energy) system development.

Figure 8 : IIASA Integrated Assessment Framework



Source : Giddens (2018)

4. GEM-E3 - a General Equilibrium Model

GEM-3E (General equilibrium Model for Energy Economy Environment), partly funded by the European Commission (DG Research, 5th Framework programme) and by national authorities, is the result of a collaborative effort by a consortium involving National Technical University of Athens (NTUA - E3M lab), Katholieke Universiteit of Leuven (KUL), University of Mannheim, the Centre for European Economic Research (ZEW), and the Ecole Centrale de Paris (ERASME).

The model is used "to examine the potential for the EU to gain a first mover advantage if adopts earlier than others ambitious GHG emissions reduction policies" (Paroussos, 2018, p. 2). GEM-E3 provides details on the macro-economy and its interaction with the environment and the energy system. The model is able to fix the optimum balance of energy demand and supply, atmospheric emissions, and pollution abatement, simultaneously with the optimizing behaviour of agents and the fulfillment of the overall equilibrium conditions.

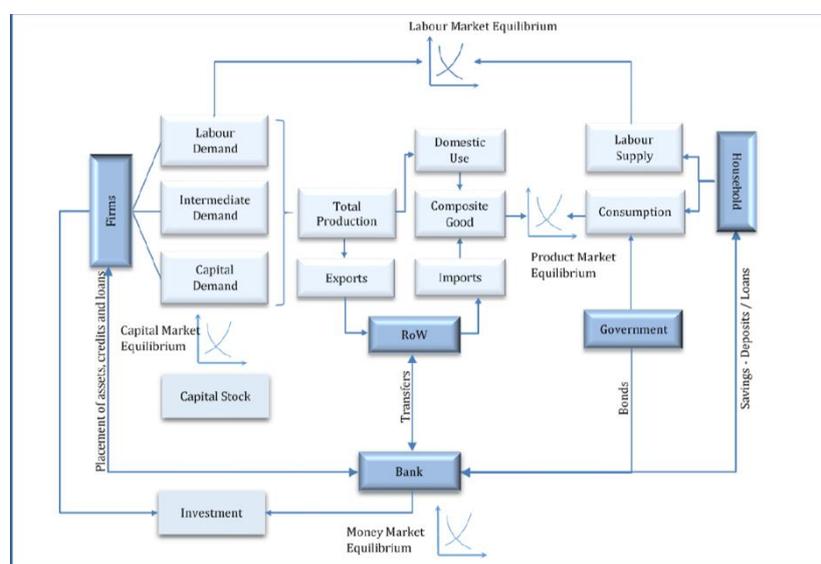
The model calculates the equilibrium prices of goods, services, labor, and capital which simultaneously clear all markets under the Walras Law (Capros, Van Regemorter,

Paroussos, Karkatsoulis, 2015). The model follows a computable general equilibrium approach³⁰.

The main features of the model are as follows (Paroussos, 2018):

- it is a global and multi-regional model, treating separately each EU-15 member state and linking them through endogenous trade of goods and services.
- it includes multiple industrial sectors and economic agents, which permits the consistent evaluation of the distributional effects of policies. An economic circuit describes the relations between agents (firms, households, banks, etc) and the main drivers (capital, investment, exportations, importations, consumption, etc).

Figure 9: Economic circuit of GEM-3E



Source: Paroussos (2018, p. 7)

- it covers the major aspects of public finance including all substantial taxes, social policy subsidies, public expenditures, and deficit financing, as well as policy instruments (for environment and energy system). A financial/monetary sub-model is connected to the macroeconomic structure, following the IS/LM methodology.

³⁰ The distinguishing features of general equilibrium modelling derive from the Arrow-Debreu economic equilibrium theorem and the constructive proof of existence of the equilibrium based on the Brouwer-Kakutani theorem. The Arrow-Debreu theorem considers the economy as a set of agents, divided into suppliers and demanders, interacting in several markets for an equal number of commodities. Each agent is a price-taker, in the sense that the market interactions, and not the agent, are setting the prices. Each agent individually defines his supply or demand behavior by optimizing his own utility, profit, or cost objectives. The theorem states that, under general conditions, there exists a set of prices that bring supply and demand quantities into equilibrium and fully (and individually) satisfy all agents. The Brouwer-Kakutani existence theorem is constructive in the sense of implementing a sort of trial and error process around a fixed point where the equilibrium vector of prices stands. Models that follow such a process are called computable general equilibrium models.

- it is a dynamic, recursive over time, model, which involves the dynamics of capital accumulation and technology progress (measured by R&D expenditure by private and public sectors), stock and flow relationships, historically-based forecasts and spill-over effects.

- it proposes an explicit description of a detailed financial sector for each country that includes agent specific debt profiles and market clearing interest rates.

Figure 10 : Computer General Equilibrium with financial sector

- Demand for finance: Each agent (in deficit) can receive a loan from domestic capital markets that needs to be repaid in a given time period at a market clearing interest rate
- Supply of finance: Each agent (in surplus) owns a portfolio of financial products with different returns and risks.

<u>without financial sector</u>	<u>with financial sector</u>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Debt accumulation does not have an impact</u> on the real economy and/or interest rates ▪ Depending on the closure rule the <u>financing</u> of an investment project takes place in <u>one period</u> (at the period where the investment products are constructed) and can be financed from the sector, country or abroad. ▪ In a given year/period alternative investment projects compete for the same capital resources (<u>crowding out effect</u>) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Agents <u>financing</u> is subject to their <u>financial position</u> (surplus – deficit). ▪ Detailed representation of financial products and detailed accounting of the financial position of each economic agent. <u>Book keeping of stock/flow relationships</u> on debt accounting (domestic and external Private and Public debt) ▪ <u>Endogenous computation of interest rates</u> for alternative uses of financial resources (deposits, bonds etc.) Use of the endogenous interest rates for <u>rationing financing decisions</u> ▪ The option to <u>create payback schedules</u> that span over many periods moderates considerably the crowding out effect

Source : Paroussos (2018, p. 18)

- it includes also a detailed representation of the power generation system (10 power generation technologies) and discrete representation of the sectors manufacturing clean energy technologies (wind, PV, electric cars, biofuels, etc).

Figure 11 : GEM-E3 model dimensions

Countries/regions	Each of the 28 EU MS, plus 18 other countries/global regions (All G-20 countries individually represented)
Sectors	51 production sectors including detailed representation of transport, power generation and clean energy technologies
Energy users	47 firms by country and households
Fuels	Biomass, Ethanol, Bio-diesel, Coal, Crude Oil, Oil, Gas
Emissions	All GHGs, both energy and process related
Energy technologies	Coal fired, Oil fired, Gas fired, Nuclear, Biomass, Hydro-electric, Wind, PV, CCS Coal, CCS Gas
Economic agents	Households, Firms, Government, Banks, Foreign Sector
Periodicity and time horizon	<u>Annual</u> to 2020, five-year time step to 2070, more suited for medium and long-term analysis
Policy applications	Capable of analyzing a wide range of policy measures (like ETS allowances, carbon taxes, investments in alternative power generation technologies and energy efficiency)
External sensitivities	Global energy prices, policy measures in non-EU countries, different uptake of low-carbon technologies
Model results/impact assessment	GDP, jobs, energy prices, consumer prices, sectoral production, budget deficit, competitiveness, balance of payments, energy use, GHG emissions, welfare

Source : Paroussos (2018, p. 4)

- it includes projections of the Input/Output Table (IOT) for country national accounts, employment, capital, monetary and financial flows, etc based on Eurostat data.

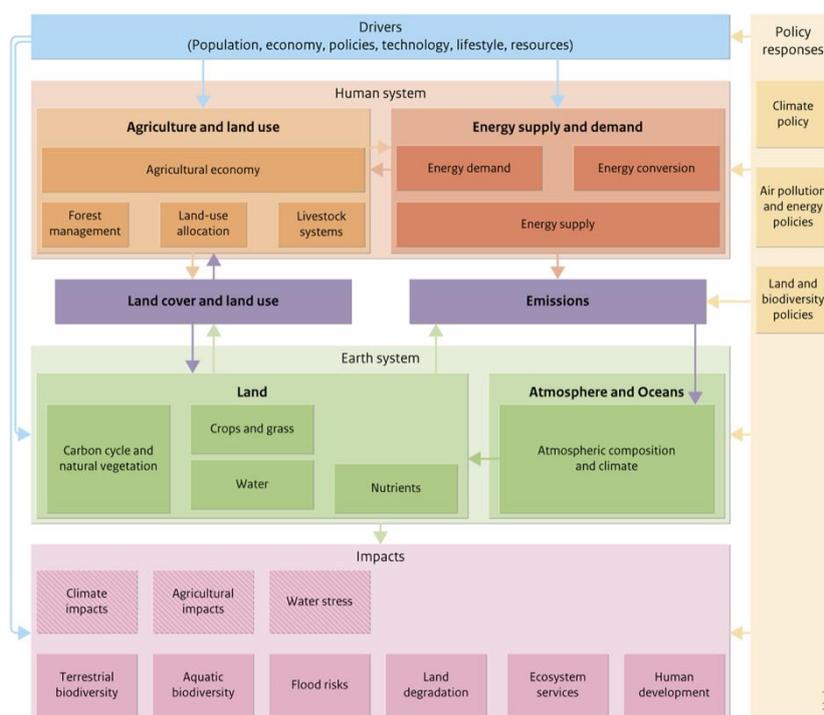
In general terms, the GEM-E3 model covers the general subject of sustainable economic growth and supports the study of related policy issues. Even if the model is

based on economic theory (general equilibrium, price adjustment, carbon tax, emissions permits), it aims to analyze the global climate change issues for Europe, and provides an analysis of distributional effects (distribution among European countries and distribution among social and economic groups within each country).

5. IMAGE - a detailed biophysical system

IMAGE (Integrated Model to Access the Global Environment) is an ecological/environmental based model that simulates the environmental consequences of human activities. The first version of IMAGE was developed in the 1980s. Its main goal is exploring interactions between human and Earth systems to better understand how to approach multiple sustainability issues (i.e. climate change, biodiversity loss, human well-being). The objective of the IMAGE model is to explore the long-term dynamics and impacts of the global changes which result from interacting socio-economic and environmental factors (Stehfest et al, 2014). The latest improvements to IMAGE 3.0. focus on human development and explore the dynamics and trade-offs between different model sectors to reach sustainability goals.

Figure 12 : IMAGE model schematic framework



Source : Stehfest et al., (2014)

IMAGE is a simulation model, which implies the exploration of simulations of alternative scenarios for human and natural system developments over the long term and communicating them in a participatory setting.

Within the family of the IAMs, IMAGE developers classify the model within the IAM typology as a *Process-oriented energy/land IAM framework*. The models of this type are

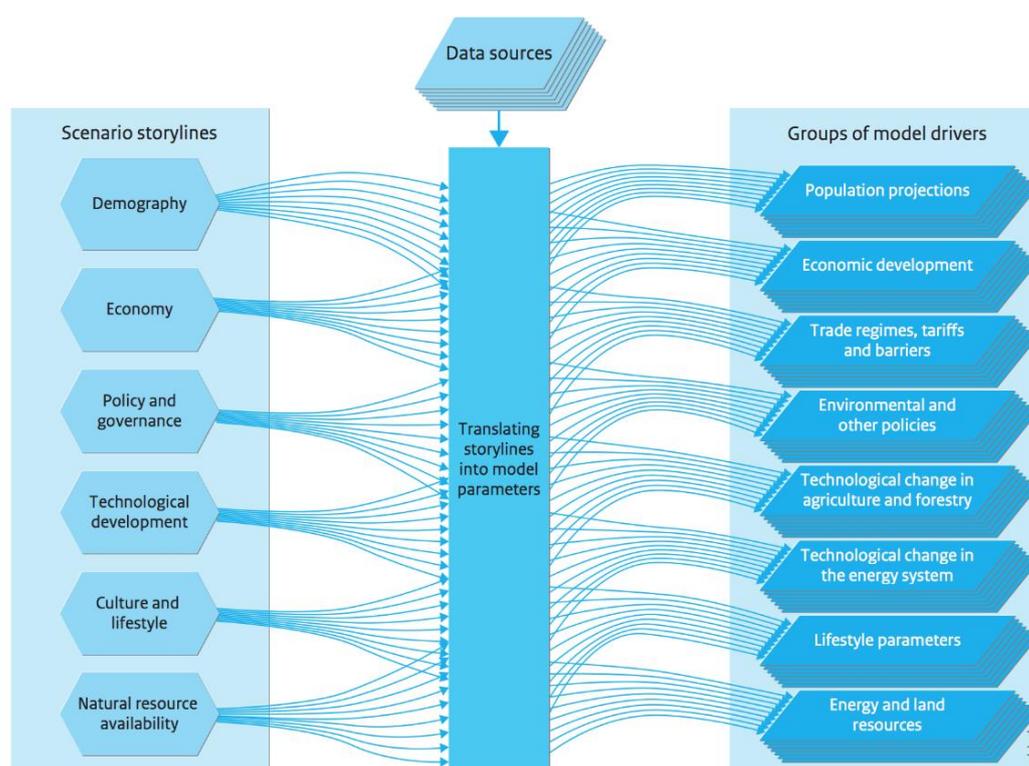
of an intermediate complexity for the human and the earth systems (van Vuuren et al, 2015).

IMAGE is a global/multi-regional model. It presents 26 world regions for the socio-economic system. Structurally, the model and the its documentation are designed in line with the *DPSIR* framework (Drivers Pressures State Impact Response). There are several models integrated into the IMAGE framework : GISMO (Global Integrated Sustainability Model) - sustainable development model, GLOBIO - biodiversity model, PIK-LPJmL - land use model, TIMER (the IMAGE Regional Energy Model) - energy model, MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) - climate model.

Originally designed to assess the global effect of greenhouse gas emissions, IMAGE now covers a broad range of environmental issues beyond climate change (e.g. land-use change, biodiversity loss, modified nutrient cycles, and water scarcity). Human societies harnessing natural resources to support their development are seen as the systems that put pressure on the earth system and create environmental problems. The authors of the model formulate the uniqueness of the model in the following way: *“The unique aspect of IMAGE is that it contains a consistent description of the physical aspects of environmental change, both in the human economy (also in relation to monetary trends) and the earth system. This makes the framework well suited to analyse the impact of individual measures and combined strategies in terms of synergies and trade-offs”* (van Vuuren et al., 2015).

The plans for the further development of the IMAGE model aim to make it a useful tool for exploring complex sustainability issues and trade-offs between the human and the natural systems in the context of the SDGs agenda. The IMAGE scenario section, which is aimed at exploring potential long-term pathways for human and natural system development, contains several main storylines and drivers. There are six main scenario storylines which are translated into the model's parameters. The alternative simulation results based on these scenarios are explored.

Figure 13: IMAGE model scenario storylines



Source : Stehfest et al. (2014)

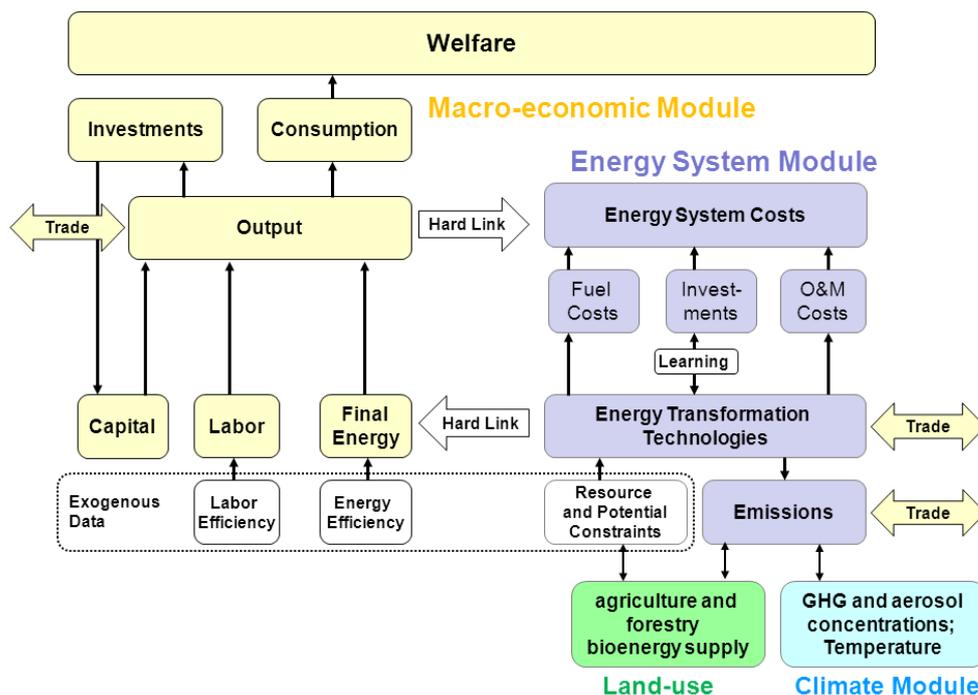
IMAGE is aimed at providing an Integrated Environmental Assessment and at being used for policy analysis. The main clients of IMAGE include the Dutch Government, the European Commission, international organizations, such as IPCC, UNEP and OECD, and the research community. In the future, efforts will be made to “*expand this client base to sector and business associations*” (van Vuuren et al., 2015).

6. REMIND-R - an Economic Growth Model

REMIND-R is a multi-regional hybrid model which incorporates an economic growth model, a detailed energy system model, and a simple climate model (Leimbach and al, 2010). The existence of interdependency between energy systems and macroeconomic systems over time is the core of REMIND-R (Bauer and al, 2009). Firstly, energy is a production factor in the macroeconomic growth model (MGM), and energy production requires financial means that are accounted for in the budget equation of the macroeconomic model. Secondly, the decision to couple the two systems is based on a “hard link”³¹ approach which “*integrates the technico-economic constraints of the energy system model (ESM) into the macroeconomic growth model (MGM) as an additional set of functions and constraints and solves one very complex non-linear programming (NKP) program*” (Bauer and al, 2009, p. 97).

Figure 14 : Structure of REMIND-R

³¹ A “soft link” approach separates the two models and integrates a reduced form model the ESM into the MGM resulting in a less complex model.



Source : PIK (2017)

- *The macro-economic system* is a Ramsey-type optimal growth model in which global welfare over time is optimized subject to equilibrium constraints. It takes into account 11 world regions. Each region is modeled as a representative household with a utility function that depends upon per capita consumption.

$$U_r = \sum_t e^{-\rho t} L_t \log\left(\frac{C_t}{L_t}\right).$$

with Population (L), consumption (C) and pure rate of time preference (ρ) of 3%. The objective of the REMIND-R model is to maximize a global welfare function that is a weighted sum of the regional utility functions :

$$W = \sum_r n_r U_r.$$

Economic output (gross domestic product, GDP) of each region is determined by a Constant Elasticity of Substitution (CES) function of the production factors, labor, capital, and end use of energy. In each region, GDP is used for consumption (C), investments into the capital stock (I), exports (X), and energy system expenditure (which consists of fuel cost (GF), investment costs (GI), and operation and maintenance cost (Go). Imports of the composite goods (M) increase GDP :

$$Y(t) - X_G(t) + M_G(t) \geq C(t) + I(t) + G_F(t) + G_I(t) + G_O(t)$$

REMIND-R follows the classical results from HOS (Heckscher-Ohlin-Samuelson) theorem and Ricardo's theory of comparative advantages. Trade between regions is induced by differences in factor endowments and technology.

All technologies are represented in the model as capacity stocks. The possibility to invest in different capital stocks provides high flexibility of technological evolution.

With its macro-economic formulation, REMIND-R is similar to the MERGE (Manne and al, 1995) and RICE (Nordhaus, Yang, 1996) models. The only difference is the high technological resolution of the energy system, and the trade relations between regions over time.

- *The energy system model (ESM)* has a detailed description of energy carriers and conversion technologies. Luderer et al (2011, p. 8) insist on the fact that ESM is embedded into the macro-economic growth model : *"the energy system can be regarded as an economic sector with a heterogeneous capital stock that demands primary energy carriers and supplies secondary energy carriers. The structure of the capital stock determines the energy related demand-supply structure. The macro-economy demands final energy as an input factor for the production of economic output. In return, the energy sector requires financial resources from the capital market that are allocated among a portfolio of alternative energy conversion technologies"*.

The primary carriers include both exhaustible resources (coal, gas, oil, uranium) which are characterized by extraction costs that increase over time as cheaply accessible deposits become exhausted and renewable resources (hydro, wind, solar, geothermal and biomass) whose potential are classified into different grades, each grade is characterized by a specific capacity factor. The secondary energy carriers include electricity, heat, hydrogen, other liquids, solid fuels, gases, transport fuel petrol, and transport fuel diesel. The energy system highlights the conversion of primary energy into secondary energy carriers via specific energy conversion technology.

The distribution of energy carriers to end-use sectors forms the interface between the macro-economic model and the energy system model. REMIND-R makes a difference between the stationary end-use sector (industry and residential buildings) and end-use in the transport sector.

- *The climate model* is represented as a set of equations that restrict welfare optimization. The climate system takes account of the impact of greenhouse gas emissions and sulphate aerosols on the level of global mean temperature (Leimbach, 2010). The REMIND-R model has two modes for climate policy analysis : 1. A *business as usual* scenario in which the global welfare function is optimized without constraints, this is a situation where the occurrence of climate change would have no effect on the economy and the decisions of households. 2. A *climate policy* scenario, in which an additional climate policy constraint is imposed on the welfare optimization (the

constraint is the limit on temperature). REMIND-R is also able to analyze the impact of carbon tax as a penalty on emissions.

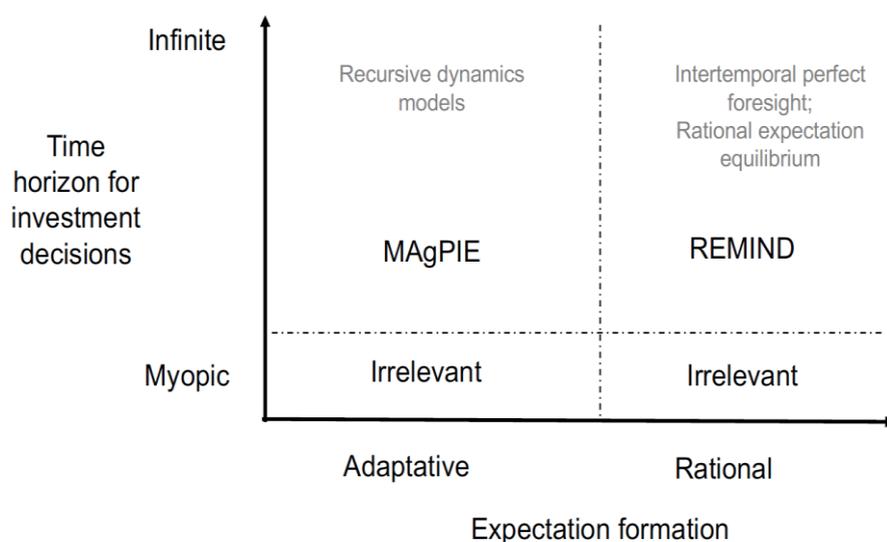
Table 1: Main characteristics of REMIND-R

<i>key distinguishing feature</i>	REMIND - R
Macro-economic core and solution concept	Intertemporal optimization: Ramsey-type growth model, Negishi approach for regional aggregation
Expectations/Foresight	Default: perfect foresight.
Substitution possibilities within the macro- economy / sectoral coverage	Nested CES function for production of generic final good from basic factors capital, labor, and different end-use energy types
Link between energy system and macro- economy	Economic activity determines demand; energy system costs (investments, fuel costs, operation and maintenance) are included in macro-economic budget constraint. Hard link, i.e. energy system and macro-economy are optimized jointly.
Production function in the energy system / substitution possibilities	Linear substitution between competing technologies for secondary energy production. Supply curves for exhaustibles (cumulative extraction cost curves) as well as renewables (grades with different capacity factors) introduce convexities.
Land use	MAC curves for deforestation
International macro- economic linkages / Trade	Single market for all commodities (fossil fuels, final good, permits)
Implementation of climate policy targets	Pareto-optimal achievement of concentration, forcing or temperature climate policy targets under full when-flexibility. Allocation rules for distribution of emission permits among regions. Other options: Emission caps & budgets, taxes equivalent.
Technological Change / Learning	Learning by doing (LbD) for wind and solar. A global learning curve is assumed. LbD spillovers are internalized. Labor productivity and energy efficiency improvements are prescribed exogenously.
Representation of end-use sectors	Three energy end-use sectors: Electricity production, stationary non- electric, transport
Cooperation vs. non- cooperation	Pareto: full cooperation
Discounting	Constant rate of pure time preference (3%)
Investment dynamics	Capital motion equations, vintages for energy supply technologies, adjustment costs for acceleration of capacity expansion in the energy system

Source : Luderer (2011, p. 3)

Recently, REMIND-R has been improved by work on the scenarios, expectations, and narratives. Problems applying optimization methods have been solved by using the partial equilibrium model (MAGPIE). The formation of expectations plays a key role : adaptative expectations (investors assume current prices to remain constant) vs rational expectations (investors know the models' outcome and form consistent expectations).

Figure 15 : the role of expectations in REMIND-MAgPIE model



Source : Bauer (2018)

The applications of REMIND-R are interesting: 1. Analysis of decarbonization pathways in an integrated framework (interrelation of climate policy, trade, renewable resources, and mitigating climate policy), 2. Regional distribution of mitigation costs (cost distribution may be broken down into differences in domestic abatement costs, effects related to shifts in trade volumes, prices of fossil energy carriers, and financial transfers in the context of the global carbon market), 3. Exploration of very low stabilization targets (including technologies and cost reduction), 4. Analysis of best vs second-best mitigation strategies (large number of mitigation options).

7. Concluding remarks and challenges

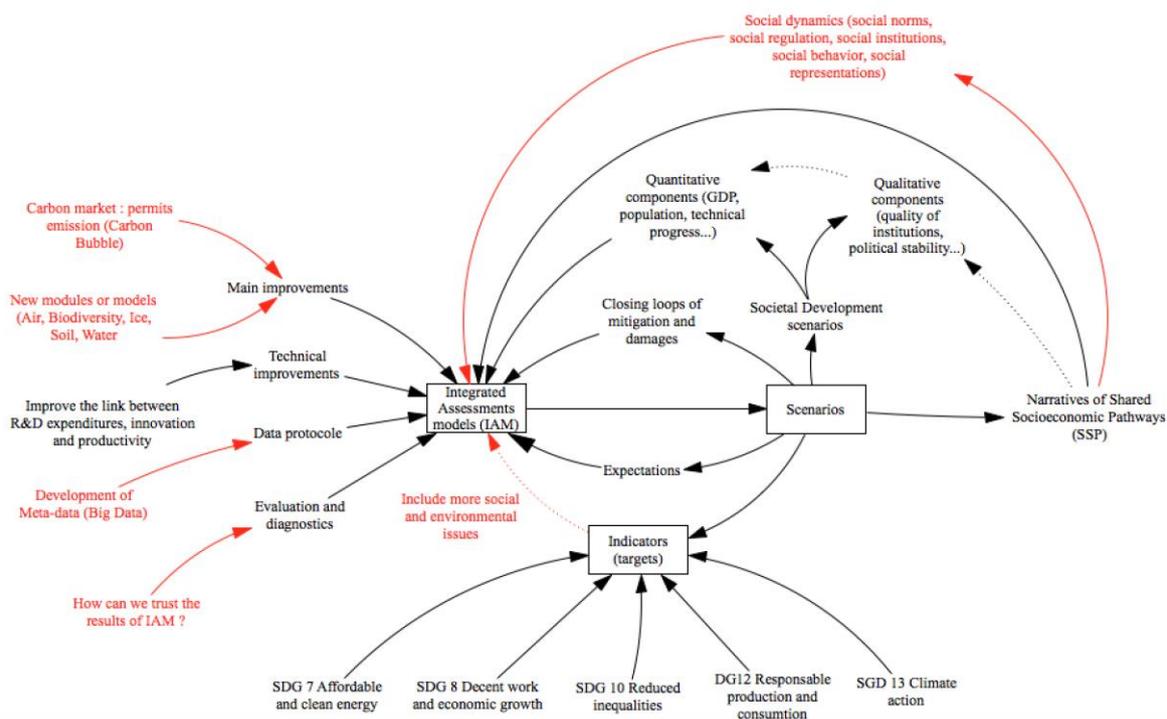
Over the past 20 years, IAMs have succeeded in bringing together a range of international institutions (IIASA, PIK, PLB, CIRED) around the issue of economics, energy, and climate change integration. These models are distinguished both by their structural forms (key variables, scale, representations, etc) and the level of complexity of the systems studied (economic system, energy system, climate system). While the nexus economy/energy/climate constitutes the main framework of the IAMs, it does not exhaust the subject nor the future developments of IAMs. The modular structure of IAMs makes it possible to integrate other nexuses (population/agriculture/food) or (biodiversity/water/air) which are equally important for the future of our societies. Table 2 presents many components (goals, macroeconomic structure, scale, type of models) of the different IAMs discussed.

Table 2 : Components of the IAMs

IAM	DICE	MESSAGE	IMAGE	GEM-3E	REMIND
<i>Macroeconomic core of the model</i>	Dynamic Optimization Model (Ramsey, 1920)	None but soft-linked to general equilibrium model MACRO	The economy is represented separately by different model components. The model is not suitable to assess detailed economic impacts, such as sector level impacts	Dynamic Optimization Model	Dynamic Optimization Model (Ramsey, 1920) Perfect foresight
<i>Goal</i>	Estimate the optimal GHG reduction trajectory	Medium- to long-term energy system planning and analysis of climate change policies	Exploring the long-term dynamics and impacts of global changes that result from interacting socio-economic and environmental factors	<i>Examine the potential for the EU to gain a first mover advantage if it adopts earlier than others ambitious GHG emissions reduction policies</i>	Analysis of decarbonization pathways in an integrated framework + regional distribution of mitigation costs
<i>Scale</i>	DICE - RICE Multiregional model	National & Multiregional models (11 regions)	Global (multi-regional)	Multiregional model (38 regions and 31 sectors)	Multiregional hybrid model (11 world regions)
<i>Type of model</i>	Optimization policy	Optimization policy	Simulation policy	Optimization Policy	Optimization Policy
<i>Representation</i>		Domestic resource utilization, energy imports and exports, trade-related monetary flows, investment requirements, types of technologies, pollutant emissions, inter-fuel substitution process	Say how and whether the transition is modelled	Economic circuit, energy technologies and GHG emissions	Trade in final goods, primary energy carriers, emissions allowance
<i>Key variables</i>	Energy, natural resources, income and population	Resource extraction, technology installation, technology activity	Exogenous scenario drivers (demography, policy and governance, technological development, culture and lifestyle, natural resource availability)	GDP, jobs, energy prices, consumer prices, sectoral production, budget deficit	Production, capital, labor and energy
<i>Externalities</i>	Carbone Cycle				
<i>Economic System</i>	Competitive Market Balance Intertemporal optimization of price and consumption	Supply cost minimization		Economic circuit (national account + IOT) Public sector, transport and international trade, financial sector	Economic system is hard linked to the energy system (economic activity results in demand for final energy)
<i>Energy System</i>	System combining market mechanisms and economic policies	Detailed description of energy supply side and technologies	TIMER energy model focusing on long-term trends in energy supply and demand	Energy efficiency and Energy technologies (coal fired... SCC, gas)	Energy system consider exhaustible primary energy resource and renewable energy potentials
<i>Climate System</i>	Climate change is captured by global average temperature	Only GHG emissions but linked to climate model MAGICC	Climate model MAGICC. Emissions beyond GHG are present	Climate by GHG emissions (energy and process related)	Carbon Cycle and temperature model
<i>Technology</i>		Technological learning endogenous	Endogenously modelled technological learning. Exogenous technological progress effects.	Modelling technical progress (R&D decision)	Technological change is exogenously driven

Today, the challenges of IAMs seem connected to the new aims of research design. The IAM framework links models, scenarios and indicators, especially Sustainable Development Goals. We can present the debate by the following diagram.

Figure 16 : Model – Scenarios and Indicators issues for IAM



IAMs have to be improved, four possible key additions to IAMs may play roles : *main improvement* (carbon market introduces financial markets in the macroeconomic structure, the equilibrium between saving and investment is not realistic), *technical improvement* (knowledge of technology diffusion, learning curve, evaluation of transport costs, and cross elasticities), *data protocol* (development of spatial data exchange, big data, time series data), and *evaluation and diagnostic* of IAM.

Indicators, like targets, can help to introduce more social and environmental issues - Stakeholders would fix the targets they want to reach; national policies could explain the gap between expectations and results.

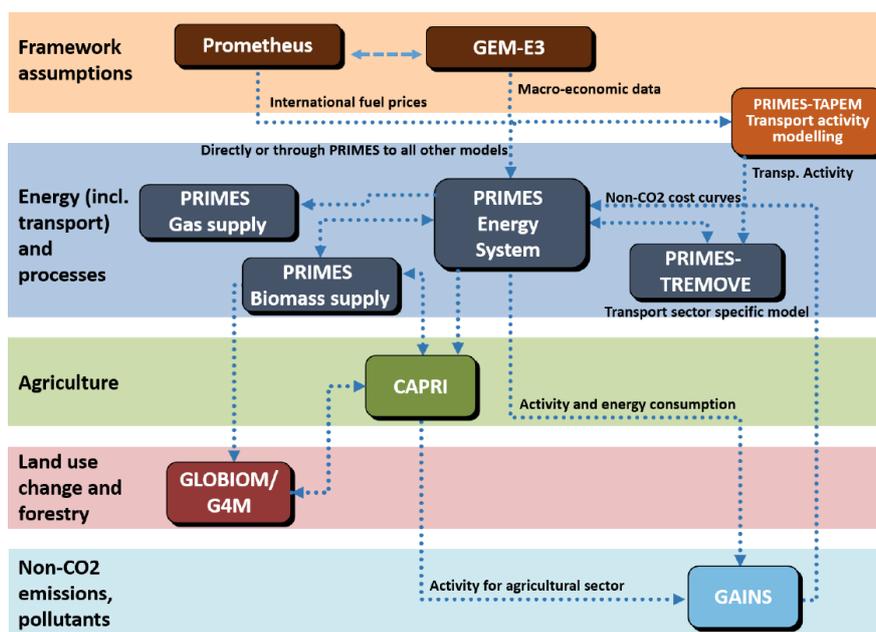
Scenarios can be deduced from the structure of IAM - different scenarios give signals about trajectories and pathways. Scenarios depend on basic assumptions (implemented in the model) but are not able to anticipate the future.

Future uncertainty may be captured by different narratives - these narratives transform qualitative data into quantitative scenarios and engage modelers to propose shared socioeconomic pathways (SSP). Social dynamics (social standards, social institutions, social regulation, social behavior, social representations) may be useful to connect to the narrative of shared socioeconomic pathways and to modify behaviors (reducing energy consumption, water consumption, waste, etc).

In 2007, the Integrated Assessment Model Consortium (IAMC) was created in response to a call from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for a research organization to lead the integrated assessment modelling community in the development of new scenarios that could be employed by climate modelers in the

development of prospective computerized model research for both the near term and long term. In the report EU reference scenario 2016 (Energy, transport and GHG emissions : trends for 2050), the European Commission used a series of interlinked models which combine technical and economic methodologies. The models were used to produce detailed projections per sector and per country. Most of them followed an approach which is based on micro-economics - they provided answers for a price-driven market equilibrium and combined engineering with economic representations for all sectors.

Figure 17: Reference Scenario for EU, trends to 2050



The PRIMES modelling suite is the core element for transport, energy, and CO2 emissions projections. The GAINS model is used for non-CO2 emissions projections. The GLOBIOMG4M models are used for LULUCF emission and removal projections. The GE3M macroeconomic model is used for value added (GDP) projections by branch of activity. The PROMOTHEUS global energy model is deployed for forecasts of world energy prices and the CAPRI model for agriculture activity forecasts.

These models were used to provide the fossil fuel price trajectories used for the EU modelling (Prometheus), to prepare consistent sectorial value added and trade projections which match given GDP and population projections by country (GEM-3E), to provide the transport activity projections (PRIMES - TAPEM), to provide the energy system projection for demand and supply side sectors included full energy balance, investment costs, prices and related CO2 emissions per country (PRIMES energy system model), to provide detailed forecasts for changes in the entire transport sector in terms of transport activity by mode and transport means (PRIMES - TREMOVE), to provide the supply and transformation projections of biomass / waste resources

(PRIMES – biomass supply), to provide forecasts for gas imports by country of origin (PRIMES - gas supply), to provide an agricultural forecast (especially for livestock and fertilizers use (CAPRI)), to provide non-CO₂ GHG and air pollutant emissions (GAINS), and to include the changes in land use and related CO₂ emissions (GLOBIOM/G4M). If these models provide background information for international climate policy negotiations, they have started more debate about the evaluation of IAMs or trust in their results, especially when they are used to explain open and complex systems.

References

- ALCAMO J. (1994), *IMAGE 2.0, Integrated Modelling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Publishers.
- ALCAMO J., SHAW R., HORDIJK L. (1990), *The RAINS Model of Acidification : Science and Strategies in Europe*, Dordrecht, Netherlands, Kluwer.
- ALLEN T.F.H, TAINTER J.A, HOEKSTRA T.W (2003), *Supply Side Sustainability*, Columbia University Press.
- AMBROSI P., COURTOIS P. (2004), « Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire », *Natures, Sciences et Sociétés*, vol 12, p. 375 – 386.
- BALA G., DUFFY P.B, TAYLOR K.E (2008), « Impact of Geoengineering Schemes on the Global Hydrological Cycle », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol 105, n°22, june, p. 7664 – 7669.
- BARKER T., SERBAN-SCRIECIU S. (2010), “Modeling Low Climate with E3MG : Towards a New Economics Approach to Simulating Energy-Environment-Economy System Dynamics”, *The Energy Journal*, vol 31, Special Issue, January, p. 137 – 164.
- BLANCHARD E.V. (2011), « L'origine des modèles intégrés du changement climatique », *Recherches internationales*, n°89, janvier-mars, p. 181-211.
- BAUER N. (2018), REMIND – MAgPIE Model, *CNRS Summer School on IAM*, Clermont-Ferrand, France, june, 59 p.
- BAUER N., BAUMSTARK L., LEIMBACH M. (2012), The Remind-R Model : The role of renewables in the low carbon transformation – first best vs second best worlds, climate change, DOI : 10.1007/s10584-011-0129-2.
- BAUER N., EDENHOFFER O., KYPREOS S. (2008), Linking Energy System and Macroeconomic Growth Models, *Journal of Computational Management Science* 5, 95-117.
- BOUTRON C.F, CANDELONE J.P, HONG S. (1993), « Le plomb dans les neiges et les glaces du Groenland », *Pollution atmosphérique*, Juillet-Septembre, p. 128-131.
- BRUCKNER T. and al. (2014), Energy Systems. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of*

the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwicker and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

DALMEDICO D.A. (2007), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.

DIEMER A., NDIAYE A., GLADKYKH G. (2017), « Le climat, du savoir scientifique aux modèles à intégration assignée », *Revue francophone du développement durable*, n°9, mars, p. 6 – 52.

DIEMER A., DIERICKX F., GLADKHYK G., MORALES M., PARRIQUE T., TORRES J. (2017), *European Union and Sustainable Development*, Editions Oeconomia.

DIEMER A. (2004), « Le développement durable et la dynamique des systèmes », *document de travail*, n°2004/05, HERMES, Université de Reims, 24 mai, 12 p.

D'ODORICA P., LAIO F., PORPORATO A., RIDOLFI L., RINALDO A., RODRIGUEZ-ITURBE I. (2010), "Ecohydrology of terrestrial Ecosystems", *BioScience*, vol 60, n°11, December, p. 898 – 907.

DOWLATABADI H., MORGAN M.G (1993), « Integrated Assessment of Climate Change », *Science*, vol 259, (5103).

EUROPEAN COMMISSION (2016), *EU Reference Scenario 2016 – Energy, transport and GhG emissions, trends to 2050*, July 15th, Luxembourg Publications Office, 220 p.

GIDDENS M. (2018), MESSAGEix, Cutting Edge Research and Challenges, CNRS Summer School, Clermont-Ferrand, France, June, 33 p.

GLADKYKH G., SPITTLER N., DIERICKX F. (2017), "Renewable Energy: Characteristics and Representation in Macroeconomic Energy-Climate Models sources for climate change models" in Diemer A. et al. (eds), *European Union and Sustainable Development*, Editions Oeconomia.

HA-DONG M., MATARASSO P. (2006), « Comment intégrer l'économie, l'énergie et le climat ? », *Pour la Science*, dossier 52, p. 92 – 97.

HOURCADE J.C, LE TREUT H. (2002), *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution*, CIRED, LMD, SMASH, Rapport de Synthèse, Juillet, 29 p.

KELLY D.L, KOLSTAD C.D (1999), « Integrated Assessment Models For Climate Change Control » in Folmer H. and Tietenberg T. (eds), *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*, Cheltenham, UK, Edward Elgar.

KIEKEN H. (2003), « Genèse et limites des modèles d'évaluation intégrée », *Annales des Ponts et Chaussées*, n°107-108, p. 84 – 91.

KNORR W ;, SCHNITZLER K.G (2006), "Enhanced albedo feedback in North Africa from possible combined vegetation and soil formation processes", *Climate Dynamics*, 26, p. 55 – 63.

IIASA MESSAGE 2017. International Institute of Applied Systems Analysis. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html> (accessed October 15, 2018).

LEIMBACH M., BAUMSTARK L., EDENHOFER O. (2010), Mitigation costs in a globalized world : climate policy analysis with Remind-R, *Environmental Modeling and Assessment*, vol 15, p. 155 - 173.

LEIMBACH M., BAUER N., BAUMSTARK L., LUKEN M., EDENHOFER O. (2010), Technological Change and International Trade, Insights from Remind, Special Issue of the Energy Journal, vol 31, p. 109 - 136.

LUDERER G., LEIMBACH M., BAUER N., KRIEGLER E. (2011), *Description of the REMIND R Model*, <http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/sustainable-solutions/remind-code-1>

MANNE A.S, MENDELSON R., ROCHELS R.G (1993), "MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GhG Reduction Policies", *Energy Policy*, vol 23, p. 17 - 34.

MANNE A.S, ROCHELS R.G (1990), "CO2 Emission Limits, An Economic Cost Analysis for the USA", *Energy Journal*, vol 12, p. 87 - 107.

MATARASSO P. (2007), « La construction historique des paradigmes de modélisation intégrés : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission » in Dalmedico A.D (ed), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.

MATARASSO P. (2003), « Evaluation intégrée et modélisation du changement climatique », *Annales des Ponts et Chaussées*, p. 71 - 79.

MEADOWS D.H, RANDERS J., MEADOWS D. (2004), *Limits to Growth, The 30-year Update*, Chelsea Green Publishing.

MEADOWS D.H, MEADOWS D.L, RANDERS J. (1992), *Beyond the Limits*, Earthscan Publications Limited.

MEADOWS D.H, MEADOWS D.L, RANDERS J., BEHRENS III W.W (1972), *The Limits to growth*, Universe Books Publishers.

MESSNER S., STRUBEGGER M. (1995), *User 's Guide for MESSAGE III*. Laxenburg, Austria.

MESSNER S., SCHRATTENHOLZER L.. MESSAGE-MACRO: Linking an energy supply.

NORDHAUS W. (2016), "Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies", *Cowles Foundation, Discussion Paper*, n°257, 44p.

NORDHAUS W., BOYER J. (1999), "Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming", Chapter 1, Yale University, October 25, 10 p.

NORDHAUS W. (1998), *Economics and Policy Issues in Climate Change*, Resources for the Future, New York.

NORDHAUS W. (1992), "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases", *Science*, vol 258, November, p. 1315 – 1319.

NORDHAUS W. (1991), "To Slow or not to slow: The Economics of the Greenhouse Effect", *Economic Journal*, vol 101, p. 920 – 937.

NORDHAUS W. (1977), "Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem", *The American Economic Review*, vol 67, n°1, p. 341 – 346.

NORDHAUS W. (1974), « Resources as a Constraint on Growth », *American Economic Review*, vol 64, n°2, May, p. 22 – 26.

NORDHAUS W. (1973), « The allocation of energy resources », *Cowles Foundation Papers*, n° 401.

NORDHAUS W. (1973), "World Dynamics, Measurement Without Data", *The Economic Journal*, vol 83, n° 332, p. 1156 – 1183.

NORDHAUS W., TOBIN J. (1972), "IS Growth Obsolete ?", in Nordhaus W., Tobin J. (eds), *Economic Research, Retrospect and Prospect*, vol 5, *Economic Growth*, NBER, p. 1 – 80.

PARSON E.A, FISHER-VANDEN K. (1997), "Integrated Assessment Models of Global Climate Change", *Annual Review of Energy and Environment*, vol 22, p. 589 – 628.

PRUYT E. (2013), *Small Dynamics Models for Big Issues*, Delft Library, The Netherlands.

RASKIN P., MONKS F., RIBEIRO T., VAN VUUREN D., ZUREK D. (2005), Global scenarios in historical perspective. In: Carpenter, S.R., et al. (Eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios: Findings of the Scenarios Working Group*. Island Press, Washington, DC, pp. 35-44.

RIAHI K., ROEHRL R.A (2000), Greenhouse gas emissions in a dynamics-as-usual scenario of economic and energy development. *Technol Forecast Soc Change*, 63, 175–205. doi:10.1016/S0040-1625(99)00111-0.

ROTHMAN D.S, AGARD J., ALCAMO J. (2007), *The Future Today*, in United Nations Environment Programme, in *Global Environment Outlook 4*. UNEP, Nairobi, pp. 397–454.

SCHNEIDER S., LANE J. (2005), "Integrated Assessment Modeling of Global Climate Change: Much Has Been Learned – Still a Long and Bumpy Road Ahead", *The Integrated Assessment Journal*, vol 5, n°1, p. 41 – 75.

SCHWANITZ V.J (2013), "Evaluating Integrated Assessment Models of Global Climate Change", *Environmental Modeling and Software*, vol 50, p. 120 – 131.

SHERWOOD S., BONY S., BOUCHER O., BRETHERTON C., FORSTER P., GREGORY J.M, STEVENS B. (2015), "Adjustments in the forcing – feedback framework for understanding climate change", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 96, n°2, February, p. 217 – 228.

STEHFEST E., VAN VUUREN D., BOUWMAN L., KRAM T. (2014). *Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications*. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL).

(http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/PBL-2014-Integrated_Assessment_of_Global_Environmental_Change_with_IMAGE_30-735.pdf)

SOKOLOV A.P and ali. (2005), *The MIT Integrated Global System Model 5IGSM), Version 2, Model Description and Baseline Evaluation*, Science Global Policy Change, Report n°124, July, 46 p.

TOL R.S.J, FANKHAUSER S. (1998), "On the Representation of Impact in Integrated Assessment Models of Climate Change", *Environmental Modeling and Assessment*, vol 3, p. 63 - 74.

VAN VUUREN D., KRAM T., STEHFEST, E. (2015). IMAGE STRATEGY DOCUMENT 2015-2020. <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-image-strategy-document-1797.pdf>

VAN VUUREN D.P, KOK M.T.J, GIROD B., LUCAS P.L, DE VRIES B. (2012), Scenarios in global environmental assessments : key characteristics and lessons for future use, *Global Environ. Change*, 22 (4), 884-895.

VIEILLE-BLANCHARD E. (2007), "Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles », in Dalmedico D.A. (ed), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.

WALSH K. (1994), « On the Influence of the Andes on the General Circulation of the Southern Hemisphere », *Journal of Climate*, vol 7, n°6, p. 1019 - 1025.

Contributions of DICE and RICE to implement Integrated Assessment Models (IAM)

Abdourakhmane NDIAYE, Arnaud DIEMER, Ganna GLADKYKH

CERDI, University of Clermont Auvergne

Chapitre 6 du livre Integrated Assessment Models and Others Climate Policy Tools : Challenges and Issues, Editor Oeconomia, June 2019

Abstract

Our paper aims to examine the history and practice of Integrated Assessment Models (IAMs) which combine energy, economy, and climate through the DICE and RICE model family. It begins by examining the emerging problem of climate change. It then provides a brief overview of the rise of IAMs which began in the 1970s. Lastly, it makes a detailed examination of an IAM model, the DICE / RICE family of models, which earned William Nordhaus the Nobel Prize in Economics in 2018.

Keywords

Climate change, DICE, integrated assessment modelling, Nordhaus, RICE

The United Nations Convention on Climate Change (UNCCC), signed by 154 countries at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) in Brazil in June 1992, had as its central objective the stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere, considered by all Parties as a dangerous anthropogenic interference with the climate system. Article 2 of the Convention stated that this level should be "*achieved within a time frame sufficient for ecosystems to adapt naturally to climate change, for food production not to be threatened and for sustainable economic development to continue in a sustainable manner*" (United Nations, 1992, article 2). However, it did not specify the operational meaning of the term "*dangerous anthropogenic interference*", nor the means of detecting the risk of such interference as it occurred, nor the measures to be applied to avoid it.

In its commitment to implement the Convention, the scientific community has proposed a synthesis of scientific, technical, economic, and socio-political knowledge in the form of Integrated Assessment Models (IAMs). Integrated assessment differs from pure research in that its purpose is to inform policy and decision-making rather than to advance scientific knowledge. However, the broader the body of knowledge

that needs to be synthesized to inform policy, the bigger are the intellectual problems that need to be addressed to provide an effective and relevant assessment.

The degree of integration of a given evaluation depends on the issue or decision to be taken. Climate change may, more than any other policy issue, require an integrated assessment. Making rational decisions on climate change requires knowledge of a large number of interrelated processes, starting with the human activities which affect greenhouse gas emissions and extends to atmospheric, marine, and biological processes. The same could be said for the climate and radiative processes which link atmospheric concentrations to global and regional climate, or the ecological, economic, and socio-political processes which link climate change to impact studies. Any progress in understanding and solving a complex problem requires the ability to interpret, integrate, reconcile, organize, and communicate knowledge in all fields, i.e. to carry out an integrated assessment.

Although there were significant examples in the past of integrated assessments of environmental problems, such as the American CIAP project (Grobeck et al, 1974), and European studies on acid rain in the RAINS model (Alcamo et al, 1990), the current number of publications on the integrated assessment of climate change is unprecedented and mobilizes research teams internationally. For the 2018 Nobel Prize winner in Economics, William Nordhaus, "*facing the challenges of global warming is a difficult task for scientists and economists, who must understand future changes, and for decision-makers, who must ultimately choose policies to balance risks and costs. Managing the Global Commons represents a unique effort to encompass the economic, scientific and political aspects of this great geophysical experiment*" (Nordhaus, 1994). In the following, we will define an integrated assessment model as a model which uses an interdisciplinary and participatory process to combine, interpret, and communicate knowledge from various scientific disciplines to enable the understanding of complex systems. This model, which generally focuses on the energy/climate/economy triptych, aims to provide the best possible response, with the current state of research, to the questions asked by policy makers on environmental issues. Our study aims to shed light on the use of these models in the context of the debates on climate change and on their ability to propose promising future scenarios for our societies. Our work will be presented in two sections. In the first section, we will clarify the state of the art of IAMs by focusing on the context and emergence of integrated assessments, and by proposing some chronological benchmarks to understand their success. In the second section, we will present a detailed analysis of the DICE/RICE family of models, widely publicized by Nordhaus following the award of his Nobel Prize.

1. Integrated Assessment Models (IAM) : State of the Art

Integrated Assessment Models (IAMs) are practical frameworks which seek to combine multidisciplinary knowledge. They have three main objectives :"(1) *the coordinated exploration of possible future trajectories of human and natural systems*; (2) *the development of knowledge on key policy formation issues*; and (3) *the prioritization of research needs to improve our ability to identify sound policy options*" (Grobecker, 1974).

The first models to integrate the available information from several disciplines in integrated assessments and produce scenarios for the future were the World 2 model (Forrester, 1972) and the World 3 model (associated with the Meadows Report). These models were based on a global architecture (World Model) and computer programming to simulate results in different contexts (Ndiaye, Diemer, Gladkykh, 2017). Generally speaking, IAMs can be divided into two main types : policy optimization and policy evaluation models. Policy optimization models seek to optimize key policy control variables such as carbon emission control rates or carbon taxes (one can seek to optimize well-being or reduce the cost associated with achieving a carbon emission reduction or concentration target). Optimization models can be divided into two sub-categories : (1) cost-benefit models ; (2) Target-based models, which optimize responses based on emission or climate objectives. Policy evaluation models project the physical, ecological, economic and social consequences of specific policies. These models are of two types : (1) deterministic projection models, in which each input and output takes on a single value ; (2) stochastic projection models, in which at least some inputs and outputs are treated in a stochastic manner. Each approach has strengths and weaknesses and produces specific information on climate change.

Researchers from the natural and social sciences are increasingly adopting a complex systems approach. Environmental problems are a perfect illustration of this. On the one hand, environmental issues are intrinsically linked to the natural sciences, and on the other hand they require effective, sustainable solutions from the social, political, and economic sciences. The most fruitful field of application of this illustration is "*the science and policy of climate change, which encompasses a wide range of sciences such as atmospheric and climate chemistry, ecology, economics, political science, game theory and international law*" (Weyant et al, 1996). As our understanding progresses in these different areas, there is an increasing need to link them, to design and implement more effective policies. In this context, integrated assessment models (IAMs) can play a key role in defining integrated approaches using knowledge from two or more domains. Thus, "*in a very short period of time, a plethora of integrated assessment models (IAMs) have been built and used to estimate the social cost of carbon (SCC) and evaluate other reduction policies*" (Pindyck, 2013). In the following, we will briefly review the chronological steps that led to the emergence of assessed integration models, and then present the advances and challenges that these models now face.

1.1 Context and emergence of integrated assessment

Integrated assessment is neither a new concept nor an activity specific to climate change, although climate change is a key use of model design. The first integrated assessment of a global environmental problem is credited to the Climate Impact Assessment Program (CIAP), conducted by the United States Department of Transportation to assess the environmental impacts of supersonic flights in the stratosphere (Grobeck et al, 1974). Six separate interdisciplinary teams examined a link in the causal chain from human activities (supersonic flight and jet engine design scenarios), to atmospheric chemistry and radiation, and to biological, economic, and social impacts. These research teams exchanged information and numerical data to produce quantitative estimates of the environmental and economic impacts of specific stratospheric scenarios.

During the 1970s and early 1980s, several other major integrated assessments were conducted using a similar structure of interdisciplinary expert groups. Among the first assessments of global climate change that helped to lay the groundwork for the current IPCC approach were the work of Clark (1982) and the National Research Council of the United States (1983). This comprehensive and interdisciplinary approach has continued in forums such as the Montreal Protocol assessment groups (United Nations, 1992) and the IPCC (2005) itself. Since CIAP³², however, no evaluation has attempted such a precise and complete integration of processes, from human activities to valued consequences, without using a formal integration model.

Formally modelled integrated assessment studies draw their inspiration, if not their methods, from the global models of the 1970s, such as Meadows et al (1972), Mesarovic and Pestel (1974) (see also Meadows et al, 1982). These highly aggregated dynamic models included generalized representations of pollution and resource depletion, but did not address a particular environmental problem. Integrated climate change assessment models emerged in the late 1970s from economic and technical models of

³² Climatic Impact Assessment Program (CIAP): probably the first major project in integrated assessment of an environmental issue was the Climatic Impact Assessment Program (CIAP), which investigated potential atmospheric impacts of the proposed American supersonic transport aircraft (SST) in the early 1970s. Though climate change was part of CIAP's mandate, most of their work focused on potential SST-caused depletion of the stratospheric ozone layer and on resultant increases in ground-level ultraviolet (UV) radiation and accompanying ecosystem damage and health risks. (For further information on the effects of ozone depletion and increased ultraviolet radiation, see the CIESIN Thematic Guide on Ozone Depletion and Global Environmental Change.) The mission statement reflected the intended broad policy-oriented perspective of the study: "in order to determine regulatory constraints on flight in the stratosphere such that no adverse environmental effects result, CIAP will assess ... the impact on man, plants, and animals of climatic changes which may occur from the operation of a worldwide stratospheric fleet as projected to 1990." The project was established by the US Congress in 1971 under the authority of the Department of Transportation (DOT), with a \$20 million budget and a three-year deadline. DOT supervised the effort and provided the project leader, but the project involved hundreds of researchers.

energy policy. Nordhaus (1979) presented the first model which combined energy conversion, emissions, and atmospheric CO concentration. Subsequent integrated climate change assessment efforts have focused on energy modelling (Hafele et al, 1981; Nordhaus and Yohe, 1983), and the integration of uncertainty about future CO concentrations (Edmonds and Reilly, 1985). During the 1980s, climate assessment studies using integrated modelling were more limited in scope than those using interdisciplinary expert panels. The modelled assessments did not go beyond atmospheric CO₂ concentrations, excluding both other gases and their impacts on climate change. The first integrated assessment model which took into account CO₂ emissions and their impacts did not deal with climate change, but with the issue of acid rain. The RAINS acidification model was developed by IIASA in the early 1980s (Alcamo, Shaw and Hordijk, 1990). RAINS integrated models of acid emissions, transport and deposition into the atmosphere. RAINS established a close relationship between the modelling team and policy makers, which made it possible to propose a more relevant model for policy makers and a more useful contribution to international negotiations. The first steps to extend integrated climate change modelling were proposed by Mintzer (1987), through the integration of other gases and global temperature change, and then by Lashof and Tirpak (1989) in their work on atmospheric stabilisation. IMAGE 1.0 (Rotmans et al, 1990) was the first model to attempt a fully integrated representation of climate from source to impact. This model was at the origin of the development of the integrated European ESCAPE model (Hulme et al, 1995). Since 1990, the number of integrated global climate change assessment modelling projects has increased rapidly. The idea that useful models could be developed to cover the whole climate problem has been increasingly accepted by the scientific community and policy makers, as advances in computing power, multidisciplinary understanding, and sectoral modelling efforts on which these integrated modelling projects are based have spread widely internationally. The first conference on the assessment of field activity (Nakicenovic et al, 1994) marked a turning point in the maturing of the integrated assessment modelling of climate change.

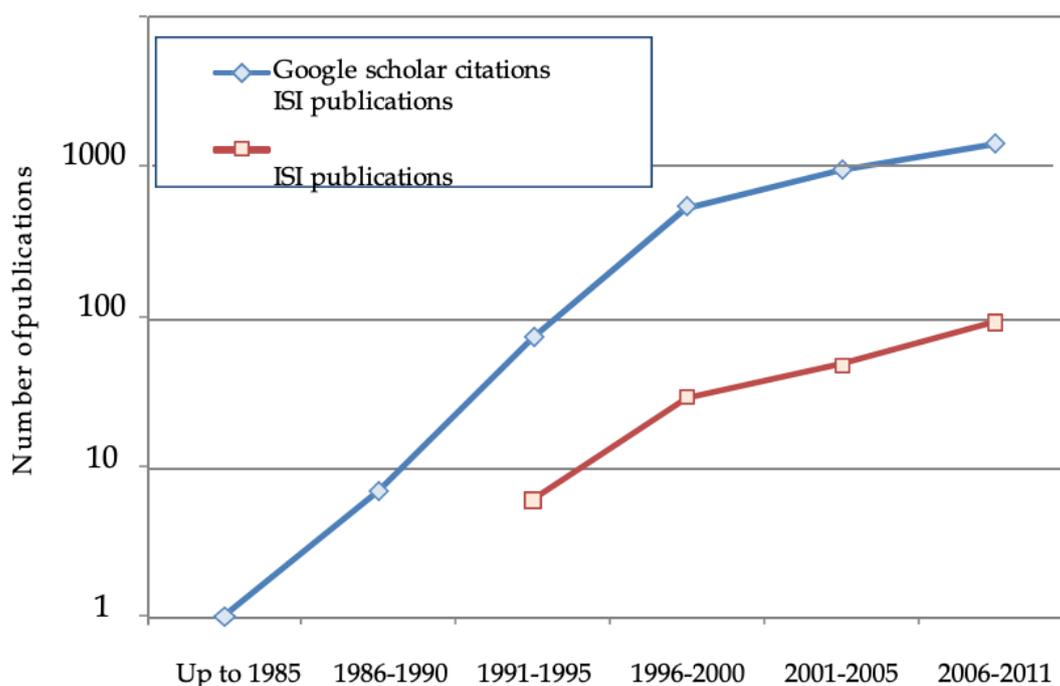
1.2 The AMI landscape, some landmarks

A Google Scholar search resulted in 3610 references to "integrated assessment models". However, the number of publications in journals is much lower, 175 between 1995 and 2011. Figure 1 shows the number of publications over time about IAM. It is clear that research is increasing considerably in this area, even if the ratio between ISI (International Scientific Indexing) publications and Google Scholar is still low. One reason is that much of the work is done in "grey literature" rather than in standard scientific journals. Although integrated assessment models have been increasingly

used over the past two decades, there are relatively few publications analysing the technical aspects of them.

On the other hand, there is a vast literature on the results as well as on the applications of the models. Weyant et al (1996) reviewed, as part of the IPCC's second assessment, a wide range of IAMs and provided a detailed overview of the state of the art. They highlighted the importance of multiple approaches in the development of IAMs, and the difficulty of encompassing all important elements in the same model. Kolstad (1998) and Kelly and Kolstad (1999) also contributed to a better understanding of IAMs. They examined 21 IAMs over the period 1992-1996, and they highlighted the important distinction between optimization models and policy evaluation models. This distinction remains one of the central dividing lines between the different models, although Kolstad (1998) seems to temper the results somewhat : "Almost all the results come from optimization models, the top-down economy / climate models. Virtually no new basic understanding seems to have emerged from policy evaluation models...". He concluded as follows : the integrated assessment community did an excellent job of analyzing and comparing the many IAMs. However, despite the efforts of researchers and the significant amount of money spent on research by governments, the message has not gone beyond the integrated assessment community. The European Union must therefore do more to bring the results to the forefront of the climate change debate. This finding appears to have changed somewhat in recent years, as governments have increasingly used MRIs in their public policy analyses, making the use of integrated modelling increasingly necessary.

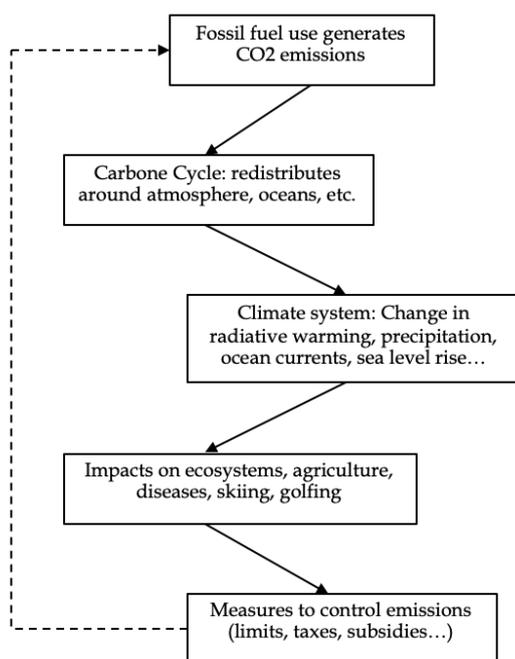
Figure 1 : Number of publications about IAMs



Source : Nordhaus (2011)

The task of integrated modelling is to bring together the different aspects of a problem (geophysical, economic, political dimensions, etc) so that an analysis or a decision can take into account all the important endogenous variables that operate simultaneously. Figure 2 shows schematically the important modules in the case of climate change. A comprehensive analysis must take into account emissions, concentrations, climate change, and impacts. The last arrow in the process links impacts and policies to emissions, closing the loop.

Figure 2: Schematic diagram of a comprehensive integrated assessment model for climate change science, economics, and policy



Source : Nordhaus (2017)

It is in this context of the diffusion of IAMs on the international scene that we feel it is important to review William Nordhaus' contributions, particularly through the DICE and RICE family of models.

2. Contributions of the DICE and RICE models to the understanding of economic, energy, and climate interactions

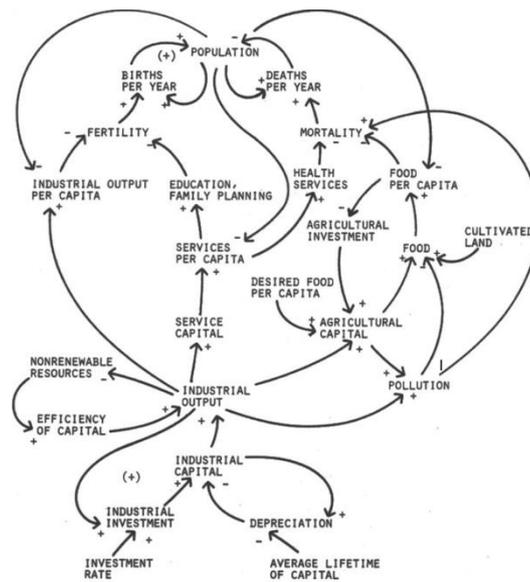
In this section, we will present both the structure and evolution of the DICE and RICE integrated assessment models. The DICE (Dynamic Integrated Climate and

Economic Model) and RICE (Regional Integrated Climate and Economic Model) models have undergone several revisions since their origin in 1992. The latest versions are the DICE-2016R models. We will first set the historical context for the emergence of the DICE model, then proceed to a detailed description of the model, and lastly we will discuss the RICE model. We will mainly refer to the work of Nordhaus (1974, 1977, 1994, 1994, 2007, 2010, 2017) and Nordhaus and Boyer (2000).

2.1 From energy resource management to taking into account the concentration of CO₂ in the atmosphere

It is difficult to understand the emergence of the DICE model without addressing the debates about CO₂ concentration in the atmosphere (symbolizing high pollution) during the 1970s, in particular the publication of the *Limits to Growth* report (1972) commissioned by the Club of Rome. What is now known as the World 3 model (World 2 having been proposed by J.J. Forrester in his book *World Dynamics*) sought, using the system dynamics method, to analyse the interdependencies and interactions between five "critical" variables : population, food production, industrialization, natural resource depletion, and pollution (Diemer, Figuière and Pradel, 2013). These five variables were assumed to have the particularity of changing according to an exponential geometric progression. System dynamics thus "*highlighted the many relationships between elements, forming loops with coupling, and for some with time-shifted effects*" (Meadows et al, 1972, p. 153). A positive loop amplifies the system (Reinforcing Loop) and appears each time a quantity varying exponentially is encountered. In a positive loop, any sequence of cause-and-effect relationships inevitably leads to an action starting, any increase in any of the elements of the loop will initiate a logical sequence of changes whose final result will be an even greater increase in the starting element. In a negative loop, any sequence will maintain at a constant level a function that tends to increase or decrease. It therefore acts in the opposite direction to the variation of the function. The negative loop (Balancing Loop) has a regulating role. The five variables mentioned above are linked to each other by a network of relationships and loops.

Figure 3 : Diagram of loops in World 3

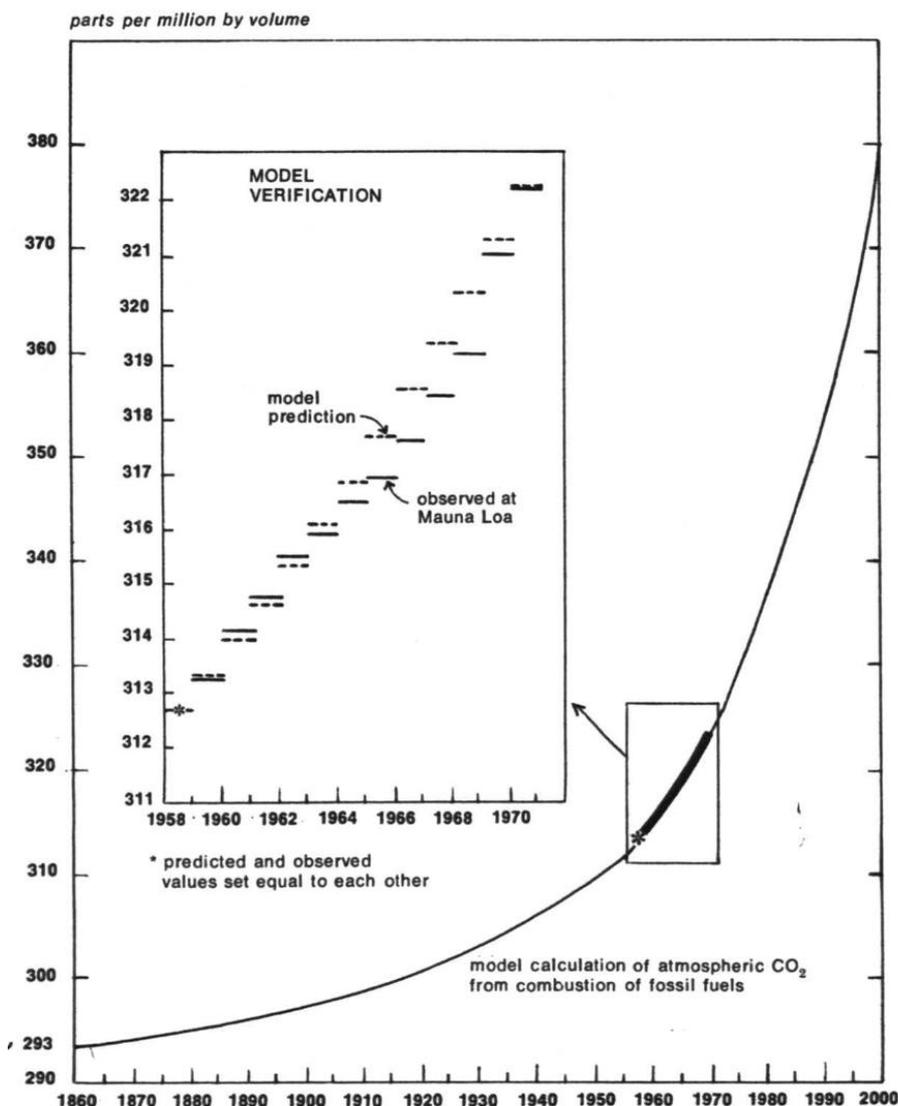


Source : Meadows et al. (1972)

The increase in population generates a need for food (positive loop), which itself requires investment and production, production will use natural resources, generate waste and pollution, pollution can cause an increase in mortality and therefore a decrease in population (negative loop).

It should be noted that in the 1972 *Limits to Growth* report, the climate system is not part of the model (Diemer, 2004, 2015). The pollution variable is captured by the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Meadows et al (1972, p. 71) introduce a positive loop : the more industrial production increases, the more fossil fuel (coal, oil and natural gas) is used ; this releases CO₂ into the atmosphere and causes an increase in mortality.

Figure 4 : CO₂ concentration in the atmosphere



Source : Meadows et al. (1972, p. 72)

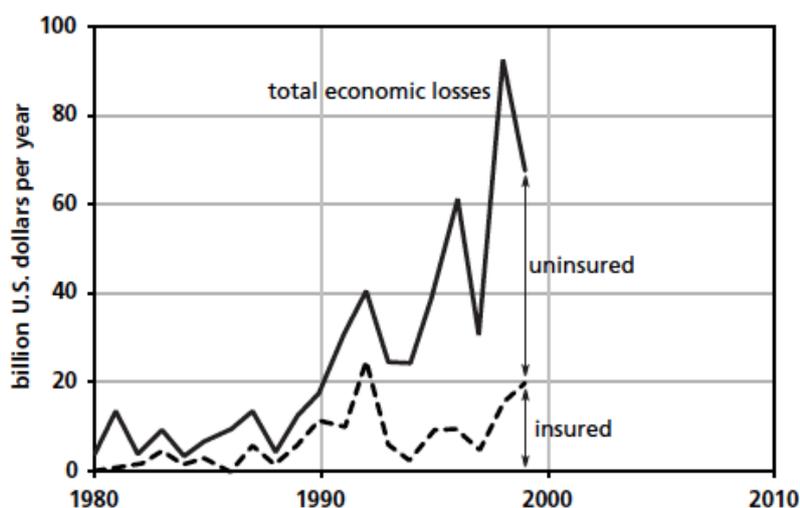
It would be necessary to wait for the publication of *Beyond The Limits* (1992) for climate to be explicitly integrated into system dynamics, but it is only mentioned in Chapter 3 (*The Limits : Sources and Sinks*) on pollution and waste. While global climate change is clearly presented as the new challenge for the coming years (scientific evidence of global warming is accumulating), its analysis continues to feed into the growth debates : "Many scientists believe that the next global limit humanity will have to deal with is the one called the greenhouse effect, or the heat trap, or global climate change" (1992, p. 92). Global climate change cannot be detected in the short term, but over decades.

To these long-term observations, three types of uncertainties must be added : 1. What would be the global temperatures without human intervention ? A reduction in growth may not be sufficient to reduce CO₂ concentrations if they increase naturally in the long term, 2. What are the consequences of global warming on precipitation,

winds, ecosystems, and human activities at particular locations on Earth ? 3. How to understand all the loops associated with carbon and energy flows. The modelling of such a system is complex and control loops can be used to stabilize CO₂ emissions (the oceans can absorb some of them).

The publication of *Limits to growth, the 30 years update* (2004), deserves some attention, as the climate generates many loops in the World 3 model. The report does not hesitate to target economists, the main climate sceptics, and to highlight the consequences of climate change on economic activities, and therefore on economic growth : « *More scientists, and now many economists as well, believe the next global limit humanity will have to deal with the greenhouse effect, or global climate change... Even some economists – a group well known for its skepticism about environmentalist alarmism – are becoming convinced that something unusual and significant is going on in the atmosphere, and that it may have human causes*” (2004, p. 113-115).

Figure 5: Worldwide Economic Losses from Weather Related Disasters



Source: Meadows et al (2004, p. 117)

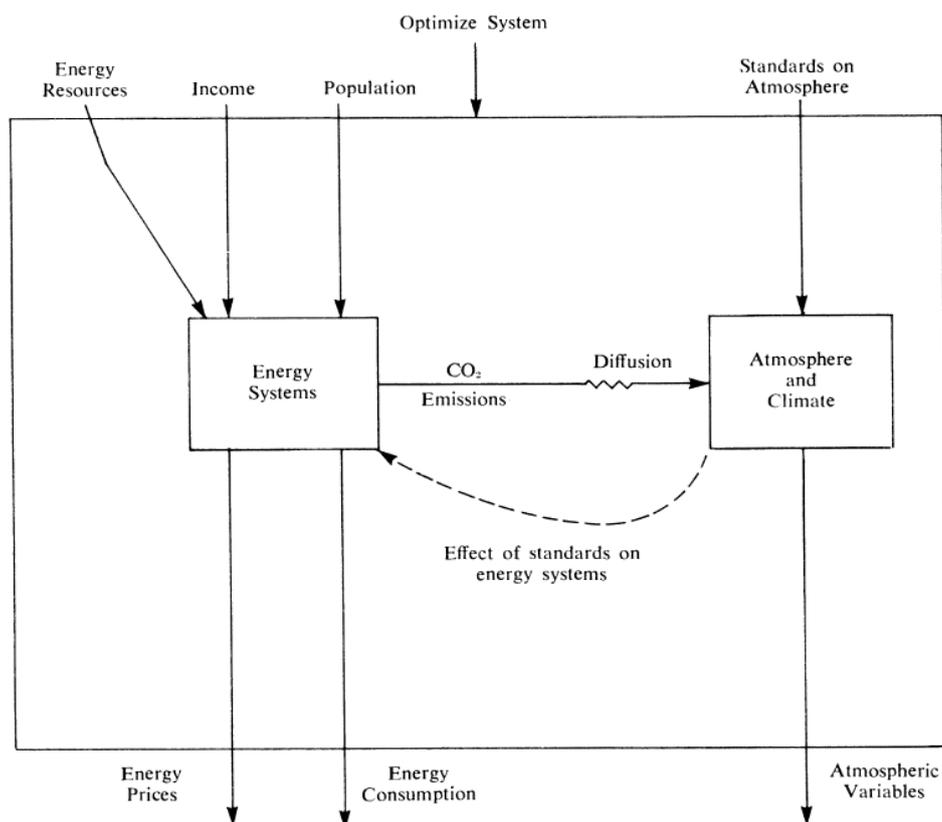
Climate change is causing economic losses that call into question the viability of insurance systems (the 1990s and 2000s marked a break in the trend, with the share of damage not giving rise to any big rise in reimbursement). Scenario 2 (Global Pollution Crisis) introduces the damaging effects of pollution and climate change. The positive loop is as follows : an increase in pollution reduces land fertility, which in turn reduces agricultural production, investments move to the agricultural sector to maintain food production and decrease in other sectors, pollution leads to lower life expectancy and increased mortality. This loop is reinforced by three effects : land contamination by heavy metals and chemicals, climate change that randomly and repeatedly alters agricultural production, and ultraviolet radiation related to ozone depletion.

It goes without saying that this work has been widely criticized by economists (Matarasso, 2007, Diemer, 2015), William Nordhaus (1972, 1973) was the main architect of this critique. In an article co-written with James Tobin entitled "Is Growth Obsolete ?" Nordhaus intended to respond to the *Limits to Growth* report ("We mention this point now because we shall return later to the ironical fact that the antigrowth men of the 1970s believe that it is they who represent the claims of a fragile future against a voracious present", 1972, p. 4) by mobilizing theory around three questions : 1. The measurement of economic growth, 2. The link between growth and natural resources, 3. the link between population growth rates and economic well-being. A year later, Nordhaus (1973) repeated his critique, targeting Forrester's *World Dynamics*. The title "World Dynamics Measurement without data" and the content of the article are unequivocal : "What is the overall impression after a careful reading of *World Dynamics* ? First, the dynamic theory put forward in the work represents no advance over earlier work... Second, the economic theory put forth in *World Dynamics* is a major retrogression from current research in economic growth theory... Third, Forrester has made no effort in *World Dynamics* to identify any relationship between his model and the real world... Fourth, the methodology of modelling in *World Dynamics* differs significantly from other studies of economic systems...Fifth, the predictions of the world's future are highly sensitive to the specification of the model... Sixth, there is a lack of humility toward predicting the future" (1973, p. 1183).

It is in this context that Nordhaus undertook his research "Resources as a constraint to growth" (1974), into the management of energy resources taking into account the impact of CO₂ concentration in the atmosphere. He concludes that assuming that "10 percent of the atmospheric CO₂ is absorbed annually (G. Skirrow), the concentration would be expected to rise from 340 ppm in 1970 to 487 ppm in 2030 - a 43 percent increase" (1974, p. 26). His paper was a first attempt at integrated climate modelling. It is certainly rudimentary (only the CO₂ variable is taken into account), but it does reflect the debates of the 1970s. Against the backdrop of the energy crisis, Nordhaus intended to develop a global energy model that could be coupled with a climate model. Nordhaus presented this theoretical framework in two articles, one presented to the Cowles Commission (*Strategies for the Control of Carbon Dioxide*, 1976), the other published in *The American Economic Review* (*Economic Growth and Climate : The Carbon Dioxide Problem*, 1977).

Figure 6 provides an overview of the model used by Nordhaus (1977) to study carbon dioxide emission control strategies. The "energy system" block is a system combining market mechanisms and economic policies.

Figure 6 : Optimization Model of Energy System and Environment



Source: Nordhaus (1977, p. 343)

The key variables are energy, natural resources, income, and population. The interaction of supply and demand leads to a trajectory of optimization of prices and consumption over time. To take into account externalities, such as the carbon cycle, Nordhaus proposes to take into account CO₂ emissions and distribution. This step leads to the imposition of standards on atmospheric concentrations (right side of the figure). By imposing such standards, it becomes possible to close the loop and force the energy system to act on the structure of supply and demand. Nordhaus was examining two strategies to keep atmospheric CO₂ concentrations at a reasonable level. The first strategy was to reduce carbon dioxide emissions. This means replacing high CO₂ fuels with low CO₂ fuels. The second strategy is to offset the effects of carbon dioxide emissions, or use new industrial processes (environmental technologies), to "suck" carbon dioxide into the atmosphere. In order to avoid "the odour of science fiction" (1977, p. 343), Nordhaus favoured the first strategy by seeking to optimize the system based on standards.

It was not until the 1990s that the DICE (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy) and RICE (Regional Integrated Model of Climate and the Economy) family of models originated (Nordhaus, 1992, 1994).

2.2 The structure of the DICE-RICE models

The DICE model, developed from 1989 and published by Nordhaus (1992, 1994), is one of the first IAMs on climate change. Since the first version, the DICE model has been the subject of numerous iterations, updating the theoretical arguments as well as the economic and environmental data. There was an intermediate version (Nordhaus, 2008), then the latest version which is DICE-2016R (Nordhaus 2017, 2017a), with a full description (Nordhaus and Sztorc, 2013).

The DICE model is a dynamic optimization model (Ramsey, 1928) which seeks to estimate the optimal Greenhouse Gas (GHG) reduction trajectory (Diemer, 2004, 2015). The optimal trajectory can be interpreted as the most effective way to slow climate change, taking into account inputs and technologies (Veille-Blanchard, 2007). It can also be interpreted as a competitive market balance in which externalities are adjusted using appropriate social prices for GHGs. In the DICE model, emissions include all GHGs, however, those associated with CO₂ are preferred. GHG emissions, which accumulate in the atmosphere, can be controlled by increasing the prices of inputs (such as energy) or GHG-intensive products. Climate change is captured by the average global temperature, a variable used in most current climate models. The economic impacts of climate change are assumed to increase as the temperature increases.

In practice, the approach of an optimization model is to maximize an objective function, which refers to the economic well-being (or utility) associated with a consumption path. In the DICE model (and the RICE model), it is assumed that the different regions of the world have well-defined preferences, represented by a social utility function, that classifies different consumption paths. The social welfare function increases the (?) per capita consumption of each generation, with a decreasing marginal utility of consumption. The amount of per capita consumption of a generation depends on the size of the population. The relative importance of different generations is influenced by two standard parameters : the pure rate of social preference over time ("generational discounting") and the elasticity of the marginal utility of consumption ("elasticity of consumption"). These two parameters interact to determine the discount rate of goods, which is essential for economic choices over time. The DICE model assumes that economic and climate policies must be designed to optimize the flow of consumption over time. It is important to stress that consumption should be interpreted as "generalized consumption", which includes not only traditional market goods and services such as food and housing, but also non-market products such as leisure, health, and environment.

The mathematical representation of this assumption is that policies are chosen to maximize a social welfare function, W , i.e. the discounted sum of the utility of per capita consumption weighted by population, where c is consumption per capita, L is

population and $R(t)$ is the discount factor. Equation (1) is the mathematical statement of the objective function. This representation is classic in modern theories of optimal economic growth (Ramsey 1928, Koopmans 1965, Cass 1965).

$$(1) W = \sum_{t=1}^{Tmax} U[c(t), L(t)]R(t)$$

In the DICE and RICE models, utility is represented by a constant function.

$$(2) U[c(t), L(t)]R(t) = L(t)[c(t)^{1-\alpha}/(1-\alpha)]$$

This equation reflects on the one hand a constant elasticity of the marginal utility of consumption, elasticity is a parameter which represents the extent of the substitutability of consumption of different years or generations. If it is close to zero, then the consumptions of different generations are close substitutes ; if it is high, the consumptions are not close substitutes. On the other hand, it reflects a specification that assumes that the value of consumption over a given period is proportional to the population. The economic welfare of future generations can be represented by :

$$(3) R(t) = (1 + p)^{-t}$$

$R(t)$ is the discount factor, while the pure social time preference rate, ρ , is the discount rate that provides welfare weights on the utilities of different generations.

Economic growth is understood in terms of economic sectors. However, unlike standard analysis, which requires little time to adjust between economic variables, climate change modelling requires very long lead times (a century or more). From a theoretical point of view, this implies taking into account capital accumulation (neoclassical analysis) and geophysical constraints. In the first case, the Cobb Douglas production functions serve as regional and global production functions, with constant returns in changes in capital, labour and technology.

$$(4) Q(t) = [1 - A(t)]A(t)K(t)^y L(t)^{1-y}/[1 + \Omega(t)]$$

In the second case, the challenge is to simplify intrinsically complex dynamics into a small number of equations that can be used in an integrated economic and geophysical model. The main feature of the DICE model (RICE) is the inclusion of several geophysical relationships that link the economy to the different forces affecting climate change (5), (6), (7) and (8).

$$(5) E(t) = E_{Ind}(t) + E_{Land}(t)$$

$$(6) M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11M_{AT}}(t-1) + \phi_{11M_{UP}}(t-1)$$

$$(7) MM_{UP}(t) = \phi_{12} M_{AT}(t-1) + \phi_{12} M_{UP}(t-1) + \phi_{32} M_{10}(t-1)$$

$$(8) M_{10}(t) = \phi_{23} M_{UP}(t-1) + \phi_{53} M_{10}(t-1)$$

In the DICE model (RICE), CO2 emissions are projected according to total production, a time-varying emission efficiency rate and an emission control rate. The emission/production ratio is estimated for each region (RICE) and then aggregated to the overall ratio (DICE). It should be noted that in the first versions, DICE and RICE used the emission control rate as a control variable in the optimization based on linear program algorithms. Today the emission control rate is determined by climate change policy combined with a carbon tax as a control variable. This is why in the DICE/RICE-2010 models, industrial CO2 is the only greenhouse gas controlled, reflecting the fact that CO2 is the main contributor to global warming. Equation (5) then generates the total CO2 emissions as a sum of industrial and land-use emissions.

Equations (5), (6), (7) and (8) assume that there are three carbon reservoirs. The variables (t) represent atmospheric carbon, biospheric carbon, and oceanic carbon respectively.

The next equation (9) concerns the relationship between GHG accumulation and climate change. The climate equations are a simplified representation that includes one equation for radiative forcing and two equations for the climate system. The radiative forcing equation is used to calculate the impact of GHG accumulation on the global radiative balance, while the climate equations calculate the average global surface temperature and the average temperature of the deep oceans in real time. These equations were derived from large-scale atmospheric general circulation models and served as the basis for the IPCC reports (4th and 5th reports).

$$(9) F(t) = \log \log 2 [M_{AT}(t)/M_{AT}(1750)] + F_{EX}(t)$$

Although the RICE model (Regional Integrated Climate and Economic Model) is the regionalized version of the DICE model, we can see a difference in preference specialization. Indeed, in RICE, it includes several agents (regions). The general preference function is a Bergson-Samuelson-type social welfare function.

$$(10) W = W(U^1, \dots, U^N), \text{ with } U^1 \text{ a preference function of a region.}$$

In this model, Negishi's (1961, 1962) approach is preferred and regions are aggregated using time and specific weights for regions with budgetary constraints. This allows the RICE-2010 model to divide the world into 12 regions : United States, European Union, Japan, Russia, Eurasia (Eastern Europe and several former Soviet republics), China, India, Middle East, Sub-Saharan Africa, Latin America, Other high-income countries, and Other developing countries. Each region is expected to produce a single product that can be used for consumption, investment or emission reduction. Each region also

has an initial stock of capital and labour and an initial and region-specific level of technology.

The structure of population, technology, and production is the same as in the DICE model. It should also be noted that the geophysical sectors of the RICE model are basically the same as the DICE model. The only difference in this area is that there are CO₂ emissions related to land use by region, but they are exogenous and have little effect on the results. The objective function used in the RICE model differs from that of the DICE model : each region is assumed to have a social welfare function, each region optimizes its consumption, its policies to reduce greenhouse gas emissions, and its investments over time.

2.3 The 2015 results and projections for 2100

The results presented in this paper cover the period 2015. These are historical data from the latest version, but projections in the oldest version. In the 1992 version, Nordhaus used data from the mid-1980s. The forecasts for 2015 can therefore be considered as forecasts for the next 30 years. Table 1 presents the projections and actual values for 2015. The first column presents the estimates for 2015 in the 1992 model, while the second column presents the estimates for 2015 from the 2017 model, which are actual data. In many areas, the errors are large and the third column shows the changes from 1992 to 2017, which corresponds to the forecast error in the 1992 model.

In this new version, production and population are greatly underestimated. Emissions and other forcings are overestimated because the decarbonization rate was underestimated. Concentrations are correctly captured, while temperature, as with most models of the Earth system, is overestimated. The social cost of carbon (SCC) remains the biggest error because it was greatly under forecasted due to a combination of different factors. It is interesting to note that SCC was not calculated in the first version of the model. It was introduced for the first time in the 2008 version. Therefore, SCC estimates for previous versions are retrospective estimates. Table 1 also provides us with a guide to errors that occur in IAMs (DICE/RICE model family). When the models are in a long-term time frame (long-term forecasts), it is possible to visualize and track errors.

Table 1: Main variables estimated for 2015

	DICE 1992	DICE-2016R	Change 1992
	2015	2015	to 2016
Major driving variables			%
Economic			
Population (billions)	6,868	7,403	8%
Per capita GDP (2010\$)	11,293	14,183	26%

Consumption per capita (2020\$)	9,195	10,501	14%
Geophysical			
Other Forcings (W/m2)	0.89	0.50	-44%
CO2/output ratio (tCO2/000 2010\$)	0.607	0.350	-42%
Outcome variables			
Industrial Emissions (GtCO2 per year)	42.3	35.7	-15%
Output (trillions 2010\$)	77.6	105.0	35%
Atmospheric concentration C (ppm)	399	400	0%
Atmospheric concentrations (GtC)	849	851	0%
Atmospheric Temperature (°C)	1.16	0.85	-27%
Total forcings (W/m2)	3.04	2.46	-19%
Social cost of carbon (\$/tCO2 2010\$)	4.54	30.98	582%

Source : Nordhaus (2017)

Table 2 presents the estimated total revisions between 1992 and 2017 for the main variables. The last two columns represent the estimated uncertainties (measured by standard deviations) from two uncertainty studies (Nordhaus, 2008, 2017a). The first estimate used the 2008 DICE model and estimated the uncertainty of several variables. These are indicated in the uncertainty column labelled "2008". The second study calculated the standard deviation of the variables using the DICE-2016R model and is labelled "2017". The revision pattern for 2100 presented in Table 2 is similar to the error pattern in Table 1 for 2015. The massive upward revision of world GDP is the most striking revision of the key variables in these revisions. Another key feature of this revision is the transition from "market exchange rates" (common until about 2000) to "purchasing power parity exchange rates" (Nordhaus, 2017). Finally, it should be noted that the first versions of the DICE model, as well as other energy saving models, were based on highly biased stagnant estimates, with a sharp decline in productivity growth after 2025 (see Nordhaus and Yohe, 1983). The factors causing emissions and forcings, on the other hand, have been significantly revised downwards. Looking at the group of variables at the bottom of Table 2, we see an interesting trend. Emissions, concentrations, and forcings are generally underestimated, but by a relatively small amount. While economic variables such as production, damage, and SCC are massively underestimated. One of the most striking results of the current retrospective analysis is that economic variables are the main sources of uncertainty.

Table 2 : Main variables estimated for 2100

	DICE 1992	DICE-2016R	Change 1992 to 2016	Estimated error	
	2100	2100	[%]	2008	2017
Major driving variables					
Economic	3.4%	3.5%	2.8%	na	0.9%

Interest Rate (% per year)	9,812	11,126	13%	na	2,421
Population (billions)	0.17	0.24	43%	na	Na
Savings rate	22,272	73,367	229%	na	49,165
Per capita GDP (2010\$)	1.3%	2.1%	62%	na	1.1%
Damage parameter (% at 3 °C)	18,536	55,825	201%	na	Na
Consumption per capita (2020\$)	1.42	1.00	-30%	na	na
Geophysical	0.113	0.094	-16%	na	0.03
Other Forcings (W/m2)					
CO2/output ratio (tCO2/000 2010\$)	78.7	70.8	-10%	50.40	52.60
Outcome variables	218.5	816.3	274%	206.0	581.0
Industrial Emissions (GtCO2 per year)	670	854	27%	162	234
Output (trillions 2010\$)	1,428	1,820	27%	334	498
Atmospheric concentration C(ppm)	3.20	4.29	34%	1.00	0.89
Atmospheric concentrations (GtC)	1.5%	4.3%	191%	na	0.028
Atmospheric concentrations (GtC)	6.65	7.00	5%	na	Na
Climate Temperature (°C)	11.79	265.73	2154%	na	Na
Damages (% output)					
Total forcings (W/m2)					
Social cost of carbon (\$/tCO2 2010\$)					

Source: Nordhaus (2017)

As a final comparison, Table 3 below presents the DICE 1992 and 2016R models and compares them with IPCC reports from approximately the same dates (IPCC 1990, 2014).

Table 3: Comparative projections of DICE and IPCC, early 1990s and mid-2010

	1980	2000	2015	2050	2100
CO2 emissions (GtCO2)					
IPCC 1990	22.0	26.0	36.7	55.0	89.8
DICE1992	24.6	36.9	46.7	67.6	89.1
DICE2016			35.8	58.2	70.9
IPCC 8.5				64.2	95.3
CO2 Concentrations (ppm)					
IPCC 1990	340	375	412	535	825
DICE1992	334	368	404	513	700
DICE2016			399	552	826
IPCC 8.5			400	530	940
Total radiative forcing (W/m2) (a)					
IPCC 1990	2.00	3.10	4.20	6.60	9.90
DICE1992	1.66	2.49	3.12	4.78	6.86
DICE2016			2.46	4.39	6.82
IPCC 8.5 (d)	1.50	1.30	2.50	4.80	8.00
Global temperature (°C)					
IPCC 1990(b)	0.20	0.40	0.80	1.90	3.45
DICE1992 (c)	0.19	0.56	0.87	1.72	2.77
DICE2016	0.21	0.38	0.85	2.13	4.10
IPCC 8.5 (e)			0.85	2.05	4.55

(a) Radiative forcing in principle since 1750 or 1850 but unclear for different sources

- (b) Subtracts 0.3 °C to correct for initial condition of 1965 = 0.2 °C.
- (c) Adds 0.2 °C to correct for initial conditions of 0 °C at 1990.
- (d) Adds 0.5 to normalize.
- (e) Adds 0.35 to make comparable to other estimates.

Source : Nordhaus (2017)

The first IPCC report included a "status quo" scenario comparable to the baseline scenario of the DICE model. The fifth report abandoned this approach by adopting representative concentration trajectories, for which CPR 8.5 is the closest to the usual scenario. In the approaches of the IPCC and DICE models, we can also note the upward revision of the temperature to 2100.

Forecast error estimates are tools to understand potential forecast errors in model revision. For the 2008 model and the 2016R model, Nordhaus used systematic studies of forecast errors from Monte-Carlo techniques. Monte Carlo techniques are more complete, however they have the disadvantage of being retrospective error estimates.

Table 4 below shows the "error forecast ratio", which is the ratio of the change in forecasts between 1992 and 2017 to the estimated forecast uncertainty (measured as a standard deviation).

Conceptually, they are similar to t ratios although they do not have a formal probabilistic structure. To designate them, Nordhaus proposes $\xi(m, n)$ as an observation or projection of the variable ξ for a future period m estimated at date n . Using this notation, Nordhaus deduces that the ultimate prediction error in 2100 compared to the 1992 model is $\xi(2100, 2100) - \xi(2100, 1992) = [\xi(2100, 2100) - \xi(2100, 2017)] + [\xi(2100, 2017) - \xi(2100, 1992)]$.

Table 4: Error forecast ratio

Variables	Ratio: (difference 2016-1992)/ estimated error
Major driving variables	
Economic	
Interest Rate (% per year)	0.11
Population (billions) Savings rate	0.54
Per capita GDP (2010\$) Damage parameter (% at 3 °C)	1.04
Consumption per capita (2020\$)	0.77
Geophysical	
Other Forcings (W/m2)	
CO2/output ratio (tCO2/000 2010\$)	-0.70
Outcome variables	

2100	Industrial Emissions (GtCO ₂ per year)	-0.15
	Output (trillions 2010\$)	1.03
	Atmospheric concentration C (ppm)	0.79
	Atmospheric concentrations (GtC)	0.79
	Atmospheric Temperature (°C)	1.22
	Climate Damages (% output)	1.02
	Total forcings (W/m ²)	
2015	Social cost of carbon, 2015 (\$/tCO ₂ 2010\$)	0.93

Source: Nordhaus (2017)

In these models, the biggest error rates are approx. 1, for temperature, per capita production, production, damages, time loss, and SCC. These estimates indicate that, while the projection errors to date which in some cases are very large (e. g. for SCC), the structural estimates of the underlying processes indicate that the uncertainties for variables such as SCC are inherently extremely high. Nordhaus draws our attention to the fact that the SCC production or estimates are substantially revised or that other major revisions must be considered.

A final question is the source of the changes for the forecasts for different variables with respect to revisions to the model structure and economic and environmental data. The approach used by Nordhaus is simple in principle but complicated in practice. This involves always starting with the oldest version, the 1992 version, then introducing step-by-step changes for both model and data differences between the 1992 and 2017 models, and finally evaluating the impact on different variables at each step. The step determines the size and sources of revisions for the important variables. However, Nordhaus acknowledges the ambiguity in this approach, as there are interdependencies between revisions. That is why most changes are made step-by-step. Table 5 shows us the adjustments made step-by-step. This list lists the "versions" of the model used to switch from DICE 1992 to DICE-2016R. It omits versions that were trivial and allows for checking the accuracy of the adjustments.

Table 5 : Main steps in the transition from 1992 to 2017 to the DICE model to test the impact of revisions

v1: Takes the 1992 version to recreate the 1992 results (1989 \$).
 v5: Adjusts for inflation with price increase of factor of 2 for all economic variables (1989\$ to 2010\$).
 v6: Adds the calculation of the real interest rate from 2016R calculation.
 v7: Updates GDP and capital to match 2015 levels.
 v9: Adjusts emissions and concentrations to match 2015 levels and match through 2100.
 v10: Updates damage function parameter to 2016R model.
 v11: Increases TFP growth to 2016R model.
 v12: Adjusts sigma growth and other TFP parameters to 2016R model.
 v13: Adjusts utility function.
 v14: Adjusts climate model to 2016R model.

v18: Final adjustment of carbon cycle to match 2016R.
 V20: Final adjust of climate model and other forcings; match equilibrium and transient temperature sensitivity from 2016R model.
 v21: Adjusts for abatement in 2016R model.
 v22: Is the current model (DICE-2016R).

Source : Nordhaus (2017)

It is important to emphasize that the sequence is a logical progression and not a set of timed steps. Some of the first steps (such as the change to 2010 dollars) take place at the end, while several changes have been made to carbon cycle modelling in recent years. Table 6 presents the breakdown of the social cost of carbon for 2015, and Table 7 presents the breakdown for the increase in temperature by 2100.

Table 6 : Decomposition of the evolution of the social cost of carbon, 2015

Change in Social Cost of Carbon (SCC), 2015			
From	To	Changed variable	Change due to These variables
v14	v18	Carbon cycle	66%
v9	v10	Damage Function	59%
v12	v13	Utility Function	47%
v6	v7	Initial Output	36%
v10	v11	Productivity growth	15%
v21	v22	DICE-2016R	13%
v13	v14	Climate model Climate	8%
v18	v20	Parameters Abatement	2%
v20	v21	function	0%
v7	v9	Initial Emissions and Concentrations	-1%
v11	v12	CO2 /GDP ratio and trend	-9%

Source: Nordhaus (2017)

Table 7 : Decomposition of global temperature variations 2100

Change in global temperature, 2100			
From	To	Changed variable	Change due to these variables
v14	v18	Carbon cycle	22%
v21	v22	DICE-2016R	11%
v10	v11	Productivity growth	8%
v13	v14	Climate model Initial	4%
v6	v7	output	4%
v12	v13	Utility function	1%
v20	v21	Abatement function	0%
v9	v10	Damage function	0%
v18	v20	Climate parameters	-3%
v11	v12	CO2 /GDP ratio and trend	-4%
v7	v9	Initial Emissions and Concentrations	-10%

Source: Nordhaus (2017)

The list in Table 6 shows the main sources for revising the 1992-2017 social cost of carbon estimates in order, while the list in Table 7 shows the main sources for revising the 1992-2017 global temperature forecasts in order. Tables 8 and 9 present all the results of the revision for the years 2015 and 2100.

Table 8 : Decomposition of changes in important variables, 2100

For year 2100											
From	To	Changed variable	Industrial Emissions (GtCO ₂ per year)	Atmospheric concentration CO ₂ (ppm)	Atmospheric Temperature (°C)	Output (trillions 2010\$)	Climate Damage (% output)	Consumption per capita (2020\$)	Carbon Price (per t CO ₂)	Emissions Control Rate (%)	Social cost of carbon (\$/tCO ₂ 2010\$)
v4*	v6	Price level	0%	0%	0%	100%	0%	100%	100%	0%	100%
v6	v7	Initial output	7%	4%	4%	35%	7%	25%	34%	3%	34%
v7	v9	Initial Emiss and Conc	-20%	-12%	-10%	0%	-19%	0%	-93%	-80%	4%
v9	v10	Damage function	0%	0%	0%	-1%	58%	-1%	0%	0%	56%
v10	v11	TFP	51%	13%	8%	217%	17%	216%	7952%	682%	252%
v11	v12	CO ₂ /GDP	-28%	-8%	-4%	-15%	-8%	-15%	-61%	-48%	-19%
v12	v13	Utility function	3%	1%	1%	3%	2%	1%	0%	0%	48%
v13	v14	Climate model	0%	0%	4%	0%	9%	0%	0%	0%	8%
v14	v18	Carbon cycle	0%	34%	22%	-2%	48%	-1%	0%	0%	43%
v18	v20	Climate params	0%	2%	-3%	0%	-6%	0%	0%	0%	6%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%
v21	v22	All others	-5%	-3%	11%	2%	28%	-9%	-67%	0%	52%

For year 2100											
From	To	Changed variable	Interest Rate (% per year)	Population (billions)	Per capita GDP growth, difference (% per year)	Capital stock (trillions, 2010\$)	Savings rate (%)	Investment (trillions, 2010\$)	CO ₂ /output ratio (tCO ₂ /000 2010\$)	Total forcings (W/m ²)	Other Forcings (W/m ²)
v4*	v6	Price level	0%	0%	0%	100%	0%	100%	-50%	0%	0%
v6	v7	Initial output	0%	8%	0%	35%	0%	35%	-21%	4%	0%
v7	v9	Initial Emiss and Conc	0%	0%	1%	0%	0%	1%	-21%	-11%	0%
v9	v10	Damage function	0%	0%	-1%	-1%	0%	-1%	1%	0%	0%
v10	v11	TFP	41%	0%	154%	166%	1%	220%	-52%	12%	0%
v11	v12	CO ₂ /GDP	-3%	0%	-4%	-14%	0%	-15%	-15%	-7%	0%
v12	v13	Utility function	-16%	0%	1%	13%	10%	13%	0%	1%	0%
v13	v14	Climate model	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v14	v18	Carbon cycle	-1%	0%	-1%	-1%	0%	-2%	1%	27%	0%
v18	v20	Climate params	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-4%	-30%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v21	v22	All others	-9%	5%	1%	13%	29%	31%	-7%	-11%	0%

Source : Nordhaus (2017)

Table 8 shows the impact of the different revisions on each variable for the projected level of 2100. For example, the column at the top left, entitled "Industrial Emissions", indicates the impact of changing the variable entitled "Modified Variable". That is, the change from v6 to v7 was a correction for the initial release (2015). This increased the projected emissions for 2100 by 7%.

Table 9 illustrates the impact of different revisions on each variable for the projected level for 2015. For example, the top left column entitled "Industrial Emissions" indicates the impact of changing the variable entitled "Modified Variable". In other words, the change from v6 to v7 corrected the initial output (2015). This has increased the projected emissions for 2015 by 7%.

Table 9 : Decomposition of the evolution of important variables, 2015

For year 2015											
From	To	Changed variable	Industrial Emissions (GtCO2 per year)	Atmospheric concentration CO2 (ppm)	Atmospheric Temperature (°C)	Output (trillions 2010\$)	Climate Damage (%) (output)	Consumption per capita (2020\$)	Carbon Price (per t CO2)	Emissions Control Rate (%)	Social cost of carbon (\$/tCO2 2010\$)
v4*	v6	Price level	0%	0%	0%	100%	0%	100%	100%	0%	100%
v6	v7	Initial output	7%	2%	2%	35%	5%	26%	36%	4%	36%
v7	v9	Initial Emiss and Conc	-23%	-2%	4%	0%	7%	0%	-94%	-82%	-1%
v9	v10	Damage function	0%	0%	0%	0%	59%	0%	0%	0%	59%
v10	v11	TFP	15%	1%	1%	13%	1%	13%	-2%	0%	15%
v11	v12	CO2 /GDP	-7%	1%	3%	-9%	5%	-9%	107%	49%	-9%
v12	v13	Utility function	2%	0%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	47%
v13	v14	Climate model	0%	0%	3%	0%	7%	0%	0%	0%	8%
v14	v18	Carbon cycle	0%	-2%	-24%	0%	-42%	0%	0%	0%	66%
v18	v20	Climate params	0%	2%	11%	0%	22%	0%	0%	0%	2%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v21	v22	All others	-6%	-2%	-24%	-5%	-42%	-100%	171%	0%	13%

For year 2015										
From	To	Changed variable	Interest Rate (%) per year)	Population (billions)	Capital stock (trillions, 2010\$)	Savings rate (%)	Investment (trillions, 2010\$)	CO2/output ratio (tCO2/000 2010\$)	Total forcings (W/m2)	Other Forcings (W/m2)
v4*	v6	Price level	0%	0%	100%	0%	100%	-50%	0%	0%
v6	v7	Initial output	0%	8%	35%	0%	35%	-21%	3%	0%
v7	v9	Initial Emiss and Conc	0%	0%	0%	0%	0%	-23%	-5%	0%
v9	v10	Damage function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v10	v11	TFP	22%	0%	2%	0%	14%	2%	2%	0%
v11	v12	CO2 /GDP	-1%	0%	-9%	0%	-9%	2%	2%	0%
v12	v13	Utility function	-11%	0%	9%	7%	10%	0%	1%	0%
v13	v14	Climate model	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v14	v18	Carbon cycle	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-3%	0%
v18	v20	Climate params	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-7%	-44%
v20	v21	Abatement function	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
v21	v22	All others	12%	0%	0%	31%	24%	-2%	-12%	0%

Source : Nordhaus (2017)

3. Conclusion

Over the past three decades, integrated assessment models (IAMs) about climate change have made significant progress. These advances have been made possible by

theoretical investigations in basic science and economics (including the development of public economics, game theory, and environmental economics). However, technology has also played a significant role in the development of current models with improved hardware, software, algorithms, and availability and access to better data. Perhaps the most important results of the IAMs include estimating the CO₂ emission reduction and carbon pricing measures needed to mitigate climate change. Until five decades ago, the awareness and the debates around carbon pricing were not included in the scientific literature. Today, with the evolution of MRIs, carbon prices, and estimates of the social cost of carbon have been integrated into regulatory decisions in major OECD countries and several developing countries.

Among the IAMs, the DICE model has been a huge success. Four reasons can be given here. The first reason is the multiple revisions proposed by Nordhaus, with an intermediate version (Nordhaus, 2008), and an updated version (Nordhaus 2017). In the end, the DICE model has been iterated many times, incorporating recent economic and scientific results and updated economic and environmental data. The second reason is based on a detailed description of the model (Nordhaus, Sztorc, 2013) with the availability of the DICE manual and the possibility of carrying out simulations. The third reason is the media coverage of DICE through the publications and work of the IPCC (since 1995) and many energy agencies (including the US agency). The fourth reason is the approach to Integrated Assessment Models. The DICE model has initiated a way of thinking about integration, which can be summarized by the following process: integration of CO₂ emissions, impacts on economic activities, economic policy measures. As a result, the triptych (Climate, Energy, Economy) is now the main use of integrated assignment models.

Of course, the work on integrated models is not limited to the DICE model, other models emerged in the 1990s, ICAM (Dowlatabadi, Morgan, 1993), IMAGE (Alcamo, 1994), MERGE (Manne et al, 1993), etc. Some, such as IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environmental) even claim the status of global, complex, interdisciplinary models.

In the discussions around IAMs and their ability to describe increasingly complex systems, the focus today is in two directions.

(1) While the forecasts for most environmental variables (e.g. CO₂ emissions, CO₂ concentrations, and temperature changes) have been subject to relatively minor revisions, the forecasts for economic variables, including those that were projected in 1992 and were happening in 2017, have changed considerably. The DICE model and the modelling community now face several challenges: the consideration of uncertainty, the integration of technological changes, and the need to think about the mechanisms for a more equitable democratic global climate governance.

(2) Beyond the structure of the models themselves, it is necessary to assign to the IAMs a real social dynamic (Dierickx, Diemer, Gladkykh and Spittler, 2018). This dynamic could build on the recent work of the IAM Consortium to develop Narratives for Shared Socioeconomic Pathways (NSSPs) describing key socio-economic trends that could shape tomorrow's society (O'Neill, 2017) or integrate a field of study on social standards needed to mitigate or adapt to the effects of climate change.

However, these challenges do not exhaust the discussions on IAMs, but rather give them a predictive and reflective dimension in terms of individual and collective responsibilities. Improving these models could be a kind of leitmotiv for researchers and policy makers to act in favour of our climate system.

References

Alcamo, J. 1994. *IMAGE 2.0, Integrated Modelling of Global Climate Change*. Kluwer Academic Publishers.

Alcamo, J., Shaw, R., Hordijk, L. 1990. *The RAINS model of acidification: Science and strategies in Europe*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands

Cass D. 1965. Optimum Growth in an Aggregative Model of Capital Accumulation. *Review of Economic Studies*, 32(3), 233–240.

Clark, D. L. 1982. Origin, nature and world climate effect of Arctic Ocean ice-cover. *Nature*, 300, (5890), 321.

Diemer, A. 2015. *Le développement durable et les économistes*. Editions Oeconomia.

Diemer, A., Figuière, C, Pradel, M. 2013. *Ecologie politique vs écologie industrielle, quelles stratégies pour le développement durable*. Editions Oeconomia.

Diemer, A. 2004. *Le développement durable et la dynamique des systèmes*. Document de travail, 2004-05, HERMES. Université de Reims, 24 mai, 12 p.

Dierickx, F., Diemer, A., Gladkykh, G., Spittler, N. 2018. *Integrated Assessment Models: Challenges and Prospects*. Eleventh Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium, november 13th – 15th, Seville, Spain.

Dowlatabadi, H., Morgan, M.G. 1993., *Integrated Assessment of Climate Change*. *Science*, 259, (5103).

Easterling, W. E., Crosson, P. R., Rosenberg, N. J., McKenney, M. S., Katz, L. A., Lemon, K. M. 1993. Agricultural impacts of and responses to climate change in the Missouri-Iowa-Nebraska-Kansas (MINK) region. *Climatic Change*, 24 (1-2), 23-61.

Edmonds, J. A., Reilly, J. M. 1985. Future global energy and carbon dioxide emissions. *Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle*, 215-246.

- Grobecker, A.J., Coronili, S.C, Cannon R.H. 1974. The report of findings: The effects of stratospheric pollution by aircraft, DOT-TST-75-50. U.S. Department of Transportation. Climatic Impact Assessment Program. National Technical Information Service. Springfield, VA.
- Häfele, W., Anderer, J., Macdonald, A. 1981. *Energy in a finite world*. Ballinger Publishing Company.
- Hulme, M., Raper, S. C., Wigley, T. M. 1995. An integrated framework to address climate change (ESCAPE) and further developments of the global and regional climate modules (MAGICC). *Energy policy*, 23(4-5), 347-355.
- Kelly, D. L., Kolstad C.D. 1999. Integrated Assessment Models For Climate Change Control. In Folmer H., Tietenberg T. (eds). *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Kolstad, C. D. 1996. Learning and Stock Effects In Environmental Regulation: The Case Of Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Environmental Economics and Management*, 31, 1-18.
- Koopmans, T. C. 1965. On the Concept of Optimal Economic Growth. *Academiae Scientiarum Scripta Varia*, 28(1), 1-75.
- Lashof, D. A., Tirpak, D. A. 1989. Policy Options for Stabilizing Global Climate: Executive summary. United States Environmental Protection Agency. Office of Policy, Planning, and Evaluation.
- Manne, A.S, Mendelsohn, R., Rochels, R.G. 1993. MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GhG Reduction Policies. *Energy Policy*, 23, 17 - 34.
- Matarasso, P. 2007. La construction historique des paradigmes de modélisation intégrés : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission » in Dalmedico A.D (ed). *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.
- Matarasso, P. 2003. Evaluation intégrée et modélisation du changement climatique. *Annales des Ponts et Chaussées*, 71 - 79.
- Meadows, D.H, Randers, J., Meadows; D. 2004. *Limits to Growth, The 30-year Update*. Chelsea Green Publishing.
- Meadows, D.H, Meadows D.L, Randers, J. 1992. *Beyond the Limits*. Earthscan Publications Limited.
- Meadows, D. H., Meadows, D. H., Randers, J., Behrens III, W. W. 1972. The limits to growth. Report to the club of Rome.
- Meadows, D., Richardson, J., Bruckmann, G. 1982. *Groping in the dark: the first decade of global modelling*. John Wiley & Sons.
- Mesarovic, M., Pestel, E. 1974. *Mankind at the turning point. The second report to the Club of Rome*.

- Mintzer, I. M. 1987. A matter of degrees: the potential for controlling the greenhouse effect. World Resources Institute.
- Nakicenovic, N., Nordhaus, W. D., Richels, R., Toth, F. L. 1994. Integrative assessment of mitigation, impacts, and adaptation to climate change.
- Ndiaye, A., Diemer, A., Gladkykh, G. (2017), Le Climat, du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée (IAM). *Revue Francophone du Développement Durable*, 9, mars, 7 - 56.
- Negishi, T. 1961. On the formation of prices. *International Economic Review*, 2 (1), 122-126.
- Negishi, T. 1962. The Stability of a Competitive Economy: A Survey Article. *Econometrica*, 30 (4): 635-639.
- Nordhaus, W. D. 2017. Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992–2017. National Bureau of Economic Research.
- Nordhaus, W. D. 2011a. Estimates of the Social Cost of Carbon: Background and Results from the RICE-2011 Model. New Haven, CT. USA. Cowles Foundation Discussion Paper.
- Nordhaus, W. D. 2010. Economic aspects of global warming in a post-Copenhagen environment. *Proceedings of the U.S. National Academy of Sciences*, 107 (26), 11721-1172.
- Nordhaus, W.D. 2007. The Stern Review on the Economics of Climate Change. *Journal of Economic Literature*, 45, 3, 686–687.
- Nordhaus, W. D., Boyer J. 2000. *Warming the World: Economic Modeling of Global Warming*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Nordhaus, W. D. 1994. *Managing the global commons: the economics of climate change*. Cambridge, MA: MIT press.
- Nordhaus, W. D., Yohe, G. W. 1983. Future paths of energy and carbon dioxide emissions. *Changing climate. Report of the carbon dioxide assessment committee*, 87.
- Nordhaus, W. D. 1979. *Efficient use of energy resources*. Yale University Press, New Haven, CT, USA.
- Nordhaus, W. D. 1977. Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem. *The American Economic Review*, 67, 1, 341 - 346.
- Nordhaus, W. D. 1974. Resources as a Constraint on Growth. *American Economic Review*, 64, 2, May, 22 - 26.
- Nordhaus, W. D. 1973. The allocation of energy resources. *Cowles Foundation Papers*, 401.
- Nordhaus, W. D. 1973. World Dynamics, Measurement Without Data. *The Economic Journal*, 83, 332, 1156 - 1183.
- Nordhaus, W. D., Tobin, J. 1972. IS Growth Obsolete?, in Nordhaus W., Tobin J. (eds), *Economic Research, Retrospect and Prospect*, 5, Economic Growth, NBER, 1 - 80.

- O'Neill, B.C et ali. 2017. The Roads Ahead: Narratives for Shared Socioeconomic Pathways describing world futures in the 21st Century. *Global Environmental Change*, 42, 169 – 180.
- Pindyck, R. S. 2013. Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us? *Journal of Economic Literature*, 51 (3): 860-72.
- Ramsey, F. 1928. A Mathematical Theory of Saving. *Economic Journal*, 38(152): 543–559.
- Rogelj, J. et al. 2010. Copenhagen Accord pledges are paltry. *Nature*, 464, 1126–1128.
- Rosenberg, N. J., Crosson, P. R. 1991. Processes for identifying regional influences of and responses to increasing atmospheric CO₂ and climate change-the MINK project: An overview (No. DOE/RL-01830T-H5 (TRO52A); TRO-52A). Battelle Memorial Inst., Columbus, OH (United States). Office of Nuclear Waste Isolation.
- Rotmans, J., De Boois, H., Swart, R. J. 1990. An integrated model for the assessment of the greenhouse effect: the Dutch approach. *Climatic Change*, 16(3), 331-356.
- United Nations N. 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. *New York*, 9.
- United Nations – DPI. 2005. ONU Info-PNUE : le stockage du CO₂ pourrait être à terme une arme efficace contre le changement climatique.
- Weyant, J., Davidson, O., Dowlabathi, H., Edmonds, J., Grubb, M., Parson, E. A., & Cline, W. 1996. *Integrated assessment of climate change: an overview and comparison of approaches and results* (367-396). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Environmental Education to Education for Sustainable Development: Challenges and Issues

Abdourakhmane NDIAYE, Faheem KHUSHIK
Arnaud DIEMER, Francine PELLAUD

University of Clermont-Ferrand, CERDI, France
HEP Fribourg, Switzerland

Cet article est paru dans la revue *International Journal of Humanities and Social Science*,
vol 9, n°1, p. 1 - 14

Abstract

The implementation of national educational policies and strategies for Education for Sustainable Development (ESD) has taken place in a context in which Environmental Education was already well established. ESD has been supported by the United Nations Decade of Education for Sustainable Development, a UNESCO programme. The aim of ESD is to encourage changes in education so that education can contribute to the orientation of societies towards sustainable development. It proposes participatory methods of teaching and learning, such as transdisciplinarity, a systematic approach, and collaborative decision-making to give learners the tools to take actions for sustainable development.

Keywords

Environmental Education, ESD, UNESCO, Sustainability, Values

Education for Sustainable Development (ESD) has been implemented in most countries (UNESCO, 2018), but most Developed countries had gone through the "environmental education" phase before applying the UNESCO framework for Education for Sustainable Development". This explains why sustainable development is often associated with the emergence of the concept of the environment, and two different educational projects are active – Environmental Education and Education for Sustainable Development.

Environmental Education (EE) emerged in 1977 at the Stockholm UNCSO. It was conceived as a process in which individuals and the community become aware of their

environment and acquire the knowledge, values, skills, experience, and willingness to act individually and collectively, to solve current and future environmental problems. Lucie Sauvé (1998, p. 15) points out that *"EE is considered as this dimension of contemporary education that is concerned with rebuilding the network of relationships between people - social group - environment"*. The environment is assumed to be an eco-socio-system, characterized by the interaction of its biophysical and social components. Environmental Education is a project concerned with "society".

Education for Sustainable Development has taken a different path. In December 2002 the United Nations General Assembly adopted resolution 57/254 for the United Nations Decade of Education for Sustainable Development. This initiative was part of a series of texts (Chapter 36 of Agenda 21, provision 124) adopted at the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, June 1992) and the World Summit on Sustainable Development (Johannesburg, September, 2002). UNESCO was given the responsibility for leading this Decade and developing a draft international implementation programme. Education for Sustainable Development became a political project, with the agreement of the major international and national institutions. The International Implementation Scheme for the United Nations Decade of Education for Sustainable Development states that ESD *"is based on the principles and values that underpin sustainable development; concerns the good health of the three spheres of sustainability (environment, society and economy); promotes lifelong learning; is locally relevant and culturally appropriate; is based on local needs, attitudes and conditions, but recognizes that meeting local needs often has international implications; mobilizes formal, non-formal and informal education; adapts to the evolving concept of sustainability; addresses content taking into account context, international issues and local priorities; builds citizens' capacities in the areas of community decision-making processes, social tolerance, environmental management, labour flexibility and quality of life; and is interdisciplinary. ESD is not the exclusive domain of any discipline, but all disciplines can contribute to ESD; it uses a variety of pedagogical techniques that promote participatory learning and the acquisition of high intellectual skills"* (UNESCO, 2005, p. 35-36).

Below we review the history of Environmental Education and Education for Sustainable Development to identify the major issues facing education systems up to 2030. The SDGs initiated by the United Nations give ESD a key role in the *Quality Education Goal* (SGD 4). The methods promoted by UNESCO for ESD can only change education systems if they offer a suitable approach for learners. It is difficult to educate people about the environment without considering the concept of the environment. From a historical point of view, this concept is based on the debates about the conservation and preservation of biodiversity (Muir vs Pinchot) in the 19th and 20th centuries. In the 1960s, the concept gained new momentum with the work of Carson and Commoner. It was in the 1970s that environmental education gained its present status.

1. The environmental issue

Initially introduced as part of the study of Geography, the concept of the environment has gradually changed (Matagne, 2003). It is complex and incorporates various fields of knowledge (geography, biology, ecology, etc). Currently it refers to very diverse practices, values and interpretations. According to Theys (1993), the environment is the subject of permanent social negotiation around the boundaries of private/public, culture/nature, technical/logical concepts of life, and depends on the context. These dimensions associated with the environment come from various schools of thought based on different visions because they are based on different interpretations of the environment. They question how we, as human beings, view ourselves within nature. Are we living beings who dominate nature? Or are we living beings subject to the laws of nature and dependent on our natural environment? These interpretations are linked to the history of peoples, religions, and science.

From its beginning, Christianity endeavoured to propose a vision of Man as master of nature, and therefore of divine creation. Nature is at the service of man, but man is at the same time responsible for it: Genesis 1:26: *"Then God said, "Let us make man in our image, according to our likeness, and let him rule over the fish of the sea, over the birds of the air, over the cattle, over all the earth, and over every creeping thing that creeps on the earth. God created man and woman. And said to them, be fruitful, multiply, fill the earth, and subdue it; and rule over the fish of the sea, over the birds of the air, and over every beast that moves on the earth."*

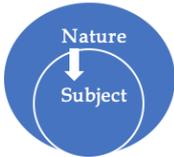
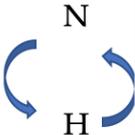
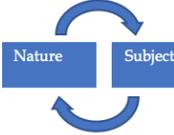
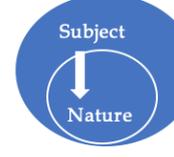
In recent centuries scientific knowledge has replaced religious beliefs while continuing to give a poor image of nature. Nature has been relegated to a stock of resources from which we happily draw by developing increasingly sophisticated technology. The scientific progress of the industrialized countries has led to the imposition of their vision of development. This anthropocentric representation of nature, has been challenged in recent years by the recognition of the environmental problems that progress may generate. This recognition should make us more humble because our control of our impact on ecosystems is very limited. According to B. Kalaora (1992), *"man's struggle is no longer between himself and nature, but with himself, with the ultimate goal of survival for both"*. The concept of double decentralization (J. Davallon, G. Grandmont, B. Schiele, 1992) illustrates this point. Man no longer appears at the centre of nature, but rather both inside it and outside it (Boissot). This decentralization makes it possible to revisit Man's biological origins, his kinship with other living beings, his animal dimension, and to revisit Man's human, cultural and scientific history, thereby revealing his double nature: as a biological animal and cultural being (a human capable of knowing and controlling) (J. Davallon, G. Grandmont, B. Schiele, 1992). It challenges entrenched concepts of identity to propose a composite identity.

Lucie Sauvé (1991) proposed a model for the interpretation of the human/environment relationship (cognitive approach, sensory approach, emotional approach, pragmatic approach, moral or ethical approach, spiritualist approach, experiential approach, cooperative approach, interdisciplinary approach, critical approach, reflective approach).

Using the Boillot test (following Chapuy), she said that it was possible to distinguish the following interpretations: environment/nature or environment/biosphere (biocentric vision), environment/problem and environment/resource (eco-sociocentric vision), environment/living environment and environment/community (sociocentric vision)

This typology is not designed to reduce the complexity of interpretation, but makes it possible to decode some of our human behaviour in terms of the environment, and to move towards a more precise understanding of the ambiguous and complex relationship we have with nature. The model demonstrates different world views, informs decision-making, guides future directions, and questions our dominant place as a species in the biosphere. The visions outlined in Table 1, which have been further developed in the literature, coexist in each of us. They guide our choices and actions at the individual and collective level. They are part of our understanding of the world, which is derived from our social and cultural experiences.

Table 1: Typology of representations Human/ Nature

Visions	Dominance Relationships	Conceptual Map	Practices of ERE
Objective object relationships BIOCENTRIC qualitative approach to nature Purpose: conservation and knowledge, belonging to nature	N ↓ H	ECOSYSTEM 	ENVIRONMENT NATURE Study of the environment, sensory approach ENVIRONMENT BIOSPHERE living together, planetary consciousness
Recursive object - subject relations TECHNOCENTRIC Purpose: sustainable development, management, expertise	 N H	ECOSOCIO SYSTEM 	RESOURCE ENVIRONMENT resource management SYSTEM ENVIRONMENT Industrial ecology
Subjective subject's relationship to the object ANTHROPOCENTRIC Purpose: quality of life, cultural heritage, social utility	N ↑ H	SOCIO SYSTEM 	ENVIRONMENT CULTURE creative individual culturally rooted ENVIRONMENT POLITICS politically anchored creative individual ENVIRONMENT COMMUNITY

Source : Theys (1993), Sauvé (1991), Diemer, Marquat (2014, 2015)

2. When the environment goes hand in hand with the protection of Nature

The emergence of the concept of the environment is based on two debates. The first debate is about the two views within the U.S. ecological movement since the end of the 19th century (Boidin, Diemer, Figuière, 2014). This debate concerns two different visions of nature protection : *Preservation* - associated with John Muir (1838-1914) and *Conservation* - associated with Gifford Pinchot (1865-1946). This contradiction between preservation and conservation still appears today as the backdrop to all major biodiversity debates. Conferences and reports of international organizations oscillate between these two visions. The second debate was inspired by the positions taken by the Nature Writers in the 1960s and 1970s. Rachel Carson (*Silent Spring*, 1962) and Barry Commoner (*Closing Circle*, 1971) embody this scientific approach to informing and educating the general public about the damage caused to the environment by human activities.

2.1 Origin of the different nature protection movements

At the end of the 19th century, the American ecological movement saw a split between supporters of nature preservation (John Muir) and those of nature conservation

(Gifford Pinchot). The relationship between the two men had started well. They met for the first time in New York in 1893, and they participated three years later in a Forestry Commission. The members of this commission travelled in Western U.S.A. and observed the damage inflicted by humans to nature. It was their love of nature that led Pinchot and Muir to take long walks together in forests (Larrère, 2007). Their friendship ended in the summer of 1897 when Pinchot published an article in the Seattle Journal encouraging domestic sheep grazing in forest reserves. Muir strongly opposed this position, stating that "hoofed locusts" should not be allowed to trample the forest. The argument between the two men fuelled the columns of popular magazines (Outlook, Harper's Weekly, Atlantic Monthly, World's Work, and Century), and took on a national character when the American government decided to build a dam on the Tuolumne River to supply water to the city of San Francisco. John Muir opposed the flooding of the Hetch Hetchy Valley (he wrote an open letter to Theodore Roosevelt asking him to cancel the project), but Gifford Pinchot supported the construction of the dam. After several years of debates that divided the country, Roosevelt's successor, Woodrow Wilson signed the decree authorizing the construction of the dam on December 19, 1913.

The Pinchot/Muir argument symbolizes the history of the nature protection movements (the exploitation of natural resources and more specifically of forests - Smith, 1998). John Muir, is one of the first modern naturalists. His essays and travel diaries are both stories of adventure in hostile regions (Alaska, Great Sierra, Cuba, etc) and hymns to nature (sketches of forest trees, meadows, lakes, glaciers, moraines, mountain passes, etc). Reproaching men for their utilitarian approach, Muir intended to preserve nature and its resources for their intrinsic and spiritual value : "*None of the dogmas professed by contemporary civilization seems to form a more insurmountable obstacle to a healthy understanding of the relationship that culture has with the wild state than one who considers that the world has been made especially for human use. Any animal, plant or crystal contradicts it in the most formal way. Now it is taught from century to century as something precious and always new, and in the darkness that results from it this monstrous claim can go freely its way*" (Muir, 2011, p. 23). Muir's idea of preservation means protection from destruction or degradation (Larrère, Larrère, 1997). Nature must be preserved in its original form. The term "wilderness", which has no equivalent in French, refers to the pristine natural environments covering vast areas, which are often found in North America. Generally uninhabited, these wildernesses sometimes have scattered, non-sedentary groups of humans of so-called primitive cultures. According to the Wilderness Act (1964), man is "at most a visitor who does not stay". Paul Arnoult and Eric Glon (2006, p. 228) point out that it was "the Anglo-Saxon settlers and their descendants who founded this idea of wilderness according to their own beliefs and cultural references". Wilderness is outside the social sphere because it is not part of the civilization and mental universe of its inhabitants. Deeply influenced by the work of

Henri David Thoreau and his book *Walden ou la vie dans les bois*, Muir challenged the predatory exploitation of natural resources and defended the idea of an ethics of nature. His efforts to improve the protection of natural areas led him to create the Sierra Club (1892), one of the biggest environmental associations in the United States (the first non-governmental organization for environmental protection, which now has over 700,000 members), and to initiate a movement to recognize national parks in the United States (e.g. Yellowstone). His writings and philosophy have influenced the modern environmental movement.

Gifford Pinchot, was an American forester with a background in European forest management methods. Pinchot was influenced by Carl Shurz, American Secretary of State for the Interior from 1871 to 1881, who was interested in forest management, and Bernhard Fernow, who was appointed Head of the Forest Division at the Department of Agriculture in 1886. Both were trained in German scientific forestry, their country of origin. It is from this influence, and the French school, that Pinchot "draws the ferments of his conservationism" (Glon, 2006, p. 251). Pinchot saw conservation as an intelligent way to manage the country's resources. Conservation is the desire to defend resources, keep them in good condition, and prevent their destruction. In his book *The Fight for Conservation* (1910), Pinchot promotes scientific forestry, and promotes the profitable, controlled, use of forests and other natural resources. His approach is based on three fundamental concepts : economic development, the concept of utility, and nature protection. The forest is considered to be a vast reservoir at the disposal of the American nation's economic development, and not of a minority of forestry companies : "The first great fact about conservation is that it stands for development" (1919, p. 27).

Pinchot advocates a wise use of forest resources and condemns the short-term selfishness of those who make the forests disappear for their personal interest. Catherine Larrère (2007, p. 4) notes that his utilitarian argument can be summed up as "the greatest good of the greatest number for the longest time". An expression that is reminiscent of Bentham's formula : "the greatest happiness of the greatest number". Pinchot prefers the rhetoric of the market economy to the expansion of the government's role in protecting nature, but he advocates setting aside forests for future needs. By laying the foundations for conservationism in the United States and Canada (first Conference in 1906), Pinchot's ideas found a favourable echo within the American Forestry Association which was created in 1875. The creation of forest reserves for future exploitation, the creation of forest fire-fighting services, and reforestation after logging are a few of the many types of forest management from a conservationist perspective. In addition, Pinchot founded the Yale University School of Forestry in 1900, and became the first head of the American Forest Service (part of the Department of Agriculture) in 1905. As an advisor, Pinchot inspired Theodore Roosevelt's environmental and natural resources policy from 1901 to 1909.

In the second half of the 20th century, the Muir and Pinchot currents took opposing directions. John Muir inspired the environmental ethics movement (Larrère, 2007), which developed around two ideas : the intrinsic value of nature (as opposed to the instrumental value), and wilderness as a model of nature to be protected. Philosophically this was built around the concepts of anthropocentrism (man is considered to be the central entity, reality is seen only through the human perspective), biocentrism (all living beings have an intrinsic value, which gives them the right to respect), ecocentrism (emphasis on the interconnection of life forms within a complex and harmonious whole, all living beings are part of a biotic community), socio-centrism (seeing in the environment only one way of problematizing society and in nature only one place to walk), and pathocentrism (taking into account the centrality of suffering, or a suffering common to all living beings). The Muir preservation ideas had their hour of glory with the creation of the IUPN (International Union For the Preservation on Nature) in 1948 (Bordeaux International Conference), and the proclamation of the US Wilderness Act in 1964. The Wilderness Act, for the protection of nature, drafted by Howard Zahniser of the Wilderness Society, defines wilderness as "a space where the earth and the community of life are not hindered by man, where man himself is only a passing visitor". The Pinchot conservationist vision of nature is still alive in the debate about sustainable development and biodiversity protection.

2.2 Environmental degradation : the Nature Writers' warning

The second debate was lead by the contributions of the U.S. Nature Writers who played a key role in the perception and interpretation of damage to the environment. They took up writing in the 1960s and 1970s to alert public opinion to environmental degradation. Rachel Carson and Barry Commoner are the emblematic figures. Their writings are now part of the history of the environmental movement.

Figure 1 : The Nature Writers, alarming the world



Rachel Carson

Barry Commoner

Rachel Carson (1907-1964), an internationally renowned marine biologist, referred in her book *Silent Spring* to the environmental problems caused by DDT. The introduction of the book entitled "A fable for tomorrow" imagines a town in the heart

of America where all life seemed to live in harmony with its surroundings : “*The town lay in the midst of a checkerboard of prosperous farms, with fields of grain and hillsides of orchards where, in spring, white clouds of bloom drifted above the green fields*” (1962, p. 1). Then, a strange blight crept over the area and everything began to change. Some evil spirit had settled on the community : mysterious illnesses swept through the flocks of chickens ; the cattle and sheep became sick and died. There were sudden and unexplained deaths among adults, and among children, who would be stricken suddenly while at play and die within in few hours. After a long description of the scene, Rachel Carson admitted that this town does not actually exist, but it might easily have a thousand counterparts in America or elsewhere in the world. The book is an attempt to explain how we have arrived at the present situation. Man, has acquired enough power to change the world. Man’s power has not only increased to a disturbing magnitude, but also it has altered in character. The most alarming of man’s assaults on the environment is the contamination of air, earth, rivers, and seas with dangerous materials : “*In this now universal contamination of the environment, chemicals are the sinister and little recognized partners of radiation in changing the very nature of the world – the very nature of its life*” (1962, p. 6).

Rachel Carson tells us that since the mid-1940’s over 200 basic chemicals had been created for killing insects, weeds, rodents, and other organisms described as “pests”. These sprays and powders are now applied almost universally to farms, gardens, forests, and homes. The whole process of spraying seems caught up in an endless spiral. Since Dichloro-Diphenyl-Trichloro-ethane (DDT) was released for civilian use, a process of escalation had been happening in which ever more toxic materials must be found. For Carson, the central problem has become the contamination of man’s environment with such substances which have an incredible potential for harm - substances which accumulate in the tissues of plants and animals. In the USA the production of synthetic pesticides increased from 124,259 tons in 1947 to 637,666 tons in 1960 (more than a fivefold increase). If pesticides are part of our life, if we are going to eat and drink them, allowing them into the marrow of our bones, we have to know something about their nature and their power. *Silent Spring* is both a wake-up call and an investigation of the workings of the chemical industry. Carson’s book tells how DDT and related chemicals are passed on from one organism to another through all the links of the food chains. It also accuses the chemical industry of intentional misinformation, and public authorities of accepting the industry’s claims without question. Rachel Carson’s battle against the chemical lobby, and the scientific arguments she used to describe the situation, inspired the creation of the US Environmental Protection Agency, and she was posthumously awarded the Presidential Medal of Freedom.

Barry Commoner (1917-2012) demonstrated the presence of strontium 90 in children's teeth, and was a committed opponent of nuclear tests. Director of the Centre for

Biology and Natural Systems Studies at Queens College (New York), he received the International Humanist Award in 1970. He was the author of two best-selling books : *Science and Survival* (1966) and *Closing Circle: Nature, Man and Technology* (1971). In *Closing Circle*, Commoner presents what he calls the environmental crisis and the purpose of his writings : “*Earth Week convinced me of the urgency of a deeper public understanding of the origins of the environmental crisis and its possible cures. That is what this book is about. It is an effort to find out what the environmental crisis means*” (1971, p. 11). Commoner traced the environmental crisis from its overt manifestations in the ecosphere, to the ecological stresses, to the problems in productive technology (and its scientific basis) that generate these stresses, and to the economic, social, and political forces which have driven humankind down this self-destructive path. *Closing Circle* discusses the rapid growth of industry and technology and their persistent effect on all forms of life. It suggests that we can reduce the negative effects by sensitizing, informing, and educating ourselves about our connection to the natural world. It also presents the basics of ecology in what Commoner termed “Laws of Ecology”.

The first law of ecology - Everything is connected to everything else - reminding us of the existence of an elaborate network of connections between different living organisms in the ecosphere. An ecosystem consists of multiple interconnected parts. Our ability to understand the behaviour of such a system has been improved by the development of ecology and cybernetics. *The second law of ecology* - Everything must go somewhere - means that in every natural system, what is excreted by one organism as waste is taken up by another as food. This is the trophic chain - carbon dioxide captured by plants which excrete oxygen, which is used by animals, and so on. *The third law of ecology* - Nature knows best - holds that any major man-made change in a natural system is likely to be detrimental to that system. DDT is a good example : the fact that DDT is not found in nature, that somewhere, at some time in the past, some unfortunate cell synthesized this molecule - and died. Given these ideas, Commoner proposes to treat man-made changes, especially chemical ones, prudently and cautiously. *The fourth law of ecology* - There is no such thing as a free lunch - warns that nothing can be gained without cost. Any exploitation of nature involves an ecological cost “*Because the global system ecosystem is connected whole, in which nothing can be gained or lost and which is not subject to over-all improvement, anything extracted from it by human effort must be replaced*” (1971, p. 46). These four laws form the basis for studying and understanding the relationships and interdependencies found in communities and ecosystems. They also imply that humankind is only one part of the biotic community and that people are shaped and nurtured by the characteristics of the land. These laws do not explain everything, but they give a clear understanding and appreciation of ecology.

While Barry Commoner and Rachel Carson’s books demonstrate a certain scientific rigour (collection and processing of information), they also highlight the commitment

of scientists to the environmental cause. They are powerful teaching works aimed at denouncing human errors and blindness in the face of technology. They are a call to vigilance and action. It is no longer possible to say that we did not know. It is also a first step towards a change in behaviour, leading to Environmental Education.

3. Environmental education, an inspiration from the 1970s

Even if Environmental Education was influenced by the opposition between Muir's preservationist thinking (biocentric and based on a wild and unspoilt nature) and Pinchot's conservationist thinking (eco-centred and based on a rational use of resources), it only obtained its true nobility in the early 1970s. Of Anglo-Saxon inspiration, it has led to the emergence of different currents of thought that are grouped under the banners of positivism (the field of quantitative research that excludes any subjective analysis, which relies on observed phenomena and rejects any form of doubt or ambiguity); constructivism (which places the individual at the centre of the construction of reality); and critical theory (L. Sauvé 1997, p. 170), which highlights the very close link between theory and action, reveals the predominant influence of the individual's social and historical context, insists on the need to clarify theories, and proposes a critical approach to social realities). UNESCO defined Environmental Education in 1972 (Giordan, Souchon, 1991). In France it was a Ministry of Education circular of 1977 (August, 29th) that specified the contents and methods of Environmental Education. The definition of the environment is broad, referring to "*all, at a given time, to the physical, chemical, biological and social and economic aspects likely to have a direct or indirect, immediate or long-term effect on living beings and human activities*". Philippe Mérieu (2001, p. 3-4) evokes four types of reasoning to justify the need to educate people about the environment: "*It is a contemporary concern*", "*behaviourist logic: children must be allowed to acquire reflexes, to adopt behaviours that have become necessary for the very survival of the planet*", "*Environmental education makes it possible to introduce a new approach, an original way of thinking about the world as a complex system constituted by a multitude of interacting elements*", "*its function of social criticism*".

Environmental Education (EE) emerged in the same year at the Stockholm UNCSO. It was conceived as a process in which individuals and the community are made aware of their environment and acquire the knowledge, values, skills, experience and also the willingness to act, individually and collectively, to solve current and future environmental problems. Lucie Sauvé (1998, p. 15) points out that "*EE is considered as this dimension of contemporary education that is concerned with rebuilding the network of relationships between people - social group - environment*". The environment is thus an eco-socio-system, characterized by the interaction of its biophysical and social components.

The originality of EE lies mainly in the conflict inherent between two interpretations of environmental education – one which focuses on people, and one which focuses on the environment. The challenge is to work at the heart of this conflict to create new social dynamics that are located in time and space. EE analyses reality and is defined by goals and values (Sauvé, 1991). The environment, being a social object, unlike nature, exists only through the way we look at it. The study of the environment is therefore fundamentally anthropocentric because it explores man's cultural and contextual relationship with the environment. *"The individual is part of the system he perceives and the strategies he adopts become an integral part of the environment, which he in turn sees as external to himself. Ways of looking at the environment are therefore, in a very broad sense, a function of what is done there, including the strategies deployed to explore and understand it. And what is done in the environment is in turn one of many possibilities"* (Ittelson, 1991). The environment only exists when man is present, so it is anchored in our cultures and social systems (Theys, 1993).

The environment can be summarized as the space in which we live, which provides us with our resources, our well-being and for which we are responsible ; it may include the idea of community, when it is associated with a particular territory, a particular local or more general identity. Man becomes an active subject and shares values with his neighbours (Giolettito, Clary, 1995). The environment takes on a solidarity dimension, generating social cohesion, with a present and future life project. Environmental Education has this ambition because it embraces the concepts of identity (autonomous self and individual responsibility), social (the social self and responsibility to others), earth (being alive and responsible towards other living beings). These are imagined as interrelated spheres contributing to Man's personal and social development (Desautels, 1998 ; Sauvé, 2012). Popular education networks such as CPIEs are part of this educational movement. They reflect the emergence of new teaching methods, such as project-led teaching, which has the aim of developing skills based on strategies of citizen engagement.

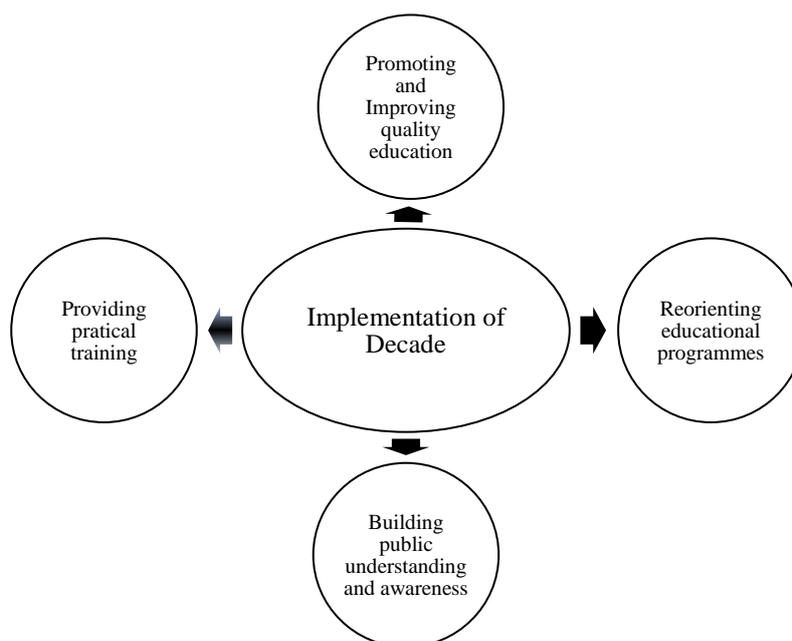
4. Education for sustainable development, more transversal

It is difficult to develop a universal model of Education for Sustainable Development, as each country must define its objectives, priorities, programme of action, and how they are to be assessed. Each country's economic, environmental, social, religious, and cultural conditions are such that ESD can take different forms. Nevertheless, it is possible to specify the essential characteristics of Education for Sustainable Development and to define its theoretical framework.

In a decade, Education for Sustainable Development succeeded in establishing itself in the educational landscape at national and international levels. In December 2002, the United Nations General Assembly adopted resolution 57/254 proclaiming the United Nations Decade of Education for Sustainable Development (2005 – 2014). This

initiative was part of a series of texts (Chapter 36 of Agenda 21, provision 124) adopted at the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, June 1992) and the World Summit on Sustainable Development (Johannesburg, September, 2002). UNESCO was designated as the lead agency for the promotion of the Decade of Education for Sustainable Development. As early as 2005, UNESCO's expectations were clearly defined : *“Throughout the Decade, education for sustainable development will contribute to enabling citizens to face the challenges of the present and future and leaders to make relevant decisions for a viable world. These actors will have acquired various skills (critical and creative thinking, communication, conflict management and problem solving strategies, project assessment) to take an active part in and contribute to the life of society ; be respectful of the Earth and life in all its diversity; and be committed to promoting democracy in a society without exclusion and where peace prevails”* (2005b, p. 4). To implement the objectives mentioned above, the Decade proposed to focus on four targets. *Promoting and improving quality education* reminds us that basic education needs to focus on shared knowledge, skills, values, and perspectives throughout a lifetime of learning. *Reorienting educational programmes* means rethinking and revising education programs from nursery school to university to improve sustainability. *Building public understanding and awareness* is a means of achieving the goals of sustainable development and encourage active citizenry. *Providing practical training* engages all the sectors to develop the knowledge and the skills necessary for sustainability. The challenges were to go beyond Environmental Education, to draw up an inventory of what exists in the world, to mobilize all the actors and especially the media, to establish partnerships and create synergies between the initiatives and programmes.

Figure 2 : Implementation of the Decade



4.1 The three challenges of ESD

An international implementation scheme was developed. Three challenges were given particular attention : sustainability issues, the role of values, and the links between different United Nations initiatives.

- **Sustainability issues** : Education for sustainable development must prepare "*people of all walks of life to plan for, cope with, and find solutions for issues that threaten the sustainability of our planet*" (UNESCO, 2005a, p. 7). Most of these issues were addressed at the Earth Summit (Rio de Janeiro, 1992) and then redefined at the World Summit on Sustainable Development (Johannesburg, 2002). These include the problem of access to water (source of conflict), the energy issue (specifically the slow implementation of renewable energy systems), biodiversity (definition of property rights in the face of bio-piracy activities by major pharmaceutical groups in the South (Vogel et al, 2000), and health (many populations are exposed to malaria and AIDS). In point 5, the Johannesburg Declaration states that all these issues are the responsibility of states, are part of a spatial and temporal scale, and refer to the three pillars of sustainable development - environment, society, and the economy : "*As such, we assume our collective responsibility to advance at the local, national, regional and global levels economic development, social development and environmental protection as independent and complementary pillars of sustainable development*". The action plan, specified in point 11 of the same declaration, specifies that "*the eradication of poverty, the adaptation of consumption and production patterns, as well as the management of the stock of natural resources necessary for economic and social development are key objectives of sustainable development, and are also its preconditions*". The concept of sustainability is both complex and multifaceted (waste management is mixed with the defence of human rights, poverty reduction, population migration, climate change, etc.). To address all these issues, it was necessary to implement innovative educational strategies (the aim is educational reform !), which could bring about profound changes in citizens' behaviour.

- **Values** : To bring about this change in mentalities and to move into the 21st century, states have to rely on the values that have forged their identity. The challenge of Education for Sustainable Development does not mean making a "clean slate" of history and culture and opposing traditional society to techno-society, but understanding its own values, those of the societies in which people live. This is an essential aspect of education for sustainable development, "*each nation, cultural group and individual must learn the skills of recognizing their own values and assessing these values in the context of sustainability*" (UNESCO, 2005, p. 7). It is difficult to draw up an exhaustive list of values. They can be ideas of justice (human rights, equity, equality),

respect (for others, for nature), emotions (sympathy, empathy, apathy), principles (participation, solidarity, precaution, responsibility). There could be a lengthy discussion on the values that should be in educational programmes. Education for sustainable development emphasizes the question of the transmission of values. Our heritage should enable us to identify locally relevant and culturally appropriate values. This is culture, the fourth pillar of sustainable development.

- *Linking the Decade to other international educational projects* : ESD has to be positioned with UNESCO's other initiatives, which include the Millennium Development Goals (MDGs), Education for All (EFA), and the United Nations Literacy Decade (UNLD). All these projects treat basic education as important, with the aim of extending it to all continents (especially Africa), and of improving its quality.

Table 2 : ESD and other international Priorities

Programmes	MDG	EFA	UNLD	ESD
Objectives	<p>8 objectives</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Eradicate extreme poverty and hunger 2. Achieve universal primary education 3. Promote gender equality and empower women 4. Reduce child mortality 5. Improve maternal health 6. Combat HIV/AIDS, malaria and other diseases 7. Ensure environmental sustainability 8. Establish a sustainable partnership for development 	<p>6 objectives</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Expand and improve all aspects of early childhood care and education. 2. Ensure that by 2015 all children, particularly girls, children in difficult circumstances and those belonging to ethnic minorities, have access to and complete free and compulsory primary education of good quality. 3. Ensure that the learning needs of all young people and adults are met through equitable access to appropriate learning and life-skills programmes. 4. Achieve a 50% improvement in levels of adult literacy by 2015, especially for women, and equitable access to basic and continuing education for all adults. 5. Eliminate gender disparities in primary and secondary education by 2005 and achieve gender equality in education by 2015, with a focus on ensuring girls' full and equal access to and achievement in basic education of good quality. 6. Improve all aspects of the quality of education and ensure excellence of all, so that recognized and 	<p>3 objectives</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mobilize a stronger commitment to literacy ; 2. Strengthen the effectiveness of the implementation of literacy programmes ; 3. Mobilize new resources for literacy. 	<p>4 objectives</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Facilitate networking, linkages and interactions among stakeholders in ESD; 2. Contribute to improving the quality of teaching and learning in education for sustainable development; 3. Assist countries to make progress towards the achievement of the Millennium Development Goals through efforts on education for sustainable development; 4. Provide countries with new opportunities to integrate education for sustainable development into their

		measurable learning outcomes are achieved by all, especially in literacy, numeracy and essential life skills.		educational reform efforts.
--	--	---	--	-----------------------------

In its 2014 report, UNESCO stated that ESD “*aims at encouraging the transformation of education so that it is able to contribute effectively to the reorientation of societies towards sustainable development... requires participatory teaching and learning methods like critical thinking, imagining future scenarios and making decisions in a collaborative way in order to empower learners to take action for sustainable development*” (2014, p. 20). The report also pointed out that projects in South countries had revealed some key points (Khushik, Diemer, 2018). Education for Sustainable Development has (i) stimulated innovation in teaching. Education policies (including curriculum reform) have encouraged learning for sustainable development in many countries, from early childhood education to training in the private sector, (ii) succeeded in bringing together all levels and types of education, (iii) highlighted the role of stakeholders and partnerships in the implementation of educational programmes.

4.2 Issues for ESD

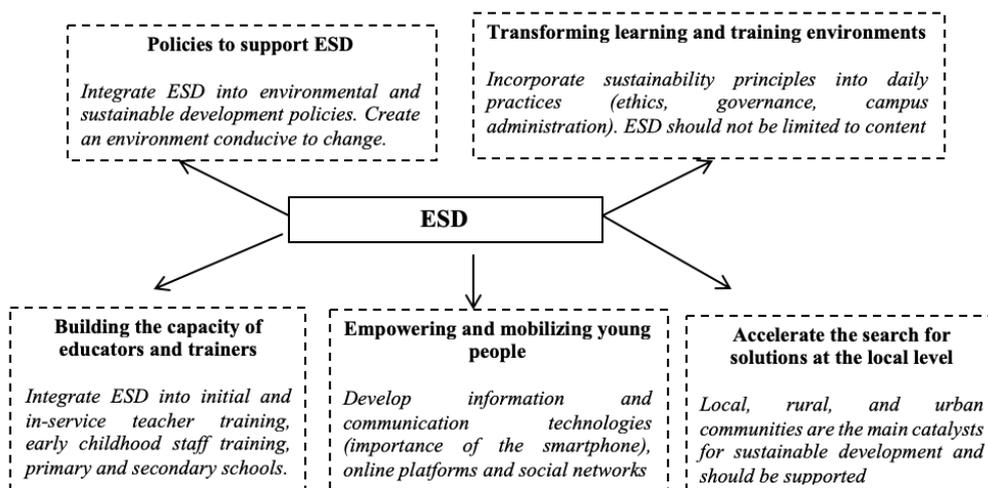
However, these achievements do not exhaust the subject and there are still many challenges to be faced -

Education for Sustainable Development is not completely integrated into sectoral policies; the place of ESD in early childhood differs between countries (gaps in programme accessibility and quality); ECCE (Early Childhood Care and Education) educators do not always have the skills to incorporate ESD into their teaching; much remains to be done to integrate ESD into technical and vocational training in both formal and informal contexts; the compartmentalization of disciplines continues to hinder the analysis of complex problems and prevents learners from acquiring the capacity to address complexity; accessibility to ESD in adult education remains difficult, which hinders the dissemination of concepts and practices of sustainable development; it is essential to reorient private sector education and training so that education provides the skills necessary for critical analysis of a whole system, collaborative problem solving, and collaborative decision-making; there is a need to improve the ability of all stakeholders to work in partnership, to better understand the social learning process, and to understand the measures for evaluating and improving outcomes.

In 2015, the lessons of the Decade of Education for Sustainable Development and the challenges ahead guided the Global Action Programme for ESD (resolution 37C/12). Five priority areas for action were identified : (i) policies to support ESD; (ii) a transformation of learning and training environments; (iii) capacity building for educators and trainers; (iv) youth empowerment and mobilization; (v) accelerating the

search for sustainable solutions at the local level. The five priority action areas are a call for commitment (over 5 years) from all stakeholders to support the implementation of ESD worldwide, and they place ESD within a framework of good practice in education (UNESCO, 2012). ESD projects focus on criteria such as the needs of populations, the consideration of shared values (cultural and universal), partnerships with the local community, the development and dissemination of information and communication through networks, etc. They emphasize a fundamental point in education for sustainable development : the reflective approach, which is an essential component for developing skills that lead to autonomy and responsibility. The reflective approach makes it possible to move forward by regularly looking back, by asking questions such as : Does the methodology meet the objectives set? Is it effective ? Does it allow all stakeholders to be involved ? What are the identifiable outcomes ?

Figure 3 : Priority Action Areas



In 2012 UNESCO published a report on good practice in biodiversity education. This underlined an important fact : the educational community increasingly recognizes biodiversity education as an essential component of ESD and lifelong learning (2010 was the International Year of Biodiversity in Schools). The good practices in Namibia (Namibia Desert Environmental Education Fund), China (Shangri-la Sustainable Communities Institute), Japan (Regional Centre of Expertise for ESD in the Sendai Metropolitan Area), and Jordan (Royal Society for Nature Conservation) have enabled the involvement of various stakeholders, the creation of networks of learners, the adoption of new methods and behaviours by learners, the transformation of these methods and behaviours into models in the community.

In 2018 UNESCO placed ESD at the heart of the 2030 Agenda for Sustainable Development and its 17 Sustainable Development Goals (United Nations, 2015). The SDGs recognize that all countries should stimulate action in the following key areas -

People, Planet, Prosperity, Peace, and Partnership (the Five Ps) - in order to tackle the global challenges which are crucial for the survival of humanity.

ESD is explicitly mentioned in target 4.7: *“By 2030, ensure that all learners acquire the knowledge and skills needed to promote sustainable development, including, among others, through education for sustainable development and sustainable lifestyles, human rights, gender equality, promotion of a culture of peace and non-violence, global citizenship and appreciation of cultural diversity and of culture’s contribution to sustainable development”* (UN, 2015, p. 19). For UNESCO the five priority action areas are intended to increase the number of countries that have integrated ESD into education and sustainable development policies, and so to catalyse ESD’s capacity to help achieve international commitments. As part of the Paris Agreement on Climate change, ESD was broadened to introduce Education for Climate Change (ECC). ESD requires changes in education systems, including strengthening curricula, innovative teaching, and innovative teacher training, but above all a conceptual and methodological model for transforming education systems.

Conclusion

In an article published in 2013 Patrick Matagne wrote about a double rupture (societal and methodological) between Environmental Education and Education for Sustainable Development. He said that the concept of the environment, initially disciplinary, had become multi-disciplinary, enriched by knowledge from geography, ecology, art, and history. Environmental Education had also become an amalgam of knowledge, practices, and values - making it more complex. Education for Sustainable Development is an education for complexity, but unlike Environmental Education, it has never been a disciplinary concept. Sustainable development has developed in a context of crisis, with economic, social, political, cultural and scientific components, which has increased its complexity. The ESD curriculum often uses both scientific concepts, and non-scientific concepts (social consensus, "good practices", etc), and refers in a recurrent way to the question of values to be shared, and also to the different positions taken by the different stakeholders in an educational project.

As well as the good practices and guidelines, ESD has to be implemented in education on strong conceptual and methodological foundations. ESD involves complexity, transdisciplinarity, a systemic approach, and values. From the methodological point of view, ESD introduces a new framework. The REDOC is an educational model which analyses people’s interpretations, uses teaching methodology, proposes new teaching tools, and results in new skills. Education can be seen as a new vehicle for better sustainability, since it is necessary to engage the world’s citizens in order to change their behaviour and accept more responsibility.

Bibliography

- Ackbarally, N. (2013). *Climate Change Teaches Some Lessons*. Interpress Service News Agency. <http://www.ipsnews.net/2013/07/climate-change-teaches-some-lessons>.
- Akkari, A., Payet, J.P. (2010). *Transformations des systèmes éducatifs dans les pays du Sud. Entre globalisation et diversification. Raisons éducatives*. 336 p.
- Alaya, A. (2010). *L'Éducation à l'Environnement en Tunisie. Analyse des valeurs relatives à la nature et à l'environnement dans les conceptions d'enseignants et d'élèves et dans les manuels scolaires*. Thèse Universités Lyon 1 et Tunis 1 (ISEFC).
- Astofi, J.P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y., Toussaint, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Paris – Bruxelles : De Boeck Université.
- Bader, B., Sauve L. (2011). *Education, Environnement et développement durable : vers une écocitoyenneté critique*. Presses de l'Université de Laval. Canada.
- Bigohe J.B., Kiaya, N., Mimboro, D., Binzangi, K. (2014). *L'enseignement de l'éducation au développement durable à l'école primaire en RDC : état des lieux et perspectives*. In A. Diemer & C. Marquat (Eds), *Eduquer au développement durable* (pp. 451 - 468). De Boeck.
- Figuière, C., Bodin, B., Diemer, A. (2014). *Economie politique du développement durable*. De Boeck.
- Bougrain Dubourg, A., Dulin, A. (2013). *L'éducation à l'environnement et au développement durable tout au long de la vie, la transition écologique*. Les avis du Conseil Economique Social et Environnemental. Décembre. 120 p.
- Bregeon, J. (2008). *Rapport du groupe de travail interministériel sur l'éducation au développement durable*.
- Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble. La Pensée Sauvage.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin Company Boston.
- Clément, P., Caravita S. (2011). *Education pour le développement durable, et compétences des élèves dans l'enseignement secondaire*. Unesco, 95 p.
- Cole, M. (1991). *On socially shared cognition*. In L.B. Resnick, J. Levine, S.D. Behrend (Eds.), *Perspectives on socially shared cognition*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Commoner, B. (1971). *The Closing Circle*, Alfred A. Knopf Editions. New York.
- Danic, I. (2006). *La notion de représentation pour les sociologues : Premier aperçu*. ESO, 25, 29 - 32.
- Diemer, A. (2016). *Le développement durable et les économistes*. Editions Oeconomia.
- Diemer, A., Marquat C. (2015a). *L'éducation au développement durable, quels enjeux pour les ESPE ? Le printemps de la recherche, réseau ESPE, 23 mars, Paris, 10 p.*
- Diemer, A., Marquat, C. (2015b). *Regards Croisés Nord Sud sur le développement durable*. De Boeck.
- Diemer, A., Marquat, C. (2014). *L'éducation au développement durable*. Editions De Boeck.

- Diemer, A. (2013a). L'éducation au développement durable, une affaire de représentation. *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, 30 - 59.
- Diemer, A. (2013b). L'éducation systémique, une réponse aux défis posés par le développement durable. *Education relative à l'environnement*, 11, 27 - 42.
- Diemer, A. (2011). De la représentation du développement durable à la construction de savoirs transversaux, *Les cahiers du CERIUM*, Montréal, septembre-octobre, 1- 28.
- Doise, W., Mugny, G. (1981). *Le développement social de l'intelligence*. Paris : InterEditions.
- Fabre, M. (2014). Les éducations à : problématisation et prudence. *Les cahiers du CERFE, Education et socialisation*, 36.
- Freire, P. (1974). *La pédagogie des opprimés*, Maspéro.
- Fisher, G.N. (1987), *Les concepts fondamentaux de la psychologie sociale*. Paris, Dunod.
- Girault, Y., Lange, J.M, Fortin-Debart, C., Simonneaux, L., Lebeaume, J. (2007). La formation des enseignants dans le cadre de l'éducation au développement durable : problèmes didactiques. *Éducation relative à l'environnement*, 6, 119-136.
- Goffin, L. (1997). L'éducation relative à l'environnement, un défi pour le XXIème siècle. Conférence forum international Planèt' ErE, Montréal.
- Goffin, L. (1992). *Problématique de l'environnement*. Fondationuniversitaireluxembourgeoise - Arlon.
- Hanh ThichNhat (2011). *Planting seeds, Practicing Mindfulness with children*. Parallax press.
- Hubert, M. (1999). *Apprendre en projets*. Lyon: Chroniquesociale.
- Hor, K. (2014). An Advocacy Journey towards Education for Sustainable Development in Singapore. <http://www.theodyssey.sg/resources/advocacy-journey-towards-education-sustainable-development-singapore>.
- Lange, J.M. (2014). Education au développement durable : intérêts et limites d'un usage scolaire des investigations multi-référentielles d'enjeux, *Cahiers du CERFEE, Education et socialisation*, 36.
- Lange, J.M., Martinand, J.L. (2010). Éducation au développement durable et éducation scientifique : balises pour un curriculum. In A. HASNI & J. LEBEAUME (Eds), *Nouveaux enjeux de l'éducation scientifique et technologique : visées, contenus, compétences, pratiques* (pp. 125 -154). Presses de l'université d'Ottawa.
- Lange, M.F. (2001). Dynamiques scolaires contemporaines au Sud. In M.F. Lange (Ed.), *Des écoles pour le Sud. Stratégies sociales, politiques étatiques et interventions du Nord*. Autrepart, 17, pp. 5-12.
- Legardez, A., Alpe, Y. (2013). Le curriculum sournois de l'éducation au développement durable : l'exemple de l'usage de certains concepts, *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, pp. 91 - 108.
- Legardez, A., Simonneaux, L. (2011). Développement durable et autres questions d'actualité. *Questions socialement vives dans l'enseignement et la formation*, Educagri.
- Legardez, A. (2004). Transposition didactique et rapports aux savoirs : l'exemple des

- enseignements de questions économiques et sociales, socialement vives. *Revue française de pédagogie*, 149, 19 – 27.
- Matagne, P. (2013). Education à l'environnement, éducation au développement durable, la double rupture. *Education et socialisation*, 33, 9 p.
- Meirieu, P. (2001). Eduquer à l'environnement : pourquoi ? Comment ? Conférence, 17p.
- Meirieu P. (1987). *Apprendre ... oui, mais comment*. Paris. ESF (1999), 17^e édition.
- Nicolescu, B. (1996), La transdisciplinarité. CIRET.
- Or2d (2014). Quelles compétences pour favoriser le passage de l'éducation à l'environnement à l'éducation au développement durable. Rapport intermédiaire, IFADEM, décembre, 51 p. <http://www.or2d.org>
- Pavlova, M. (2007). Two pathways, one destination: TVET for a sustainable future. Background paper for the virtual Conference. UNESCO-UNEVOC, 22 octobre – 10 novembre.
- Pellaud, F. (2011). Pour une éducation au développement durable. Quae Editions.
- Piaget, J. (1937). La construction du réel chez l'enfant. Paris Delachaux et Niestlé.
- Rosnay, de J. (1977). Le macroscopie. Editions du Seuil.
- Rosnay, de J. (1991). L'écologie et la vulgarisation scientifique. Musée de la Civilisation.
- Sarabhai, K. V., Subramaniam, S.M. (2014). ESD and Biodiversity Education. Background paper for the DESD Global. Monitoring and Evaluation Report.
- Sauve, L. (1997). Pour une éducation relative à l'environnement. Montréal: GuérinÉditeur.
- Siraj-Blatchford, J. (2014). Matarajio' project: Gender equality in Kenya. <http://327sustainability.wordpress.com/2014/06/03/matarajio-project-gender-equality-in-kenya>.
- Sauve, L. (1994). Pour une éducation relative à l'environnement. ESKA, Paris.
- Simonneaux, J. (2013). Quelques postures épistémologiques pour une éducation au développement durable ? *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, pp. 75 – 90.
- Tostan (2013). Seven Female Solar Engineers Share Knowledge at Tostan Solar Power Workshop. Dakar.
- Unesco (2018). Issues and trends in Education for Sustainable Development, Education on the move, Education 2030, Leicht A., Heiss J. and Byun W.J (Eds.), Unesco France, 271 p.
- Unesco (2014). Shaping the Future we want, UN Decade of Education for Sustainable Development (2005 – 2014). Final Report, Unesco France. Paris, ISBN 978-92-3-100053-9, 198 p.
- Unesco (2012). Education pour le développement – Bonnes pratiques en matière de biodiversité, 6, UNESCO – secteur de l'éducation. Paris. France, 112 p.
- Unesco (2009). Review of Contexts and Structures for Education for Sustainable Development, 84 p.
- Unesco (2006). L'éducation non formelle. Bureau de l'information au public, 2 p.
- Unesco (2005a). United Nations Decade of Education for Sustainable Development (2005 – 2014). International Implementation Scheme, Unesco Education Sector, ED/DESD/2005/PI/01, 31 p.

- Unesco (2005b). UN Decade of Education for Sustainable Development, 2005 – 2014. ED/2005/PEQ/ESD/3, Division for the promotion of Quality Education., 10 p.
- Unesco (2005c). Unesco and Sustainable Development, 44 p.
- Unesco (1996). Learning, a treasure within. Paris, 51 p.
- United Nations (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1, 41 p.
- Vogel, J.H., Alarcon, R., Saenz Garcia M., Morales, M., Lindstrom, R. (2000). El Cartel de la biodiversidad. CARE, Proyecto SUBIR.
- Vygostky, L.S. (1934). Pensée et langage. Paris. Editions sociales (1985).
- Wals A. E. J. (2014). Social Learning-oriented ESD: meanings, challenges, practices and prospects for the post-DESD era. Background paper for the DESD Global Monitoring and Evaluation Report.

Education for Sustainable Development: a conceptual and methodological approach

Arnaud DIEMER, Abdourakhmane NDIAYE,
Faheem KHUSHIK, Francine PELLAUD

*University Clermont Auvergne, CERDI,
Jean Monnet Excellence Center on Sustainability (ERASME)
HEP Fribourg*

Article à paraître dans la revue *International Journal of Education*, May, 2019

Abstract

Education for sustainable development has been widely institutionalized by the United Nations Decade of Education for Sustainable Development, an UNESCO programme. The aim of ESD is to encourage changes in education so that it can effectively contribute to the reorientation of societies towards sustainable development. It proposes participatory methods of teaching and learning such as critical thinking, the imagination of future scenarios, and collaborative decision-making to enable learners to take the actions necessary for sustainable development. If good practice is part of the UN discourse, it is not enough to change behaviour and encourage movement towards a more sustainable society, ESD has to be built on conceptual and methodological foundations. The REDOC approach proposes to implement ESD by analysing representations, using pedagogical methodology, proposing tools, and suggesting skills and knowledge.

Key words

ESD, UNESCO, REDOC, Sustainable Development, Values

In December 2002, the United Nations General Assembly adopted resolution 57/254 proclaiming the United Nations Decade of Education for Sustainable Development. This initiative completed a series of texts (Chapter 36 of Agenda 21, provision 124)

adopted at the United Nations Conference on Environment and Development (Rio de Janeiro, June 1992) and the World Summit on Sustainable Development (Johannesburg, September, 2002). UNESCO was entrusted with the responsibility of leading this Decade and developing a draft international implementation programme. Education for Sustainable Development thus became a political project, which was formalized by the major international and national institutions. As such, the International Implementation Scheme for the United Nations Decade of Education for Sustainable Development considers that ESD *"is based on the principles and values that underpin sustainable development; concerns the good health of the three spheres of sustainability (environment, society and economy); promotes lifelong learning; is locally relevant and culturally appropriate; is based on local needs, attitudes and conditions, but recognizes that meeting local needs often has international implications; mobilizes formal, non-formal and informal education; adapts to the evolving concept of sustainability; addresses content taking into account context, international issues and local priorities; builds citizens' capacities in the areas of community decision-making processes, social tolerance, environmental management, labour flexibility and quality of life; and is interdisciplinary. ESD is not the exclusive domain of any discipline, but all disciplines can contribute to ESD; it uses a variety of pedagogical techniques that promote participatory learning and the acquisition of high intellectual skills"* (UNESCO, 2005, p. 35-36).

In 2018, UNESCO placed ESD at the heart of the 2030 Agenda for Sustainable Development and its 17 Sustainable Development Goals (United Nations, 2015). The SDGs recognize that all countries should stimulate action in the following key areas - People, Planet, Prosperity, Peace, and Partnership (the Five Ps) - in order to tackle the global challenges that are crucial for the survival of humanity. ESD is explicitly mentioned in target 4.7: *"By 2030, ensure that all learners acquire the knowledge and skills needed to promote sustainable development, including, among others, through education for sustainable development and sustainable lifestyles, human rights, gender equality, promotion of a culture of peace and non-violence, global citizenship and appreciation of cultural diversity and of culture's contribution to sustainable development"* (UN, 2015, p. 19). For UNESCO, the five priority action areas (policies to support ESD, transforming learning and training environments, building the capacity of educators and trainers, empowering and mobilizing young people, accelerate the search for solutions at the local level) are intended to increase the number of countries that have integrated ESD into education and sustainable development policies, and so to catalyse ESD's capacity to help achieve global commitments (as part of the Paris Agreement on Climate change ESD introduced the Education for Climate Change (ECC). ESD requires changes in education systems, including strengthening curricula, innovative pedagogies and teacher training, but above all a model for transforming education systems.

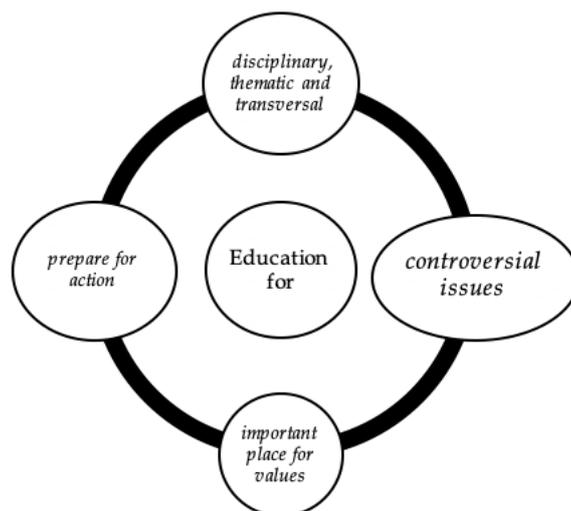
It is difficult to imagine a universal model of education for sustainable development, as each country must define its objectives, priorities, programme of

action, and how they are to be assessed. Economic, environmental, social, religious, and cultural conditions are such that ESD can take different forms. Nevertheless, it is possible to specify the essential characteristics of education for sustainable development and to define the contours of its theoretical framework. Firstly, it is part of the field of Education for (e.g. Education for biodiversity, Education for Health, Education for Environment). Secondly, it refers to a conceptual framework of sustainable development. Thirdly, it uses a methodological approach, the REDOC model.

1. ESD and *education for*

In recent years, *education for* has entered our educational system. This phenomenon has become widespread, in France and in Europe, and the list continues to grow with incursions into inter- or trans-disciplinarity taking place (Giordan, Souchon, 1991). How can such a phenomenon be explained? Is this a fashion or is it a real desire to transform our education systems? Lebeaume (2004), Lange and Victor (2006), Simonneaux (2006), Legardez and Alpe (2013), Lange (2015) oppose these educational forms to traditional teaching. Unlike traditional teaching, which refers to compartmentalized disciplinary content (scientific knowledge is stabilized) and places the teacher at the heart of knowledge transmission, *education for* is based on the knowledge of the various actors in formal/informal education, proposes to build a model of social and ethical competencies, uses a trans-disciplinary approach (Diemer, 2014) and aims at a critical and committed form of pedagogy (Diemer, Marquat, 2014 ; Diemer, 2015). Legardez and Alpe (2013) have specified the four important features of this difference from classical education : their thematic, non-disciplinary and "transversal" nature (according to the terminology of the French Ministry of National Education); their close relationship to present social issues; the important place they give to values; and their objective of changing behaviour, to prepare for action.

Figure 1 : *The four components of Education for*



Source : Diemer (2015, 2016)

This change in education has challenged the relationship of teaching to education, and is a challenge for institutions in charge of teacher training. In what follows, we look at the four characteristics of Education in order to identify the challenges for education systems (Diemer, Marquat, 2016) and for education for sustainable development. At the international level, UNESCO states that ESD "*consists in integrating into teaching and learning the key themes of sustainable development, such as climate change, natural risk prevention, biodiversity, poverty reduction or sustainable consumption. It involves the adoption of participatory pedagogical methods to motivate and empower learners to change their behaviour and become actors in sustainable development. This is why education for sustainable development promotes the acquisition of skills that enable learners to develop their critical thinking skills, imagine future scenarios and make common decisions*" (2005, p. 35). Education for sustainable development implies a fundamental change in teaching as it is generally practiced today.

1.1 Education for ... is a-disciplinary, thematic and transversal

Education for requires decompartmentalization and transdisciplinarity. It involves the mobilization of various types of knowledge and their linking to understand the complexity of problem. It is a question of reconnecting disciplines long divided into classes and subclasses (Bodin, Diemer, Figuière, 2014). While *education for* calls for a transdisciplinary approach, it does not mean that it abandons the need to mobilize disciplinary knowledge. Thus, even if the question of knowledge is peripheral to the objective, disciplinary skills are fundamental to developing critical thinking skills about social practices. A disciplinary scientific culture is an essential basis for the analysis of facts. Contrary to what Alain Beitone (2014) suggests, the positioning of "education for " does not consist in "challenging the scientific approach", but rather in

supplementing the theory of the general fact with an approach to particular facts (Diemer, 2013), to associate value judgments with the observation of facts. 'Education for' and especially Education for Sustainable Development requires the creation of a conceptual framework to observe and understand the phenomena that cross the world. In its report, United Nations Decade of Education for Sustainable Development (2005-2014), UNESCO outlined the framework : "*Education for sustainable development is interdisciplinary. ESD is not the exclusive domain of any discipline, but all disciplines can contribute to ESD*" (2005, p. 36).

In France, the Bregeon report (2008) confirmed this position : "*Education for sustainable development is not a discipline. It calls for integration into existing pedagogical processes, invites partnership actions and calls for a variety of approaches, as well as pedagogical innovation*".

1.2 Education for... refers to controversial issues

The production of scientific knowledge is subject to power and meaning relationships, according to Bourdieu's field theory (1979). The more rigorous the science is, the more accurate its objectification and effects will be. The close interaction of the world of science with those of politics and the media, which do not, however, obey the same rules, creates strong pressures that generate positions that are not subject to any scientific rigour. However, by influencing people's knowledge of the world, we can, according to Bourdieu, influence the social world (Bourdieu, 1980). The teacher therefore faces a double challenge. On the one hand, the teacher must escape the quarrels and political compromises to which scientists are subjected and which distort the theory of the general fact. On the other hand, the teacher must adapt his/her practice in order to develop in the students the skills necessary for their civic construction, in particular an autonomy of analysis that encourages them to act in a critical and responsible manner. This is the case for scientific fields which are exposed to the media that are part of national education programmes such as the issue of energy and climate (Diemer, 2015) or the production of GMOs (Diemer, 1999, 2001, 2002). These fields are subject to emotional tensions and strong positions that require appropriate teaching. These areas, sometimes termed controversies (Latour, 1989 ; Albe, 2011; Diemer, Marquat, Rafaitin, 2014) and other socially relevant issues (Legardez, Simonneaux, 2006, 2011), are the subject of research and are at the origin of the development of innovative educational practices. According to Raynaud (2003, p. 8), "a scientific controversy is characterized by the persistent and public division of several members of a scientific community, whether coalitionized or not, who support contradictory arguments in the interpretation of a given phenomenon". According to Legardez and Simonneaux (2011, p. 16), a socially lively issue has the following characteristics : (1) It is alive in society : it raises questions about the social practices of the actors, and their social representations. It is considered as an issue for society and

gives rise to debate (disputes, conflicts), it is the subject of media coverage. (2) It is highly relevant to reference knowledge : it gives rise to debates (controversies) between specialists in disciplinary fields or between experts in professional fields. Controversies can be subject to paradigm shifts (e.g. the treatment of inequalities according to redistributive or commutative justice). (3) It is alive in school (or even university) knowledge. Controversies can arise within institutional knowledge (programmes) and intermediate knowledge (manuals). Teachers are directly confronted by it.

Teaching about scientific controversies means addressing the question of scientific rationality in a changing and tense societal context that challenges knowledge and creates uncertainty. The teaching of Life and Earth Sciences and Economic and Social Sciences are particularly exposed to the question of controversy since these disciplines must address such issues as gender, global warming, genetically modified organisms, social protection, inequality, participatory democracy, etc. Education for sustainable development is an excellent place for addressing societal issues and controversies.

1.3 Education for... *gives an important place to values*

Education for brings us into the field of values. Introducing values into the educational field does not necessarily refer to subjectivity. Such an approach makes it possible to associate principles (e.g. solidarity, participation, etc.) with the analysis of facts while opening up new perspectives in terms of skills. Life skills (attitudes), know-how (skills and approaches), knowledge in terms of knowledge and finally knowledge about knowledge (which is equivalent to metacognition) are in turn mobilized at school (Giordan, Pellaud, 2001). Combining the autonomy of reasoning with a constructive critical spirit (Freire, 1996), these four types of knowledge in a broad sense make it possible to make well-considered decisions, based as much on a "scientific" understanding of the problems as on ethical reflection. In the case of ESD, the questions may concern the relationship between man and his environment, and more generally, our relationship with the world. People have a diversity of cultures and ethical relationships with the environment and sustainable development, which makes us oscillate between two extreme philosophies (Clément 2004), materialism (nature results from evolution) and spiritualism (nature is a gift from God). Between these two extremes, there are many positions. Implementing ESD requires positioning oneself at the intersection of these extreme positions, decentralizing from these representations to better understand those of others, and building shared representations. This posture leads to questions about the relationship between principles, values, and ethics.

The principles are based on fundamental propositions, they serve as a basis for reasoning and position papers, they define a way of action. In the case of Education for Sustainable Development, the principles of responsibility, precaution, and

solidarity allow individuals to conform their conduct to a set of predefined rules regardless of the particular circumstances of the action (Diemer, 2013). Principles are values in the sense that if they were worthless, if they had no meaning, an individual would not make them his/her own. However, values are on a different level, they affect the intimacy of the individual and enter into the construction of his/her psycho-social identity (Malewska-Peyre, 1991). Any direct questioning of these values is therefore likely to create cognitive blockages. Both the field of education and the field of the environment are 'undermined' by values (Sauvé, 2009), which requires teachers to be clear-sighted, rigorous and of the highest integrity. Generally, values are socially constructed and culturally determined (Diemer, Marquat, 2016), which gives them a universal character (Sauvé, Villemagne, 2005). Understanding our own values, the values of the society in which we live, and the values of other societies around the world (Dewey, 2011), is an essential aspect of Education for Sustainable Development. While the history of the United Nations has been accompanied by the promotion of a large number of values related to dignity and human rights, equity and respect for the environment, sustainable development, and more specifically education for sustainable development, goes further by extending them to the inter-generational level (Caravita et al, 2008). Of course, the values to be taught and learned in each ESD programme can be debated, however, the objective of ESD is to "create locally relevant and culturally appropriate values" based on the principles and values inherent in sustainable development (UNESCO, 2005, p. 8). Ethics, on the other hand, can be seen as an attempt to answer the Socratic question : how should we live ? (Williams, 1985). It is a reasoned reflection with a view to "doing the right thing". Ethics refers to action (Fortin, 1995), specifically it proposes to question the values and principles that tend to guide our actions, in order to act in accordance with them (Legault, 1999, Pellaud, 2011).

1.4 Education for... *prepare for action*

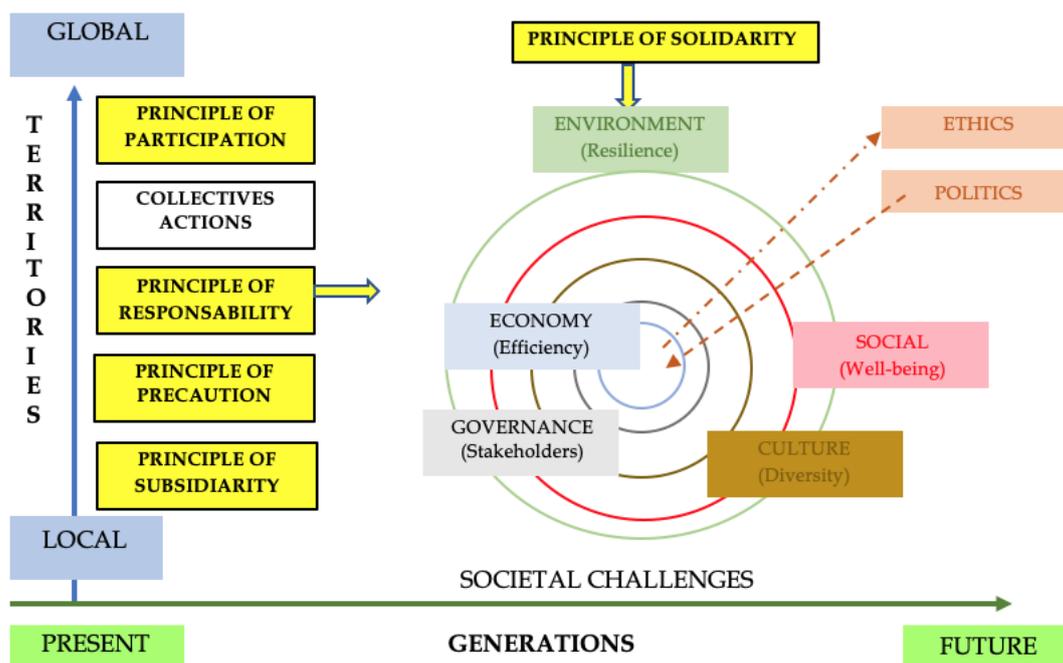
Traditional education is not the preferred place for action. It is intended to prepare minds by providing them with the knowledge they need to understand the world and to train responsible citizens. Nevertheless, schools are evolving. Initiatives and citizen actions are being developed in partnership with local actors. Hence the importance of developing forms of education that prepare successive generations to build the society to come. Schools are beginning to open up to this perspective by drawing inspiration from the principles of popular education. Education tends to answer the question of the individual and collective construction of a common future by working in three directions (Christian Maurel, 2011) : emancipation of individuals so that they are able to leave the place - social, gender, cultural - that has been assigned to them; action to regain control of their destiny; and involvement in the transformation of social and political relations.

Education for... allows the development of processes of empowerment and choice of education through a critical analysis of the issues at stake. It is part of the emancipation process by allowing a critical and analytical mind to flourish. Emancipation, which in the strict sense of the term means freedom from specific constraints, can only be achieved in a democratic context. Emancipation means access to free will, to a judgment of situations by oneself. It is a capacity to think, to elaborate and to consider oneself at the origin of one's judgments (Pasquier, 2013). The emancipation necessary for the preparation of action is one of the roles of school. Learning to live together (Pellaud, Giordan, Eastes, 2007), which begins with the ability to live with oneself, requires first of all the clarification of one's own values in order to be able to confront them with ideas. This dialogue (internal and external) between values, principles of life, and the rules of collaborative action requires the development of the skills of understanding and listening to oneself and others. To foster the development of these skills necessary for collective action, it is also useful to diversify pedagogical practices by taking into account the representational universes and organizational concepts (knowledge anchorage point) of each person. Beyond traditional formal education, non-formal and informal education should not be neglected. Their advantage is that they are most often anchored in reality, that they are in synergy and network with other actors, that they encourage imagination because they are unconstrained, and that they are part of the action (Diemer, Marquat, 2016).

2. ESD, a conceptual framework of sustainable development

Education for Sustainable Development (ESD) refers to a conceptual framework of the sustainable development concept (Diemer, 2013, 2017) characterized by (i) societal challenges (also referred to as controversial issues); (ii) an introduction to complexity and system thinking; (iii) a transdisciplinary approach; (iv) five pillars of sustainable development (environmental, social, cultural, economic, governance); (v) spatial and temporal scales; (vi) a system of values and broad principles (responsibility, precaution, participation, solidarity).

Figure 2: Thinking ESD in the Sustainable Development Framework

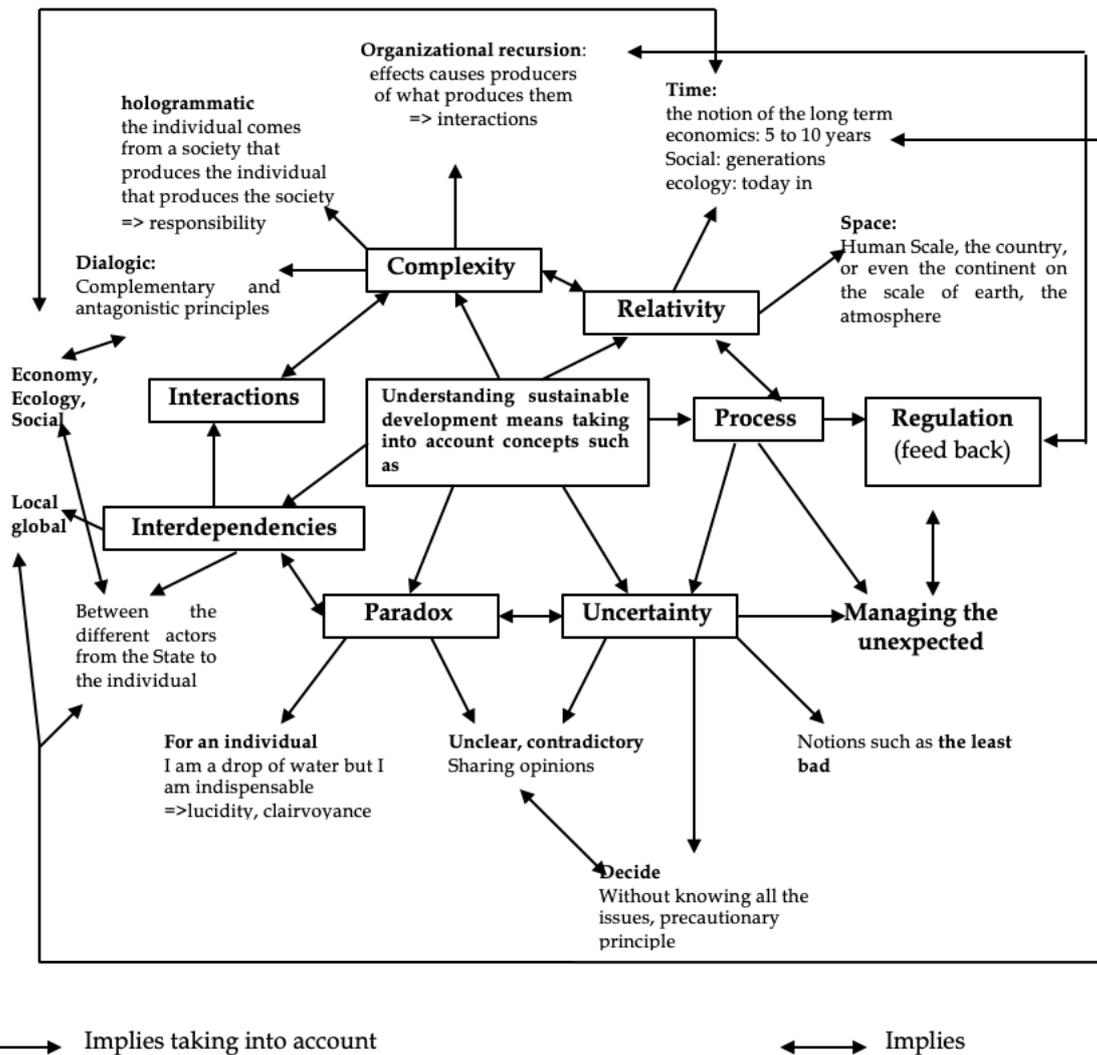


Source: Diemer (2015)

(i) Sustainable development asks us to consider a growing list of societal issues (biodiversity, climate change, energy, water, production patterns, consumption patterns, food, human rights, human health, governance, urbanization, sustainable mobility, etc.). ESD is integrated into many global frameworks and conventions: Article 6 "Education, training and public awareness" of the United Nations Framework Convention on Climate Change (1992); Article 13 "Public education and awareness" of the Convention on Biological Diversity; point 18 "Education and training" of the Hyogo Framework for Action 2005 - 2015 for Disaster-Resilient Nations and Communities; and the 10-year framework of programmes on sustainable consumption and production 2012 - 2021 "Lifestyles and sustainable education"

(ii) Sustainable Development invites us to consider complex thinking and systemic analysis. A complex situation requires a global vision of the context, which means considering all the factors involved in the problem being addressed, while placing the problem within a broader framework (Morin, 2005). Complexity introduces the concepts of interactions, interference, and uncertainty. It involves the use of system dynamics (Meadows Report, 1972) which focus on interacting elements (feedback loops) and irreversible processes.

Figure 3 : Complexity of Sustainable Development



Source : Pellaud (2011)

(iii) Sustainable development requires a transdisciplinary approach. Education for sustainable development is fuelled by the explosion of disciplinary research (the importance of fundamental knowledge related to sustainable development), advocates openness between disciplines (interdisciplinarity), and research to bring knowledge together across disciplines (transdisciplinarity). Transdisciplinarity is situated between disciplines, across disciplines, and outside disciplines (Nicolescu, 1996). Transdisciplinarity constructs its own content and methods in order to capture a multidimensional reality, structured at multiple levels. It is a cognitive paradigm whose main mission is to build bridges between disciplines (Piaget, 1972).

(iv) Sustainable Development is based on a set of 5 pillars of sustainable development. In addition to the three well-known pillars of the Brundtland Report (environmental, social, and economic), the cultural and governance pillars have to be added. Culture, and more specifically cultural diversity (UNESCO, 2001, 2005), plays an important role in the understanding, acceptance, and diffusion of sustainable development. This signifies the need to apply a culturally sensitive educational model so that local

populations can both take ownership of it and contribute to its enrichment. Governance, on the other hand, introduces the notion of stakeholders (Freeman, 1984). It reminds us that education for sustainable development actions are the result of an awareness of the central position given to meaningful action. Governance rehabilitates the intentionality (competence to act) and justifications of actors in a reciprocal process of doing and saying (Boidin, Diemer, Figuière, 2014). In this representation of sustainable development, it is important not to go beyond the boundaries of the planet (the environment is characterized by biodiversity, climate, water – which are challenges for society), so that the ecosystem can be resilient. Above all, society must respect the environment and focus on the notion of well-being (Buen vivir). Culture is part of the social sphere, it uses diversity to enrich human relationships. Governance involves all stakeholders in the decision-making process. The economy is reduced to its purest representation, a place of exchange, and it concerns only a small part of our lives (the relational goods that are shared by all citizens replace the material goods, obtained under the sign of private property).

(v) Sustainable Development has spatial and temporal scales. Time introduces the generational effect (as defined in the Brundtland report), but also looks at the past (refusal to forget), and the future (a prospective approach that must be based on medium- and long-term planning [Sachs, 1997]). Space must articulate global and local levels (Zuindeau, 2000) based on the principle of subsidiarity (this point is particularly important when talking about territories and the enhancement of indigenous knowledge).

(vi) Sustainable development introduces a system of values and four principles of sustainability. These values, respect for the environment, empathy, respect for others, and self-esteem, should (?) make it possible to empower individuals, to train responsible citizens (education for eco-citizenship) capable of projecting themselves into the future, to become involved in a genuine social project, to understand the full complexity of the socio-economic, ecological, cultural, and ethical factors that determine the entire sustainability of development (UNESCO, 2009). ESD also integrates the basic values of environmental education, whether it is Goffin's STAR (Solidarity, Tolerance, Altruism and Responsibility) model (1992, 1997) or Alaya's CARTAS (Citizenship, Autonomy, Responsibility, Tolerance, Altruism and Solidarity) model (2010). Principles such as responsibility, solidarity, precaution, and participation now define the philosophy of sustainable development. Education for sustainable development thus refers to the art of living together. On the basis of this conceptual framework, it is possible to propose a methodological framework for integrating ESD into the learning process.

3. ESD as a methodological framework, the REDOC approach

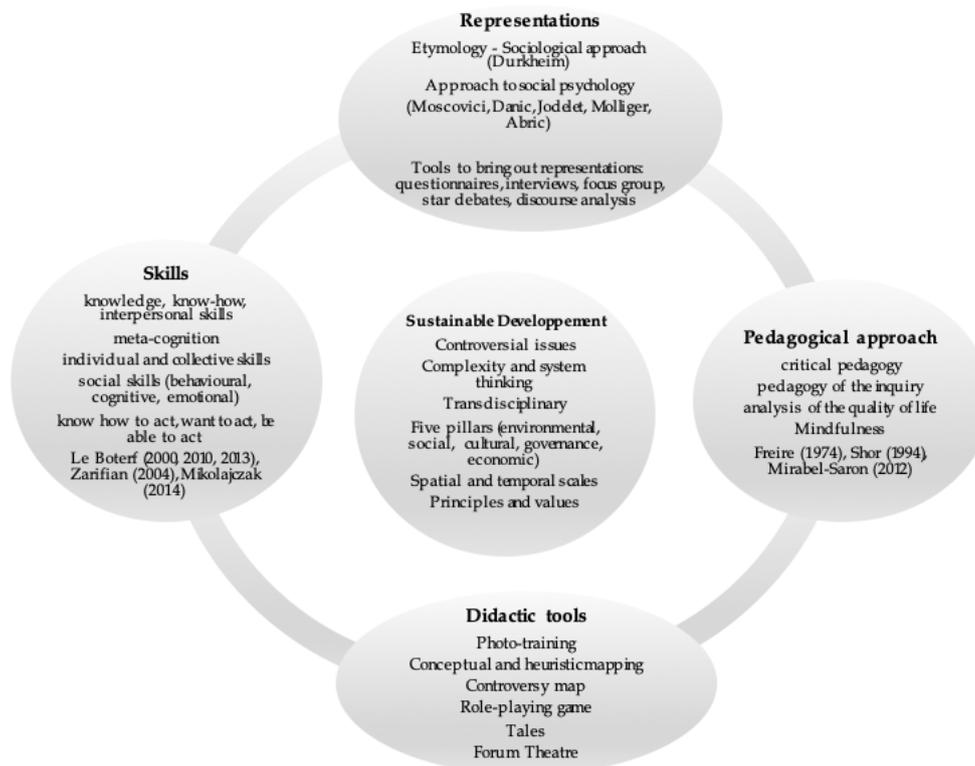
Below we present a methodological framework for education for sustainable development. This framework is associated with a model called REDOC, Representations, Pedagogical Approach, Tools and Skills (Diemer, Kerneis, Marquat, 2014). We used this framework for our study on Education for sustainable development for African Countries (Diemer, 2015).

- Step 1 - Representations - the aim is to bring out the representations of sustainable development of teachers, pupils, and citizens by using different techniques such as questionnaires, interviews, focus groups, or the analysis of speech proposed by software (TROPES). The notion of representation refers to the mental elements that are formed by our actions and that inform our actions. It is characterized by a process of construction and functioning that is distinct from other ways of thinking (Danic, 2006). The notion of social representation includes a certain number of features such as symbolism, imagination, cognition, action, conception, interaction, etc: "*Social representation is a process of perceptual and mental elaboration of reality that transforms social objects (persons, contexts, situations) into symbolic categories (values, beliefs, ideologies) and confers on them a cognitive status allowing them to grasp aspects of ordinary life by reframing our own behaviours within social interactions*" (Fischer, 1987, p. 118).

- Step 2 - Pedagogical approach - there is a broad consensus that the pedagogical practices of education for sustainable development are based on the teacher's active construction of his/her own skills (Vygotsky, 1934 ; Piaget, 1937; Meirieu, 1987, Astolfi, 1997), and his/her ability to help students build their own skills (Eastes, 2013). Socio-constructivism is a relevant theoretical framework for studying ESD (Doise and Mugny, 1981 ; Cole, 1991). Each teacher builds his/her own knowledge, skills, attitudes and values in a socialized context (family, village, friends, colleagues, working conditions, social pressures, etc). ESD invites us to pay particular attention to cultural and educational contexts in cognitive processes (this is why concepts and representations are so connected). However, as we have already pointed out, the theory of didactic situations (Brousseau, 1998) can also be used here, particularly for problem situations, debates, socially lively questions, surveys, and collective actions.

In a previous study (Diemer, 2015), we sought to show how, through specific pedagogies, it is possible to develop in teachers (but also in students) skills specific to understanding sustainable development. We identified four pedagogical modalities : critical pedagogy (Freire, 1974), project-based pedagogy (Hubert, 1999), exploration of the living environment (Sauve, 1997), and mindfulness (Hant Thich Nhat, 2011).

Figure 4 : *REDOC Framework*



Source : Diemer, Marquat, Bigohe (2014), Diemer (2015, 2017)

- Step 3 - Use and design of didactic tools - ESD uses innovative tools which enable teachers to interact with their students. Use of photographs, storytelling, comic strips, theatre, discussion topics, concept mapping, heuristics, and debates were proposed in a framework aimed at (i) collecting teachers' representations (both to free-up speech and to facilitate exchanges during focus group sessions), (ii) identifying whether certain tools resonated with local practices, (iii) analysing the possibilities of integrating the tools into a phase of accompanying teachers in education for sustainable development. In the case of Benin and Togo, three didactic tools were tested : storytelling (use of the book Justine and fire stone Ogress which speaks of Western overconsumption), photographs (writing a story from three images referring to a certain idea of Nature), and debate (use of a puppet to provoke a discussion on the nuisance of plastic bags which is a big pollution problem in African countries).

- Step 4 - Skills - a fundamental issue in education for sustainable development. Several of the competences targeted by ESD are derived from the key competences for education framework, namely : acting autonomously, interacting with one's environment, interacting effectively with others. UNESCO's work on competences is based on the report Learning : the Treasure Within (1996), which contains the following pillars: (i) learning to know, (ii) learning to do, (iii) learning to be, (iv)

learning to live together, (v) learning to transform oneself and society. Of course, each country will seek to give priority in its education system to skills that are consistent within its specific cultural, social, environmental, and economic framework. However, there are skills that are related to the pedagogical objectives and modalities of ESD: critical analysis (ability to ask questions, seek answers, debate, choose, argue), systemic reflection (ability to analyse and understand complex situations, to accept several points of view and partial solutions), transdisciplinary approach (ability to mobilise several fields of knowledge, know how to connect and discuss them), collaborative decision-making (know how to collectively build an optimal solution for all, motivate stakeholders to converge, develop a common vision of a project), a sense of responsibility (act responsibly, ability to assume responsibilities and take charge of missions). It should be noted that in all these skills, there are interactions between mobilized knowledge, attitudes, and values.

Conclusion

Education for sustainable development has been implemented by the resolution 57/254, proclaiming the United Nations Decade of Education for Sustainable Development (2004-2015). In 2018, UNESCO placed ESD at the heart of the 2030 Agenda for Sustainable Development and its 17 Sustainable Development Goals (United Nations, 2015). ESD is explicitly mentioned in target 4.7: *“By 2030, ensure that all learners acquire the knowledge and skills needed to promote sustainable development, including, among others, through education for sustainable development and sustainable lifestyles, human rights, gender equality, promotion of a culture of peace and non-violence, global citizenship and appreciation of cultural diversity and of culture’s contribution to sustainable development”* (UN, 2015, p. 19). Beyond the good practices and guidelines, the success of ESD requires a strong conceptual and methodological foundations. From the conceptual point of view, ESD involves controversial issues, complexity, transdisciplinary approach, system thinking method, principles and values. From the methodological point of view, ESD introduces a new framework. The REDOC model is an educational model which analyses people’s representations, uses pedagogical methodology, proposes didactic tools and suggests new skills. As education seems to be the new vehicle for better sustainability, it is necessary to engage world’s citizens in order to change their behaviour and accept more responsibility.

Bibliography

- Ackbarally, N. (2013). Climate Change Teaches Some Lessons. Interpress Service News Agency. <http://www.ipsnews.net/2013/07/climate-change-teaches-some-lessons>.
- Akkari, A., Payet, J.P. (2010). Transformations des systèmes éducatifs dans les pays du Sud. Entre globalisation et diversification. *Raisons éducatives*. 336 p.

- Alaya, A. (2010). *L'Éducation à l'Environnement en Tunisie. Analyse des valeurs relatives à la nature et à l'environnement dans les conceptions d'enseignants et d'élèves et dans les manuels scolaires*. Thèse Universités Lyon 1 et Tunis 1 (ISEFC).
- Astofi, J.P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y., Toussaint, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Paris – Bruxelles : De Boeck Université.
- Bader, B., Sauve L. (2011). *Education, Environnement et développement durable : vers une écocitoyenneté critique*. Presses de l'Université de Laval. Canada.
- Bigohe J.B., Kiaya, N., Mimboro, D., Binzangi, K. (2014). *L'enseignement de l'éducation au développement durable à l'école primaire en RDC : état des lieux et perspectives*. In A. Diemer & C. Marquat (Eds), *Eduquer au développement durable* (pp. 451 – 468). De Boeck.
- Figuière, C., Bodin, B., Diemer, A. (2014). *Economie politique du développement durable*. De Boeck.
- Bougrain Dubourg, A., Dulin, A. (2013). *L'éducation à l'environnement et au développement durable tout au long de la vie, la transition écologique*. Les avis du Conseil Economique Social et Environnemental. Décembre. 120 p.
- Bregeon, J. (2008). *Rapport du groupe de travail interministériel sur l'éducation au développement durable*.
- Brousseau, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble. La Pensée Sauvage.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin Company Boston.
- Clément, P., Caravita S. (2011). *Education pour le développement durable, et compétences des élèves dans l'enseignement secondaire*. Unesco, 95 p.
- Cole, M. (1991). *On socially shared cognition*. In L.B. Resnick, J. Levine, S.D. Behrend (Eds.), *Perspectives on socially shared cognition*. Washington, DC: American Psychological Association.
- Commoner, B. (1971). *The Closing Circle*, Alfred A. Knopf Editions. New York.
- Danic, I. (2006). *La notion de représentation pour les sociologues : Premier aperçu*. ESO, 25, 29 – 32.
- Diemer, A. (2016). *Le développement durable et les économistes*. Editions Oeconomia.
- Diemer, A., Marquat C. (2015a). *L'éducation au développement durable, quels enjeux pour les ESPE ? Le printemps de la recherche, réseau ESPE, 23 mars, Paris, 10 p.*
- Diemer, A., Marquat, C. (2015b). *Regards Croisés Nord Sud sur le développement durable*. De Boeck.
- Diemer, A., Marquat, C. (2014). *L'éducation au développement durable*. Editions De Boeck.
- Diemer, A. (2013a). *L'éducation au développement durable, une affaire de représentation*. *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, 30 – 59.
- Diemer, A. (2013b). *L'éducation systémique, une réponse aux défis posés par le développement durable*. *Education relative à l'environnement*, 11, 27 – 42.
- Diemer, A. (2011). *De la représentation du développement durable à la construction de savoirs transversaux*, *Les cahiers du CERIUM*, Montréal, septembre-octobre, 1- 28.
- Doise, W., Mugny, G. (1981). *Le développement social de l'intelligence*. Paris :

InterEditions.

Fabre, M. (2014). Les éducations à : problématisation et prudence. Les cahiers du CERFE, Education et socialisation, 36.

Freire, P. (1974). La pédagogie des opprimés, Maspéro.

Fisher, G.N. (1987), Les concepts fondamentaux de la psychologie sociale. Paris, Dunod.

Girault, Y., Lange, J.M, Fortin-Debart, C., Simonneaux, L., Lebeaume, J. (2007). La formation des enseignants dans le cadre de l'éducation au développement durable : problèmes didactiques. *Éducation relative à l'environnement*, 6, 119-136.

Goffin, L. (1997). L'éducation relative à l'environnement, un défi pour le XXIème siècle. Conférence forum international Planèt' ErE, Montréal.

Goffin, L. (1992). Problématique de l'environnement. Fondation universitaire luxembourgeoise - Arlon.

Hanh Thich Nhat (2011). *Planting seeds, Practicing Mindfulness with children*. Parallax press.

Hubert, M. (1999). *Apprendre en projets*. Lyon: Chronique sociale.

Hor, K. (2014). An Advocacy Journey towards Education for Sustainable Development in Singapore. <http://www.theodyssey.sg/resources/advocacy-journey-towards-education-sustainable-development-singapore>.

Lange, J.M. (2014). Education au développement durable : intérêts et limites d'un usage scolaire des investigations multi-référentielles d'enjeux, *Cahiers du CERFEE, Education et socialisation*, 36.

Lange, J.M., Martinand, J.L. (2010). Éducation au développement durable et éducation scientifique : balises pour un curriculum. In A. HASNI & J. LEBEAUME (Eds), *Nouveaux enjeux de l'éducation scientifique et technologique : visées, contenus, compétences, pratiques* (pp. 125 -154). Presses de l'université d'Ottawa.

Lange, M.F. (2001). Dynamiques scolaires contemporaines au Sud. In M.F. Lange (Ed.), *Des écoles pour le Sud. Stratégies sociales, politiques étatiques et interventions du Nord*. Autrepart, 17, pp. 5-12.

Legardez, A., Alpe, Y. (2013). Le curriculum sournois de l'éducation au développement durable : l'exemple de l'usage de certains concepts, *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, pp. 91 - 108.

Legardez, A., Simonneaux, L. (2011). Développement durable et autres questions d'actualité. *Questions socialement vives dans l'enseignement et la formation*, Educagri.

Legardez, A. (2004). Transposition didactique et rapports aux savoirs : l'exemple des enseignements de questions économiques et sociales, socialement vives. *Revue française de pédagogie*, 149, 19 - 27.

Matagne, P. (2013). Education à l'environnement, éducation au développement durable, la double rupture. *Education et socialisation*, 33, 9 p.

Meirieu, P. (2001). Eduquer à l'environnement : pourquoi ? Comment ? Conférence, 17 p.

Meirieu P. (1987). *Apprendre ... oui, mais comment*. Paris. ESF (1999), 17^e édition.

- Or2d (2014). Quelles compétences pour favoriser le passage de l'éducation à l'environnement à l'éducation au développement durable. Rapport intermédiaire, IFADEM, décembre, 51 p. <http://www.or2d.org>
- Pavlova, M. (2007). Two pathways, one destination: TVET for a sustainable future. Background paper for the virtual Conference. UNESCO-UNEVOC, 22 octobre - 10 novembre.
- Pellaud, F. (2011). Pour une éducation au développement durable. Quae Editions.
- Piaget, J. (1937). La construction du réel chez l'enfant. Paris Delachaux et Niestlé.
- Rosnay, de J. (1977). Le macroscopie. Editions du Seuil.
- Rosnay, de J. (1991). L'écologie et la vulgarisation scientifique. Musée de la Civilisation.
- Sarabhai, K. V., Subramaniam, S.M. (2014). ESD and Biodiversity Education. Background paper for the DESD Global. Monitoring and Evaluation Report.
- Sauve, L. (1997). Pour une éducation relative à l'environnement. Montréal: Guérin Éditeur.
- Siraj-Blatchford, J. (2014). Matarajio' project: Gender equality in Kenya. <http://327sustainability.wordpress.com/2014/06/03/matarajio-project-gender-equality-in-kenya>.
- Sauve, L. (1994). Pour une éducation relative à l'environnement. ESKA, Paris.
- Simonneaux, J. (2013). Quelques postures épistémologiques pour une éducation au développement durable ?, *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, pp. 75 - 90.
- Tostan (2013). Seven Female Solar Engineers Share Knowledge at Tostan Solar Power Workshop. Dakar.
- Unesco (2018). Issues and trends in Education for Sustainable Development, Education on the move, Education 2030, Leicht A., Heiss J. and Byun W.J (Eds.), Unesco France, 271 p.
- Unesco (2014). Shaping the Future we want, UN Decade of Education for Sustainable Development (2005 - 2014). Final Report, Unesco France. Paris, ISBN 978-92-3-100053-9, 198 p.
- Unesco (2012). Education pour le développement - Bonnes pratiques en matière de biodiversité, 6, UNESCO - secteur de l'éducation. Paris. France, 112 p.
- Unesco (2009). Review of Contexts and Structures for Education for Sustainable Development, 84 p.
- Unesco (2006). L'éducation non formelle. Bureau de l'information au public, 2 p.
- Unesco (2005a). United Nations Decade of Education for Sustainable Development (2005 - 2014). International Implementation Scheme, Unesco Education Sector, ED/DESD/2005/PI/01, 31 p.
- Unesco (2005b). UN Decade of Education for Sustainable Development, 2005 - 2014. ED/2005/PEQ/ESD/3, Division for the promotion of Quality Education., 10 p.
- Unesco (2005c). Unesco and Sustainable Development, 44 p.
- Unesco (1996). Learning, a treasure within. Paris, 51 p.

United Nations (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1, 41 p.

Vogel, J. H., Alarcon, R., Saenz Garcia M., Morales, M., Lindstrom, R. (2000). *El Cartel de la biodiversidad*. CARE, Proyecto SUBIR.

Vygostky, L.S. (1934). *Pensée et langage*. Paris. Editions sociales (1985).

De l'Éducation au Développement Durable (EDD) aux Objectifs du Développement Durable (ODD), de nouvelles prescriptions pour les pays du Sud ?³³

Arnaud Diemer, Faheem Khushik, Abdourakhmane Ndiaye

Université Clermont Auvergne, CERDI, OR2D, CIFEODD

Article paru dans le numéro spécial de la *Revue Francophone du Développement Durable*,

HS n°4, décembre 2017.

Résumé : En l'espace d'une quinzaine d'années, le développement durable s'est immiscé dans toutes les stratégies nationales et les rapports de synthèse des grandes institutions internationales (OCDE, Banque Mondiale, PNUD...). Il se décline à la fois sous la forme d'une éducation au développement durable (UNESCO, décennie 2005-2014) et sous la forme d'indicateurs susceptibles de mesurer le chemin accompli. Les OMD, puis les ODD font aujourd'hui l'objet d'une attention particulière. Les Etats cherchent à atteindre par tous les moyens les cibles prescrites par les 17 ODD à l'horizon 2030, le PNUD entend aider les pays qui auraient du mal à maintenir le cap et les ONG tentent de comprendre les enjeux associés à ces nouveaux objectifs. Parmi ces ODD, l'ODD 4 Education de qualité revêt une importance de tout premier plan. Au-delà du fait que l'éducation est une variable clé du développement d'un pays, l'ODD 4 se positionne comme un facteur clé du changement, un changement plus qualitatif que quantitatif car il suppose que le développement durable (et son éducation) entraîne de véritables modifications des comportements individuels.

Mots clés : Changements climatiques, EDD, ODD, OMD, pauvreté,

En janvier 2016, les Nations-Unies ont lancé officiellement le programme 2030 pour le développement durable. Ce programme d'action, basé sur les 17 objectifs du développement durable (ODD), présentait les principaux défis à relever à l'échelle planétaire pour les 15 prochaines années. Il devait constituer « une feuille de route pour les individus et la planète, [visant à] capitaliser sur le succès des Objectifs du Millenium pour le Développement, les fameux OMD [au nombre de 8] et assurer un progrès économique et social durable à travers le monde » (Rapport Nations-Unies, Avant-propos de son secrétaire général, BAN KI i-Moon, 2016, p.c2). Contrairement aux OMD qui se présentaient comme des prescriptions du Nord au Sud, les ODD devaient permettre

³³ Une version de ce texte a été présentée au colloque international de la Faculté d'Éducation de l'Université de Montpellier « Quel(s) curriculum (a) pour les objectifs du développement durable ? », les 5 et 6 avril 2018. Nous remercions les différents participants qui ont contribué, par leurs suggestions et leurs remarques, à cette nouvelle version.

d'évaluer la situation mondiale actuelle, de fournir une vue d'ensemble via des méthodes statistiques et des indicateurs (OCDE, 2016), d'identifier les forces et les faiblesses, les contraintes et les opportunités propres à chaque pays, de coordonner les efforts de chacun en les replaçant dans un contexte mondial... Les ODD n'étaient ni incitatifs, ni contraignants (pas de pénalités pour les pays qui ne les appliquent pas), ils devaient juste s'insérer dans les politiques de développement durable des Etats et les plans d'actions à l'échelle nationale (IDDRI, 2016). Du fait de leur interdépendance, de leur complexité et de leur cadre systémique, ces ODD peuvent cependant poser un certain nombre de problèmes dans la mise en œuvre des politiques publiques, comme l'a souligné le dernier rapport des Nations-Unies (2017) : « *Ce rapport montre que le rythme de progression dans de nombreux domaines est bien plus lent que celui nécessaire pour atteindre les cibles d'ici à 2030* » (Rapport des Nations-Unies, Avant-propos de son nouveau secrétaire, Antonio Guterres, 2017, p. 2).

Dans ce qui suit, notre papier entend se focaliser sur l'objectif 4 (éducation de qualité (les anglo-saxons préfèrent utiliser l'expression *Higher Education*³⁴) tout en cherchant à l'articuler avec les autres ODD, notamment l'ODD 1 (pauvreté) et l'ODD 13 (changements climatiques). Il s'agit ainsi de :

1° Cerner l'ambition et la portée « perforatrice » des 17 ODD, en les comparant aux 8 OMD et en initiant une réflexion en matière d'éducation au développement durable (la fameuse décennie pour une éducation au développement durable, 2005 - 2015, lancée par l'UNESCO). Ce saut qualitatif doit nous permettre d'examiner les enjeux relatifs à l'objectif 4 (Education de qualité), à savoir la place de l'éducation à l'école primaire, un accès plus large et plus équitable à l'enseignement et à la formation technique et professionnelle, l'apprentissage tout au long de la vie, le mieux vivre ensemble incarné par les valeurs portées par le développement durable. Mais également d'identifier les principales représentations associées aux ODD (Ecole primaire, pays à faible revenus, régions développées, formation des adultes) ainsi que les défis en matière de politiques éducatives (processus de scolarisation, connaissances fondamentales, inégalités socio-économiques et discrimination de genre). Cet objectif sera illustré par les politiques d'EDD promues au Sénégal et au Pakistan.

2° repositionner l'ODD 4 dans des dimensions systémique et pédagogique de manière à analyser les enjeux en matière de politiques éducatives. A ce titre, nous établirons des liens avec divers ODD de manière à cerner les enjeux en matière d'éducation au développement durable, d'éducation aux changements climatiques ou encore d'éducation à la citoyenneté et à la solidarité internationale. Nos deux études de cas nous serviront ici de fil rouge. Les ODD 4 (Education de qualité) et 13 (changements

³⁴ Nous allons peut-être revivre dans les prochaines années, le feuilleton qui a alimenté maintes débats, soutenabilité ou durabilité... La notion de *Higher Education* étant beaucoup plus large que celle d'éducation de qualité.

climatiques) seront associés au cas du Sénégal tandis que les ODD 1 et 4 seront articulés dans le cas du Pakistan.

D'une manière générale, ce papier entend questionner les ODD au regard de leur pertinence et de leur opérationnalité de manière à cerner différents scénarii en matière de politiques éducatives et en matière d'éducation au développement durable.

I. Education au développement durable, quelles réalités ?

En l'espace d'une quinzaine d'années, l'éducation au développement durable est parvenue à s'imposer dans le paysage éducatif au point de générer une profusion de textes officiels – nationaux et internationaux – qui recommandent sa mise en place (Diemer, Girardin, Marquat, 2015). La résolution 57/254³⁵ adoptée par les Nations-Unis en décembre 2002, a confié à l'Unesco, la charge de diriger la Décennie des Nations Unies pour l'Éducation en vue d'un Développement Durable (DNUEDD). Dans son plan international de mise en œuvre de la DNUEDD (2005), l'UNESCO définissait l'éducation pour le développement durable en ces termes : « *L'éducation pour le développement durable consiste à intégrer dans l'enseignement et l'apprentissage les thèmes clés du développement durable, comme le changement climatique, la prévention des risques naturels, la biodiversité, la réduction de la pauvreté ou la consommation durable. Elle implique l'adoption de méthodes participatives pédagogiques visant à motiver et autonomiser les apprenants, pour qu'ils modifient leurs comportements et deviennent les acteurs du développement durable. C'est pourquoi l'éducation pour le développement durable favorise l'acquisition de compétences permettant aux apprenants de développer leur esprit critique, d'imaginer des scénarios prospectifs et de prendre des décisions communes* ». Les auteurs du rapport n'hésitaient pas alors à faire preuve de provocation en concluant que l'éducation pour le développement durable impliquait « *un changement en profondeur de l'enseignement tel qu'il est généralement pratiqué aujourd'hui* ». Parallèlement à cette initiative onusienne, la communauté scientifique s'est mobilisée pour définir, conceptualiser et poser les bases d'une éducation au développement durable (Diemer, Marquat, 2014). Nous nous proposons ici de retracer ces deux histoires afin de cerner les enjeux posés par les Objectifs du Développement Durable (ODD).

A. L'éducation au développement durable, un projet onusien

Dans les années 2000, la mise en place de « l'éducation au développement durable » dans les programmes d'enseignement du primaire, du secondaire et du supérieur s'est effectuée à plusieurs niveaux : les instances internationales (ONU, UNESCO) ont adopté une série de résolutions ; l'OCDE via sa Commission a conçu un cadre général de propositions ; les différents Etats ont mis en place des actions visant à inscrire l'EDD

³⁵ Voir également les résolutions 58/219 du 23 décembre 2003 et 59/237 du 22 décembre 2004.

dans leur stratégie nationale. Ainsi, dans la droite lignée du rapport Brundtland (1987) et de sa définition du développement durable – « *le développement durable se définit comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* », l'EDD a été conçue comme un projet politique visant à promouvoir la vision du développement durable et à mettre en évidence le rôle de l'éducation dans la transition vers celui-ci.

1. La Décennie des Nations Unies pour l'Education en vue du développement durable (DNUEDD)

La décennie des Nations Unies pour l'Education en vue du développement durable (2005 – 2014) – et son corollaire, la nouvelle feuille de route Post 2015 – a ainsi joué un rôle important dans la popularisation de cette *éducation* à dans les pays du Nord (Diemer, Marquat, 2014) comme ceux du Sud (Diemer, 2015). La DNUEDD venait parachever une série de textes (chapitre 36 d'Action 21, disposition 124) adoptés lors de la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (Rio de Janeiro, juin 1992) et le Sommet Mondial pour le développement durable (Johannesburg, septembre, 2002). L'UNESCO s'est ainsi vue confier la charge de diriger cette Décennie et d'élaborer un projet de programme d'application international. Si les termes *éducation en vue du développement durable* ou *éducation pour le développement durable* apparaissent conjointement dans le plan international de mise en œuvre de la Décennie, trois domaines font l'objet d'une attention particulière : les questions de durabilité, le rôle des valeurs et les liens entre les différentes initiatives des Nations Unies.

- L'éducation pour le développement durable doit préparer « *des gens des horizons les plus divers à prévoir, faire face et trouver des solutions aux questions qui menacent la durabilité de notre planète* » (UNESCO, 2005, p. 7). La plupart de ces questions ont été abordées lors du Sommet de la Planète Terre (Rio de Janeiro, 1992), puis redéfinies lors du Sommet Mondial pour le Développement Durable (Johannesburg, 2002). On y trouve le problème de l'accès à l'eau (source de conflits), le dossier des énergies (plus précisément la lenteur de la mise en place des énergies renouvelables), la biodiversité (définition des droits de propriété face aux activités de bio-piraterie des grands groupes pharmaceutiques dans les pays du Sud) et la santé (nombreuses populations exposées au paludisme et au sida). Dans son point 5, la *Déclaration de Johannesburg* rappelle que toutes ces questions engagent la responsabilité des Etats, s'inscrivent dans une échelle spatio-temporelle et renvoient aux trois piliers du développement durable – l'environnement, la société et l'économie : « *A ce titre, nous assumons notre responsabilité collective qui est de faire progresser au niveau local, national, régional et mondial le développement économique, le développement social et la protection de l'environnement, piliers indépendants et complémentaires du développement durable* ». Le plan d'actions – précisé par le point 11 de cette même déclaration – précise quant à lui que « *l'élimination*

de la pauvreté, l'adaptation des modes de consommation et de production, ainsi que la gestion du stock de ressources naturelles nécessaires au développement économique et social sont des objectifs primordiaux de développement durable, et en sont aussi les conditions préalables ». La sphère de la durabilité est ainsi à la fois complexe et protéiforme (la gestion des déchets se mêle à la défense des droits de l'homme, à la réduction de la pauvreté, aux migrations des population, aux changements climatiques...). Pour traiter l'ensemble de ces problématiques, il convenait de mettre en œuvre des stratégies éducatives innovantes, susceptibles d'amener des changements profonds dans les comportements des citoyens.

- Pour provoquer ce changement des mentalités et basculer dans le XXI^e siècle, les Etats devaient s'appuyer sur les valeurs qui ont forgé leur identité. Le défi de l'éducation pour le développement durable ne signifie pas faire « *table rase* » de son histoire et de sa culture, d'opposer la société traditionnelle à la techno-société, mais de comprendre ses propres valeurs, celles de la société dans laquelle nous évoluons, et celles des autres sociétés. Ce point constitue un aspect essentiel de l'éducation pour le développement durable, « *chaque nation, chaque groupe culturel et chaque individu doit acquérir les capacités de reconnaître ses propres valeurs et de les évaluer dans le contexte de la durabilité* » (Unesco, 2005, p. 8). Il est difficile de dresser une liste exhaustive des valeurs, un certain nombre d'entre elles renvoient à des idées de justice (droits de l'homme, équité, égalité), de respect (d'autrui, de la nature), à des émotions (sympathie, empathie, apathie), à des principes (participation, solidarité, précaution, responsabilité). Par ailleurs, on pourrait discuter longtemps des valeurs qu'il conviendrait d'introduire dans les programmes éducatifs. L'éducation pour le développement durable insiste surtout sur la question de la transmission des valeurs, cet héritage intergénérationnel doit nous permettre d'identifier des valeurs pertinentes localement et appropriées culturellement. Nous touchons là au 4^e pilier du développement durable, la culture.

- L'éducation pour le développement durable doit être replacée parmi les autres initiatives de l'UNESCO. Il s'agit notamment des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), de l'Education pour Tous (EPT) et de la Décennie des Nations Unies pour l'Alphabétisation (DNUA). Toutes ces initiatives accordent une large part à l'éducation de base, souhaitant à la fois l'étendre à tous les continents (notamment l'Afrique) et améliorer sa qualité.

Tableau 1 : Les programmes et objectifs de l'UNESCO

Programmes	OMD	EPT	DNUA	EDD
Objectifs	Huit objectifs 1. Eliminer l'extrême pauvreté et la faim	Six objectifs 1. Développer et améliorer sous tous leurs aspects la protection et l'éducation de la petite enfance. 2. Faire en sorte que d'ici 2015 tous les enfants, notamment les	Trois objectifs 1. mobiliser un engagement plus résolu en faveur de l'alphabétisation	4 objectifs 1. Faciliter la constitution de réseaux, les liens, les échanges et les

	<p>2. Assurer l'éducation primaire pour tous</p> <p>3. Promouvoir l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes</p> <p>4. Réduire la mortalité des enfants</p> <p>5. Améliorer la santé maternelle</p> <p>6. Combattre le VIH/Sida, le paludisme et d'autres maladies</p> <p>7. Assurer un environnement durable</p> <p>8. Mettre en place un partenariat durable pour le développement</p>	<p>filles, les enfants en difficulté et ceux appartenant à des minorités ethniques, aient la possibilité d'accéder à un enseignement primaire obligatoire et gratuit de qualité et de le suivre jusqu'à son terme.</p> <p>3. Répondre aux besoins éducatifs de tous les jeunes et de tous les adultes en assurant un accès équitable à des programmes adéquats ayant pour objet l'acquisition de connaissances ainsi que de compétences nécessaires dans la vie courante.</p> <p>4. Améliorer de 50 % les niveaux d'alphabétisation des adultes, et notamment des femmes, d'ici à 2015, et assurer à tous les adultes un accès équitable aux programmes d'éducation de base et d'éducation permanente.</p> <p>5. Éliminer les disparités entre les sexes dans l'enseignement primaire et secondaire d'ici 2005 et instaurer l'égalité dans ce domaine en 2015 en veillant notamment à assurer aux filles un accès équitable et sans restriction à une éducation de base de qualité avec les mêmes chances de réussite.</p> <p>6. Améliorer sous tous ses aspects la qualité de l'éducation dans un souci d'excellence de façon à obtenir pour tous des résultats d'apprentissage reconnus et quantifiables - notamment en ce qui concerne la lecture, l'écriture et le calcul et les compétences indispensables dans la vie courante.</p>	<p>;</p> <p>2. renforcer l'efficacité de la mise en œuvre des programmes d'alphabétisation ;</p> <p>3. mobiliser de nouvelles ressources en faveur de l'alphabétisation .</p>	<p>interactions entre les parties prenantes à l'éducation pour le développement durable ;</p> <p>2. Participer à l'amélioration de la qualité de l'enseignement et de l'apprentissage dans l'éducation pour le développement durable ;</p> <p>3. Aider les pays à faire des progrès dans la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le développement grâce à des efforts concernant l'éducation pour le développement durable ;</p> <p>4. Fournir aux pays de nouvelles possibilités d'intégrer l'éducation pour le développement durable dans leurs efforts de réforme de l'enseignement.</p>
--	--	---	---	---

L'EDD occupe une place centrale dans les initiatives de l'UNESCO, du fait qu'elle ne se limite pas au seul domaine éducatif. En effet, elle renvoie au tissu social, culturel et institutionnel de chaque pays. Elle insiste sur les valeurs et les principes véhiculés par le développement durable. Elle induit une réforme profonde des pratiques pédagogiques. Enfin, elle introduit la participation de partenaires de tout niveau (local, régional, national, international) et de toutes les sphères (gouvernements, société civile, ONG, secteur privé). Les notions de gouvernance et de parties prenantes font ainsi leur apparition, elles constituent à ce titre le 5^e pilier du développement durable. Au niveau national, les ministères de l'éducation donnent un cadre directeur à l'EDD (*éducation formelle*) et mobilisent des ressources (il s'agit notamment de fournir aux

éducateurs et aux formateurs les connaissances et les informations voulues pour mettre en pratique l'EDD) ; les ONG facilitent les échanges sur les bonnes pratiques (*éducation informelle*) ; les médias s'attachent à sensibiliser le public au développement durable et à l'EDD...

Le bilan global des actions menées lors de la décennie des nations Unies pour l'éducation au développement durable reste encore à faire, cependant les initiatives émanant des pays du Sud ont révélé quelques points clés (Unesco, 2014).

(i) *L'éducation au développement durable a stimulé l'innovation pédagogique.* Les politiques de l'éducation (comprenant la refonte des programmes) ont encouragé l'apprentissage au développement durable dans un grand nombre de pays, de l'éducation de la petite enfance jusqu'à la formation dans le secteur privé. Siraj-Blatchford (2014) évoque le cas du projet Matarajio mené dans la vallée du Rift (Kenya) et qui s'est appuyé sur l'héritage écologique de Wangari Maathai, militante écologiste et Prix Nobel de la Paix. Des enfants ont ainsi pu s'informer et échanger au sujet des problèmes environnementaux, tout en participant à diverses activités pratiques sur l'appréciation, la préservation et la gestion des forêts boisées. Ackbarally (2013) note de son côté que près de 250 000 élèves de l'enseignement primaire et secondaire de l'Ile Maurice s'initient au changement climatique et à l'environnement. Enfin, l'enseignement supérieur n'est pas en reste, le réseau régional Intégration de l'environnement et de la durabilité dans le programme de partenariat des universités africaines (MESA) rassemble près de 77 universités africaines implantées dans 32 pays d'Afrique.

(ii) *L'éducation au développement parvient à investir et à fédérer tous les niveaux et les domaines de l'éducation, notamment entre l'éducation formelle, non formelle et informelle.* Tostan (2013) a décrit le projet Solar Power, réalisé par l'ONG Tostan en Afrique et qui donne aux femmes rurales les moyens de se rendre au « Collège aux pieds nus » pour y suivre un programme de formation en ingénierie de l'énergie solaire. A leur retour, ces femmes peuvent former d'autres femmes des communautés voisines, cela démultiplie les effets du programme (58 ingénieures solaires formées) et donne à chacune d'entre elles des moyens de subsistance. Grâce à ce projet, les femmes disposent d'une source d'énergie renouvelable et elles s'imposent comme entrepreneures au sein de leur communauté, ce qui contribue à renforcer le développement à l'initiative de la communauté (452 panneaux solaires installés dans 9 villages du Sénégal).

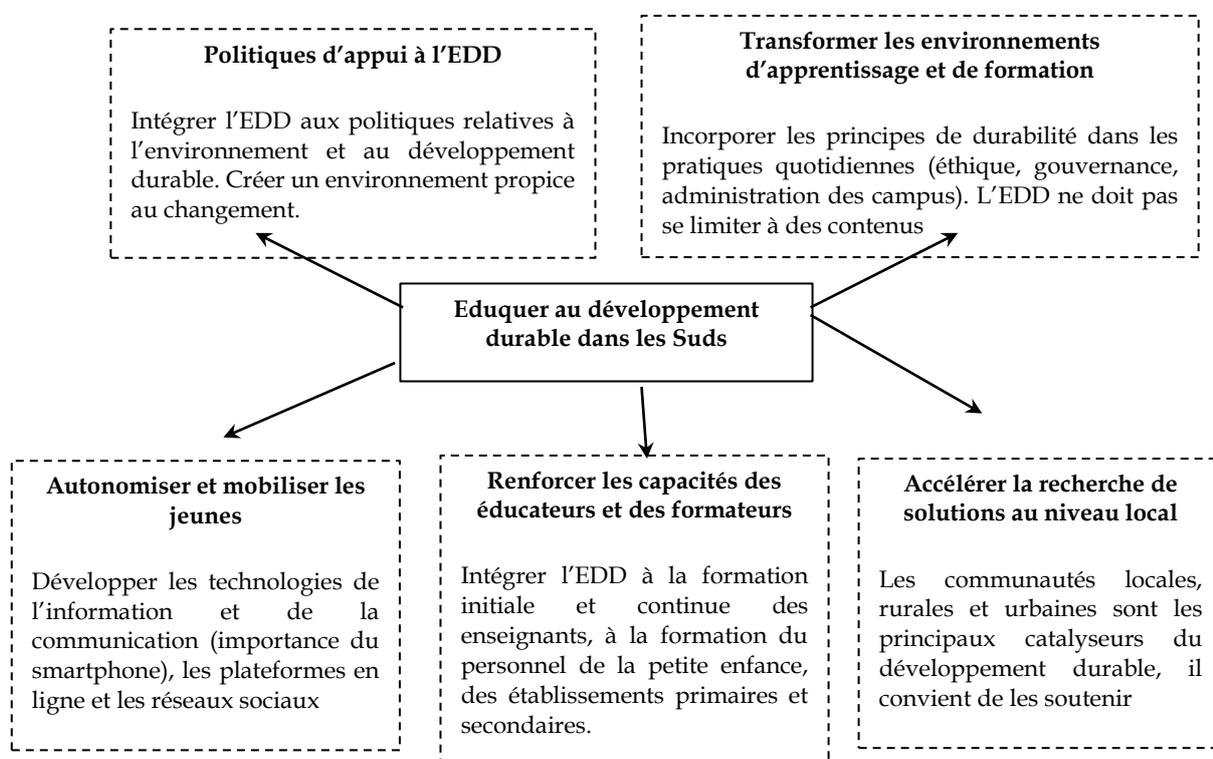
(iii) *L'éducation au développement a mis en avant le rôle des parties prenantes et des partenariats dans la mise en œuvre des programmes éducatifs.* Dans le secteur public, le Gouvernement de Mongolie et le département suisse de développement et de coopération ont signé un accord de coopération pour promouvoir l'avenir durable via l'EDD. Ce projet concerne 752 écoles, établissements de formation des enseignants et

départements de l'éducation, 500 000 enfants et 26 000 enseignants sont impliqués dans le projet (SDC, 2013).

2. La feuille de route 2015, un programme d'action globale pour l'EDD

Les enseignements de la Décennie et les défis à relever ont servi de guide au Programme d'action global pour l'EDD (résolution 37C/12). Cinq domaines d'actions prioritaires ont ainsi vu le jour : (i) des politiques d'appui de l'EDD ; (ii) une transformation des environnements d'apprentissage et de formation ; (iii) un renforcement des capacités des éducateurs et des formateurs ; (iv) l'autonomisation et la mobilisation des jeunes ; (v) accélération de la recherche de solutions durables au niveau local.

Figure 1 : Les Domaines d'actions prioritaires



Si ces 5 domaines d'actions prioritaires constituent d'une certaine manière, un appel à engagements (sur 5 ans) de toutes les parties prenantes afin de soutenir la mise en œuvre de l'éducation au développement durable à l'échelle mondiale, ils inscrivent une nouvelle fois l'EDD dans une logique des bonnes pratiques (Unesco, 2012). En d'autres termes, l'EDD reste encore descriptive et aucun cadre méthodologique ne semble proposé, même si la question des thématiques du DD, des valeurs et des compétences figure au tout premier plan.

Tableau 2 : La mise en place de l'EDD dans trois pays du Sud

	MAROC	SENEGAL	CAMEROUN
Education	Réforme en 2000 (formelle)	Loi d'orientation de l'éducation nationale de 1991 (formelle)	Loi n°98/004, politique de l'éducation de 1998 (formelle). Mais informelle pour l'EDD (place des ONG)
Approche	Approche par les compétences - apprendre à connaître - apprendre à être - apprendre à faire - apprendre à vivre ensemble - apprendre à se transformer soi-même ainsi que la société	Approche par les compétences - apprendre à connaître - apprendre à être - apprendre à faire - apprendre à vivre ensemble - apprendre à se transformer soi-même ainsi que la société	Approche par les compétences - apprendre à connaître - apprendre à être - apprendre à faire - apprendre à vivre ensemble - apprendre à se transformer soi-même ainsi que la société
Curriculum	Disciplinaire Sciences de la vie et de la terre = Environnement Sciences sociales = social et valeurs Lycée Technique : Economique	Disciplinaire Géographie (cours moyen) = compétences Géographie (cours secondaire): trois piliers du DD SVT (cours moyen) = écologie SVT (cours secondaire) - durabilité	L'EDD est inscrite dans les programmes de l'enseignement primaire (éducation à la citoyenneté, à la santé, aux droits de l'homme, à l'environnement). L'EDD a pris du retard dans le secondaire
Articulation entre les disciplines	Aucune, pas de coordination entre les enseignants	Collaboration interdisciplinaire recommandée mais reprise dans aucun programme	Interdisciplinaire notamment dans les écoles primaires : recherche de solutions à des défis environnementaux

Source : Unesco (2011), Diemer (2015)

B. L'éducation au développement durable, un cadre théorique ?

Il est difficile d'imaginer un modèle universel d'éducation au développement durable, chaque pays devant définir ses objectifs, ses priorités, son programme d'actions et leur mode d'évaluation. Les conditions économiques, environnementales, sociales, religieuses et culturelles sont telles que l'EDD peut prendre différentes formes. Il est néanmoins possible de préciser les caractéristiques essentielles d'une éducation au développement durable et de préciser les contours de son cadre théorique. D'une manière générale, l'EDD est une problématique complexe et la manière dont elle est mise en œuvre constitue un véritable défi pour tous les pays. Dans ce qui suit, nous souhaiterions poser le cadre méthodologique de l'EDD (Diemer, Girardin, Marquat, 2015)

1. L'EDD et le courant des éducations à

Depuis quelques années, les *éducations à...* ont fait leur entrée dans notre système éducatif³⁶. Ce phénomène a pris une telle ampleur – en France comme en Europe – que la liste ne cesse de s’allonger (éducation à l’environnement, éducation aux médias, éducation à la santé, éducation à la biodiversité, éducation aux changements climatiques...) au gré des incursions dans l’inter ou la transdisciplinarité. Comment expliquer un tel engouement ? S’agit-il d’un phénomène de mode ou faut-il y voir une réelle volonté de transformer notre système éducatif ? Lebeaume (2004), Lange et Victor (2006), Simonneaux (2006), Legardez et Alpe (2013), Lange (2015) n’hésitent pas à opposer ces *éducations à* aux enseignements traditionnels. A la différence de ces derniers qui renvoient à des contenus disciplinaires cloisonnés (les savoirs scientifiques y sont stabilisés) et placent l’enseignant au cœur de la transmission des connaissances, les *éducations à* s’appuient sur les savoirs des différents acteurs de l’éducation formelle-informelle, se proposent de construire un modèle de compétences sociales et éthiques, ont recours à une approche transdisciplinaire (Diemer, 2014) et ambitionnent une pédagogie critique et engagée dans l’action (Diemer, Marquat, 2014 ; Diemer, 2015). Legardez et Alpe (2013) ont précisé les quatre traits importants dans cette prise de distance avec l’enseignement classique : leur caractère thématique, non disciplinaire et « transversal » (selon la terminologie du Ministère de l’Education Nationale); leur relation étroite avec des questions socialement vives ; la place importante qu’elles accordent aux valeurs ; et leur objectif de faire évoluer les comportements, pour préparer à l’action.

Cette floraison des *éducations à*³⁷ interpelle notre rapport à l’enseignement et à l’éducation³⁸, elle constitue un réel défi pour les institutions chargées de la formation des enseignants. L’éducation pour le développement durable impliquerait ni plus ni moins un changement en profondeur de l’enseignement tel qu’il est généralement pratiqué aujourd’hui.

³⁶ Fabre (2014) fait remonter la prolifération des *Educations à* la circulaire Fontanet (1973) instituant l’obligation d’une information et éducation sexuelle à l’école.

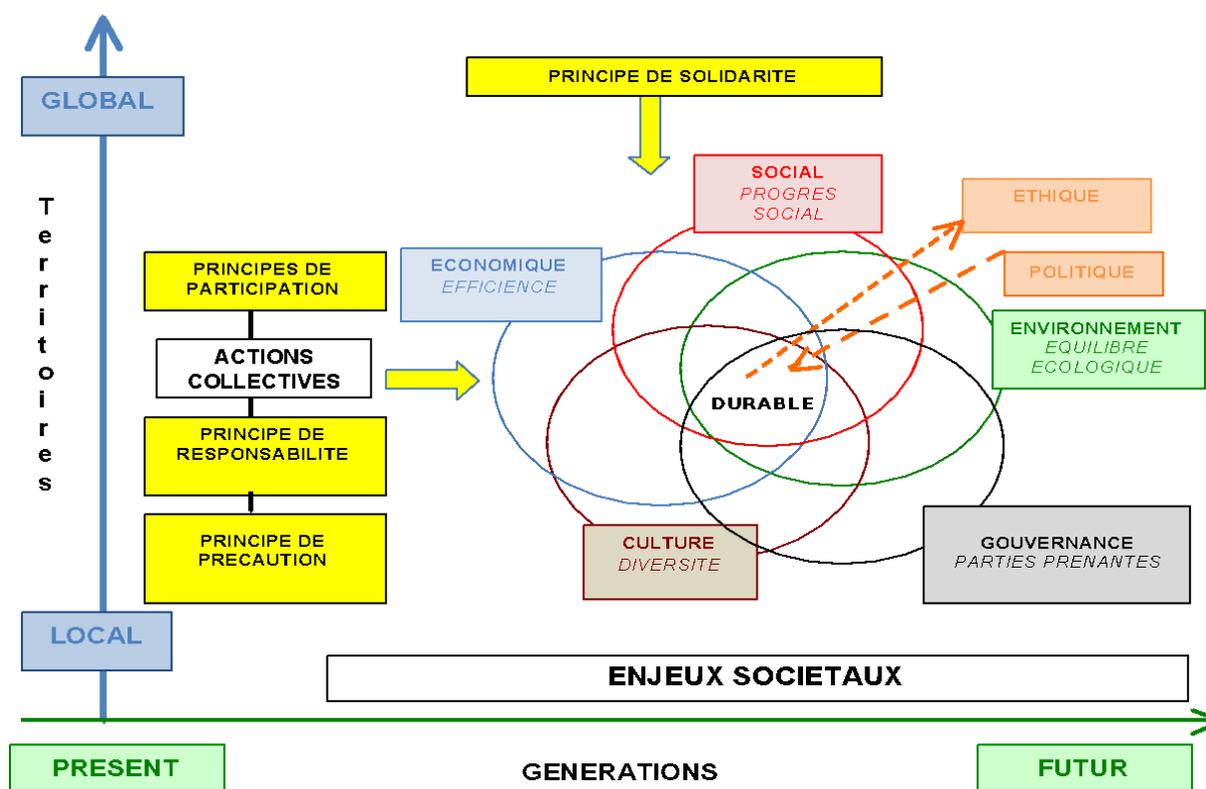
³⁷ Pour Fabre (2014), les nombreuses recherches sur les «*Éducations à*» s’orienteraient dans quatre directions a) celle de l’approche curriculaire analysant la mise en place et le développement de ces nouvelles perspectives dans les textes officiels ou les programmes et interrogeant leurs enjeux pour l’école ; celle de l’analyse des pratiques d’enseignement, mettant en évidence l’inventivité des enseignants, mais également les difficultés qu’ils éprouvent ; c) celle des approches didactiques analysant la teneur des savoirs enseignés, les modalités possibles de ces enseignements, les représentations des formateurs; d) celle enfin des approches à la fois épistémologiques et éthiques questionnant le contexte socio-historique d’apparition de ces «*Éducations à*» la nature de ces nouveaux objets et la posture professionnelle qui doit être celle de l’enseignant dans ces situations d’enseignement difficiles ».

³⁸ Selon le Larousse, *Enseigner*, c’est faire apprendre une science, un art, une discipline à quelqu’un, le lui expliquer en lui donnant des cours, des leçons. C’est transmettre un savoir de type scolaire ou non. Rendre compétent dans un domaine déterminé. *Eduquer*, c’est former quelqu’un en développant et en épanouissant sa personnalité. Développer une aptitude par des exercices appropriés. Développer chez quelqu’un certaines aptitudes, certaines connaissances, une forme de culture (voir Pellaud, 2013).

2. L'EDD, un cadre conceptuel

L'EDD renvoie à un cadre conceptuel (Diemer, 2013) caractérisé par des enjeux de société (on parle également de questions socialement vives) ; une initiation à la pensée complexe et l'analyse systémique ; une approche transdisciplinaire ; des piliers du développement durable (au nombre de 5 : environnemental, social, culturel, économique, gouvernance) ; des échelles spatio-temporelles ; un système de valeurs et de grands principes (responsabilité, précaution, participation, solidarité).

Figure 2 : Penser l'éducation au développement durable



Source : Diemer (2011, 2012, 2013)

(i) L'EDD renvoie à des enjeux de société dont la liste ne cesse de s'élargir (biodiversité, changement climatique, énergie, eau, modes de production et de consommation, alimentation, droits de la personne, santé humaine, gouvernance, urbanisation, mobilité durable...). L'EDD est intégrée à de nombreux cadres et conventions de portée mondiale : article 6 « *Education, formation et sensibilisation du public* » de la convention cadre de Nations Unies sur les changements climatiques (1992) ; article 13 « *Education et sensibilisation du public* », de la convention sur la diversité biologique ; point 18 « *Education et formation* » du cadre d'action de Hyogo 2005 - 2015 pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes ; programme « modes de

vie et éducation durable » du cadre décennal de programmation concernant les modes de consommation et de production durables 2012 – 2021.

(ii) L'EDD nous invite à une initiation à la pensée complexe et à l'analyse systémique. Une situation complexe impose la nécessité d'une vision globale du contexte, ce qui revient à considérer tous les facteurs impliqués dans le problème traité, tout en insérant ce problème dans un cadre plus large (Morin, 2005). La complexité introduit les notions d'interactions, d'interférence et d'incertitude... Elle suppose le recours à l'analyse systémique qui se concentre sur les éléments en interaction (boucles de rétroaction) et les processus irréversibles.

(iii) L'EDD suppose une approche transdisciplinaire. L'éducation au développement durable se nourrit de l'explosion de la recherche disciplinaire (importance des savoirs fondamentaux relatifs au développement durable), prône l'ouverture entre les disciplines (interdisciplinarité) et recherche à rassembler les savoirs au-delà des disciplines (transdisciplinarité). La transdisciplinarité se situe à la fois entre les disciplines, à travers les disciplines et au-delà des disciplines (Nicolescu, 1996). Elle est censée construire ses propres contenus et méthodes afin de saisir une réalité multidimensionnelle, structurée à de multiples niveaux (Piaget, 1972).

(iv) L'EDD repose sur un ensemble de 5 piliers du développement durable. Aux trois piliers bien connus du Rapport Brundtland (environnemental, social et économique), il convient d'ajouter le pilier culturel et celui de la gouvernance. La culture – et plus précisément la diversité culturelle (Unesco, 2001, 2005) joue un rôle important dans la compréhension, l'acceptation et la diffusion du développement durable. Il faut entendre ici la nécessité d'appliquer un modèle éducatif respectueux des cultures, afin que les populations locales puissent à la fois se l'approprier et contribuer à son enrichissement. La gouvernance introduit la notion de parties prenantes (Freeman, 1984). Elle réhabilite l'intentionnalité (compétence à agir) et les justifications des acteurs dans une détermination réciproque du faire et du dire (Boidin & al., 2014).

(v) L'EDD s'inscrit dans des échelles spatio-temporelles. Le temps introduit l'effet générationnel (c'est la définition du rapport Brundtland) mais également un regard sur le passé (refus de l'oubli) et le futur (démarche prospective, scénario). L'espace doit articuler le niveau global et le niveau local en s'appuyant sur le principe de subsidiarité (ce point est particulièrement important lorsque l'on parle des territoires et de la valorisation des savoirs autochtones).

(vi) Enfin, l'EDD repose sur un système de valeurs et de grands principes (durabilité). Ces valeurs (respect de l'environnement, empathie, respect d'autrui, estime de soi...) doivent permettre d'émanciper les individus, de former des citoyens responsables (éducation à l'éco-citoyenneté) et capables de se projeter dans l'avenir, de s'impliquer dans un véritable projet de société, de comprendre toute la complexité des facteurs socioéconomiques, écologiques, culturels et éthiques qui déterminent toute la

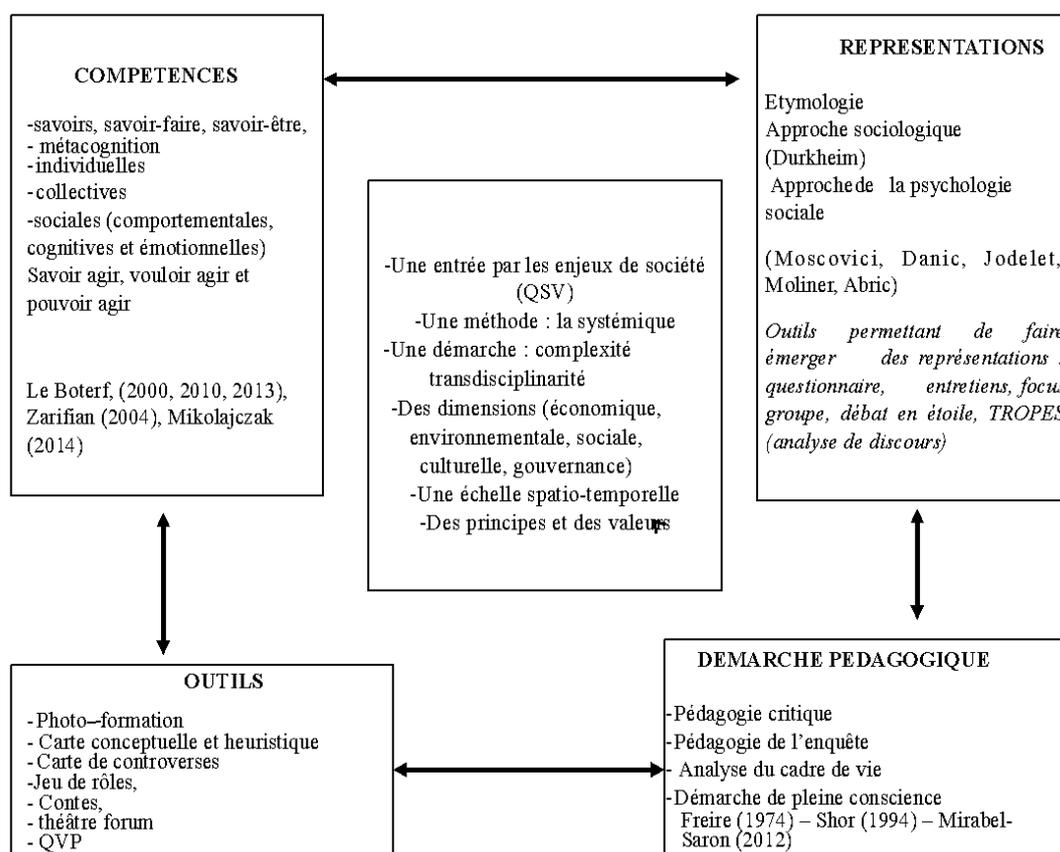
durabilité du développement (Unesco, 2009). Des principes tels que la responsabilité, la solidarité, la précaution, la participation définissent aujourd’hui la philosophie du développement durable.

Fort de ce cadre conceptuel, il est possible de proposer un cadre méthodologique visant à inscrire l’EDD dans un processus d’apprentissage.

3. L’EDD, un cadre méthodologique

Dans ce qui suit, nous avons cherché à identifier un cadre méthodologique pour l’éducation au développement durable. Ce cadre a été associé à un modèle baptisé REDOC pour REprésentations, Démarche pédagogique, Outils et Compétences (Diemer, Marquat, Bigohe, 2014 ; Diemer, Kerneis, Marquat, 2014 ; Diemer, 2015 ; Diemer, 2017).

Figure 3 : Le modèle REDOC



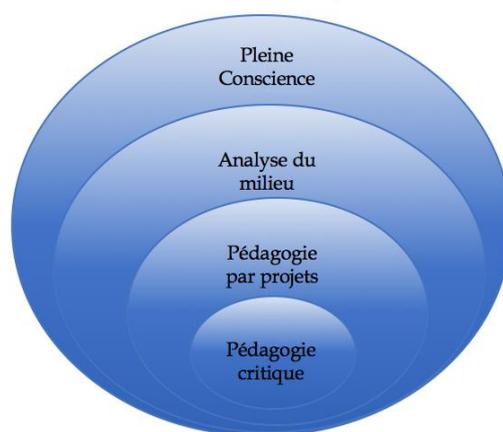
Source : Diemer, Marquat, Bigohe (2014)

- La question des représentations constitue la première étape du modèle. Il s’agit de faire émerger les représentations du développement durable des enseignants, des élèves et des citoyens en utilisant différentes techniques tels que les questionnaires, les entretiens, les focus group ou encore l’analyse de discours proposé par des logiciels

tels que TROPES. La notion de représentation désigne les éléments mentaux qui se forment par nos actions et qui informent nos actes. Elle se caractérise par un processus de construction et de fonctionnement distinct d'autres manières de penser (Danic, 2006). La notion de représentation (sociale) regroupe ainsi un certain nombre de traits tels que la symbolique, l'imaginaire, la cognition, l'action et l'interaction... : « *La représentation sociale est un processus d'élaboration perceptive et mentale de la réalité qui transforme les objets sociaux (personnes, contextes, situations) en catégories symboliques (valeurs, croyances, idéologies) et leur confère un statut cognitif permettant d'appréhender les aspects de la vie ordinaire par un recadrage de nos propres conduites à l'intérieur des interactions sociales* » (Fischer, 1987, p. 118).

- La démarche pédagogique constitue la deuxième étape du modèle. Un large consensus se dégage pour fonder les pratiques pédagogiques de l'éducation au développement durable sur la construction active par l'enseignant de ses propres compétences (Vygotsky, 1934 ; Piaget, 1937 ; Meirieu, 1987, Astolfi, 1997...). Le socio-constructivisme constitue un cadre théorique pertinent pour étudier l'EDD (Doise et Mugny, 1981 ; Cole, 1991). Chaque enseignant construit ses propres connaissances, ses savoirs faire, ses attitudes et ses valeurs dans un contexte socialisé (famille, village, amis, collègues de travail, conditions de travail, pression sociale...). L'EDD nous invite à porter une attention particulière aux contextes culturels et éducationnels dans les processus cognitifs. C'est ce souci du « penser global, agir local » qui nous a poussé à privilégier les quatre modalités pédagogiques suivantes (Diemer, Claveau, Marquat, Montéro, 2016) pour aborder l'éducation au développement durable : la pédagogie critique (Freire, 1974), la pédagogie par projet (Hubert, 1999), l'exploration du milieu de vie (Sauve, 1997) et la pleine conscience (Hant Thich Nhat, 2011)

Figure 4 : Démarches interactives et complémentaires en éducation au développement durable



Source : Claveau, Diemer, Montero, Pellaud (2016)

- L'utilisation et la conception d'outils didactiques constituent la troisième étape du modèle. L'EDD utilise des outils novateurs qui mettent les enseignants en interaction avec leurs élèves... Le photoformation, le récit (conte), la bande dessinée, la pratique

du théâtre forum, l'objet débat ou encore la réalisation de cartes (conceptuelle, heuristique ou de controverses) sont des outils interactifs qui permettent (i) de recueillir les représentations des apprenants (il s'agissait à la fois de libérer la parole et de faciliter les échanges au cours de séances de focus group), (ii) d'identifier les outils qui entrent en résonance avec des pratiques locales et (iii) d'analyser les possibilités d'intégration des outils dans une phase d'accompagnement des apprenants en éducation au développement durable.

- La dernière étape du modèle REDOC évoque une question fondamentale en éducation au développement durable, celle des compétences³⁹. Plusieurs des compétences visées par l'EDD sont issues du cadre des compétences clés pour l'éducation, à savoir : agir de façon autonome, interagir avec son environnement, interagir efficacement avec les autres... Le travail de l'UNESCO sur les compétences s'appuie sur le rapport *Learning : the Treasure Within* (1996), on y retrouve les piliers suivants : (i) apprendre à savoir, (ii) apprendre à faire, (iii) apprendre à être, (iv) apprendre à vivre ensemble, (v) apprendre à se transformer soi-même ainsi que la société. Bien entendu, chaque pays cherchera à privilégier dans son système éducatif les compétences cohérentes avec les spécificités culturelles, sociales, environnementales et économiques. Il y a cependant des compétences qui sont liées aux objectifs et aux modalités pédagogiques de l'EDD : *l'analyse critique* (capacité à poser des questions, à chercher des réponses, à débattre, à choisir, à argumenter...), *la réflexion systémique* (capacité à analyser et comprendre des situations complexes, à accepter plusieurs points de vue et des solutions partielles...), *la démarche transdisciplinaire* (capacité à mobiliser plusieurs domaines de connaissances, savoir les mettre en lien et les discuter...), *la prise de décisions collaboratives* (savoir construire collectivement une solution optimale pour tous, faire converger les parties prenantes, faire émerger une vision commune d'un projet...), *le sens des responsabilités* (agir de manière responsable, capacité à assumer ses responsabilités et à prendre en charge des missions...). Notons que dans toutes ces compétences, il y a à la fois interaction entre les connaissances mobilisées, les attitudes et les valeurs.

4. *L'EDD, une affaire de bonnes pratiques et d'actions de terrain*

Au-delà de la question purement théorique, il convient de rappeler que l'éducation au développement durable renvoie à la fois à des bonnes pratiques (programmes UNESCO) et des actions de terrain. Les projets d'EDD mettent l'accent sur un certain nombre de critères tels que les besoins des populations ; la prise en compte des valeurs (culturelles et universelles) partagées ; la présence de partenariats issus du tissu social et local ; le développement et la diffusion de l'information et la communication via des

³⁹ Nous retrouvons ici une dimension forte de l'EDD, à savoir son positionnement sur le triangle Connaissances - Compétences - Attitudes.

réseaux... Ils mettent l'accent sur un point fondamental de l'éducation au développement durable : la démarche réflexive. C'est une composante essentielle pour arriver à développer les compétences conduisant à l'autonomie et à la responsabilité. La réflexivité est « *l'aptitude du sujet à envisager sa propre activité pour en analyser la genèse, les procédés ou les conséquences, autrement dit la pratique de la réflexivité constitue la possibilité qu'a tout acteur social d'examiner sa situation et son action* » (Bertucci, 2009).

Cette pratique permet d'avancer en jetant un regard régulièrement derrière soi, en se posant les questions telles que : la démarche répond-elle aux objectifs fixés ? Est-elle efficace ? Permet-elle d'associer la communauté d'acteurs ? Quelles en sont les conséquences repérables ?

C. L'Éducation au développement durable au Pakistan et au Sénégal

Si l'éducation au développement durable - via les programmes de l'Unesco - s'est largement répandue dans les pays du Nord et du Sud, les programmes nationaux n'ont pas toujours fait de l'EDD, une priorité en matière de politique d'éducation. En effet, la formation des enseignants reste une variable clé pour la mise en place de l'EDD, et par conséquent, en l'absence d'une réelle volonté des établissements de formation des enseignants d'intégrer l'EDD dans les programmes de formation initiale, peu de progrès ont réellement été réalisés...

C'est le cas notamment du Pakistan qui a vu la mise en place d'initiatives dispersées telles que le Réseau des Ecoles Associées de l'UNESCO (ASPnet), de cours sur l'EDD dans le cadre de programmes de master (Sciences de l'éducation), de la participation spontanée de quelques universités (exemple de l'université de Punjab) au Réseau International des Etablissements de Formation des Enseignants. Plus de soixante écoles faisant partie de l'ASPnet ont développé des programmes d'éducation à la paix et au développement durable afin de partager des connaissances contextualisées sur le respect et la diversité culturelle avec les enseignants, les élèves, les parents et l'ensemble de la communauté. Une initiative pédagogique concernant l'EDD a été proposée par the Institute of Education, Lahore College for Women University (Kalsoom & Khanam, 2017). Ce programme avait pour objectif de sensibiliser les enseignants en formation initiale aux concepts de développement durable (DD) et d'éducation au développement durable (EDD) afin de renforcer leur prise de conscience de la notion de durabilité. Dans le cadre de cette initiative, les enseignants de premier cycle en formation initiale ont réalisé des travaux au niveau local et d'une durée de 11 semaines. Ces travaux comprenaient des enquêtes de terrain sur des questions de durabilité (effet du contexte socio-économique sur l'éducation, défis auxquels sont confrontées les étudiantes dans l'enseignement supérieur, conscience environnementale des enseignants en formation initiale, culture des instituts de formation des enseignants).

Bien qu'il existe des efforts individuels ou institutionnels liés à la mise en œuvre de l'EDD dans la formation des enseignants, l'EDD fait timidement son entrée dans la politique d'éducation du Pakistan. L'analyse de différents documents tels que la politique d'éducation (gouvernement du Pakistan, 2009), les plans provinciaux du secteur de l'éducation (gouvernement du Baloutchistan, 2013, gouvernement du Punjab, 2013-2017), le curriculum du programme *B. Ed Honours* (Higher Education Commission, 2012) ou encore les normes professionnelles nationales pour les enseignants (Ministère de l'Éducation, 2009), ne font pas apparaître l'éducation pour le développement durable comme une priorité nationale. Cette quasi-absence de l'EDD dans les dispositifs nationaux contraste avec les initiatives qui sont prises sur d'autres sujets. Ainsi, l'éducation environnementale, l'économie, les droits de la personne et la citoyenneté ont été inclus dans le programme d'études du *B. Ed* (avec distinction). La responsabilité civique, la cohésion sociale et la tolérance sont mentionnées dans la politique d'éducation nationale, le plan sectoriel d'éducation et les normes professionnelles nationales.

Selon Kalsoom, Qureshi et Khanam (2018), cette faible importance accordée à l'EDD a généré deux types de problèmes : (i) les connaissances des enseignants en formation initiale sur les questions de durabilité et leurs attitudes et comportements à l'égard de la durabilité ne sont pas à la hauteur des attentes ; (ii) l'absence de recherches sur les questions liées à l'EDD. Sur ce dernier point, Kalsoom, Qureshi et Khanam (2018) ont analysé une base de données concernant les articles en matière d'EDD écrits par des auteurs pakistanais. Les bases de données consultées étaient Springer, Taylor et Francis, ainsi que quatre revues nationales sur l'éducation. Ils ont trouvé plus de 2 500 articles sur l'EDD, mais aucune étude empirique sur l'EDD n'a été réalisée par des auteurs pakistanais. Ils ont analysé 353 articles qui ont été publiés dans des revues nationales de 2004 à 2016 et concluent qu'aucun article n'avait été publié sur l'EDD. Ainsi, les chercheurs pakistanais sembleraient peu ou pas exposer aux recherches liées aux concepts de développement durable et d'éducation au développement durable.

Le cas du Sénégal contraste avec celui du Pakistan, son engagement dans la prise en compte de la protection de l'environnement et des ressources naturelles est attestée, d'une part, par son adhésion à la plupart des traités et conventions internationaux sur l'environnement, et d'autre part, par l'adoption déjà en 1983 de la première loi sur l'environnement. Il s'agit de la loi n° 83-05 du 28 Janvier 1983. Les préoccupations environnementales se complexifiant, le Sénégal a tenté de s'adapter par une relecture de l'environnement juridique en adoptant en 2000 un nouveau code de l'environnement : Loi n° 2001 - 01 du 15 Janvier 2001. Dans ce texte il apparaît clairement une volonté nationale de faire de l'éducation un levier, un moyen pour prendre en charge les défis environnementaux.

En effet, l'article L 7 dudit code stipule clairement : « L'Etat garantit à l'ensemble des citoyens le droit à une éducation environnementale. Dans ce cadre, les institutions publiques et privées ayant en charge l'enseignement, la recherche ou la communication se doivent de participer à l'éducation, à la formation et à la sensibilisation des populations aux problèmes d'environnement : en intégrant dans leurs activités des programmes permettant d'assurer une meilleure connaissance de l'environnement ; en favorisant le renforcement des capacités des acteurs environnementaux ».

Au lendemain de la Conférence de Paris et du lancement des Objectifs du Développement Durable (ODD), le Sénégal a lancé un projet de loi constitutionnel, en avril 2016, en vue de réitérer son engagement et sa volonté de poursuivre son développement économique en se souciant de l'environnement, tout en faisant de l'éducation le pilier de cette stratégie. Le 13/06/2016, à la suite d'un Référendum, le Sénégal a inscrit pour la première fois le concept de développement durable dans sa constitution, comme nous pouvons le constater dans les articles ci-dessous,

Art. 3. - Il est ajouté, après l'article 25 de la Constitution, un article 25-1, un article 25-2 et un article 25-3 ainsi rédigés :

« **Article 25-1.** - Les ressources naturelles appartiennent au peuple. Elles sont utilisées pour l'amélioration de ses conditions de vie.

L'exploitation et la gestion des ressources naturelles doivent se faire dans la transparence et de façon à générer une croissance économique, à promouvoir le bien-être de la population en général et à être écologiquement durables ».

« **Article 25-2.** - Chacun a droit à un environnement sain.

La défense, la préservation et l'amélioration de l'environnement incombent aux pouvoirs publics. Les pouvoirs publics ont l'obligation de préserver, de restaurer les processus écologiques essentiels, de pourvoir à la gestion responsable des espèces et des écosystèmes, de préserver la diversité et l'intégrité du patrimoine génétique, d'exiger l'évaluation environnementale pour les plans, projets ou programmes, de promouvoir l'éducation environnementale et d'assurer la protection des populations dans l'élaboration et la mise en œuvre des projets et programmes dont les impacts sociaux et environnementaux sont significatifs ».

« **Article 25-3(...)** Tout citoyen a le devoir de préserver les ressources naturelles et l'environnement du pays et d'œuvrer pour le développement durable au profit des générations présentes et futures ».

Le souci de passer par l'école pour apporter des solutions aux problèmes environnementaux et au-delà, d'aller vers un développement durable, est bien réel.

Déjà en 2000, le Sénégal accueillait le Forum mondial sur l'éducation. Le Cadre de Dakar est l'expression collective de la communauté internationale à agir pour réaliser de façon durable les buts et objectifs de l'éducation universelle pour tous.

Au plan sectoriel, le Ministère de l'environnement a mis en place la CEFE : la Cellule d'Education et de Formation à l'Environnement. Elle est la suite logique du programme de formation pour l'environnement (PFIE), volet relatif à l'enseignement primaire du programme sahélien d'éducation (PSE), financé par l'Union européenne au titre des aides non remboursables pour la décennie 1990-2000. La même année, le ministère de l'éducation nationale a lancé le PDEF, Programme de Développement de l'Education et de la Formation. En 2005, il s'en est d'ailleurs suivi une refonte des programmes à travers l'approche par les compétences où l'environnement et le développement durable sont présents⁴⁰. C'est aussi la période de la décennie des Nations Unies pour le développement durable, où le Sénégal s'est fortement engagé au côté de l'Unesco, chef de fil de ce mouvement.

Le guide pédagogique sénégalais à destination de l'enseignement élémentaire a intégré l'éducation au développement durable dans le curriculum de l'éducation de base (Ministère de l'éducation nationale, 2015). C'est un sous-domaine (au même titre que la découverte du monde) du domaine *Education à la science et à la vie sociale*, subdivisé en deux composantes : vivre dans son milieu et vivre ensemble. Le guide insiste sur la compétence interdisciplinaire, cette dernière vise « à intégrer les notions de base, des mesures préventives, des techniques d'observation et de bonnes habitudes comportementales dans des situations de relations humaines et de propositions de solutions pratiques à des problèmes liés au cadre et aux conditions de vie du milieu immédiat » (2015, p. 316). La démarche pédagogique est centrée autour de 4 paliers interdisciplinaires (palier 1 : adapter la compétence interdisciplinaire aux problèmes de maladies et d'hygiène) et de 4 situations d'intégration de ces mêmes paliers (situation d'intégration du palier 1 : apprentissages ponctuels et apprentissage de l'intégration).

Le sous-domaine « *vivre dans son milieu* » est décomposé en *compétences de base et critères* (pertinence, justesse, exhaustivité, conformité, faisabilité), *appropriation de la compétence* (sens, composantes). Il s'agit concrètement d'entraîner les élèves à observer leur milieu, à identifier les problèmes qui s'y posent et à proposer des solutions justes. La compétence émerge dans les situations où les élèves proposent des solutions appropriées aux problèmes du milieu immédiat.

Le sous-domaine « *vivre ensemble* » reprend cette même dichotomie, toutefois il s'agit de familiariser les élèves au fait d'être attentifs aux problèmes qui naissent des relations humaines au sein de leur entourage (cercle d'amis, camarades de classes,

⁴⁰ Le rôle des organisations non gouvernementales (ONG) fût non négligeable, elles foisonnent dans ce domaine et viennent en appui de l'Etat. Les actions initiées entrent dans le cadre de la préservation des ressources naturelles (GTZ, Peace Corps, Oceanium etc.) mais aussi dans la tâche de formation pour asseoir une conscience citoyenne écologique au niveau surtout scolaire. A ce titre, des acteurs comme Globe, lancé depuis 1995 au Sénégal, COSAPER, le Comité des Educateurs et Educatrices sénégalais pour l'éducation à l'environnement ou encore Aide et Action ont joué un rôle très important, et multiplié les actions de sensibilisation des jeunes aux défis de l'environnement.

jeux) et de proposer des solutions justes. Il s'agit également de promouvoir de bons comportements à l'égard d'autrui (parents, adultes, aînés, amis, camarades). La compétence se manifeste dans des situations où l'élève adopte ou propose de bons comportements.

II. Quand le développement durable interagit avec l'éducation au développement durable, les relations ODD - EDD

Si l'UNESCO est aujourd'hui associée à l'éducation au développement durable (EDD), il convient de rappeler que les origines de cette dernière remontent au début des années 70 avec la Conférence de Stockholm et la popularisation du concept d'écodéveloppement (Diemer, 2015 ; Berr et Diemer, 2016)). Toutefois, l'EDD n'acquiert ses véritables lettres de noblesse qu'à la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (CNUED), plus connue sous le nom de Sommet de la Terre (Rio de Janeiro, 1992). A l'issue des diverses négociations, la CNUED a publié, l'agenda 21, qui propose un plan d'actions détaillé aux niveaux mondial, national et local pour les organismes des Nations Unies, les gouvernements, les grandes organisations non gouvernementales et de la société civile, et les réseaux pour réduire les effets de l'activité humaine (Unesco, 2009, p. 7). A la suite de la publication de cet agenda 21, un certain nombre d'institutions internationales se sont engagées dans la voie du développement durable et de son éducation.

Depuis 2005, l'OCDE propose un ensemble de travaux menés dans les six grands domaines thématiques suivants : consommation et production durables, changement climatique et développement durable, échanges et investissements étrangers durables, réforme des subventions et développement durable, éducation au service du développement durable, environnement et santé. D'un point de vue organisationnel, l'OCDE s'est dotée d'un outil, le RAEDD (Réunion annuelle d'experts du développement durable), qui a pour objectifs « *d'encourager l'intégration de la problématique du développement durable dans les activités des comités de l'OCDE, de faire connaître les pratiques exemplaires des pays membres de l'OCDE en matière de stratégies de développement durable et de nouer le dialogue avec des pays non membres* » (OCDE, 2011, p. 4). Concernant plus précisément la thématique de l'éducation au service du développement durable, l'OCDE s'est attachée « *à évaluer les connaissances qu'ont les apprenants des problématiques environnementales, à cerner l'influence de l'éducation sur les comportements et à déterminer les conditions nécessaires à la mise en place des environnements pédagogiques idoines* » (OCDE, 2011, p. 66). Le comité des politiques d'éducation (CPE) supervise l'orientation générale des travaux sur l'éducation au service du développement durable. Ces derniers sont centrés sur les installations scolaires durables, les environnements pédagogiques novateurs, le rôle de l'enseignement supérieur dans le développement durable, la compréhension de préoccupations

environnementales par les apprenants et l'impact qu'elles ont sur eux, ainsi que l'amélioration des retombées sociales par l'éducation.

Différents organes et groupes de travail sont venus alimenter la réflexion en matière d'EDD.

- Le centre pour les environnements pédagogiques efficaces (CELE) s'est concentré sur l'environnement matériel d'apprentissage en étudiant les moyens de mettre en place des équipements éducatifs durables, le rapport coûts avantages de tels équipements et en quoi ils soutiennent les activités d'enseignement et d'apprentissage.

- Le programme sur la gestion des établissements d'enseignement supérieur (IMHE) s'est occupé d'un projet sur l'enseignement supérieur et le développement des villes/espaces régionaux. Il s'agit notamment d'examiner la contribution de la recherche des établissements d'enseignement supérieur (ESE) à l'innovation régionale ; le rôle de l'enseignement et de l'apprentissage dans le développement du capital humain et des compétences ; la contribution de l'ESE au développement social, culturel et environnemental ; le rôle des EES dans le renforcement des capacités régionales pour agir dans une économie mondiale de plus en plus compétitive (OCDE, 2009). Le rapport *Higher Education for Sustainable Development* (2010) a présenté les résultats d'une étude internationale sur la façon dont les établissements d'enseignement supérieur abordaient le développement durable.

- Le programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) a cherché à évaluer au plan international des jeunes âgés de 15 ans inscrits dans un établissement d'enseignement. L'évaluation réalisée en 2006 a servi de base au rapport *Green at Fifteen ? How 15 years Olds perform in environmental science and geoscience in Pisa 2009*. Ce dernier présente une analyse et des informations sur les facteurs de sensibilisation de élèves aux sciences de l'environnement, sur leur attitude à l'égard de l'environnement et sur la corrélation entre cette attitude et les résultats en sciences de l'environnement. En conclusion, le rapport fait observer que les systèmes éducatifs doivent améliorer leurs performances pour faire en sorte que, dans tous les secteurs de la société, les futurs citoyens puissent exploiter leur potentiel de compréhension des questions environnementales.

- L'OCDE a mis en place en 2008, un atelier sur l'éducation au service du développement durable. Ce programme horizontal sur le développement durable a été organisé en coopération avec la Direction de l'éducation et la Division chargée de la politique à l'égard des consommateurs et de la Direction de la Science, de la technologie et de l'industrie. Il a permis de répertorier et de diffuser largement auprès des organisations et des pays les bonnes pratiques concernant les stratégies nationales, les programmes d'enseignement, les pratiques des établissements scolaires en matière d'éducation au service du développement durable (éducation et sensibilisation à la consommation et à la production durables).

- Le Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) a lancé un projet destiné à étudier les caractéristiques et l'efficacité des nouveaux environnements pédagogiques ainsi que leur contribution au développement durable.

Dans son rapport *Regards sur l'éducation* (2014), l'OCDE n'hésitait pas à souligner le rôle essentiel que l'éducation et les compétences jouent en faveur du progrès social.

Plus récemment (2015), l'Assemblée générale des Nations-Unies (NU) a adopté le document final « *Transformer notre monde, le programme de développement durable à l'horizon 2030* » consacré à l'adoption du programme de développement pour l'après 2015. Ce programme de développement durable a été présenté comme un plan d'action pour l'humanité, la planète et la prospérité. L'éradication de la pauvreté sous toutes ses formes et toutes ses dimensions constituait le grand défi que l'humanité devait relever (résolution des NU, Assemblée générale du 25 septembre 2015). Les 17 objectifs du développement durable (ODD) et les 169 cibles témoignent aujourd'hui de l'ampleur de ce nouveau programme et de son ambition. Ils soulèvent également la question de la place de l'éducation, et notamment de l'éducation au développement durable, dans les programmes de lutte contre la pauvreté.

A. Philosophie et opérationnalité des ODD

L'ambition et l'ampleur du programme de développement durable des Nations Unies à l'horizon 2030, ne laissent planer aucun doute. Les ODD s'inscrivent dans le prolongement des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), il s'agit à la fois de capitaliser sur leur succès tout en parvenant à les dépasser.

Figure 5 : des OMD aux ODD



Source : Nations Unies (2015, 2018)

- Capitaliser sur les succès car les OMD ont permis des avancées dans plusieurs domaines importants (rapport des Nations-Unies, 2015).

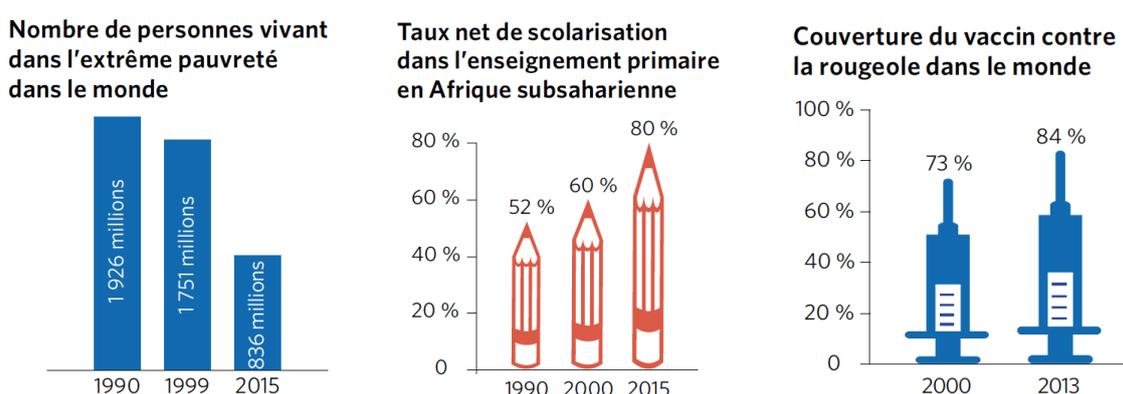
L'objectif 1 visait à éliminer l'extrême pauvreté et la faim. En 2015, 14% de la population des pays en développement vivait avec moins de 1.25 dollar par jour contre près de 47% en 1990. Sur le plan mondial, le nombre de personnes vivant dans une extrême pauvreté a diminué de plus de moitié, passant de 1.9 milliard en 1990 à 836 millions en 2015.

L'objectif 2 entendait assurer une éducation primaire pour tous. Le nombre d'enfants non scolarisés en âge de fréquenter l'école primaire a été réduit de moitié dans le monde, passant de 100 millions en 2000 à 57 millions en 2015. Dans les régions en développement, le taux net de scolarisation dans l'enseignement primaire a atteint 91% en 2015 contre 83% en 2000.

L'objectif 3 promouvait l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes. Dans l'ensemble des régions en développement, la cible visant à éliminer la disparité entre les sexes dans l'enseignement primaire, secondaire et supérieur a été atteinte. En Asie du Sud, 74 filles allaient à l'école primaire pour 100 garçons en 1990. En 2015, 103 filles étaient scolarisées pour 100 garçons.

L'objectif 4 portait sur la réduction de la mortalité des enfants de moins de cinq ans. Ce taux est passé de 90 à 43 décès pour 1000 naissances vivantes entre 1990 et 2015. Près de 84% des enfants dans le monde ont reçu au moins une dose de vaccin contre la rougeole en 2013, contre 73% en 2000.

Figure 6 : Les OMD en quelques chiffres



Source : Rapport des Nations-Unies (2015)

L'objectif 5 se proposait d'améliorer la santé maternelle. Le taux de mortalité maternelle est passé de 380 à 210 décès pour 1000 naissances vivantes entre 1990 et 2013. Le nombre de naissances dans le monde assisté par un personnel soignant qualifié est passé de 59 à 71%, de 1990 à 2014. L'objectif 6 visait à combattre le

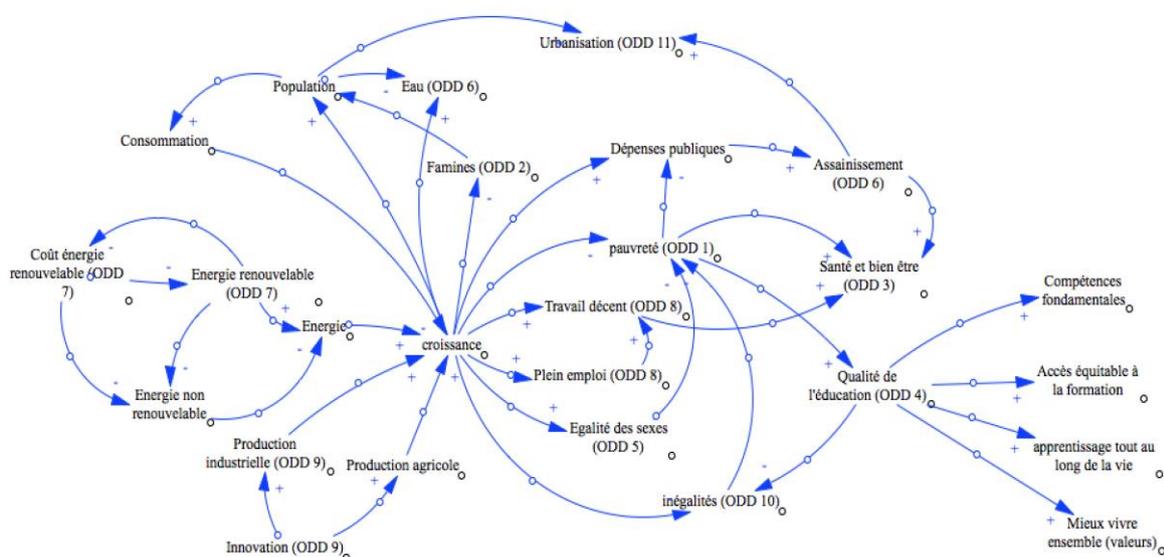
VIH/SIDA, le paludisme et d'autres maladies. Les nouvelles infections au VIH ont chuté de 40% entre 2000 et 2013 pour s'établir à 2.1 millions de cas. Plus de 6.2 millions de décès dus au paludisme ont été évités entre 2000 et 2015, principalement chez les enfants de moins de cinq ans en Afrique Subsaharienne. L'objectif 7 entendait assurer un environnement durable. En 2015, 91% de la population mondiale utilisait une source d'eau potable améliorée contre 76% en 1990. La proportion de la population urbaine des régions en développement vivant dans des taudis est passée de 39,4% en 2000 à 29,7% en 2014. Enfin l'objectif 8 escomptait mettre en place un partenariat mondial pour le développement. Les sommes que les pays développés ont consacré à l'aide publique au développement, sont passées de 81 à 135 milliards de 2000 à 2014 (soit une hausse de 66%). Le nombre d'abonnements à des téléphones portables a été multiplié par 10 de 2000 à 2015, passant de 738 millions à 7 milliards.

- Les dépasser car malgré ces succès, les progrès ont été inégaux entre les régions et les pays, donnant lieu à des écarts importants. (i) Les inégalités entre les sexes persistent. Malgré des taux de pauvreté en diminution en Amérique Latine et aux Caraïbes, la proportion de femmes par rapport aux hommes dans les ménages pauvres a augmenté en passant de 108 femmes pour 100 hommes en 1997 à 117 femmes pour 100 hommes en 2012. Les femmes subissent des discriminations pour l'accès au travail, aux biens économiques et la participation aux prises de décisions. (ii) Les changements climatiques et la dégradation de l'environnement ont tendance à remettre en cause les progrès réalisés, et ce sont les plus pauvres qui en souffrent. La pénurie d'eau affecte 40% des habitants de la planète. Les émissions de dioxyde de carbone dans le monde ont doublé de 1990 à 2015. (iii) Les conflits sont toujours la principale menace au développement humain. Fin 2014, les conflits avaient forcé près de 60 millions de personnes à abandonner leur foyer. (iv) Des millions de personnes souffrent encore de la faim et n'ont pas accès aux services de base. 800 millions de personnes continuent à vivre dans une extrême pauvreté. 57 millions d'enfants en âge de fréquenter l'école ne sont pas scolarisés.

D'une certaine manière, sur le fond comme sur la forme, les ODD prennent leur distance vis à vis des OMD. Contrairement à ces derniers, qui se présentaient comme des prescriptions du Nord au Sud (voir le rapport *Taking Stock of the global Partnership for Development*, 2015), les ODD concernent les pays du Nord et les pays du Sud. Selon la FAO (2015), ils offriraient la vision d'un monde plus juste et plus prospère. Ils doivent permettre d'évaluer la situation mondiale actuelle, de fournir une vue d'ensemble via des méthodes statistiques et des indicateurs (OCDE, 2016), d'identifier les forces et les faiblesses, les contraintes et les opportunités propres à chaque pays, de coordonner les efforts de chacun en les replaçant dans un contexte mondial... Les ODD ne sont ni incitatifs, ni contraignants (pas de pénalités pour les pays qui ne les appliquent pas), ils doivent juste s'insérer dans les politiques de développement durable des Etats et les plans d'actions à l'échelle nationale (IDDRI, 2016). Or, le mot

« juste » cache une difficulté de taille, du fait de leur interdépendance, de leur complexité et de leur cadre systémique, ces ODD posent un certain nombre de problèmes dans la mise en œuvre des politiques publiques. Ainsi, et en vertu des principes du développement durable, les 17 ODD sont indivisibles (lutter contre la menace du changement climatique influence notre façon de gérer nos ressources naturelles, parvenir à l'égalité des sexes ou à une meilleure santé contribue à éradiquer la pauvreté, consolider la paix réduit les inégalités et contribue à des économies florissantes...), et c'est comme tel qu'il faudra les analyser et en tirer des enseignements sur le long terme.

Figure 7 : Les ODD, une démarche systémique propre au DD



La dynamique des systèmes (initiée par Forrester, 1968) peut être utilisée ici pour comprendre les liens et les interdépendances entre les différents ODD. Les boucles positives amplifient le système (logique exponentielle), ainsi, si la production agricole augmente, cela augmente la croissance, qui réduit les famines, ce qui diminue la pauvreté. Les boucles négatives régulent le système. Moins de pauvreté, permet d'augmenter la qualité de l'éducation, qui elle-même réduit les inégalités... Cette représentation des ODD montre qu'il est difficile d'anticiper les effets d'une politique publique, qui plus est, destinée à améliorer les bienfaits de l'éducation. Par ailleurs, elle permet de comprendre les scénarios derrière chaque mesure. Ainsi, la qualité de l'éducation semble bien dépendre de la réduction de la pauvreté, qui elle-même dépend de la croissance économique. Dans le cas des pays en développement, cette hausse de la croissance peut se réaliser au détriment d'une consommation responsable (c'est l'un des principaux constats que l'on peut faire actuellement dans ces pays, qui ne parviennent pas encore à améliorer l'ODD 12).

Enfin, les ODD intègrent des enjeux écologiques globaux (Agenda 21 et les trois conventions internationales sur le climat, la biodiversité et la désertification) qui ne faisaient pas partie des OMD. Ainsi, les ODD placent le changement climatique au coeur des débats en matière de développement durable et font du PNUD, le chef de file en matière de développement durable au sein des Nations-Unies

- la résolution des Nations-Unies et le lancement du programme de développement durable (ODD) à l'horizon 2030 ont coïncidé avec un autre accord historique, conclu en 2015 lors de la Conférence de Paris sur les changements climatiques (COP21). Avec le Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe, ratifié au Japon en mars 2015, ces accords définissent un ensemble de normes communes et de cibles atteignables pour réduire les émissions de carbone, gérer les risques liés aux changements climatiques et aux catastrophes naturelles, et renforcer les capacités de résilience (Aubert & al., 2017).

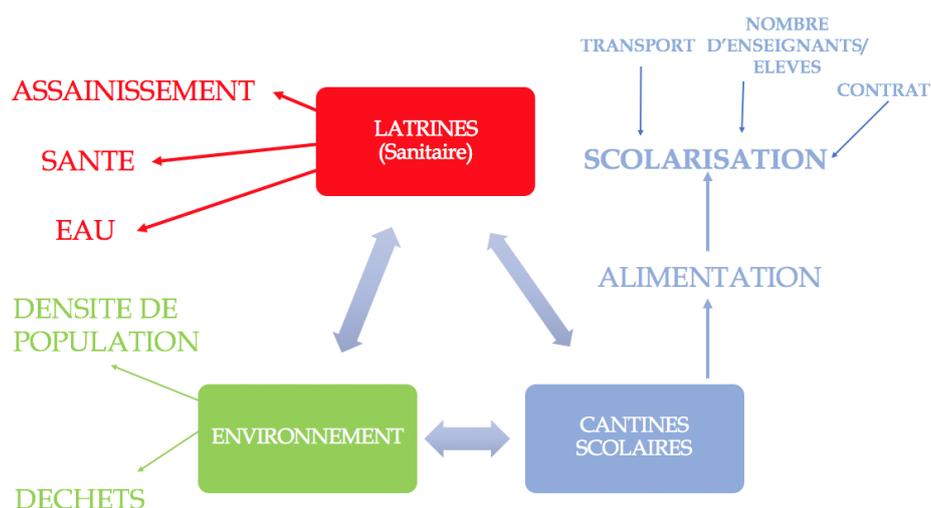
- Entrés en vigueur en janvier 2016, les ODD orientent les politiques et le financement du PNUD pour les 15 prochaines années. Le PNUD occupe ainsi une position unique pour contribuer à mettre en œuvre les Objectifs par le biais des activités qu'il mène dans 170 pays et territoires. Son plan stratégique est axé sur des domaines essentiels, dont la réduction de la pauvreté, la gouvernance démocratique et la consolidation de la paix, les changements climatiques et le risque de catastrophes naturelles, ainsi que les inégalités économiques. Le PNUD aide les gouvernements à intégrer les ODD dans leurs politiques et projets nationaux de développement. Grâce à ces précédentes initiatives en matière de développement, le PNUD a acquis une précieuse expérience et une compétence politique éprouvée pour accompagner les pays en développement à atteindre les cibles fixées par les ODD d'ici à 2030.

B. ODD et éducation, la mise en perspective de l'ODD 4

L'éducation au développement durable et les compétences qu'elle sous-entend, se développe autour de quatre grands enjeux qui mobilisent la plupart des pays en développement, *la question sanitaire* (que l'on peut décliner en assainissement, accès à l'eau et aux services de santé), *la question environnementale* (associée à la densité de population dans les zones urbaines et aux déchets) et *la question alimentaire* (restauration des cantines scolaires). Ces enjeux de société sont aujourd'hui intégrés dans le curriculum de base des principaux programmes nationaux (exemple du guide pédagogique du Sénégal) et les ODD, ils introduisent de ce fait, un dernier enjeu, *la question éducative* (déclinée elle-même dans l'ODD 4). Or, cet enjeu ne saurait se limiter à une simple analyse des curricula, dans de nombreux pays en développement, la qualité de l'éducation est conditionnée par un contexte social, politique, religieux et

économique. Les transports et l'accès à l'école peuvent prendre du temps à la fois pour les élèves (longues heures de marche) et les enseignants (2 à 3 heures par jour pour se rendre en cours). Les inégalités entre zones urbaines et zones rurales sont une réalité. Le nombre d'élèves par salle de cours peut atteindre 80 personnes dans le cycle primaire. Malgré des circulaires dans les pays en développement qui fixent l'effectif à 35 ou 50 élèves, la réalité dépasse de loin les textes et rend difficile toute innovation pédagogique (pédagogie critique, pleine conscience, pédagogie par projets) associée à l'éducation au développement durable. Enfin, les contrats enseignants ne sont pas homogènes et uniformes, il existe un grand nombre de contrats et donc une amplitude importante en matière de compétences : de l'enseignant fonctionnaire (qui a suivi une formation dans les écoles normales et qui a pu bénéficier de quelques heures de formation sur l'éducation au développement durable) à l'enseignant contractuel payé par le village (qui a dû se forger lui-même une culture en matière éducation au développement durable).

Figure 8 : EDD, ODD et contexte socio-politique

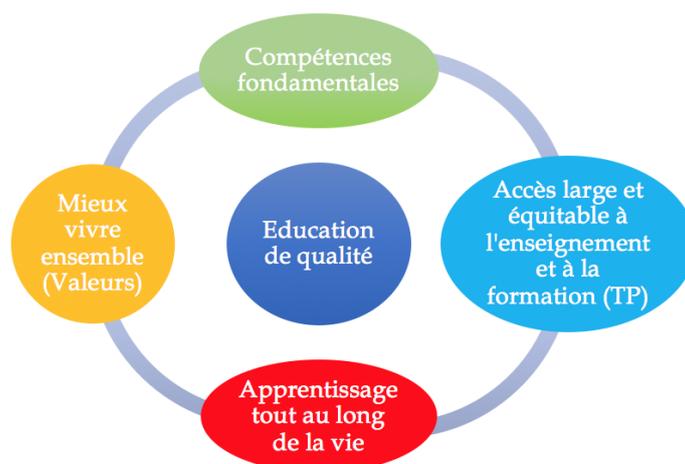


Source : Diemer (2017)

L'ODD 4 vise à assurer que tous aient accès à une éducation de qualité et à des possibilités d'apprentissage tout au long de leur vie. Cet objectif se concentre sur l'acquisition des compétences fondamentales et de niveau supérieur à toutes les étapes de l'éducation et du développement ; sur un accès plus large et plus équitable à une éducation de qualité à tous les niveaux, ainsi qu'à l'enseignement et la formation techniques et professionnels (EFTP) ; et sur les connaissances, les compétences et les valeurs requises pour vivre en société de façon productive.

Cet ODD rappelle surtout qu'il existe des conditions cumulatives à la non scolarisation : les enfants vivent dans des zones rurales, sont touchés par la pauvreté ou ont des parents avec peu ou sans éducation (Rapport ODD, 2016).

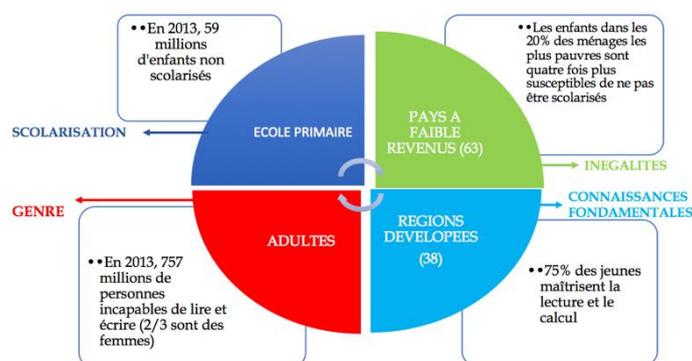
Figure 9 : ODD 4, une éducation de qualité



Source : Diemer (2017)

Cela étant - et c'est peut-être là qu'il convient de nuancer les attentes et les résultats de l'ODD 4 - le fait qu'une éducation de qualité doit pouvoir agir sur plusieurs cibles (acquisition de compétences fondamentales comme la lecture, l'écriture et le calcul ; un bon développement en matière de santé physique, social, émotionnel et mental...) occulte quelque peu, la réalité des faits. En effet, l'éducation de qualité renvoie à des situations contextualisées. Ainsi, l'école primaire pose le problème de la scolarisation et de l'accès au système éducatif, les pays à faible revenus rappellent qu'une amélioration de l'éducation passe par une éradication de la pauvreté, les pays développés doivent accentuer leurs efforts sur les connaissances fondamentales et les adultes (formation tout au long de la vie) ne doivent pas être rattrapés par des questions de genre.

Figure 10 : Les cibles clés de l'ODD 4



Source : Diemer (2017)

Inégalités, genre, scolarisation, connaissances fondamentales sont à la fois les variables cibles de l'ODD 4 et les expressions du caractère systémique du développement durable (les inégalités correspondant à l'ODD 10 et le genre à l'ODD 5). Ce rattachement de l'ODD 4 à la pensée complexe et systémique, nous permet de réaffirmer le lien fort qui unit éducation de qualité et éducation au développement durable. D'une certaine manière, l'ODD 4 et l'EDD se positionnent au carrefour d'un triptyque composé des besoins de première nécessité, de la relation avec la nature et du vivre ensemble.

Figure 11 : Les enjeux de l'ODD4 et de l'EDD



C'est bien là que se trouve le défi que les pays développés et en développement devront relever.

C. Quels positionnements pour les pays du Sud

En adoptant une position universaliste, les Nations-Unies ont fait de la pauvreté, une cause mondiale. Les ODD s'appliquent aux pays du Nord comme aux pays du Sud, toutefois il convient de créer les conditions suffisantes et nécessaires pour que de tels objectifs ne fondent pas comme neige au soleil. En effet, au-delà des déclarations de circonstance, « *Nous sommes résolus à éliminer la pauvreté et la faim partout dans le monde d'ici à 2030 ; à combattre les inégalités qui existent dans les pays et d'un pays à l'autre ; à édifier des sociétés pacifiques et justes, où chacun a sa place ; à protéger les droits de l'homme et à favoriser l'égalité des sexes et l'autonomisation des femmes et des filles ; à protéger durablement la planète et ses ressources naturelles* » (Nations Unies, 2015), il convient que les programmes de développement durable s'inscrivent dans les stratégies nationales des différents Etats.

1. La mise en oeuvre des ODD 4 et ODD 13 : le cas du Sénégal

Le Partenariat mondial pour les données du développement durable (Global Partnership for Sustainable Development Data, GPSDD) a été lancé en Septembre 2015, en marge de l'Assemblée Générale des Nations Unies durant laquelle les Objectifs de Développement Durable (ODD) ont été adoptés. Au début de l'année 2016, la Commission de statistiques de l'O.N.U. a recommandé quelques 231 indicateurs pour les ODD, or pour de nombreux pays en développement, les données

ne sont pas disponibles. Le Sénégal fait partie des premiers pays africains ayant adhéré au GPSDD en septembre 2015. L'un des objectifs du GPSDD est d'appuyer les pays en développement à mettre en œuvre une feuille de route, impliquant différentes parties prenantes, pour exploiter la révolution des données pour le développement durable.

Même si les autorités sénégalaises reconnaissent un alignement entre les politiques nationales (PSE) et les ODD, force est d'admettre qu'il reste beaucoup de défis à relever. Si l'ODD 13 a fait l'objet d'une réelle performance du pays, l'ODD 4 enregistre des améliorations très marginales.

L'ODD 4 est associé à plusieurs cibles et indicateurs. L'indicateur 1 recense la « *Proportion d'enfants de moins de 5 ans dont le développement est en bonne voie en matière de santé, d'apprentissage et de bien-être psychosocial, par sexe* ». Précisons que l'indice de développement de la petite enfance de MICS définit « être en bonne voie » comme le pourcentage d'enfants âgés de 36-59 mois qui sont en voie de développement dans au moins trois des quatre domaines suivants : alphabétisation-calcul⁴¹, physique⁴², socio-émotionnel⁴³ et l'apprentissage⁴⁴. D'autres mesures utilisent des définitions différentes, avec différents points de vue empiriques et conceptuels sur la meilleure façon de définir « être sur la bonne voie ». Il n'y a pas encore de définition mondialement acceptée de « être sur la bonne voie de développement ». Définir et mesurer le fait d'« être sur la bonne voie de développement » doit être un objectif pour la prochaine phase de développement de cet indicateur.

L'indicateur est une mesure générale du développement des enfants et de leur état de préparation à l'école. Les données disponibles pour le suivi mondial sont généralement collectées à partir des données individuelles par l'intermédiaire de l'évaluation directe des enfants dans de nombreuses évaluations régionales ou nationales, ou signalées par les mères / les principaux soignants ou les enseignants. Ces données sont ensuite utilisées pour calculer un indicateur qui représentera une mesure composite à travers une gamme de caractéristiques convenues dans les domaines de la santé, de l'apprentissage et du bien-être psychosocial.

L'indicateur 2 mesure le « *taux de participation à des activités organisées d'apprentissage (un an avant l'âge officiel d'ENTREE dans le primaire), par sexe* ». Il s'agit du pourcentage d'enfants de la tranche d'âge donnée qui participent à un ou plusieurs programmes

⁴¹ L'indice de développement de la petite enfance MICS définit un enfant comme étant « sur la bonne voie de développement » en alphabétisation- calcul, s'il peut identifier au moins 10 lettres de l'alphabet, lire 4 mots simples et reconnaître et nommer tous les nombres de 1 à 10.

⁴² Un enfant est en voie de développement sur le plan physique s'il peut ramasser facilement de petits objets et se porte généralement assez bien pour jouer.

⁴³ Un enfant est en voie de développement dans le développement socio-émotionnel s'il est capable d'entreprendre des activités simples indépendamment, s'entendre avec les autres enfants et ne pas habituellement donner des coups de pieds, mordre ou frapper d'autres enfants ou des adultes.

⁴⁴ Un enfant est en voie de développement dans l'apprentissage s'il participe à tout type d'apprentissage organisé, y compris l'éducation de la petite enfance, de la maternelle ou des soins communautaires.

d'apprentissage organisés, y compris des programmes offrant une combinaison d'éducation et de soins. La participation à l'éducation de la petite enfance ainsi qu'à l'enseignement primaire sont incluses. La tranche d'âge varie en fonction de l'âge officiel d'entrée dans l'enseignement primaire. Un programme d'apprentissage organisé consiste en une séquence d'activités éducatives conçues dans le but d'obtenir des résultats d'apprentissage prédéterminés ou d'accomplir un ensemble spécifique de tâches éducatives. Les programmes d'éducation de la petite enfance et de l'enseignement primaire sont des exemples de programmes d'apprentissage organisés.

La petite enfance et l'enseignement primaire sont définis dans la révision de 2011 de la Classification Internationale Type de l'Education (CITE 2011). L'éducation de la petite enfance est habituellement conçue selon une approche holistique pour soutenir le développement cognitif, physique, social et affectif précoce des enfants et pour introduire les jeunes enfants à l'enseignement organisé en dehors du contexte familial. L'enseignement primaire offre des activités d'apprentissage et d'éducation conçues pour fournir aux apprenants des aptitudes fondamentales en lecture, en écriture et en mathématiques et établir une base solide pour l'apprentissage et la compréhension des principaux domaines du savoir et du développement personnel. Il se concentre sur l'apprentissage à un niveau de base de la complexité avec peu, voire aucune spécialisation. L'âge officiel d'admission à l'enseignement primaire est l'âge auquel les enfants sont tenus de commencer l'enseignement primaire conformément à la législation ou aux politiques nationales. Lorsqu'on spécifie plus d'un âge, par exemple, dans les différentes régions d'un pays, l'âge officiel d'admission le plus courant (c'est-à-dire l'âge auquel la plupart des enfants du pays sont censés commencer le primaire) est utilisé pour calculer cet indicateur au niveau mondial.

Tableau 3 : indicateurs et ODD4

Année	Indicateurs		
	Taux de participation à des activités organisées d'apprentissage (un an avant l'âge officiel de scolarisation dans le primaire) MF	Taux de participation à des activités organisées d'apprentissage (un an avant l'âge officiel de scolarisation dans le primaire) M	Taux de participation à des activités organisées d'apprentissage (un an avant l'âge officiel de scolarisation dans le primaire) F
Sénégal			
2010	13.8	13.1	14.5
2011	15	14	15.9
2012	15.7	14.7	16.7
2013	15.5	14.7	16.4
2014	17.6	16.6	18.6
2015	17.3	16.2	18.3

2016	M	M	M
------	---	---	---

Sources : ECDI, EDI, IDELA, MELQO et ICARO

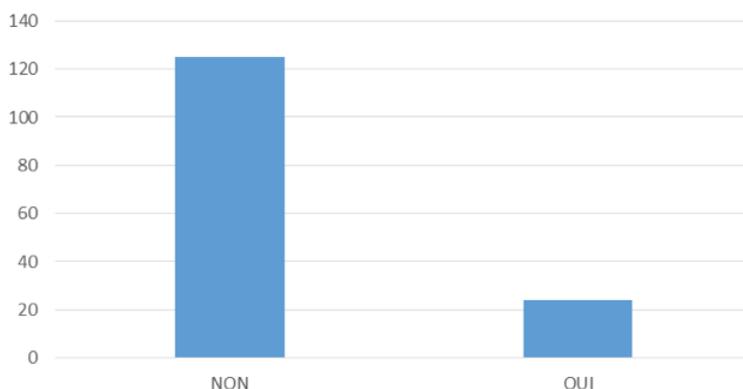
Dans le cadre de cet article, nous avons souhaité regarder de plus près, l'articulation entre l'ODD 4 et l'ODD 13. L'enjeu nous semble très important car il pourrait permettre d'instituer une véritable éducation aux changements climatiques, éducation de plus en plus préconisée par l'UNESCO. Si l'on se fie au rapport national de suivi des ODD en 2016 (septembre, 2017), des performances importantes ont été constatées au niveau des ODD 2 (éliminer la faim), ODD 11 (villes durables) et ODD 13 (prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions). Cette performance repose sur une causalité qui ne laisse planer aucun doute sur le scénario préconisé : le développement du secteur agricole doit stimuler une croissance forte des rendements agricoles, couplée à une diminution des inégalités en termes de revenus (ODD 10, politique de redistribution), celle-ci doit permettre d'améliorer les indicateurs de sécurité alimentaire et donc d'augmenter la performance de l'ODD 2 « Faim zéro ». Les dépenses publiques affectées à l'adaptation aux changements climatiques (ODD 13) et à la gestion des déchets (ODD 11) seraient l'une des principales causes de la performance de ces deux ODD.

Ces succès contrastent quelque peu lorsque l'on analyse les ODD 4 (éducation) et 12 (production et consommation responsables). En effet, ces deux ODD n'enregistrent que des avancées marginales, qui ne sont pas à la hauteur des espérances. Ils sont symptomatiques à nos yeux, des choix qui, de manière systémique, peuvent orienter l'avenir de nos sociétés. Concernant l'éducation (ODD 4), le rapport souligne que si la tendance se poursuit, le Sénégal ne réalisera que 30% de son objectif en 2030. Le rapport précise que l'inertie de la démographie pourrait être le principal frein à la réalisation de l'ODD 4, il est ainsi préconisé d'identifier les leviers qui se trouvent au-delà du système éducatif (c'est à dire d'avoir une approche systémique) et d'agir dans le sens escompté. Dans le cas de l'ODD 12, ces modestes résultats seraient en partie dus à la croissance économique stimulée par des secteurs utilisant un stock significatif de produits hi-tech à obsolescence programmée (téléphone portable, tablettes...).

L'illustration du Sénégal et de sa gestion des ODD n'est pas à blâmer ici, elle reflète simplement un état de fait. Il est possible d'atteindre un même objectif tout en proposant des stratégies différentes. La stratégie actuelle est davantage tournée vers la recherche de gains de productivité et de croissance, en espérant que ces bienfaits se répercuteront de manière systémique sur les autres moteurs du développement, plutôt que de miser sur un changement de comportement induit par une éducation aux changements climatiques ou une consommation responsable. Le défi est donc important, car la plupart des enseignants du primaire, interrogés entre 2015-2016, ne

faisaient pas de lien entre l'ODD 13 et l'ODD 4. Seuls, 20 enseignants sur 150, ont intégré l'ODD 13 dans une stratégie globale d'éducation au développement durable.

Tableau 4 : Enseignants du primaire établissant un lien entre les ODD 13 et 4



Source : Ndiaye (2018)

2. La mise en œuvre des ODD 2 et ODD 4 : le cas du Pakistan

Le Pakistan se caractérise principalement par une population importante (207,78 millions d'habitants) et un taux de natalité élevé (2,7 %). Au-delà de cette situation que l'on retrouve dans de nombreux pays en développement, il a également un taux d'alphabétisation très faible, 58% (NEMIS-AEPAM, 2016), 30% de la population vit au-dessous du seuil de pauvreté, un revenu national brut par habitant qui est inférieur à 1500\$ (\$ courants) et un IDH égal à 0,538. La pauvreté et l'analphabétisme sont une combinaison de maux qui poussent la majorité des jeunes et des enfants à l'extrémisme ou à des activités violentes ou criminelles. L'environnement se détériore, la pollution atmosphérique, les récentes vagues de smog en hiver, l'urbanisation, l'eau contaminée, le terrorisme, les conflits régionaux/provinciaux, la sécurité alimentaire, l'inflation, l'inégalité, l'accès à l'éducation, les prêts, les questions de sécurité, la fertilité des sols, la déforestation, la corruption viennent étayer la longue liste de défis auxquels le Pakistan est confronté de nos jours. Ces défis ont fait du Pakistan, un pays très vulnérable et dépendant des aides humanitaires que veulent bien lui accorder les grandes institutions internationales ou/et les ONG.

Il ne fait aucun doute que l'éducation joue un rôle important lorsqu'il s'agit d'atteindre des objectifs de bien-être et de bien vivre, symboles d'une société œuvrant dans le développement durable. Bien qu'il y ait un débat controversé sur le type d'éducation nécessaire et suffisant pour atteindre les ODD, toutes les parties prenantes s'accordent à dire que nous avons besoin d'une éducation multiforme et non pas d'une éducation conventionnelle, instituant l'éducation au service du développement durable. Dans un pays comme le Pakistan qui n'a pas pu atteindre l'objectif de

l'éducation primaire universelle au cours de la dernière décennie, l'enjeu est de taille et en dit long sur les perspectives en matière de réalisation de l'ODD 4. Selon le rapport 2015 sur l'éducation pour tous, 6,7 millions d'enfants ne sont toujours pas scolarisés, dont 62% sont des filles. Par conséquent, l'accès à la scolarité est une condition préalable à la mise en œuvre d'une EDD, de sorte qu'il est essentiel de veiller à ce que le plus grand nombre possible d'enfants aillent à l'école et restent à l'école jusqu'au niveau intermédiaire.

Dans ce qui suit, nous avons choisi de mettre l'accent sur l'articulation entre l'ODD 1 (pas de pauvreté) et l'ODD 4, toutefois cette mise en perspective serait insuffisante et biaisée si nous ne revenions pas sur les OMD, et notamment l'OMD 2 « *Assurer l'éducation primaire pour tous* ». L'OMD 2 visait à atteindre 100% de scolarisation dans le primaire, 100% d'achèvement des études de la première à la cinquième année et un taux d'alphabétisation de 88% (Pakistan report, 2013). Les résultats furent très décevants. Les taux de scolarisation et d'achèvement du primaire ont augmenté jusqu'au milieu des années 2000, puis ont ralenti pour se fixer à 57% puis 50% en 2011/2012. Le taux d'alphabétisme atteint les 58% toutefois ce chiffre global cache de profondes disparités entre les hommes (70%) et les femmes (47%).

En 2013, un plan d'actions d'envergure nationale a vu le jour, il devait permettre d'accélérer les progrès vers l'OMD 2 afin que la cible soit atteinte en 2015. Malheureusement, ce plan d'action n'a pas pu être mis en œuvre et ce, malgré de nombreuses initiatives visant à encourager la scolarisation⁴⁵. Le projet TAWANA (Healthy) a fourni de l'huile comestible ainsi que des légumineuses et du riz aux familles afin d'augmenter le taux de scolarisation des enfants des zones rurales. Les filles ont reçu de petites allocations pour les inciter à s'inscrire et à rester à l'école jusqu'au niveau secondaire. De 2007 à 2015, des incitations ont été données aux élèves en leur fournissant des manuels scolaires gratuits de la première à la dixième année. L'Assemblée nationale du Pakistan a créé un groupe de travail composé de membres élus pour examiner les progrès réalisés par rapport aux OMD. Tous ces efforts n'ont pas été couronnés de succès de sorte que le Pakistan n'a pas réussi à atteindre les OMD (32% des enfants de 5 à 9 ans n'étaient toujours pas scolarisés en 2015).

Dans les documents officiels du gouvernement pakistanais (rapport national sur les OMD de 2011 et 2013), il était question d'une stratégie inclusive, cohérente et collaborative pour atteindre des objectifs ambitieux. Cette dernière faisait partie d'un plan d'action, *the Millennium Acceleration Framework* (MAF), élaboré par le Programme

⁴⁵ En vertu de l'article 25a de la Constitution pakistanaise, deux dispositions importantes ayant une incidence sur l'éducation ont été introduites. La première rappelle que l'éducation est un droit humain fondamental pour chaque citoyen de l'État. La seconde précise c'est à l'État qu'il incombe de dispenser un enseignement gratuit et obligatoire à tous les enfants âgés de cinq à seize ans". Le 18e Amendement prévoit également une extension des fonctions aux gouvernements provinciaux, y compris dans le domaine de l'éducation

des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et destiné à accélérer les progrès en matière d'OMD, notamment pour les pays susceptibles de ne pas atteindre les objectifs de 2015. Si tous les gouvernements qui se sont succédés, ont cherché à atteindre les OMD sous la pression internationale, en revanche aucune administration n'a réellement défini une liste de priorités ou pris des dispositions concrètes.

De nombreuses raisons ont été évoquées par le gouvernement pakistanais pour expliquer ces échecs : le coup d'état militaire d'octobre 1999 qui a modifié le régime en place et réduit les efforts déployés sur le système éducatif ; le tremblement de terre de 2005 (Asie du Sud) qui a provoqué des déplacements de population et qui est venu perturber le déploiement de la politique d'éducation ; la situation post-2005 caractérisée par une montée des attentats terroristes et des opérations militaires dans la partie Nord-Ouest du pays ; la grande inondation de 2010 ou encore le tremblement de terre de 2015 dans la province occidentale du Baloutchistan. A côté de ces catastrophes naturelles et conflits humains, il convient de souligner également des problèmes internes tels que la corruption, l'incompétence des services ministériels, l'absence de mécanisme de suivi, les questions de responsabilité, l'ingérence politique dans les établissements d'enseignement, l'absence des enseignants et l'indisponibilité des installations de base (eau, électricité, toilettes) dans les écoles, et non des moindres, l'extrême pauvreté du pays.

Le concept de pauvreté est un phénomène bien connu au Pakistan, 29,5% de sa population vit en dessous du seuil de pauvreté (1,25 \$ par jour est une mesure internationale du seuil de pauvreté). Le triangle OMD - ODD - pauvreté illustre la situation passée et présente du Pakistan. La relation étroite entre ODD 1 et ODD 4 reprend une causalité bien connue dans les pays en développement, la pauvreté oblige un grand nombre d'enfants à travailler pour soutenir et contribuer au revenu familial. Une pauvreté clairement affichée, et ce, malgré une économie très florissante (taux de croissance de 5.3% sur l'exercice 2016/2017, un PIB proche de 300 milliards de dollars). Certains économistes du Centre de Politique Sociale et du Développement (SPDC) de Karachi (Sabir, 2016) y voient la présence d'un effet de seuil, la croissance ne serait pas encore assez forte pour réduire la pauvreté (des chiffres, de l'ordre de 6 à 8% sont avancés pour entraîner une baisse significative de la pauvreté). Autrement dit, le salut de l'éducation et les perspectives optimistes sur les cibles de l'ODD 4 seraient conditionnées non pas par une volonté du gouvernement pakistanais d'améliorer son système éducatif mais bien par un objectif de croissance économique.

Compte tenu des faits mentionnés ci-dessus et de l'examen des OMD, il semble très difficile pour le Pakistan de donner la priorité aux objectifs de l'EDD ou de synchroniser sa vision 2025 avec celle des ODD. L'agenda éducatif est sur la liste des priorités (ODD 4), cependant aucun mécanisme ou cadre de référence n'ont été suggérés pour mettre en œuvre un tel programme et atteindre les cibles dans un délai

raisonnable. La plupart des cibles de l'ODD 4 constituent des défis internes à relever. En 2015, une stratégie inclusive, visant à tirer parti des leçons du passé et à forger un ordre du jour stimulant, prônait (1) la formation de groupes de travail nationaux et provinciaux sur les ODD afin d'obtenir l'apport des provinces pour l'établissement des priorités nationales, (2) l'établissement de bureaux dédiés aux ODD au sein du ministère de la Planification et du Développement pour une solide consultation des parties prenantes aux niveaux fédéral et provincial, (3) des consultations et des engagements au niveau national avec toutes les parties prenantes clés, y compris le secteur des entreprises et des médias, (4) le renforcement des sources de données nationales par des technologies de l'information innovantes et créatives à tous les niveaux. Pour qu'un programme de développement durable soit efficace et porteur de changement pour la société, il doit s'appuyer sur les quatre éléments de base suivants : (i) une vision ambitieuse de l'avenir fermement ancrée dans les droits de l'homme et les valeurs et principes universellement acceptés, y compris ceux qui sont énoncés dans la Déclaration universelle des droits de l'homme et la Déclaration du Millénaire ; (ii) un ensemble d'objectifs et de cibles concis visant à réaliser les priorités, (iii) un partenariat mondial pour le développement afin de mobiliser les moyens de mise en œuvre ; et (4) un cadre de suivi participatif de manière à intégrer toutes les parties prenantes à la prise de décisions.

Au Pakistan, les défis posés par les ODD 1 et ODD 4 ne pourront être relevés qu'au prix d'une triple démarche : coordonner et engager toutes les parties prenantes (notamment les ONG) dans une politique d'éradication de la pauvreté par l'éducation ; identifier et classer par ordre de priorité le programme de développement social essentiel et adapté à chaque province ; redéployer et allouer des ressources appropriées selon des mécanismes rigoureux de surveillance et de contrôle.

Si la pauvreté n'est pas une fatalité, elle peut très vite le devenir si les forces vives du pays n'ont plus de raison d'espérer le changement.

Conclusion

Si l'éducation au développement durable s'est largement disséminée dans les pays développés et les pays en développement, elle le doit principalement au programme des Nations-Unies, mis en place par l'UNESCO de 2005 à 2014. Durant ces dix années, l'éducation au développement durable s'est institutionnalisée au point de rentrer dans les curricula de base proposés par les directives nationales ou les guides pédagogiques. Parallèlement, l'éducation au développement s'est fondue dans le courant des éducations à, en rupture avec l'approche traditionnelle disciplinaire. Elle a généré de nombreux travaux sur les représentations sociales des apprenants et de enseignants, sur les démarches pédagogiques appropriées, les outils didactiques ou encore les compétences mobilisées. Le modèle REDOC revendique aujourd'hui un tel héritage,

positionné à la fois dans les sciences sociales et les sciences de l'éducation, il constitue un véritable mode opératoire pour initier des changements de comportements ou nous amener à appréhender nos différences. Si l'éducation reste un facteur de socialisation, c'est dans la diversité et non dans l'homogénéisation qu'il convient de rechercher les clés de notre avenir. Les OMD, puis les ODD ont relancé notre appétit pour la pensée complexe et systémique, pour les enjeux de société, pour les valeurs qu'une société durable se doit d'incarner. Pour certains pays, les ODD sont une longue marche parsemée d'embûches et synonyme de frustrations (le Pakistan), pour d'autres, ce sont des repères qui permettent de mesurer le chemin parcouru et d'améliorer sans cesse les résultats attendus (le Sénégal). Si les ODD placent l'éducation au rang de cible prioritaire et ont pris le parti d'associer l'éducation au développement durable à l'ODD 4 *Education de qualité*, ils peinent encore à prôner de véritables changements sociétaux. Le développement durable risque une nouvelle fois de préférer les compromis aux révolutions, au risque de renvoyer à 2050, les espoirs de nombreux citoyens du monde.

Bibliographie

- ABRIC J.C (1994), *Pratiques sociales et représentations*, PUF. Nouvelle édition (2011).
- ABRIC J.C (1989), « L'étude expérimentale des représentations sociales » in D. Jodelet (dir), *Les représentations sociales*, PUF.
- ABRIC J.C (1987), *Coopération, compétition et représentations sociales*, Cousset, Delval.
- ABRIC J.C (1976), *Jeux, conflits et représentations sociales*, thèse d'Etat, Université d'Aix en Provence.
- AFD (2013), *Education, formation, emploi, la jeunesse au cœur du développement*, Plan d'action 2013 - 2015. Editions Agence Française du Développement.
- BARTHES A., ALPE Y. (2015), *Utiliser les représentations sociales pour l'analyse des savoirs en éducation : exemple de l'éducation au développement durable*, L'Harmattan.
- AKKARI A., PAYET J.P. (2010), « Transformations des systèmes éducatifs dans les pays du Sud. Entre globalisation et diversification », *Raisons éducatives*, 336 p.
- ALAYA A. (2010), *L'Education à l'Environnement en Tunisie. Analyse des valeurs relatives à la nature et à l'environnement dans les conceptions d'enseignants et d'élèves et dans les manuels scolaires*. Thèse Universités Lyon 1 et Tunis 1 (ISEFC).
- AUBERT M.H, BESS G., BELLEC P. (2017), *Revue des politiques du ministère au regard des objectifs du développement durable (agenda 2030)*, *Rapport n°010982-01*, Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD), 189 p.
- BADER B., SAUVE L. (2011), *Education, Environnement et développement durable : vers une écocitoyenneté critique*, Presses de l'Université de Laval. Canada.

BERR E., DIEMER A. (2016), « De l'écodéveloppement au *Buen Vivir*, ou comment replacer les savoirs locaux au coeur des processus de coopération décentralisée dans les pays du Sud », *Mondes en développement*, vol 44, n°375, p. 1 - 16.

BODIN B., DIEMER A., FIGUIERE C. (2014), *Economie politique du développement durable*, De Boeck.

CLAVEAU M., DIEMER A., PELLAUD F., MONTERO C. (2016), « L'éducation au développement durable, une affaire de pédagogies », 4^e colloque international de l'Association pour les Recherches Comparatistes en Didactiques, Université de Toulouse, 9 - 11 mars, 10 p.

CLEMENT P., CARAVITA S. (2011), *Education pour le développement durable, et compétences des élèves dans l'enseignement secondaire*, Unesco, 95 p.

DANICI I. (2006), « La notion de représentation pour les sociologues : Premier aperçu », *ESO*, n°25, décembre, p. 29 - 32.

DIEMER A., NDIAYE A., GLADKHYK G. (2017), « Le climat, du savoir scientifique aux modèles d'intégration assignée », *Revue Francophone du Développement Durable*, n°9, p. 7 - 50.

DIEMER A. (2017), *Objectif 4 : Promouvoir une éducation de qualité*, Les Journées de l'Economie (JECO), 9 novembre, Lyon, 13 p.

DIEMER A. (2017)), « De la décennie des Nations-Unies au Global Action Program, quand l'éducation se met au service du développement durable », in Diemer A., Abdelbaki B., Baudot F., Sawadogo G. (eds), *Le développement durable dans la francophonie*, CIFEODD.

DIEMER A., GIRARDIN M., MARQUAT C., MULNET D., PELLAUD F., RAFAITIN Y. (2016), *L'éducation au développement durable dans le cycle primaire : illustration par le projet IFADEM dans 5 pays d'Afrique : Bénin, Burkina Faso, Niger, RDC, Togo* », *Colloque international « Innover et former au monde de demain »*, ESPE Clermont Auvergne, 6 - 7 avril, 17 p.

DIEMER A., MARQUAT C. (2015), *Représentations Nord - Sud du développement durable*, De Boeck.

DIEMER A. (2015), *L'éducation au développement durable dans les Suds, les apports du modèle REDOC*, Observatoire des représentations du développement durable (OR2D), Editions Oeconomia.

DIEMER A. (2015), *Le développement durable et les économistes*, Editions Oeconomia.

DIEMER A., MARQUAT C. (2015), *L'éducation au développement durable, quels enjeux pour les ESPE ? Le printemps de la recherche, réseau ESPE*, 23 mars, Paris, 10 p.

DIEMER A., MARQUAT C. (2015), *Regards Croisés Nord Sud sur le développement durable*, De Boeck.

DIEMER A., MARQUAT C. (2014), *L'éducation au développement durable*, Editions De Boeck.

DIEMER A., MARQUAT C., RAFAITIN Y. (2014), « From Controversial Issues to Questions Questions Socialement Vives, une clé pour comprendre le développement durable, une illustration par les gaz de schiste », *ConviSciencia de la recherche en éducation, Journées internationales d'EFTS*, 4,5,6 juin, 15 p.

DIEMER A., MARQUAT C. (2014), « L'éducation au développement durable, entre spécificité des pays du Nord et modèle généralisable aux pays du Sud, les enseignements de la décennie 2005 - 2014 », *Colloque de Parakou, Bénin*, 25 p.

DIEMER A., BIGOHE J.B, MARQUAT C. (2014), « Quelles compétences pour favoriser l'éducation à l'environnement et l'éducation au développement durable », *Rencontres IFADEM, Bilan et perspectives des recherches et expertises*, vendredi 12 décembre, Paris, 7 p.

DIEMER A. (2013), « L'éducation au développement durable, une affaire de représentation », *Revue Francophone du développement durable*, n°1, mars, p. 30 - 59.

DIEMER A. (2013), « L'éducation systémique, une réponse aux défis posés par le développement durable », *Education relative à l'environnement*, vol. 11.

DIEMER A. (2011), « De la représentation du développement durable à la construction de savoirs transversaux » in *Les cahiers du CERIU*M, Montréal, septembre-octobre, p. 1- 28.

FABRE M. (2014), « Les éducations à : problématisation et prudence », *Les cahiers du CERFE, Education et socialisation*, vol 36.

FAO (2015), *La FAO et les 17 objectifs de développement durable*, 8 p.

FORRESTER J.J (1968), *La dynamique des systèmes*, Dunod.

FREIRE P. (1974), *La pédagogie des opprimés*, Maspéro.

GIRAULT Y., LANGE J.M, FORTIN-DEBART C., SIMONNEAUX L., LEBEAUME J. (2007), « La formation des enseignants dans le cadre de l'éducation au développement durable : problèmes didactiques », *Éducation relative à l'environnement*, Vol. 6. 119-136.

HANH THICH NHAT (2011), *Planting seeds, Practicing Mindfulness with children*, Parallax press.

HUBERT M. (1999), *Apprendre en projets*. Lyon: Chronique sociale.

HOR K. (2014), *An Advocacy Journey towards Education for Sustainable Development in Singapore*. <http://www.theodyssey.sg/resources/advocacy-journey-towards-education-sustainable-development-singapore>.

KALSOOM Q., QURESHI N., KHANAM A. (2018), "Perceptions of the Research Scholars Regarding Education for Sustainable development (ESD) in Pakistan" in Leal Filho W., Rogers J., Lyer-Raniga U. (eds), *Sustainable Development Research in the Asia Pacific Region*, Springer.

KERNEIS J., MARQUAT C., DIEMER A. (2014), « Une approche comparatiste de l'Éducation au Développement Durable et de l'Éducation aux Médias et à l'Information via les cartes de controverses », Colloque de Rouen « Les éducations à, un (des) levier(s) du système éducatif, novembre, 29 p.

KHUSHIK F., DIEMER A. (2017), « Critical Analysis of Education Policies in Pakistan: A Sustainable Development Perspective », *International Symposium "Transforming Higher Education in Pakistan, a Journey of 70 year*, Islamabad, Pakistan, December, 19 p.

JODELET D. (1997), « Représentation sociale : phénomènes, concept et théorie » in S. Moscovici (dir), *Psychologie sociale* Paris, PUF.

JODELET D. (1991), *Les représentations sociales*, Paris, PUF.

JODELET D. (1991), *Représentation sociale*, Grand Dictionnaire de la psychologie, Paris, Larousse.

LEGARDEZ A., ALPE Y. (2013), « Le curriculum sournois de l'éducation au développement durable : l'exemple de l'usage de certains concepts », *Revue Francophone du développement durable*, n°1, mars, p. 91 - 108.

LEGARDEZ A., SIMONNEAUX L. (2011), *Développement durable et autres questions d'actualité. Questions socialement vives dans l'enseignement et la formation*, Educagri.

LEGARDEZ A. (2004), « Transposition didactique et rapports aux savoirs : l'exemple des enseignements de questions économiques et sociales, socialement vives », *Revue française de pédagogie*, n°149, p. 19 - 27.

LANGE J.M (2014), « Education au développement durable : intérêts et limites d'un usage scolaire des investigations multi-référentielles d'enjeux », *Cahiers du CERFEE, Education et socialisation*, vol 36.

LEGARDEZ A. (2004), « L'utilisation de l'analyse des représentations sociales dans une perspective didactique : l'exemple de questions économiques », *Revue des sciences de l'éducation*, vol. 30, n° 3, p. 647-665.

LANGE J.-M., MARTINAND J.-L. (2010) « Éducation au développement durable et éducation scientifique : balises pour un curriculum » in A. HASNI et J. LEBEAUME (dir.), *Nouveaux enjeux de l'éducation scientifique et technologique : visées, contenus, compétences, pratiques*, Presses de l'université d'Ottawa, p. 125-154.

- LANGE M.F (2001), « Dynamiques scolaires contemporaines au Sud » in Lange M.-F. (éd.), *Des écoles pour le Sud. Stratégies sociales, politiques étatiques et interventions du Nord, Autrepart*, n° 17, p. 5-12.
- LEAL FILHO W., ROGERS J., LYER-RANIGA U. (2018), *Sustainable Development Research in the Asia Pacific Region*, Springer.
- MATAGNE P. (2013), « Education à l'environnement, éducation au développement durable, la double rupture », *Education et socialisation*, vol 33, 9 p.
- MERIEU P. (2001), *Eduquer à l'environnement : pourquoi ?, comment ?*, Conférence, 17p.
- MEIRIEU P. (1987) – *Apprendre ... oui, mais comment*. Paris : ESF (1999), 17^e édition
- MINISTERE DE L'EDUCATION (2015), *Guide pédagogique de l'enseignement élémentaire*, Sénégal, 390 p.
- MOSCOVICI S. (1961), *La psychanalyse, son image et son public*, Paris, PUF.
- NATIONS-UNIES (2016), *Rapport sur les objectifs du développement durable*, New York, 56 p.
- NATIONS UNIES (2015), *Objectifs du Millénaire pour le Développement*, rapport 2015, New York, 75 p.
- NATIONS UNIES (2015), *Transformer notre monde, le programme de développement durable à l'horizon 2030*, Résolution adoptée par l'Assemblée générale, le 25 septembre, A/RES/70/1, 70^e session, points 15 et 116 de l'ordre du jour, 38 p.
- NATIONS UNIES (2015), *Convention Cadre sur les changements climatiques*, FCCC/CP/2015/L.9/Rev 1, le 12 décembre, Conférences des Parties, 21^e session, Paris 30 novembre – 11 décembre, 40 p.
- NDIAYE A. (2018), « Analyse des représentations des enseignants du primaire sur le développement durable, les changements climatiques et l'éducation aux changements climatiques », *séminaire OR2D*.
- OCDE (2014), *Regards sur l'éducation, Les indicateurs de l'OCDE*. Editions OCDE.
- OCDE (2009), *Enseignement supérieur et développement des villes et espaces régionaux*, Programme sur la gestion des établissements, 12 p.
- OR2D (2014), « Quelles compétences pour favoriser le passage de l'éducation à l'environnement à l'éducation au développement durable », *Rapport intermédiaire*, IFADEM, décembre, 51 p. (disponible sur <http://www.or2d.org>)
- PAGONI M., TUTIAUX-GUILLON N. (2012), « Les éducations à... nouvelles recherches, nouveaux questionnements », *Spirale*, n°50.
- PAVLOVA M. (2007), *Two pathways, one destination: TVET for a sustainable future*. Background paper for the virtual Conference. UNESCO-UNEVOC, 22 octobre – 10 novembre.

- PELLAUD F. (2011), *Pour une éducation au développement durable*, Quae Editions.
- PIAGET J. (1937), *La construction du réel chez l'enfant*, Paris : Delachaux et Niestlé.
- PLANNING COMMISSION OF PAKISTAN (2013), *Pakistan Millennium Development Goals*, Report 2013, 195 p.
- PNUD (2011), *MDG Acceleration Framework*, United Nations, New York.
- PNUED (1992), *Chapitre 36 : promotion de l'éducation, de la sensibilisation du public et de la formation*, Rapport de la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, Rio de Janeiro, 3-14 juin.
- SARABHAI K. V., SUBRAMANIAN S.M (2014), *ESD and Biodiversity Education. Background paper for the DESD Global, Monitoring and Evaluation Report*.
- SAUVE L. (2011), « La prescription du développement durable en éducation : la troublante histoire d'une invasion barbare » in Bader B., Sauvé L. (dir), *Education, environnement et développement durable : vers une écocitoyenneté critique*, Presses Universitaires de Laval.
- SAUVE L., MACHABEE L. (2000), « La représentation : point focal de l'apprentissage », *Education relative à l'environnement*, vol. 2, p. 183-194.
- SAUVE L. (1997), *Pour une éducation relative à l'environnement*. Montréal: Guérin Éditeur.
- Siraj-Blatchford J., 2014, 'Matarajio' project: Gender equality in Kenya. <http://327.sustainability.wordpress.com/2014/06/03/matarajio-project-gender-equality-in-kenya>.
- SAUVE L. (1994), *Pour une éducation relative à l'environnement*, ESKA, Paris.
- SIMONNEAUX J. (2013), « Quelques postures épistémologiques pour une éducation au développement durable ? », *Revue Francophone du développement durable*, n°1, mars p. 75 - 90.
- UNESCO (2014), *Façonner l'avenir que nous voulons*, Décennie des Nations Unies pour l'éducation au service du développement durable (2005 - 2014), rapport final, Section de l'éducation pour le développement durable. Division pour l'enseignement, l'apprentissage et les contenus, UNESCO.
- UNESCO (2011), *Education for Sustainable Development, An expert review of Processes and Learning*, Section for Education for Sustainable Development, Paris, 132 p.
- UNESCO (2009), *Contextes et structures de l'éducation pour le développement*, Décennie des Nations Unies pour l'éducation au service du développement durable (2005-2014), 90 p.
- UNESCO (2006), *L'éducation non formelle*, Bureau de l'information au public, 2 p.

UNESCO (2005), *Décennie des Nations Unies pour l'éducation en vue du développement durable* (2005 – 2014).

UNESCO (1996), *Learning, a treasure within*, Paris, 51 p.

TILBURY D., MULA I. (2009), *Review of Education for Sustainable Development Policies from a Cultural Diversity and Intercultural Dialogue: Gaps and Opportunities for Future Action*. Paris: UNESCO.

VYGOSTKY L.S. (1934), *Pensée et langage*, Paris : Ed. Sociales, 1985.

Eduquer aux changements climatiques au Sénégal, une initiation au modèle REDOC via les représentations sociales

Abdourakhmane Ndiaye, Arnaud Diemer, Francine Pellaud
CERDI, Université Clermont Auvergne, France
Centre d'excellence Jean Monnet sur le développement durable (ERASME)
HEP de Fribourg, Suisse

Article en cours de révision pour la Revue d'Education Relative à l'Environnement

Résumé

En l'espace de quelques années, l'éducation aux changements climatiques (ECC) s'est faite une place dans la grande famille *des éducations à* (éducation à l'environnement, éducation aux médias, éducation à la santé, éducation à la biodiversité...). L'UNESCO et sa Décennie des Nations-Unies pour une Education en vue du Développement Durable (2004 - 2015) a même forgé une expression nouvelle, l'éducation au changement climatique en vue d'un développement durable (ECCDD). Le changement climatique constitue un thème majeur du développement durable. Il renvoie, d'une part, aux connaissances qu'il convient de transmettre pour atténuer les effets du changement climatique et s'adapter à un environnement en constante évolution et, d'autre part, aux compétences attendues pour modifier nos attitudes et nos comportements. L'ECCDD implique l'adoption de méthodes pédagogiques visant à faire participer, à motiver et à rendre autonome les apprenants pour qu'ils deviennent de véritables acteurs du changement. A partir d'un modèle baptisé REDOC, nous avons cherché à faire ressortir les représentations sociales du développement durable et du changement climatique des enseignants du cycle primaire au Sénégal, de manière à proposer des démarches pédagogiques innovantes, de concevoir des outils didactiques pour développer des compétences en vue d'une éducation aux changements climatiques (ECC).

Mots-clés

Changements climatiques, pédagogies, compétences, REDOC, représentations

Introduction

Au Sénégal, le Programme d'Amélioration de la Qualité, de l'Équité et de la Transparence du secteur de l'Éducation et de la Formation (PAQUET-EF)⁴⁶ constitue

⁴⁶ Visions (1) et priorités (2) du PAQUET-EF : (1) « *Un système d'éducation et de formation équitable, efficace, efficient, conforme aux exigences du développement économique et social, plus engagé dans la prise en charge des exclus, et fondé sur une gouvernance inclusive, une responsabilisation plus accrue des Collectivités locales et des*

le cadre opérationnel de la politique éducative pour la période 2012-2025. Le gouvernement mise ainsi sur l'éducation et la formation, qu'il considère comme des leviers indispensables pour l'amélioration des conditions économiques, environnementales, sociales et culturelles du pays (Bauchet, Germain, 2003). Ainsi, dans la continuité de la réforme du système éducatif mise en œuvre à travers le Programme décennal de l'Éducation et de la Formation (PDEF)⁴⁷, le Gouvernement du Sénégal a formulé une nouvelle Lettre de Politique Générale pour le secteur de l'Éducation et la Formation, couvrant la période 2012-2025. À cet égard, la politique éducative⁴⁸ a intégré les nombreuses recommandations préconisées par des programmes, tels que l'Éducation pour tous (EPT)⁴⁹, les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD)⁵⁰, la Décennie des Nations Unies pour une éducation en vue du développement durable (DEDD)⁵¹ et la Stratégie nationale de Développement économique et social (SNDES)⁵². Des cibles prioritaires ont été définies – la réalisation d'une scolarisation primaire universelle, un accès équitable entre filles et garçons, la réduction de la pauvreté, la formation qualifiante des jeunes et des adultes – et affiniées dans le cadre des Objectifs du Développement Durable (ODD) promulgués en 2015.

Dans un contexte international, marqué par l'entrée en vigueur de l'accord de Paris⁵³ sur le climat et la mise en œuvre du Programme de l'Agenda 2030 des Nations-Unies⁵⁴, le principal défi consiste à intégrer des connaissances scientifiques, des méthodes pédagogiques, des outils didactiques et des compétences dans le processus d'apprentissage des élèves et des enseignants en lien avec le changement climatique. Si ce dernier frappe tous les continents (Ouragans Florence et Michael aux Etats-Unis

acteurs à la base ». (1) « *L'adaptation de l'offre de formation professionnelle aux besoins du marché du travail. Le renforcement de la déconcentration et de la décentralisation de la gestion. Le renforcement du dialogue entre les partenaires de l'éducation, la société civile et les syndicats* ».

⁴⁷ En 1996, le Sénégal a lancé la procédure d'élaboration et de mise en œuvre du Programme décennal de l'éducation et de la formation, plan d'opérationnalisation de la politique éducative. Ce plan sera modifié en 2000 et rebaptisé Programme de développement de l'éducation et de la formation (PDEF), modification expressément justifiée, entre autres, par l'impératif d'intégrer le sixième objectif de la Conférence de Dakar. Le PDEF est articulé autour de trois axes principaux que sont l'accès, la qualité et la gestion du secteur de l'éducation. Pour l'accès, son ambition est d'augmenter le taux brut de scolarisation de 54 % en 1995 à 100 % à l'horizon 2010 (MEN, 2005a)

⁴⁸ MEN, 2011b, « Rapport national de la situation de l'éducation, 2011 », Dakar, Ministère de l'enseignement préscolaire, de l'élémentaire, du moyen secondaire et des langues nationales.

⁴⁹ Unesco, 2000, « Cadre d'action de Dakar. L'éducation pour tous : tenir nos engagements collectifs texte adopté par le Forum sur l'éducation pour tous, Dakar, Sénégal, 26-28 avril 2000 », Paris, Unesco.

⁵⁰ Unies, N. (2011). Objectifs du Millénaire pour le développement. ONU, < <http://www.un.org/fr/millenniumgoals/>>, consulté le, 25.

⁵¹ Unies, N. (2002). Rapport du Sommet mondial pour le développement durable. Johannesburg (Afrique du Sud), 26, 9.

⁵² Gouv.sn

⁵³ Unies, N. (2015). Accord de Paris. Disponible sur : http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/french_paris_agreement.pdf (Consulté le : 26 avril 2017).

⁵⁴ UNIES, N. (2015). Objectifs de Développement Durable (ODD).

en 2018 ; le Cyclone Yutu, le plus puissant de l'année 2018 aux Iles Mariannes), l'Afrique, le Moyen Orient et l'Asie sont particulièrement exposés aux dérèglements du climat (Banque mondiale, 2012). La hausse des températures intensifie les événements météorologiques extrêmes (Mangkhut, le typhon le plus meurtrier en Asie avec 137 victimes en 2018) et soulève de nombreuses interrogations sur leurs effets à long terme (disponibilités en eau potable, désertification, développement important d'espèces nuisibles transmettant des maladies à l'espèce humaine). Si le changement climatique affecte de plus en plus de personnes dans le monde, il perturbe également le processus d'apprentissage des élèves (acquisition des savoirs), une étape cruciale dans le développement humain (voir les rapports Save the Children et de l'UNICEF en 2008). Les inondations et les périodes de sécheresse affectent les élèves de nombreuses façons : (i) les périodes de grosses chaleurs ou de crues importantes empêchent les enfants d'aller à l'école, (ii) elles touchent directement les infrastructures scolaires ou leur mode de fonctionnement (pannes d'électricité) ; (iii) elles accentuent les problèmes de pauvreté et de malnutrition, rompant ainsi le cercle vertueux entre réduction de la pauvreté et éducation de qualité ; (iv) elles rendent vulnérables une partie de la population, les enfants, aux maladies telles que le paludisme ou la dengue.

D'une certaine manière, comme le rappelait déjà en 2008, le rapport du Consortium CREATE, des enfants d'âge scolaire touchés par la malnutrition, des maladies ou des phénomènes climatiques extrêmes n'auront pas le même potentiel d'apprentissage que d'autres enfants. Ils risquent de « décrocher » du système scolaire, de pallier aux difficultés de la famille en travaillant à la maison ou d'arrêter tout simplement leur scolarité précocement. Une éducation aux changements climatiques ne peut répondre à tous ces problèmes, notamment lorsqu'ils ont une portée systémique, toutefois elle peut relever certains défis. Elle doit notamment aider les jeunes à comprendre et à atténuer l'impact du réchauffement planétaire, les encourager à changer de comportements et d'attitudes ou encore faciliter l'émergence de processus d'adaptation aux tendances liées au changement climatique. L'éducation aux changements climatiques (ECC) peut ainsi constituer une réponse internationale – mais contextualisée – aux changements climatiques.

Dans ce qui suit, nous souhaiterions poser les bases d'une éducation aux changements climatiques en nous appuyant sur un modèle mental que nous avons baptisé REDOC (Diemer, 2015) et expérimenté dans 5 pays d'Afrique (Benin, Burkina-Faso, Niger, RDC, Togo) dans le cadre d'une éducation au développement durable. Le modèle REDOC (pour REprésentations, Démarche pédagogique, Outils Didactiques et Compétences) apporte certaines réponses aux défis du changement climatique. Il renforce la capacité des Etats membres à assurer une éducation de qualité en s'appuyant sur les représentations sociales et collectives de ses citoyens, il encourage les approches pédagogiques novatrices visant à intégrer le changement climatique

dans les écoles, il favorise la sensibilisation au changement climatique via des outils didactiques appropriés et il renforce les compétences des élèves dans le cadre de programmes éducatifs informels et non formels. Pour ce faire, nous nous appuyerons sur le cas du Sénégal en présentant les résultats d'une première étape d'investigations, celle portant sur les représentations sociales des enseignants sénégalais du cycle primaire en matière de changement climatique et d'éducation aux changements climatiques.

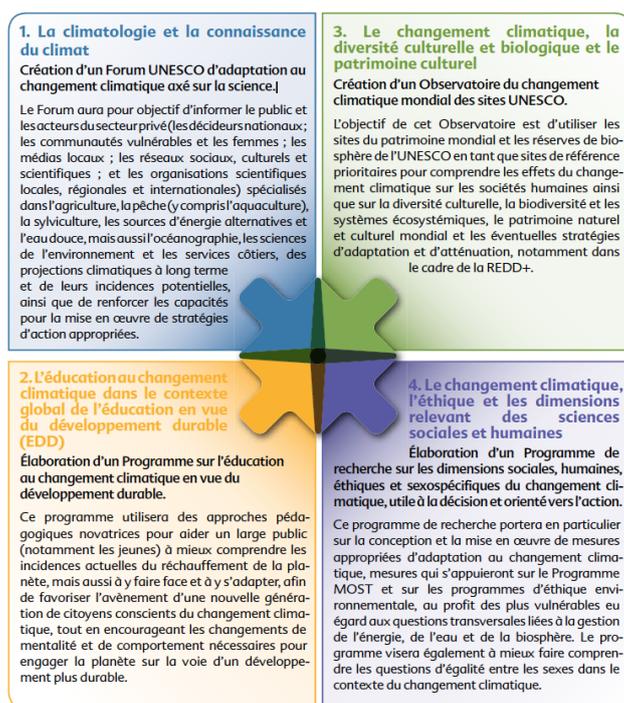
1. L'ECC, à la recherche d'un cadre méthodologique : le modèle REDOC

Depuis la Décennie des Nations Unies pour l'éducation au développement durable (DUEDD 2005- 2014), l'éducation au développement durable (EDD) est souvent présentée comme un élément clé d'une éducation de qualité (voir l'Objectif du Développement Durable n°4 – cible 4.7), voire même un catalyseur du développement durable. Le Programme d'Action Globale (PAG) de l'UNESCO s'est largement appuyé sur les résultats et les recommandations de la DUEDD « *pour susciter et intensifier l'action en faveur de l'éducation au développement durable (EDD)* ». Deux objectifs ont fait l'objet d'une attention particulière : (1) Réorienter l'éducation et l'apprentissage de sorte que chacun ait la possibilité de se familiariser avec les connaissances, les compétences, les valeurs et les attitudes nécessaires pour avoir les moyens de contribuer au développement durable ; (2) Accroître la place de l'éducation et de l'apprentissage dans tous les plans d'action, programmes et activités qui visent à promouvoir le développement durable. Si le PAG s'inscrit bien comme une contribution concrète à l'agenda post-2015, il a également initié une feuille de route détaillée relative à sa mise en œuvre. Quatre stratégies ont été adoptées afin de susciter des initiatives nationales : (i) engagement volontaire des Etats membres dans la mise en place du PAG de l'UNESCO ; (ii) renforcement des parties prenantes (logique de réseaux) dans le pilotage des projets ; (iii) mise en place d'une communauté mondiale apprenante susceptibles de faire émerger des problématiques, des tendances ou des idées nouvelles ; (iv) promotion des bonnes pratiques qu'il convient de recenser, de diffuser et de mettre en avant.

Si l'éducation au développement durable s'est progressivement imposée dans le champ de compétences de l'UNESCO, il convient de rappeler que la famille des *éducations* à s'est également agrandie via l'éducation à la biodiversité, l'éducation à la santé ou encore l'éducation aux changements climatiques (Ndiaye, Khushik, Diemer, Pellaud, 2019a). L'initiative de l'UNESCO pour faire face au changement climatique a été lancée en 2009 à Copenhague par sa Directrice Générale, Irina Bokova, à l'occasion de la 15^e Conférence des Parties (COP) à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Elle visait « *à renforcer les compétences scientifiques ainsi que les capacités d'adaptation et de mitigation, des pays et communautés les plus vulnérables aux effets du changement climatique, en mettant l'accent sur un certain*

nombre de questions stratégiques » (UNESCO, 2011, p. 3). Par la suite, l'initiative de l'UNESCO a été définie autour de quatre piliers - scientifique, éducatif, environnemental et éthique - avec une attention particulière pour les deux thématiques suivantes : (1) l'égalité des sexes sur le continent africain ; (2) la vulnérabilité croissante des petits Etats insulaires en développement (EID).

Figure 1 : Les quatre piliers de l'Initiative UNESCO pour faire face au changement climatique



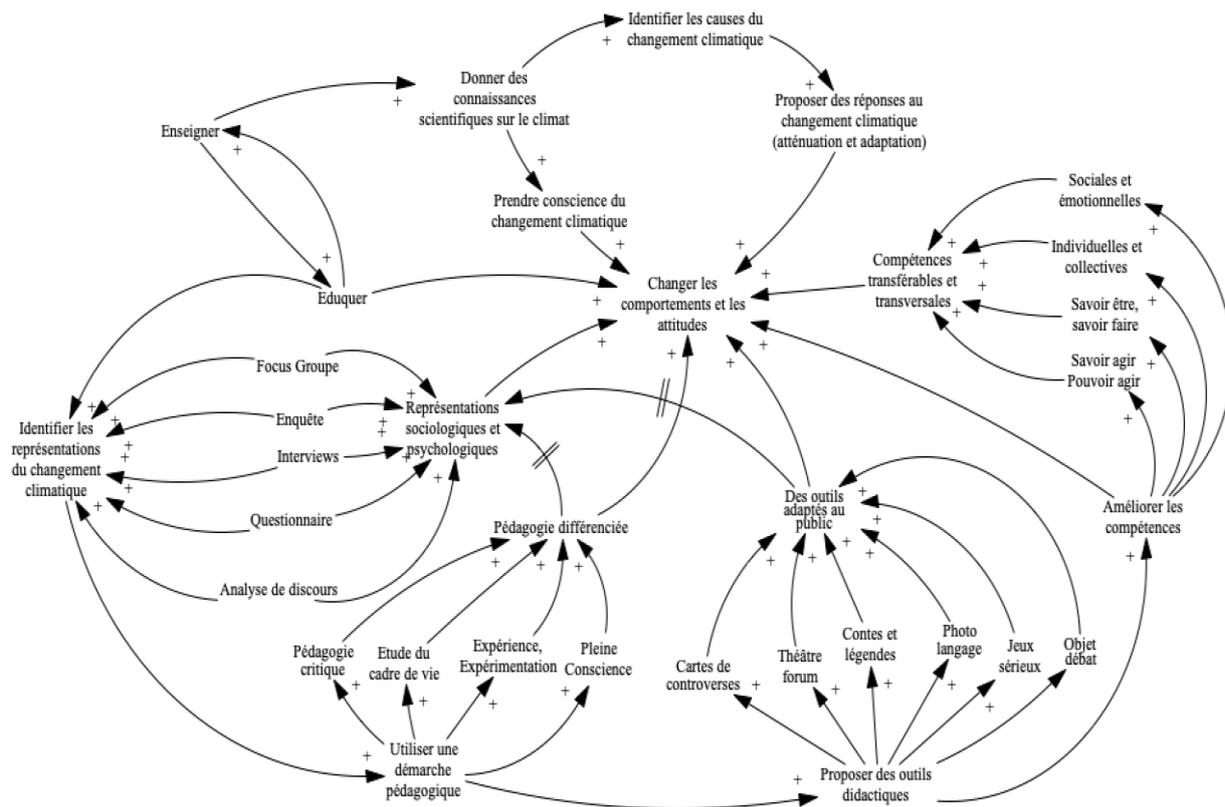
Source : Unesco (2011, p. 4)

L'éducation au changement climatique en vue d'un développement durable (ECCDD) s'est ainsi construite autour d'un champ de connaissances (comprendre les incidences du réchauffement climatique) et d'un objectif (encourager les changements de mentalité et de comportements nécessaires au développement durable). Très rapidement des modules d'ECC ont été élaborés pour offrir aux enseignants, éducateurs, concepteurs de programmes... des outils et des méthodes leur permettant

d'intégrer les problématiques du changement climatique. Les modules se sont généralement inscrits dans un cadre conceptuel incluant un module changement climatique (comprendre les enjeux du changement climatique), un module d'éducation à l'environnement (mettre en relation le climat avec les concepts de l'écologie), un module catastrophes naturelles (ce module a été développé dans les pays du Sud soumis aux événements extrêmes mais également dans les pays du Nord sous la bannière de l'éducation aux risques majeurs) et un module formation de formateur (amener les éducateurs, les enseignants et les parties prenantes à communiquer et attirer l'attention sur l'ECCDD). De nombreuses déclinaisons de ces modules ont pris la forme de *Serious Game* (le jeu Nuage), de *pédagogies innovantes* (classe inversée, théâtre forum) ou d'outils didactiques (l'usage des cartes de controverses à Sciences Po Paris) sans pour autant proposer un cadre conceptuel rigoureux pour aborder la question du changement climatique, ni même suggérer une entrée par les représentations sociales.

Le modèle REDOC (REprésentations, Démarche pédagogique, Outils Didactiques, Compétences) entend proposer un tel cadre (Kerneis, Marquat, Diemer, 2014 ; Diemer, 2015). Il a été développé suite à un projet de recherche - action d'éducation au développement durable dans les pays du Sud (Bénin, Burkina Faso, Niger, RDC, Togo) à l'initiative de l'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) et de l'IFADEM (Initiative Francophone pour la Formation à Distance des Maîtres). Ce cadre consiste (1) à partir des *représentations* des individus ou des groupes d'individus (Moscovici, 1961 ; Abric, 1979, 2011) via des techniques telles que les questionnaires, les entretiens, le focus groupe, l'analyse de discours (utilisation du logiciel TROPES); (2) pour élaborer une *Démarche pédagogique* (cette dernière s'appuie sur plusieurs composants : réflexion critique, projet collectif et collaboratif, volonté d'agir, recensement des bonnes pratiques, analyse du milieu et du cadre de vie, pleine conscience...); (3) reposant sur un certain nombre *d'outils novateurs* (conte, photolangage, objet débat, radios locales, théâtre forum, cartes de controverses...); (4) destinés à faire émerger des *Compétences* (individuelles, collectives, cognitives, émotionnelles...).

Figure 2 : L'ECCDD au prisme du modèle REDOC



1.1 Des représentations nécessaires pour s'immerger dans l'ECCDD

La représentation désigne « l'action de replacer devant les yeux ». Il s'agit de rendre compte de quelque chose d'absent présent mais également de placer ce quelque chose (une idée) devant les yeux de l'autre. L'action est un mode de représentation parmi d'autres, l'image, la figure, le graphisme ou l'abstraction constituent également des moyens de visualiser une idée ou un concept (Diemer, 2013). La notion de représentations peut être appréhendée d'un double point de vue : sociologique/psychologique.

Du point de vue sociologique, la question des représentations renvoie directement aux travaux de Durkheim. Dans un article publié dans la *Revue de Métaphysique et de Morale*, Emile Durkheim (1898) part du constat que la vie collective comme la vie mentale est faite de représentations. Nier qu'elles existent serait contraire à l'observation des faits : « Puisque l'observation révèle l'existence d'un ordre de phénomènes appelés représentations, qui se distinguent par des caractères particuliers des autres phénomènes de la nature, il est contraire à toute méthode de les traiter comme s'ils n'étaient pas » (1898, p. 5). Durkheim distingue cependant trois types de phénomènes, les processus physico-chimiques du cerveau, les représentations individuelles et les représentations

collectives. Ces dernières sont associées à des croyances, des règles ou des pratiques communes à tous les membres d'une société : « *Si l'on peut contester peut-être que tous les phénomènes sociaux, sans exception, s'imposent à l'individu du dehors, le doute ne paraît pas possible pour ce qui concerne les croyances et les pratiques religieuses, les règles de la morale, les innombrables préceptes du droit, c'est-à-dire pour les manifestations les plus caractéristiques de la vie collective. Toutes sont expressément obligatoires ; or l'obligation est la preuve que ces manières d'agir et de penser ne sont pas l'œuvre de l'individu, mais émanent d'une puissance morale qui le dépasse* » (1898, p. 17). Durkheim pense ainsi les **représentations collectives** comme une réalité sociale. Du point de vue de la psychologie sociale, Moscovici (1961) a précisé dans son ouvrage *La psychanalyse, son image et son public* que la notion de représentation (sociale) devait rendre compréhensible la réalité tout en s'insérant dans un échange avec autrui et en mobilisant les ressources de l'imagination : « *La représentation sociale est un corpus organisé de connaissances et une des activités psychiques auxquelles les hommes rendent la réalité physique et sociale intelligible, s'insèrent dans un groupe ou un rapport quotidien d'échanges, libèrent les pouvoirs de leur imagination* » (1961, p. 27-28). Il ajoute quelques pages plus loin que la représentation n'a pas besoin de coller à la réalité, c'est avant tout une forme de reconstruction de la réalité : « *Représenter une chose, un état n'est en effet pas simplement le dédoubler, le répéter ou le reproduire, c'est le reconstituer, le retoucher, lui en changer le texte* » (1961, p. 56). La notion de représentation désigne ainsi les éléments mentaux qui se forment par nos actions et qui informent nos actes. Elle se caractérise par un processus de construction et de fonctionnement distinct d'autres manières de penser (Danic, 2006). La notion de représentation (sociale) regroupe un certain nombre de traits tels que la symbolique, l'imaginaire, la cognition, l'action et l'interaction...

On le voit, la conceptualisation des représentations par la sociologie et la psychologie sociale font de ces dernières un véritable objet d'étude (Garnier et Sauvé, 1999). Etudier une représentation sociale, comprendre son fonctionnement, nécessite cependant d'en cerner sa structure et son organisation. Selon Abric (1976, 1987, 1994, 2011), « *toute représentation est organisée autour d'un noyau central* » (2011, p. 28). Ce noyau central est l'élément fondamental de la représentation, car c'est lui qui détermine à la fois la signification et l'organisation de la représentation. Le noyau central (ou structurant) d'une représentation assure deux fonctions essentielles : une fonction génératrice (il est l'élément par lequel se crée ou se transforme, la signification des autres éléments constitutifs de la présentation) et une fonction organisatrice (c'est le noyau central qui détermine la nature des liens qui unissent entre eux les éléments de la présentation). Abric ajoute que le noyau central a une propriété importante : « *c'est l'élément le plus stable de la représentation, celui qui en assure la pérennité dans des contextes mouvants et évolutifs* » (ibid). Le noyau porte ainsi en lui, une double identité : d'une part, il constitue dans la représentation l'élément qui résiste le plus au changement, et d'autre

part, toute modification du noyau central entraîne une transformation complète de la représentation. Si le repérage du noyau central s'avère déterminant pour connaître l'objet même de la représentation, il n'est cependant pas suffisant pour comprendre la structure et l'organisation d'une représentation. En effet, autour de ce dernier, gravitent des éléments périphériques. Ils sont en relation directe avec le noyau central, ils constituent l'essentiel du contenu de la représentation, sa partie la plus accessible : « ils comprennent des informations retenues, sélectionnées et interprétées, des jugements formulés à propos de l'objet et de son environnement, des stéréotypes et des croyances » (Abric, 2011, p. 33).

D'une certaine manière, on peut affirmer que les représentations sociales et leurs deux composantes (noyau central, éléments périphériques) s'inscrivent dans une analyse systémique et une approche par la pensée complexe... deux traits saillants d'une éducation au changement climatique pour un développement durable (ECCDD). Systémique car le noyau central et les éléments périphériques rendent les représentations à la fois stables et mouvantes, rigides et souples (le noyau central renvoie à des valeurs profondément partagées par le groupe, les éléments périphériques laissent la place aux expériences individuelles, aux données du vécu, aux situations spécifiques...). Complexe car les représentations sont à la fois consensuelles (ancrage du noyau central, émergence d'une solution collective) et marquées par de profondes différences interindividuelles. Doise (1985, p. 20) a résumé cette situation de la manière suivante : « l'identité des principes de régulation n'empêche nullement la diversité des prises de décisions qui se manifestent à travers des attitudes et des opinions » (cité par Abric, 2011, p. 38). En d'autres termes, l'étude des représentations doit tenir compte des différences interindividuelles, de manière à savoir si ces divergences sont essentielles ou si elles portent sur des aspects accessoires qui ne remettent pas en cause le fonctionnement d'un groupe.

Ainsi tous les outils (questionnaire, interviews, focus groupe, analyse de discours, enquête) proposant d'identifier les représentations sociales à des fins didactiques trouvent une certaine légitimité dans l'exploitation du modèle REDOC.

1.2 Des démarches pédagogiques favorables à l'ECCDD

Il est utile ici de rappeler que la didactique peut apporter des pistes intéressantes pour comprendre pourquoi certaines pédagogies répondent mieux aux spécificités d'une ECCDD. Si nous nous référons aux différents modèles « classiques » de l'apprendre – la maïeutique, l'empirisme, le behaviorisme, le (socio)constructivisme et les théories du changement conceptuel, dont le modèle allostérique-, nous constatons que seuls les deux derniers répondent aux besoins du développement d'une pensée complexe : le constructivisme et son élargissement au socio-constructivisme, dont les précurseurs sont Piaget (1949) et Vygotsky (1933 et 1934), et le modèle allostérique de l'apprendre développé par l'équipe d'André Giordan dès les années 1980 dont les précurseurs

remontent à Bachelard (1884-1962) pour ce qui est des représentations (1934), Dewey (1859-1952), Montessori (1870-1952), Ferrière (1879-1960) ou Freinet (1896-1966) pour leurs visions pédagogiques, mais aussi politiques et philosophiques. Giordan (1986, 1987, 1998, 2002, 2004, 2008) donne, par ailleurs, des indications précises sur les besoins de l'élève en matière d'environnements didactiques favorables à l'apprendre. Ces indications sont des aides précieuses pour voir en quoi les différentes pratiques pédagogiques participent ou non à une ECCDD.

Tant le constructivisme, le socio-constructivisme que le modèle allostérique, montrent que l'élève n'arrive pas « vierge » de toute connaissances à l'école (Giordan, Pellaud, Eastes, 2004 ; Giordan, Pellaud, 2008, Eastes, 2013). Il possède des conceptions qui vont, en même temps, être ses outils pour construire ses savoirs et des obstacles à cette construction. C'est la raison pour laquelle, l'enseignant doit, en permanence, « faire avec pour aller contre » les conceptions de l'élève, selon l'expression de Giordan (1986 ; 1998). En matière d'ECCDD, ces conceptions sont renforcées par un grand nombre de paradigmes qui vont à l'encontre des principes qui régissent la pensée complexe (Pellaud, 2000, 2011, 2013). Il incombe donc aux enseignants de choisir des pédagogies qui vont favoriser l'apprendre, mais un apprendre tourné vers le développement d'une pensée complexe, elle-même régie par des modes de raisonnement spécifiques. Nous avons parlé d'environnement didactique favorable à l'apprendre et de principes régissant la pensée complexe. Pour simplifier, nous dirons que toute pédagogie qui offre les outils permettant de développer l'ensemble de ces items peut être considérée comme favorable à l'apprendre.

Avec de tels objectifs, l'enseignant s'éloigne définitivement d'une position de « transmetteur des connaissances », rôle qui lui colle à la peau, encore aujourd'hui. Il devient de plus en plus un « préparateur », un « metteur en scène », le savoir nécessitant un contexte, un cadre, un décor pour que les élèves en comprennent le sens et la portée. Il doit également être un « perturbateur », capable de bousculer les conceptions des élèves, de les déstabiliser afin que ceux-ci soient dans l'obligation de les lâcher, de les transformer, de les faire évoluer. Mais trop de déstabilisation empêche l'apprentissage. Un rôle d'« accompagnateur » incombe donc simultanément à l'enseignant. Cet accompagnateur doit être capable de donner confiance en lui à l'élève, de créer une ambiance de classe qui permette le développement de cette confiance en soi et dans les autres, afin que les élèves puissent « se » lâcher et lâcher en même temps ces conceptions auxquelles ils tiennent tant, seuls outils de compréhension du monde à leur disposition. Enfin, l'objectif essentiel de tout apprentissage est d'amener les élèves à une capacité à être, à faire, à entreprendre. Il doit donc devenir un « développeur d'autonomie » en offrant à ses élèves le plaisir d'apprendre, de comprendre, l'envie d'en savoir plus, d'être curieux, le besoin d'aller au-delà de ce qui est facilement accessible. On oublie trop souvent que le plaisir émane

de l'effort, de la fierté que peut procurer un travail réalisé, bien fait, dans lequel la créativité et le respect du potentiel de chacun est reconnu et valorisé.

Mais tenir compte de cet environnement n'est pas suffisant pour garantir une ECCDD. En effet, celle-ci doit permettre le développement de la pensée complexe (Pellaud, 2011, 2013), notamment en favorisant la compréhension des principes qui la régissent. Ces principes (ambivalence, non certitude, non permanence, flux, relativité, systèmes complexes, interdépendance) vont à l'encontre de ce qui se fait habituellement en classe, où les problèmes ont une seule solution estimée correcte et où tout est pensé selon un axe unique, qu'il s'agisse de la construction des savoirs, du développement de la pensée ou de la progression selon l'âge et les notes obtenues. On comprend mieux, lorsque l'on prend conscience de ces dimensions pourquoi l'ECCDD a tant de peine à se frayer un chemin au milieu des balises rectilignes de l'école traditionnelle. Mais là encore, en rester à ces principes serait réduire l'ECCDD à des compétences. Si importances soient-elles, celles-ci ne suffisent pas. Il faut encore leur ajouter certains savoir-être, tels que : le développement d'un esprit critique constructif, la capacité à clarifier ses valeurs dans le respect des opinions et des cultures, la capacité à développer une pensée prospective, la capacité à agir en fonction des éléments susmentionnés.

Certaines pédagogies (pédagogie critique, pédagogie par projet, exploration du milieu de vie, pleine conscience) permettent de développer chez les apprenants des compétences propres à la compréhension du changement climatique et à son éducation.

1.3 Des outils didactiques adaptés à l'ECCDD

Si les pédagogies doivent être appropriées au public, les compétences auxquelles elles renvoient sont étroitement liées aux outils didactiques utilisés. Ces outils, à la fois ludiques et sérieux, doivent développer chez les apprenants, une analyse critique et réflexive, une capacité à mettre en perspective des points de vue différents ou encore à stimuler la créativité. Il ne s'agit pas ici de proposer une liste exhaustive des outils propres à une ECCDD, (une sorte de kit pédagogique), mais d'en utiliser certains dans des contextes appropriés. On peut citer le conte, le photo-langage, l'objet débat, le théâtre forum, les cartes de controverses, les jeux sérieux... qui s'apparentent plus à des terrains d'expérimentation qu'à des situations protocolaires.

Le conte nourrit l'imaginaire des enfants comme des adultes depuis un certain nombre d'années. S'il est porteur de valeurs, sa volonté première, à l'inverse de la morale, n'est pas de les transmettre, mais de les proposer à l'auditeur. Acteur de toutes les traditions orales par excellence, le conte peut être considéré comme universel, quand bien même les cultures dans lesquelles il émerge lui donnent des teintes particulières. C'est un outil pédagogique polyvalent : il peut être support de réflexion et amorce de débat ; il peut libérer la parole et provoquer des échanges (Girardin,

Pellaud, 2015). Le conte fait appel à l'imaginaire –un lieu non défini, des personnages fictifs, une situation non réelle- mais également à l'imagination, surtout si on laisse la possibilité à l'auditeur de devenir acteur (Pellaud et Robach, 2010). C'est la démarche qui a été privilégiée dans le projet IFADEM (2015). Arrêté au milieu de l'histoire, les apprenants étaient sollicités pour inventer la fin. Parfois bonne, parfois mauvaise, elle permettait alors de montrer les différents possibles et, surtout, de parler des valeurs que portaient les différentes versions. Deux objectifs importants pour une ECCDD : la pensée prospective et la clarification des valeurs. *Le photo langage* est un ensemble de techniques pédagogiques qui utilisent la photographie au service d'un projet de formation. Cette approche trouve sa source dans les pratiques de formateur d'enseignants. Elle vise la mise au jour des présupposés et des attentes, des représentations des apprenants et de la mise à distance avec leurs propres conceptions dans une phase projective (Girardin, Rafaitin, 2015). Il est nécessaire de les prendre en compte à la fois pour le formateur (pour savoir où en sont les apprenants) et pour les participants (pour clarifier leur conception du problème et découvrir qu'il existe d'autres façons de voir les choses). *L'objet débat* comme son nom l'indique repose sur la création ou le choix - de manière collective - d'un objet qui puisse susciter un débat lors de son utilisation en classe. Le questionnement est ainsi de mise : que faire ? Comment ? Pourquoi ? En vertu de quelles valeurs ? Avec quels matériaux ? Pour leur faire dire quoi ? Voilà déjà de quoi travailler la collaboration, la synergie, la communication. L'objectif de cet objet est d'être assez évocateur pour susciter le questionnement, tout en laissant assez de place à l'imagination pour que chacun puisse y voir son propre questionnement. Miroir du groupe concepteur autant que miroir de ceux qui vont y être confrontés, il laisse une grande place à l'imprévu (Pellaud, 2015, Pellaud, Marbacher, Heinzen, Salihi, Schweizer. 2016). *Le Théâtre forum* est une des techniques du théâtre de l'opprimé conçue par Augusto Boal au Brésil pendant la dictature et la censure. Le principe est de jouer ensemble des situations dans lesquelles notre vie de tous les jours ne va pas comme nous le souhaiterions puis à trouver des solutions en rejouant la scène autant de fois que nécessaire mais en changeant une partie du scénario. Les enjeux des situations problématiques sont décodés pour imaginer des dénouements et vérifier leur faisabilité. Sorte de théâtre interactif, le théâtre forum permet donc de faire émerger la parole et d'imaginer des solutions collectives à des problèmes individuels (Baron, Raffin, 2015). Enfin, *les cartes conceptuelles, mentales et de controverses* insistent sur la capacité (ce qui implique une participation active) de l'apprenant à mobiliser un ensemble d'informations pour construire de nouvelles connaissances dans un environnement en perpétuel mouvement. A ce titre, la cartographie présente de nombreuses vertus pédagogiques. D'un point de vue conceptuel, elle permet à des apprenants de mieux appréhender des quantités importantes d'informations (logique de structuration de l'information) et d'améliorer leur niveau de compréhension d'un sujet (logique de simplification de la

réalisation). D'un point de vue mental, elle engage les apprenants dans la créativité. Ce qui se traduit à la fois par une révision des idées, un élargissement de la discussion, un échange d'arguments et une forme d'autoproduction des connaissances. Du point de vue de la controverse, elle permet aux apprenants d'évoluer dans un cadre où les connaissances ne sont pas stabilisées, de prendre en compte l'incertitude afin de repérer l'ensemble des solutions et de comprendre tout le cheminement d'un raisonnement (Marquat, Diemer, Rafaitin, 2014, Rafaitin, Marquat, Diemer, 2015).

1.4 Des compétences à formaliser

Au sens étymologique la compétence provient soit de la « *competentia* » c'est-à-dire « juste rapport » ou du latin « *cum petere* » c'est-à-dire chercher à obtenir ensemble (Mulnet, 2014). Les compétences peuvent être comprises comme un ensemble de connaissances, capacités et attitudes que l'on mobilise dans un contexte précis. D'une manière générale, le sens que l'on donne à la notion de compétence n'est pas sans relation avec l'évolution de l'organisation du travail notamment dans le monde de l'entreprise. Dans ce contexte, on exige des personnes qu'elles soient capables de coopérer, décider, prendre des initiatives face à un emploi en constante évolution. Zarifian (1994) met ainsi l'accent sur la qualification du salarié. Le Boterf (1994) insiste quant à lui sur la responsabilité du professionnel à aller au-delà de la prescription, en sachant naviguer dans la complexité et se donner les moyens d'atteindre les résultats attendus. La compétence (Bosman, Gérard et Roegiers, 2000) permet une réponse originale, efficace (utile et pertinente sur le plan social) et intégrée (mobilisant simultanément un ensemble de savoirs, savoirs faire et savoir être en contextes). En ergonomie, cinq traits majeurs caractérisent la compétence : elle est *contingente* (dépend du contexte), *structurée* (sans l'action), *finalisée* (vers une réalisation), *apprise* (et non innée) et enfin *abstraite* (elle n'est pas observable directement et ne peut s'appréhender que par les résultats).

Dans le cadre du modèle REDOC, nous considérerons que la compétence est constituée de savoirs, savoirs faire, savoir être mais aussi de savoir, vouloir et pouvoir agir au sens de Le Boterf. Dans le cadre d'une ECCDD, différents types de positionnements pourront être envisagés : (1) un ensemble de connaissances réunies dans le champ des sciences de la vie et de la terre, des sciences sociales et économiques, des sciences de l'ingénieur. Il ne s'agit ici que d'enseigner les contenus issus de ces trois sphères d'expertise scientifique, ce qui conduit à adopter une démarche pluridisciplinaire ; (2) un contenant où ce qui importe n'est pas tellement les contenus mais plutôt la façon de les associer (à l'image d'une bonne recette de cuisine). Ceci conduit à la mise en place de savoirs faire que l'on peut associer à des bons gestes ; (3) une démarche, qui part du principe qu'il est nécessaire de se fixer des objectifs, puis de les atteindre en suivant un certain nombre de principes éthiques et opérationnels. Ces objectifs jouent le rôle de balises pour nous permettre d'avancer mais seront

continuellement remis en question au cours de l'avancée, car on se situe dans l'action. Il nous faudra donc assumer la responsabilité de nos actions. C'est de cette manière qu'il faut analyser les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

Ces compétences devront être à la fois transférables (il s'agit de prendre en compte le contexte et d'y adapter ses compétences) et transversales (ce qui induit une capacité à exprimer plusieurs compétences dans des registres et des contextes totalement différents). Dans le cas d'une ECCDD, il est possible de se référer à un guide référentiel des compétences transversales dont l'objectif serait de répondre à la question suivante : « comment former à une vision systémique, prospective et collective du monde de demain, en intégrant une prise de responsabilité tout en conservant une vision éthique, et en permettant et en accompagnant les changements nécessaires pour vivre ensemble demain ? » (Mulnet, Baron, Raffin, Egger, 2015).

De ce fait, le changement climatique ne peut se concevoir sans faire référence au *système climatique* (Ndiaye, Diemer, 2017). Ce dernier est conçu sous la forme d'un arbre des causalités et de conséquences, de boucles de rétroaction (positives et négatives) qui renforcent ou équilibrent le système et de phénomènes de délais. Sa *dimension prospective* renvoie aux concepts de risque, d'incertitude et d'imprévisibilité. Elle sous-entend également la présence de scénarios (pessimiste, optimiste et médian). Les *compétences collectives* jouent un rôle important, elles sont à la fois une agrégation des compétences individuelles (psychosociales) et le signe de méta-compétences issues d'un groupe (principalement véhiculées par une image de classe, une convention, un processus routinier...). La *responsabilité et l'éthique* définissent le champ et les limites du système étudié. Il s'agit à la fois de rappeler les obligations qui incombent à nos actes et de les situer dans une quête de sens. Les compétences sont ici porteuses de valeurs, ce sont ces dernières qui définissent les moyens de parvenir à atteindre certains objectifs. *Le changement* est l'objectif final, et dans le cas de l'ECCDD, il ne peut se concevoir que comme une capacité à changer les modes de pensée, les priorités, les valeurs, les comportements et les attitudes des individus ou d'un collectif d'individus (groupes, société).

Le modèle REDOC suppose donc que les trois leviers suivants soient actionnés : (i) que l'ECDD induise une démarche mobilisant ces cinq compétences ; (ii) que l'ECCDD conduise à l'action quelle que soit la compétence mobilisée ; (iii) que l'ECCDD mène à une forme de réflexivité susceptible d'améliorer les-dites compétences.

Au terme de cette présentation, il convient d'insister ici sur les principaux apports du modèle REDOC (Diemer, Ndiaye, Khushik, Pellaud, 2019b). D'une part, il met en lumière une ambiguïté toujours bien présente dans les rapports UNESCO. Si les connaissances scientifiques sont une condition nécessaire pour changer les

comportements, ce n'est pas une condition suffisante. C'est tout l'enjeu d'une éducation au changement climatique, dépasser le cadre de l'enseignement pour amener les apprenants à cerner les représentations collectives, à adopter une réflexion critique sur leurs pratiques, à maîtriser les outils de formation et à traduire cet ensemble en compétences. D'autre part, si les changements de comportements et d'attitudes sont la cible à atteindre, REDOC souligne qu'il existe de nombreuses clés d'entrée susceptibles d'engendrer une démarche réflexive. Il est possible de mobiliser des outils (exemple le théâtre forum) pour identifier les représentations collectives d'un groupe. Autrement dit, chacun (enseignant, formateur, responsable de formation, ONG, associations...) peut s'approprier REDOC en fonction de ses compétences, ses centres d'intérêts ou de ses objectifs pédagogiques. Enfin, le modèle REDOC est avant tout un modèle mental, s'appuyant sur une méthode de pensée systémique (Diemer, Ndiaye, Khushik, Pellaud, 2019c). Ce que les anglo-saxons ont l'habitude d'appeler *System Thinking* (Booth Sweeney, Meadows, 2010), renvoie à une série d'étapes. Il s'agit de préciser le problème que l'on souhaite étudier, de formuler des hypothèses pour expliquer le problème et de les tester à l'aide d'un modèle. Ce n'est que lorsque l'on a une compréhension suffisante de la situation que l'on souhaite décrire, que l'on peut mettre en œuvre le changement. Le modèle REDOC décrit un long processus d'apprentissage qui part des représentations pour aller vers les compétences, c'est une sorte de méta-cadre qu'il convient d'intégrer dans les sciences de l'éducation. Dans ce qui suit, nous utiliserons la grille d'analyse de REDOC pour appréhender les représentations du développement durable et du changement climatique des enseignants du primaire au Sénégal.

2. Analyse des représentations du développement durable et du changement climatique par les enseignants sénégalais du primaire dans les régions de Dakar et de Thiès

Les représentations (connaissances et perceptions) du développement durable et du changement climatique par les enseignants sénégalais du primaire, dans les régions de Dakar et de Thiès, ont été recueillies à l'aide d'un questionnaire⁵⁵ et d'une enquête de terrain qui s'est déroulée entre le 1^{er} octobre et le 30 novembre 2016. Les répondants ont fait partie d'un échantillon représentatif des enseignants et des enseignantes en

⁵⁵ Deux mois avant le départ pour le Sénégal, le questionnaire a été soumis à des chercheurs francophones du laboratoire ACTé, puis à des formateurs de l'ESPE Clermont Auvergne.

service dans des écoles primaires concernées. Les questionnaires ont été réalisés sur le lieu de travail des enseignants. Ils comportaient 11 questions réparties en trois thèmes : le développement durable, le changement climatique et l'éducation aux changements climatiques. Il a été préparé en vue d'être administré individuellement, dans le cadre d'un entretien avec l'enseignant (e).

2.1 Méthodologie de l'enquête et collecte des données

Nous avons établi une procédure très rigoureuse d'échantillonnage pour que la fiabilité de notre étude repose sur la représentativité de l'échantillon des enseignants. A défaut de disposer d'une liste exhaustive de l'ensemble des enseignants des deux régions ciblées (Dakar et Thiès), nous avons pu avoir accès à la base de données de la Direction de la Planification de ces deux académies.

Tableau 1 : Nombre d'écoles enquêtées

	Région de Dakar		Région de Thiès		Total
	Dakar ville	Rufisque	Thiès commun e	Thiès département	
		1	2		
Ecole urbaine	5	5		5	15
Ecole rurale		5	5		10
Total	5	10		5	25

Source : Dépouillement de questionnaire par les auteurs

Nous avons ensuite contacté les directeurs de ces écoles afin de mettre en place notre protocole d'enquête. Afin de garantir une précision suffisante dans l'estimation des paramètres géographiques (zone urbaine et zone rurale), nous avons considéré qu'un minimum de 25 écoles primaires devait être enquêtées avec, au minimum, cinq enseignants interviewés par école. Pour prendre en compte la diversité des écoles dans le pays et s'assurer de la représentativité des écoles qui composent cette étude, nous avons utilisé deux critères : la localisation géographique (région) et le milieu (rural/urbain) de l'école. Nous avons également tenu compte dans notre étude, du statut des enseignants interrogés, car il permet de cerner la part des enseignants statutaires (50%) dans le corps enseignant de ces deux régions.

Tableau 2 : Nombre d'enseignants interrogés selon leur statut

Statut	Féminin	Masculin	Total
Titulaires	45	30	75
Contractuels	24	21	45
Stagiaires	17	13	30
Total	86	64	150

Source : enquête réalisée par les auteurs

La première opération consistait à faire le choix des 25 écoles primaires conformément au plan d'échantillonnage retenu. Le tirage des écoles s'est effectué de façon indépendante. Ensuite, nous nous sommes rendus dans les écoles pour une première prise de contact. Nous avons expliqué le motif de notre présence dans l'école et l'objectif de l'enquête. Le questionnaire a été proposé aux enseignants, certains ont répondu le jour même en remplissant le questionnaire pendant leurs heures de pause, d'autres nous les ont remis le lendemain. Notre statut d'enseignants nous a facilité notre entrée en relation avec les directeurs des écoles retenues, puis avec leurs enseignants. La conduite de l'enquête dans les écoles s'est très bien déroulée dans toutes les écoles, qu'elles soient urbaines ou rurales.

Les données collectées ont été vérifiées, codifiées puis saisies à partir des tables Excel. Le bilan des opérations souligne que 100% des écoles prévues ont été couvertes, ce qui correspond à un taux de réponse très élevé. Avec une parfaite adéquation entre les échantillons prévu et réalisé, le degré de fiabilité des analyses fondées sur ces données peut donc être considéré comme robuste, avec des précisions d'estimations acceptables.

Tableau 3 : comparaison des échantillons

Région	Milieu		Echantillon	
	Urbain	Rural	Nombre d'écoles prévues	Nombre d'écoles enquêtées
Dakar	10	5	15	15
Thiès	5	5	10	10
Total	25		25	

Source : enquête réalisée par les auteurs

2.2 Les résultats de l'enquête

Les résultats ont été analysés en utilisant notre tripartition initiale : (1) représentations sociales du développement durable ; (2) représentations sociales du changement climatique ; (3) représentations sociales du changement climatique et de son éducation.

2.2.1 Les représentations sociales du développement durable

Quand on évoque le développement durable avec les enseignants sénégalais, trois thèmes recueillent l'essentiel des réponses : l'environnement, la population et la santé. L'un d'eux, l'environnement constitue le noyau central des représentations sociales du développement durable chez les enseignants sénégalais du primaire. L'environnement renvoie à deux sous-catégories : la protection de l'environnement et le respect de l'environnement. Les thèmes population et santé peuvent être assimilés à des éléments périphériques. Derrière ces deux notions, se cachent trois thèmes sensibles aux pays

en développement : les maladies transmissibles, les déchets et l'eau (pollution et accessibilité).

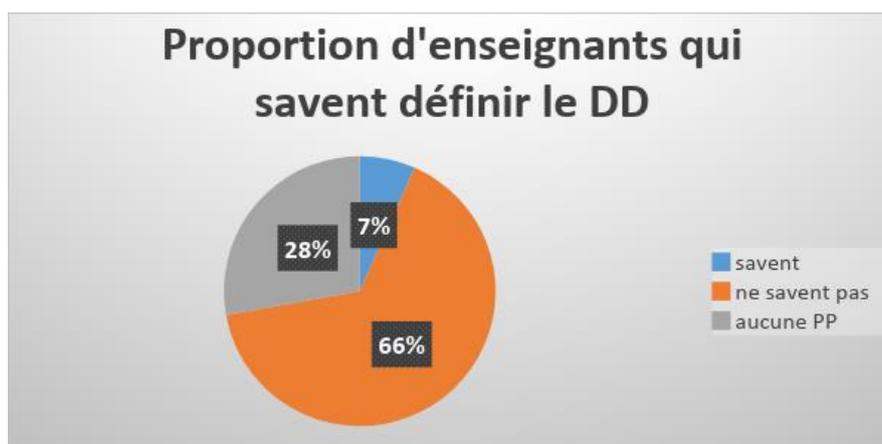
- A la question Q1, avez-vous déjà entendu parler du développement durable ?

Sur les 150 enseignants interrogés, 100% reconnaissent avoir entendu parler du concept de développement durable. Ce résultat est lié au fait que le développement durable est mentionné dans le Guide pédagogique de l'enseignant Sénégal. Cet outil est disponible dans toutes les écoles et à toutes les étapes du cycle primaire (1^{ère} étape : CI-CP, 2^{ème} étape : CE1-CE2 et 3^{ème} étape : CM1-CM2). Il n'y a pas de disparités entre les enseignants en milieu urbain ou rural.

- A la question Q2, que signifie pour vous la notion de développement durable ?

Les réponses apportent plus d'informations. Si tous les enseignants ont entendu parler de la notion de développement durable, très peu d'enseignants savent le définir et font référence au rapport Brundtland. Seul 7 % des interrogés sont capables de reformuler la définition officielle du développement durable.

Figure 3 : Proportion d'enseignants pouvant définir le concept de développement durable



Source : Questionnaire (auteurs)

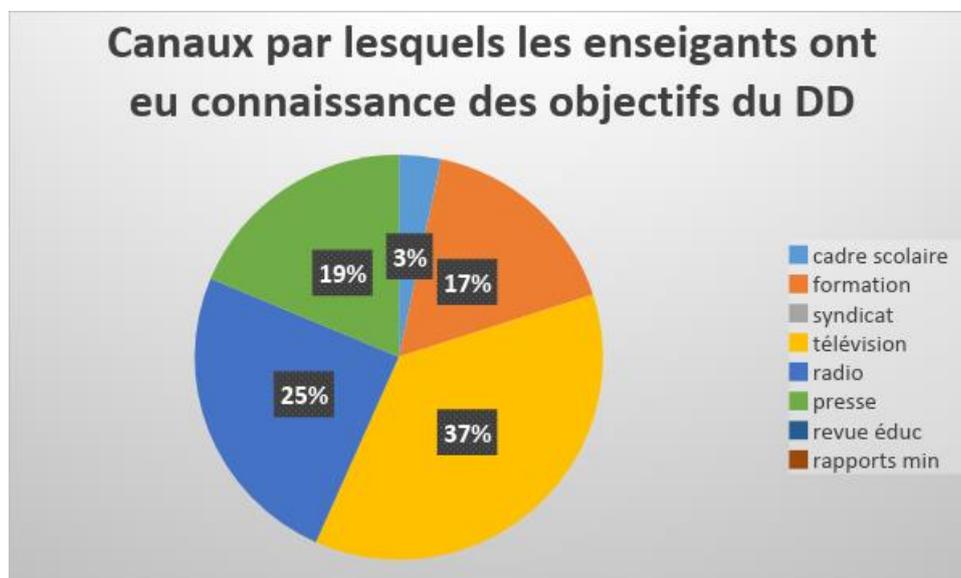
Ce faible niveau de réponses nous a conduit à nous interroger sur les moyens par lesquels les enseignants sénégalais avaient eu connaissance des objectifs du développement durable (ODD).

- A la question Q3, dans quelle(s) circonstance(s) avez-vous entendez parler des objectifs du DD ?

Les enseignants ont précisé qu'ils avaient pris connaissance des ODD à travers trois médias : la télévision, la radio (les radios locales jouent un rôle très important dans la diffusion de l'information sur le territoire national) et la presse. La diffusion de ces connaissances par ces médias ne touche pas uniquement les enseignants, mais tous les acteurs de la société sénégalaise. Les centres de formation et d'éducation (écoles) sont

également de bons relais de l'information. En revanche, le canal ministériel et académique (circulaires, lettres d'orientation, rapports ministériels ou revue spécialisées en éducation) ne constitue pas un support important dans l'appropriation et l'approfondissement des ODD.

Figure 4 : Les canaux de communication des ODD



Source : données de l'enquête (auteurs)

- A la question (Q4), avez-vous déjà eu une formation sur le développement durable ?

Tous les enseignants ont répondu par l'affirmatif. Cependant, après information auprès du ministère, il s'avère que ces formations n'ont pas cherché à préciser les principes, les objectifs et les enjeux du développement durable. Dans le cadre de la généralisation du curriculum de base à l'école, le gouvernement sénégalais a financé, en collaboration avec ses partenaires, des formations dans toutes les académies. Ces formations visaient essentiellement l'instauration d'une réforme basée sur l'approche par les compétences. L'orientation des autorités sénégalaises est claire : « les changements préconisés dans les programmes d'éducation de base, tant du formel que du non formel, relèvent d'un souci d'adaptation du Sénégal aux mutations intervenues dans l'environnement national et international. En effet le début du troisième millénaire est marqué par une dynamique accélérée de mondialisation et la nécessité pour les ressources humaines d'un pays, quel qu'il soit d'être de plus en plus compétent. L'option curriculum adoptée par le Sénégal a pour but principal de permettre au système éducatif sénégalais d'entrer de manière appropriée dans la modernité » (CEB, 2007). Nombreux sont les enseignants sénégalais à partager les valeurs du développement durable et de son éducation. Mais cette adhésion à l'initiative d'une éducation au développement durable par les enseignants ne garantit pas sa réelle mise en œuvre dans les pratiques quotidiennes de classe.

Le tableau 4 soulève ce problème. Le développement durable et son éducation sont considérés comme un « sous domaine » de l'éducation à la Science et à la vie sociale (ESVS). En outre, aucune mention n'est faite sur les changements climatiques.

Tableau 4 : Schéma intégrateur des domaines dans le cursus scolaire

DOMAINES	SOUS DOMAINES	ACTIVITES	THEMES TRANSVERSAUX
DOMAINE 1 Education à la science et à la vie sociale	SOUS DOMAINE 1 Découverte du monde	<i>Histoire</i>	
		<i>Géographie</i>	
		<i>Initiation scientifique et technologique</i>	
	SOUS DOMAINE 2 Education au développement durable	<i>Vivre dans son milieu</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Environnement ▪ Population ▪ Santé
		<i>Vivre ensemble</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Genre ▪ Paix, citoyenneté et droits humains ▪ Education religieuse

Source : GEB (2007)

Il paraît manifeste que les enseignants sont l'une des courroies de transmission des connaissances sur le développement durable et les ODD. Dans le cas de l'école primaire, ils doivent initier un processus d'apprentissage qui passe à la fois par des éco-gestes et des bribes de connaissances. Si cette phase n'est pas appréhendée à sa juste valeur (formation des enseignants au développement durable), c'est toute une génération qui ne sera pas sensibilisée aux enjeux du développement durable et à la question du changement climatique.

2.2.2. Les représentations sociales du changement climatique

Les représentations en matière de changement climatique introduisent trois notions : la gestion durable des ressources, la responsabilité et la citoyenneté. La gestion durable des ressources occupe la place du noyau central. Ce noyau comprend la préservation, l'entretien et l'utilisation durable des écosystèmes. Aux dires des enseignants, il convient de dissocier, dans cette thématique, le maintien des processus écologiques (système agricole et forêts, systèmes côtiers et eau douce), la préservation de la biologie génétique (la préservation des espèces et de leur habitat) et l'utilisation durable des espèces et des écosystèmes (gestion équitable du capital naturel). La responsabilité et la citoyenneté constituent deux éléments périphériques du noyau. Pour un grand nombre d'enseignants, la responsabilité se situe à un double niveau, un niveau local et un niveau global ou international. A l'intérieur de chaque niveau, la responsabilité peut être collective (conférée à une représentation politique) et/ou individuelle (elle engage l'être humain en tant que sujet et acteur).

Notons un point important dans l'ensemble des réponses données par les enseignants. Ces derniers associent le changement climatique à l'environnement et plus précisément à la biodiversité. Les termes « système climatique » ou « effet de serre » qui constituent des notions essentielles dans les sciences du climat, ne ressortent presque jamais dans le discours des enseignants.

- A la question Q5, *avez-vous déjà entendu parler du changement climatique ?*

Tous les enseignants enquêtés ont répondu par l'affirmative. Leur principale source d'information, ce sont les médias (98%) et quelques campagnes de sensibilisation (12%). Les cursus de formation ne sont jamais cités. Lorsque l'on évoque avec eux le lien entre le changement climatique et développement durable, la plupart des enseignants se 'refugient' derrière le concept environnement.

- A la question Q6, *avez-vous déjà suivi une formation sur le changement climatique ?*

La réponse est formelle, aucun des 150 enseignants interrogés n'a suivi une formation spécifique dans ce domaine.

- A la question Q7, *quels sont les causes des changements climatiques ?*

Les enseignants sont incapables d'énoncer avec exactitude cinq causes du changement climatique. Ce tableau révèle aussi une information importante : 94% des réponses désignent l'homme comme l'une des causes principales du changement climatique.

Tableau 5 : identification des causes du changement climatique

	<i>A pu énoncer correctement les causes du CC (en %)</i>
<i>Aucune proposition</i>	16
<i>1 cause sur 5</i>	30,6
<i>2 causes sur 5</i>	35,4
<i>3 causes sur 5</i>	10,7
<i>4 causes sur 5</i>	7,3

Source : Auteurs

- A la question Q8, *quelles sont les conséquences des changements climatiques ?*

Les enseignants sont beaucoup plus précis et préoccupés par les conséquences du changement climatique. La totalité des enseignants ont énoncé correctement au moins une conséquence du changement climatique. Les inondations (en zones urbaines et en zones rurales) représentent 40% des réponses, les phénomènes de sécheresse (surtout en zone rurale), représentent 35 % des réponses, enfin 15% des personnes interrogées mentionnent la hausse du niveau de la mer (surtout à Dakar et Rufisque).

Tableau 6 : identification des conséquences du changement climatique

	<i>A pu énoncer correctement les conséquences du CC (en %)</i>
--	--

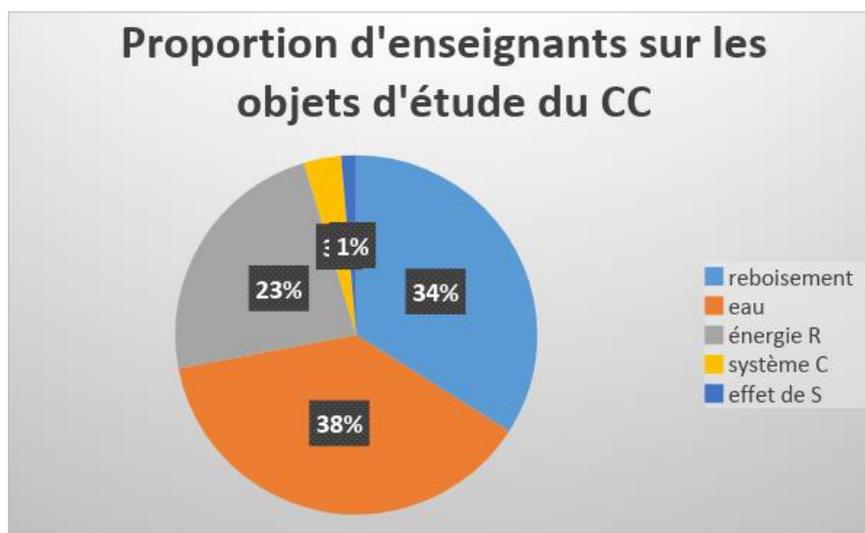
1 conséquence sur 6	20
2 conséquence sur 6	40
3 conséquence sur 6	30
4 conséquence sur 6	10

Source : Auteurs

2.2.3 Les représentations sociales du changement climatique et de son éducation

Les représentations en matière d'éducation au changement climatique ne renvoient ni à des méthodes pédagogiques, ni à des outils didactiques, ni même à des compétences. Les enseignants abordent le changement climatique et son éducation à partir des objets d'étude du changement climatique. Ainsi, les enseignants introduisent le changement climatique en classe en s'appuyant sur des thèmes tels que l'eau (38%), le reboisement (34%) ou l'énergie (25%). Le système climatique et l'effet de serre ne sont pratiquement jamais mentionnés (moins de 1%). La culture et les connaissances des enseignants s'appuient beaucoup sur l'information distillée par les médias,

Figure 5 : Les objets d'étude du changement climatique



Source : Auteurs

- A la question Q11, enseigneriez-vous le changement climatique à vos élèves ?

La réponse est unanime, que ce soit dans les zones urbaines ou rurales, qu'ils soient contractuels ou titulaires, tous reconnaissent à travers leurs réponses (100% de oui), l'utilité d'une éducation en faveur du changement climatique dans les classes du primaire. Cette réponse se trouve confortée par leur souhait de trancher entre enseigner et éduquer au changement. Les enseignants ont une vision transformatrice de leur métier, un grand nombre insistent sur le fait qu'éduquer au changement climatique passe par des bonnes pratiques.

3. Quelques recommandations pour intégrer l'éducation au changement climatique dans la scolarité obligatoire au Sénégal

A l'heure actuelle, l'éducation aux changements climatiques pour un développement durable (ECDD) est devenue un enjeu important dans la formation initiale, non seulement dans les pays du Sud, mais aussi dans les pays du Nord. Si on lui porte de plus en plus d'intérêt, sa mise en œuvre à l'école dépend des directives ministérielles et des enseignants. Il est donc nécessaire que l'ECDD soit intégrée dans les programmes scolaires du Primaire et qu'une véritable politique de formation continue soit mise en place à destination des enseignants.

Pour une généralisation effective de l'éducation au changement climatique dans l'enseignement scolaire du système primaire sénégalais et plus largement dans tous les systèmes éducatifs nationaux, nous formulons les trois recommandations suivantes : (1) la mise en œuvre et l'ancrage de l'ECC dans l'enseignement scolaire par des dispositifs incitatifs ; (2) la formation initiale et la formation continue des enseignants ; (3) l'intégration des acteurs de la société civile à l'école.

(1) Par recommandations pour la mise en œuvre et l'ancrage de l'ECC dans l'enseignement primaire, nous entendons ici plusieurs choses :

- La création de modules (kit pédagogique) à l'intention des enseignants. L'IFADEM, très présente au Sénégal et en Afrique en général, peut initier une telle démarche en concertation avec les ministères concernés (notamment pour distiller des ressources à distance).

- L'ECDD doit s'intégrer dans un processus d'apprentissage intégrant une pédagogie de projet (pédagogie dont les enseignants du primaire sont familiers) et de nombreux outils didactiques en fonction du niveau des élèves : le conte et le photo-langage pour les premières sections ; le théâtre forum et l'objet-débat pour les sections supérieures.

- L'ECDD doit s'appuyer sur une démarche systémique (*systeme thinking*) visant à présenter le système climatique en fin de cursus du primaire. Le raisonnement par relations causales initie les élèves à une démarche de résolution de problèmes par itérations successives.

- Le jeu et les débats philosophiques peuvent être introduits dès le CM1 et le CM2 afin de familiariser les élèves avec les différents thèmes du changement climatique.

- Les bonnes pratiques peuvent prendre la forme d'ateliers pratiques intégrant des connaissances sur la biodiversité (comprendre le processus d'évolution d'une plante, ses besoins en eau, sels minéraux et énergie, ses relations avec les insectes et les autres végétaux) et les incidences que peut avoir le changement des conditions climatiques lors de son évolution.

(2) Par recommandations pour mettre à la disposition du corps enseignant du matériel d'enseignement et des documents de travail, nous pourrions évoquer :

- des supports (kit de connaissances) à destination des enseignants. Il s'agira de textes courts présentant un point théorique, les savoirs scientifiques et quelques illustrations.
- Une présentation d'analyses factuelles associées à des objectifs pédagogiques, exemple d'une crue ou d'une inondation permettant de comprendre les phénomènes hydriques, les phases successives menant à un tel événement et les bons gestes à accomplir.
- Des kits vidéo permettant de mobiliser des outils didactiques en situation contextualisée. Les focus group peuvent être utilisées pour discuter d'un outil. Des sessions de 30 mn peuvent être incitatives car elles s'intègrent facilement dans des séquences de cours.

(3) Par recommandations concernant l'intégration des acteurs de la société civile, nous suggérons plusieurs séquences à but pédagogique.

- Les acteurs de la société civile et plus précisément les habitants d'une ville, qu'ils relèvent du cercle familial ou du voisinage, ont souvent été témoins des conséquences du changement climatique. Des interventions auprès des classes avec la production d'un cahier « Mémoire » confectionné par les élèves permettraient de faire du changement climatique une connaissance commune.
- Les acteurs de la société sont souvent capables d'apporter un autre regard sur les thématiques du changement climatique car ils interviennent directement auprès des populations (aide humanitaire ou sociale)
- Les enseignants sont habitués à faire des sorties sur le terrain lors des cours sur la biodiversité ou l'environnement, ce principe peut être expérimenté dans le cas de changements climatiques, exemple de la désertification ou de l'accès à l'eau.
- Les acteurs de la société civile ont souvent un lien direct ou indirect avec de grandes organisations ou des Fondations à but non lucratif. Ces dernières sont capables de financer des programmes d'envergure au niveau régional ou national. Le climat peut être ce fil rouge et constituer un objectif de formation à plus ou moins long terme.

Conclusion

En 2005, dans son plan international de mise en œuvre de la Décennie des Nations Unies pour l'éducation en vue d'une éducation au développement durable (2004-2015), l'UNESCO, définissait l'éducation au développement durable (EDD) en ces termes « *l'éducation au développement durable consiste à intégrer dans l'enseignement et l'apprentissage les thèmes clés du développement durable comme le changement climatique, la prévention des risques naturels, la biodiversité, la réduction de la pauvreté ou la consommation*

durable ». Pendant près de 10 ans, les différents Etats ont procédé à de nombreuses expérimentations, vantant les mérites des éco-gestes et d'un retour à la question environnementale. L'UNESCO a largement communiqué sur ces projets en publiant une série de rapports présentant les diverses expressions du développement durable. Si le changement climatique constitue un thème du développement durable et qu'à ce titre, il est intégré dans une éducation au développement durable, il est encore prématuré d'évoquer l'existence d'une véritable éducation aux changements climatiques dans les pays du Sud comme dans les pays du Nord. Une éducation aux changements climatiques en vue d'un développement durable (ECCDD) doit intégrer un cadre conceptuel et méthodologique permettant aux enseignants et aux apprenants de renforcer leurs compétences. Aux connaissances scientifiques sur le climat, qui relèvent d'une compréhension et d'une analyse des sciences du climat, il convient d'associer une éducation aux changements climatiques qui suppose un changement dans les comportements et les attitudes des individus. Le modèle REDOC (REprésentations, Démarche pédagogique, Outils didactiques et Compétences) peut apporter certaines réponses. Pour les chercheurs, il s'apparente à une recherche relevant de la psychologie et de la sociologie pour appréhender les représentations sociales des enseignants et des apprenants. C'est également une immersion anthropologique dans les perceptions et les motivations d'un groupe. Pour les didacticiens, il enclenche une réflexion sur les méthodes pédagogiques adaptées au public et sur les apprentissages à mettre en place. Pour les enseignants, il propose une série d'outils transférables en situation de classe et propices à toute forme d'innovation pédagogique. Enfin, pour les apprenants, il renforce leurs compétences tout en les invitant à changer de comportements et d'attitudes. Si le modèle REDOC reste avant tout un modèle mental fortement ancré dans la pensée systémique et complexe, il suppose de la part des enseignants et des apprenants qui se l'approprient, l'émergence d'une forte réflexivité sur les pratiques à mettre en place et les objectifs pédagogiques à atteindre.

Bibliographie

- Abric, J.C (1994), *Pratiques sociales et représentations*, PUF. Nouvelle édition (2011).
- Abric, J.C (1989), *L'étude expérimentale des représentations sociales*, in D. Jodelet (dir), *Les représentations sociales*, PUF.
- Abric, J.C (1987), *Coopération, compétition et représentations sociales*, Cousset, Delval.
- Abric, J.C (1976), *Jeux, conflits et représentations sociales*, thèse d'Etat, Université d'Aix en Provence.
- Bachelard, G. (1934), *La formation de l'esprit scientifique*, J.Vrin éd.
- Barthes, A., Alpe, Y. (2015), *Utiliser les représentations sociales pour l'analyse des savoirs en éducation : exemple de l'éducation au développement durable*,

L'Harmattan.

Bauchet, P. Germain, P. (2003), *L'éducation, fondement du développement durable en Afrique*, Presses Universitaires de France. Collection des Cahiers des Sciences Morales et Politiques.

Bosman, C., Gerard, F.M, Roegiers, X. (2000), *Quel avenir pour les compétences ? Bruxelles* : de Boeck Université.

Checkland, P. (1981), *Systems thinking, systems practice*.

Clément, P. (2004), « Science et idéologie : exemples en didactique et épistémologie de la biologie : Sciences, Médias et Société », Colloque Ecole Normale Supérieure Lettres et Sciences Humaines, Lyon, 15, 16 et 17 juin.

Develay, M. (2015), *D'un programme de connaissances à un curriculum de compétences*, De Boeck

Dewey, J. (1962), *L'école et l'enfant*, Paris, Delachaux et Niestlé.

Doise, W. (1985), *Les représentations sociales : définition d'un concept*, *Connexions*, 45, 243 - 253.

Danic, I. (2006), *La notion de représentation pour les sociologues : Premier aperçu*, *ESO*, 25, décembre, 29 - 32.

Diemer, A. (2015), *L'éducation au développement durable dans les Suds, une initiation au modèle REDOC*, *Oeconomia*.

Diemer, A., Marquat, C. (2015), *Regards croisés Nord Sud sur le développement durable*, De Boeck.

Diemer, A. (2013), *Les représentations du développement durable dans les Parcs Naturels régionaux*, Séminaire de l'OR2D, document de travail, 3, 22 octobre, 39 p.

Durkheim, E. (1898), *Représentations individuelles et représentations collectives*, *Revue de Métaphysique et de Morale*, VI, mai, 1 - 22.

Eastes, R-E. (2013), *Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens, entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences*, Thèse de doctorat, Université de Genève.

Fisher, G.N (1987), *Les concepts fondamentaux de la psychologie sociale*, Paris, Dunod.

Flament, C. (2011), *Structure, dynamique et transformation des représentations sociales*, in Abric J.C (dir), *Pratiques sociales et représentations*, PUF.

Flament C. (1989), *Structure et dynamique des représentations sociales* in D. Jodelet (dir), *Les représentations sociales*, PUF.

Garnier, C., Sauve, L. (1998-1999), *Apport de la théorie des représentations sociales à l'éducation relative à l'environnement. Conditions pour un design de recherche*, *Education relative à l'environnement*, 1, 65-77.

Giordan, A. (1986), *Environmental Education, teaching and learning processes*, UNESCO-PNUE.

Giordan, A., De Vecchi, G. (1987), *Les origines du savoir*, éd. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.

Giordan, A. (1998), *Apprendre !* éd. Belin, Paris.

Giordan, A. (2002), *Une autre école pour nos enfants*, Delagrave.

Giordan, A., Pellaud, F., Eastes, R-E (2004), *Des modèles pour comprendre l'apprendre : de l'empirisme au modèle allostérique* in *Gymnasium Helveticum*, mai.

Giordan, A., Pellaud, F. (2008), *Comment enseigner les sciences*, éd. Delagrave, Paris.

Giral, J., Chamboredon, M.C, Legardez, A. (2008), *Former au développement durable et à la citoyenneté par le débat situé et argumenté et la co-construction de savoirs environnementaux critiques*, Colloques des Mines, Albi.

Girault, Y., Lhoste, Y. (2010), *Opinions et savoirs : positionnement épistémologiques et questions didactiques*, in *Opinions et savoirs. Recherches en didactique des sciences et technologies*, 1, INRP Editions.

Hagege, H. (2015), *Et les compétences spirituelles alors ? La clé de la durabilité est celle du bonheur ! Actes du Colloque Former au monde demain.*

Jodelet D. (1997), *Représentation sociale : phénomènes, concept et théorie* » in S. Moscovici (dir), *Psychologie sociale*, Paris, PUF.

Jodelet, D. (1991), *Les représentations sociales*, Paris, PUF.

Jodelet, D. (1991), *Représentation sociale*, Grand Dictionnaire de la psychologie, Paris, Larousse.

Lange, J. M., & Victor, P. (2011). *Un nouveau métier : éduquer au développement durable*. *La Revue Durable*, 42, 36-39.

Le Boterf, G. (1994), *De la compétence. Essai sur un attracteur étrange*, Paris, Les Editions d'organisation, 16-18.

Legardez, A., Simmoneaux, L. (2011), *Développement durable et autres questions d'actualité. Questions socialement vives dans l'enseignement et la formation*, Educagri.

Legardez, A. (2004), *Transposition didactique et rapport aux savoirs : enseignements de questions économiques et sociales, socialement vives*, *Revue Française de Pédagogie*, 49, 19-27.

Legardez, A. (2004), *L'utilisation de l'analyse des représentations sociales dans une perspective didactique : l'exemple de questions économiques*, *Revue des sciences de l'éducation*, 30, 3, 647-665.

Leplat J. (2004), *L'analyse psychologique du travail*, *Revue européenne de psychologie appliquée*, 54, 101-108.

MEN, 2005b, *Programme décennal l'éducation et de la formation, plan d'action de la deuxième phase 2005-2007*, Dakar, Ministère de l'enseignement préscolaire, de l'élémentaire, du moyen secondaire et des langues nationales.

Morin, E. (2000), *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*. Seuil.

- Morin, E. (2014), *Enseigner à vivre. Manifeste pour changer l'éducation*. Actes Sud.
- Moscovici, S. (1961), *La psychanalyse, son image et son public*, Paris, PUF.
- Mulnet, D. (2014), *Quelles compétences pour quelle éducation au développement durable* in Diemer A., Marquat C. (dir), *Education au développement durable. Enjeux et Controverses*. De Boeck.
- Nations-Unies, (2015), *Accord de Paris*. Disponible sur : http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/french_paris_agreement.pdf
- Nations-Unies, (2015), *Objectifs de Développement Durable (ODD)*.
- Nations-Unies, (2011), *Objectifs du Millénaire pour le développement*. ONU
- Nations-Unies, (2002), *Rapport du Sommet mondial pour le développement durable*. Johannesburg. Afrique du Sud.
- Pagoni, M., Tutiaux-Guillon, N. (2012), *Les éducations à... nouvelles recherches, nouveaux questionnements*, Spirale, 50.
- Pellaud, F., Heinzen, S., Marbacher, V., Salihi, L., & Schweizer, T. (2016). *Questionner les objets quotidiens pour développer une pensée créatrice et prospective*. In *Former au monde de demain*. Colloque international francophone de l'École supérieure du professorat et de l'éducation de Clermont-Ferrand, France
- Pellaud, F. (2013), *EDD, ça veut dire quoi?*, *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars.
- Pellaud, F., Rolle, L., Gremaud, B., Bourqui, F. (2012), *L'éducation en vue d'un développement durable : enjeux, objectifs et pistes pratiques interdisciplinaires*, *Revue interdisciplinaire de didactique*, Québec.
- Pellaud, F. (2011), *Pour une éducation au développement durable*, Quae Editions.
- Pellaud, F. Robach, C. (2010) *L'Ogresse*, Les Atomes Crochus éd. Paris, disponible en livre animé sur : <https://www.lasourisquiraconte.com/les-histoires-a-inventer/7-l-ogresse.html>
- Pellaud, F. (2000), *L'utilisation des conceptions du public lors de la diffusion d'un concept complexe, celui de développement durable, dans le cadre d'un projet en muséologie*. Thèse de doctorat, Université de Genève.
- Piaget, J. (1998), *De la pédagogie*, éd. Odile Jacob, Paris.
- Raffin, F., Baron S. (2011), *Dossier d'analyse sur la notion des représentations, Evaluation de l'UE 1A, Diplôme universitaire d'éducation au développement durable*, ESPE Clermont Auvergne.
- Rouquette, M.L (1994), *Sur la connaissance des masses : essai de psychologie politique*. Presses Universitaires de Grenoble.
- Sauve, L., Machabee, L. (2000), *La représentation : point focal de l'apprentissage*, *Education relative à l'environnement*, 2, 183-194.

Schneuwly, B., Bronckart, J-P. (1985), *Vygotsky aujourd'hui*, éd. Dela chaux et Niestlé, Neuchâtel.

Stengers, I. (2005), en introduction au livre de Querrien, A. *L'école mutuelle, une pédagogie trop efficace ?* éd. les empêcheurs de penser en rond.

Thayer, R. E., Newman, J. R., & McClain, T. M. (1994), *Self-regulation of mood: Strategies for changing a bad mood, raising energy, and reducing tension*. *Journal of personality and social psychology*, 67(5).

Unesco (2014), *Façonner l'avenir que nous voulons*, Décennie des Nations Unies pour l'éducation au service du développement durable (2005 - 2014), rapport final, Section de l'éducation pour le développement durable. Division pour l'enseignement, l'apprentissage et les contenus, UNESCO.

Unesco (2009), *Contextes et structures de l'EDD*, Décennie des Nations Unies pour l'éducation au service de l'éducation au développement durable.

Unesco, (2000), *Cadre d'action de Dakar. L'éducation pour tous : tenir nos engagements collectifs* texte adopté par le Forum sur l'éducation pour tous, Dakar, Sénégal, 26-28 avril 2000, Paris, Unesco.

Verges, P. (1994), *Les représentations sociales de l'économie : une forme de connaissance*, in Jodelet D. (dir), *Les représentations sociales*, PUF.

Vivien, F.D, Lepart, J., Marty, P. (2013) *L'évaluation de la durabilité*. Indisciplines. Editions QUAE.

Zahatchouk, J.M (2008), *Travail par compétences et socle commun*, Repères, Sceren, CRDP d'Amiens.

Zarifian, P. (1994), *Compétences et organisation qualifiante en milieux industriels* in F. Minet, M. Parlie, S. de Witte (dir), *La compétence, mythe, construction ou réalité ?* Paris. L'Harmattan.

CONCLUSION

Depuis la publication du rapport Brundtland (1987), le développement durable s'est progressivement immiscé dans les programmes et les stratégies des Nations-Unies : « *Au fil des ans, les Etats Membres ont progressivement admis que le développement durable – un développement apte à promouvoir la prospérité et les opportunités économique, un plus grand bien-être social et la protection de l'environnement – est le meilleur moyen d'améliorer la vie des populations sur la terre* » (Nations-Unies,2019). Cette promotion du développement durable constitue aujourd'hui l'une des priorités de l'ONU, via les 17 Objectifs du Développement Durable (ODD) adoptés en 2015 et son programme de développement durable à l'horizon 2030.

L'éducation joue un rôle important dans la mise en œuvre du développement durable. L'Assemblée générale des Nations Unies n'a pas hésité à lancer sa Décennie pour l'Education en vue du Développement Durable (DEDD) sur la période 2005 – 2014. Il s'agissait d'intégrer les principes, les valeurs et les pratiques du développement durable à toutes les modalités d'enseignement et d'apprentissage. Cet effort éducatif visait « *à changer les comportements afin de construire pour la génération présente et les générations à venir un avenir plus viable fondé sur l'intégrité environnementale, la durabilité économique et l'équité sociale* » (UNESCO, 2005). L'UNESCO, en tant que chef de file de la DEDD, a coordonné les actions des agences ainsi que les programmes du système des Nations-Unies dans le domaine de l'Education au Développement Durable (EDD). De ce fait, tous les Etats Membres - et notamment le Sénégal - ont intégré un volet Education dans leur Stratégie Nationale pour le Développement Durable⁵⁶ (SNDD).

Dans nos sociétés modernes, l'éducation remplit trois grandes fonctions. Elle est tout d'abord le terreau de la transmission des connaissances, il s'agit de permettre

⁵⁶ Il nous paraît opportun d'opérer une distinction entre l'idée régulatrice d'un développement durable, telle qu'elle a émergé dans le cadre de l'ONU, et son opérationnalisation au niveau national. Dans le cas de l'idée régulatrice, la durabilité ne correspond pas à une forme d'état paradisiaque d'un développement achevé, mais à un état dynamique devant être réalisé et consolidé en permanence. Dans le cas de son opérationnalisation, les objectifs dépendent du contexte, c'est-à-dire de la période considérée et de l'environnement social, politique, économique et culturel en question. Ils ne peuvent pas être définis aujourd'hui et s'appliquer à toutes les générations qui suivront, ni être fixés par des représentants d'une région donnée dans le monde et être généralisés à l'ensemble de l'humanité. Le développement durable et son éducation doivent ainsi s'inscrire dans un processus consensuel, permettant une transposition à l'échelle nationale.

à chacun d'apprendre à penser par soi-même en puisant dans un registre des savoirs. L'éducation est synonyme d'instruction pour tous, d'émancipation par le savoir rationnel et de développement de la personnalité (enfant, adulte). Elle est également un canal de socialisation, créant un sentiment d'appartenance collective qui dépasse les clivages communautaristes et les particularismes. Si l'éducation promeut des règles, des principes et des valeurs universelles, elle met aussi l'accent sur une citoyenneté construite autour du « mieux vivre ensemble ». Enfin, elle est censée préparer chacun à être compétent et efficace dans sa vie professionnelle. L'éducation permet l'insertion dans le tissu socioéconomique (logique de l'employabilité), via notamment l'acquisition d'un diplôme ou la valorisation des acquis de l'expérience.

L'éducation au développement durable inscrit le développement durable dans les trois grandes missions de l'éducation tout en suggérant l'idée d'une *transmission de compétences spécifiques pour un développement durable*. Sur le plan national, cette transmission renvoie au curriculum. Ce chemin de vie suppose que l'on veille à ce que tous les êtres humains (de la génération présente et des générations futures) puissent exercer leur droit à l'éducation et qu'il soit possible de capitaliser à la fois des formations, des diplômes, des pratiques professionnelles et des expériences de la vie. C'est au nom de ces compétences que l'éducation doit contribuer à la mise en œuvre des *Objectifs du Développement Durable* (ODD) – via l'ODD 4 Education de qualité mais également tous les autres ODD. L'éducation comme transmission de compétences dans un cadre de développement durable peut prendre plusieurs formes. Il peut s'agir (1) de la transmission via les fondamentaux de la lecture et de l'écriture (principalement au sein de l'école primaire) ou de disciplines inhérentes au cursus scolaire (à l'école primaire, le Sport, l'Art, la Musique ou encore la découverte de l'environnement peuvent intégrer le développement durable dans leurs dispositifs de formation) ; (2) de la transmission vers un public cible en fonction de buts précis (il s'agit de distiller des connaissances et des aptitudes pour atteindre les objectifs relevant du développement durable) ; (3) de la transmission de compétences spécifiques pour un développement durable (l'éducation doit permettre aux enfants et aux citoyens, de prendre part aux processus de décisions, d'agir à l'échelle locale ou d'interpeller nos responsables politiques). Cette transmission de compétences est nécessaire et indispensable dans le cas des pays en développement, surtout lorsque ceux-ci font face à de nombreux enjeux sociétaux (éradication de la pauvreté, accès à l'électricité, sécurité alimentaire, catastrophes naturelles).

Notre travail de thèse a cherché à intégrer l'ensemble de ces enjeux, en les replaçant dans un cadre bien précis, celui du changement climatique et de l'émergence d'une éducation aux changements climatiques pour un développement durable (ECCDD). Il s'agissait à la fois de clarifier le champ, les caractéristiques et les principes d'une ECCDD et d'élaborer des propositions pour son intégration dans la formation de base. Pour ce faire, nous avons inscrit cette problématique dans un double cadre : celui de

l'interdisciplinarité (cette thèse s'inscrit dans les sciences du climat, les sciences économiques et les sciences de l'éducation) ; celui du cycle primaire du système éducatif sénégalais. Notre méthodologie de recherche s'est appuyée sur deux clés d'entrée : la dynamique des systèmes complexes et le modèle REDOC (Représentations, Démarche pédagogique, Outils didactiques et Compétences). Plus qu'une juxtaposition de deux termes, la dynamique des systèmes complexes introduit deux courants de pensée : la dynamique des systèmes (*System Dynamics*) popularisée dans les années 50 et 60 par Forrester) et l'étude de la *complexité* (Morin, 1977, 1980). L'objectif étant de proposer une méthodologie à la fois intuitive (chaîne de causalités) et robuste scientifiquement (boucle de rétroaction, effets temporels) pour transmettre des connaissances aux apprenants. Le modèle REDOC, expérimenté dans le cadre d'une éducation au développement durable (EDD) dans 5 pays africains pour le compte de l'IFADEM, peut être assimilé à un modèle de pensée (logique mnémotechnique) visant à structurer un projet de recherche-action. L'objectif étant de cerner les représentations des apprenants pour ensuite leur proposer des stratégies pédagogiques choisies, des outils didactiques appropriés et un référentiel des compétences.

L'éducation aux changements climatiques en vue d'un développement durable (ECCDD) doit répondre à certaines finalités : les apprenants doivent être aptes et prêts à participer à des processus sociaux permettant de déterminer et de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour tendre vers un développement durable. Ils doivent avoir conscience de la signification des changements climatiques et saisissent le sens de la coresponsabilité de tous aux niveaux socio-culturel, économique et écologique. Cette éducation doit s'appuyer sur des contenus (montrer les rapports entre des événements qui interviennent à l'échelle planétaire et ceux qui sont ressentis à l'échelle locale ; thématiser des changements qui se produisent sur de longues périodes (passé-présent avenir) ; faire ressortir les interactions entre les dimensions socioculturelle, écologique et économique, ainsi que les intérêts et les systèmes de valeurs de différents acteurs) ; faire prendre conscience que la qualité environnementale est l'élément principal du mieux vivre ensemble) tout en proposant quelques orientations en termes d'enseignement (thématiser les conséquences majeures et les répercussions secondaires de décisions ou de comportements ; établir des liens entre l'environnement et le cadre de vie; dresser une mémoire des risques majeurs pour les générations futures).

Cette éducation aux changements climatiques en vue d'un développement durable doit relever plusieurs défis. *Tout d'abord*, la transmission des connaissances doit à la fois s'inscrire dans la science « éclairante » et la science « agissante ». Il s'agit de conjuguer capacité à apprendre et capacité à agir. La science éclairante distille de la connaissance à partir de nouvelles observations. Elle repose sur l'objectivité du chercheur et a pour finalité une certaine stabilisation des savoirs (par stabilisation,

nous entendons ici une réduction de l'incertitude, une réponse aux controverses). La science agissante vise à introduire des changements dans nos comportements et nos attitudes... Elle suppose l'éveil des consciences, le souhait et la volonté de participer aux débats, la mise en place de démarches participatives... *Ensuite*, il s'agit de passer du « monde des Modernes », ouvert et infini, rythmé par l'immédiateté du présent, au monde de la « biosphère », clos et resserré, caractérisé par un allongement du temps de l'action (Bourg et al, 2010). En effet, les problèmes écologiques contemporains exigent une redéfinition des échelles spatio-temporelles. Ces problèmes présentent quatre caractéristiques (rapport à l'espace, indivisibilité, imprévisibilité, dimension temporelle) dont chacune met à mal les principes de notre démocratie, de notre système économique et notre rapport à la Nature. *En outre*, l'ECCDD doit relever le défi d'un « nouvel ordre de « gouvernementalité » pour changer de « régime climatique » (Aykut et Dahan, 2015). Si la gouvernance onusienne a eu les mérites de poser les bases des principales discussions en matière de changement climatique (elle reste la seule arène où les pays pauvres peuvent s'exprimer, elle a offert, via les off des conférences annuelles(COP), la possibilité à la société civile et aux ONG de se saisir activement des enjeux du défi climatique), son mode de fonctionnement a toujours eu tendance à privilégier la recherche de compromis plutôt que de véritables consensus. C'est l'une des principales raisons de l'inefficacité des nombreuses mesures adoptées. Ce problème ne peut être résolu que si le régime climatique est appréhendé comme une entité centralisée et cohérente, mais totalement séparée des autres régimes et autres instances de gouvernance qui font la mondialisation contemporaine. La gouvernance onusienne ne peut rester éternellement, l'instance unique de traitement du problème climatique. Dans cette perspective, il nous faut repenser l'ordre de gouvernance du régime climatique. Trois impératifs s'imposent dans cette reconstruction : re-politiser les enjeux ; désenclaver le climat et changer d'échelles (c'est-à-dire accepter que la gouvernance soit polycentrique et multi-échelles) et changer de paradigmes économiques. Enfin, l'ECCDD déployée dans les systèmes éducatifs nationaux, devra relever le défi de la nouvelle économie de l'effet de serre, c'est-à-dire incarner la nouvelle économie du changement climatique. Nous vivons une époque d'opportunités et de risques immenses. Les opportunités consistent à exploiter les capacités grandissantes de l'intelligence humaine et du progrès technologique pour répondre au défi du changement climatique. Les risques peuvent s'expliquer par le fait que la croissance de l'économie mondiale s'accompagne irrémédiablement d'une hausse marquée des émissions de gaz à effet de serre (et ceci malgré la venue d'une crise financière en 2008, de la mise en place de stratégies d'atténuation des émissions de GES ou encore des investissements gigantesques consacrés aux énergies renouvelables). Si les tendances actuelles d'émissions de GSE se poursuivaient, l'élévation de la température moyenne mondiale qui en résulterait pourrait dépasser avant la fin du siècle les 4°C au-dessus des niveaux préindustriels (l'élévation de 2°C

intégrée dans les scénarios du GIEC et pris en compte par les décideurs politiques pourrait donc très rapidement ne plus devenir réaliste, mais incarné le scénario optimiste pour les 100 prochaines années). Il est très difficile d'estimer les coûts économiques de tels effets car de nombreuses incertitudes demeurent. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) suggère que les coûts vraisemblables d'un réchauffement mondial (de l'ordre de 2°C) seront de l'ordre de 0,5 à 2% du PIB mondial d'ici 2050 (notons ici que ces estimations intègrent l'idée d'un découplage économie-environnement et ne tiennent pas compte du fait que les futures innovations demanderont plus d'énergie demain qu'aujourd'hui).

Dans ce contexte, l'ECC devra déployer toutes ses capacités transformatrices pour engager nos sociétés vers un avenir plus radieux et plus stimulant pour la jeunesse. Le changement climatique auquel l'humanité fait face, est à la fois un objet scientifique, politique, social, économique, culturel et environnemental. Il doit être traité comme tel. Notre travail de thèse se positionne au niveau de cette interface. Il s'appuie sur un double postulat.

(1) Le registre des savoirs qu'il convient de mobiliser pour déterminer le cadre et le champ de l'ECCDD, doit articuler quatre types de savoirs : *les savoirs scientifiques* (nous avons identifié les connaissances relatives au climat, la présentation du système climatique, l'identification des controverses, la place des modèles du climat, et surtout l'intégration du nexus économie - énergie - climat via les Integrated Assessment Models, IAM) ; *les savoirs institutionnels* : il faut entendre par ce qualificatif la réponse à plusieurs questions : à quel moment se stabilise un savoir ? Qui en parle ? De quelle manière ? Qui sont les principaux acteurs et décideurs politiques ? Quelle est l'autorité légitime pour parler et s'exprimer sur les changements climatiques ? ; *les savoirs mesurés* : les indicateurs du changement climatique sont déterminés à partir d'informations et d'observations, ils reposent sur une méthodologie scientifique, ils doivent également bien compris par la société ; *les savoirs pédagogiques* : il s'agit d'identifier les représentations en matière de changement climatique, les approches pédagogiques à mettre en place, les outils qu'il convient de mobiliser ou encore les compétences que l'on souhaite développer.

Dans ce registre des savoirs, nous avons particulièrement insisté sur (1) l'expression d'un savoir scientifique lié à la modélisation du climat et à son interaction avec d'autres objets (économie - énergie). Nous avons avancé que la méthode scientifique proposée « la dynamique des systèmes complexes » permettait de se donner une bonne représentation des causes et des conséquences du changement climatique. Cette méthode, très intuitive, permet aux apprenants de délimiter les frontières d'un système et d'analyser les forces en présence. L'interaction entre économie - énergie - climat nous semble propice au développement de ressources pour l'école primaire. Ressources dans lesquels les élèves pour cerner ce que l'on entend par système

climatique, système économique ou système énergétique. Nous avons également (2) souligné que les acteurs (GIEC, ONG, Etats...) jouaient un rôle important dans la production et la diffusion du savoir. La transposition dans l'ECCDD pourrait prendre la forme d'une carte des acteurs, dans laquelle il serait possible de cerner les arguments mobilisés (technique, social, culturel, écologique, économique, politique...) et la chronologie des débats. Nous avons aussi considéré (3) que les Objectifs du Développement Durable (ODD), notamment l'ODD 4 Qualité de l'éducation et l'ODD 13 lutter contre le changement climatique, constituaient d'excellents indicateurs lorsqu'ils étaient articulés autour dans une vision systémique. Le cas du Sénégal a été pris pour exemple.

Au terme de ce premier postulat, il nous semble que la production et la transmission de connaissances sont nécessaires pour forger une éducation aux changements climatiques en vue d'un développement durable, toutefois elles ne peuvent à elles seules amener les apprenants et les citoyens à modifier leurs comportements et leurs attitudes. Il nous faut donc rechercher un cadre susceptible d'incarner la transformation globale de nos sociétés. Le détour par les *Educations à* – que ce soit l'éducation relative à l'environnement (ERE), l'éducation aux médias et à la communication (EMC), l'éducation au développement durable (EDD) – constitue à nos yeux, un excellent moyen d'amorcer un projet éducatif novateur et intégrateur. Les cinq objectifs de l'ERE – prise de conscience, connaissances, état d'esprit, compétences et participation) formulés par l'UNESCO et le PNUE en 1977, pourraient trouver dans l'ECCDD, un terrain fertile d'expérimentations (Pruneau, Demers, Khattabi, 2008).

(2) L'analyse des représentations (à dissocier de leurs conceptions) des enseignants (et des apprenants) est une étape nécessaire et indispensable pour mettre en place un ensemble de pédagogies diversifiées et complémentaires, développer des outils didactiques appropriés et proposer un référentiel de compétences contextualisé. Dans notre travail de recherche, les représentations des enseignants sénégalais du cycle primaire ont été analysées à l'aide d'un questionnaire. Nous avons ainsi cherché à mettre en relief leurs représentations du développement durable, du changement climatique ou du réchauffement climatique. Dans le cas du Sénégal (mais également dans la plupart des pays en développement), nous avons pu constater que la question du changement climatique devait s'articuler avec d'autres enjeux propres au système scolaire : le statut des enseignants, la qualité des infrastructures (de nombreuses écoles primaires comptent des classes de 50 à 60 élèves regroupés dans des bâtiments à toit métallique et donc très exposés aux pics de chaleur), la question de l'hygiène et de la santé publique (la chaleur accroît les problèmes de santé publique et fait resurgir des maladies que l'on pensait éradiquer), le problème des cantines scolaires (le fait de fournir un repas aux élèves leur permet d'assister aux cours)...

Les nombreuses investigations que nous avons menées dans le champ de la science du climat, dans les sciences économiques et sociales, puis en Sciences de l'éducation nous ont permis d'assimiler un grand nombre de connaissances, de comprendre les enjeux d'une ECCDD en matière de transposition didactique et d'imaginer ce que pourrait être un livret pédagogique à destination des enseignants sénégalais du cycle primaire. Toutefois, elles ont également engendré un sentiment d'insatisfaction et de frustration car notre travail n'est pas parvenu à nous mettre dans la posture d'un chercheur développant une recherche-action en éducation aux changements climatiques. Nous n'avons pas développé de stratégies pédagogiques (expérience en milieu naturel, pédagogie critique...) adaptées au contexte du Sénégal, nous n'avons pas testé d'outils didactiques en situation de classe (le conte, le photolangage, les cartes conceptuelles...), nous n'avons pas produit ce référentiel des compétences qui aurait pu servir aux enseignants sénégalais du cycle primaire.

S'il existe bien un défi que l'Éducation aux Changements Climatiques en vue d'un Développement Durable doit relever, c'est bien ce passage des connaissances aux compétences⁵⁷. Rappelons que l'ECCDD s'inscrit dans le programme qui a fait suite à la décennie pour l'éducation au développement durable (DEDD) qui s'est déroulée de 2005 à 2014. Si nous nous référons aux compétences formulées par l'Unesco dans le cadre du programme « Education 2030⁵⁸ », il est précisé qu'une éducation de qualité « favorise la créativité et les connaissances, et garantit l'acquisition des compétences fondamentales en lecture, écriture et calcul, ainsi que des compétences en matière d'analyse et de résolution de problèmes, et d'autres aptitudes cognitives, interpersonnelles et sociales de haut niveau. Elle développe également les compétences, les valeurs et les attitudes qui permettent aux citoyens de mener une vie saine et épanouissante, de prendre des décisions éclairées et de relever les défis locaux et mondiaux, grâce à l'éducation en vue du développement durable (EDD) et à l'éducation à la citoyenneté mondiale (ECM). »

En France, un « guide compétence développement durable et responsabilité sociétale » a été élaboré par la conférence des grandes écoles et celle des présidents d'université (2016). Les compétences proposées sont transversales. Comme le précisent les auteurs, « chaque compétence comporte cinq dimensions (savoir et connaître, identifier les ressources mobilisées nécessaires, analyser pour comprendre, choisir/se positionner et proposer, agir, évaluer et réajuster) ». Ces dimensions ne sont pas sans rappeler les éléments dont est formée la taxonomie de Bloom (1956) revisitée par Krathwohl en 2002 et dans laquelle les niveaux supérieurs de la pyramide reflètent mieux les besoins de la société actuelle.

⁵⁷ Ce développement est tiré d'une ébauche d'article que nous sommes en train de rédiger, Francine Pellaud, Arnaud Diemer et moi-même. La contribution de Francine Pellaud constitue une part importante de ce travail et je la remercie d'avoir accepté de partager ses principales idées dans le cadre de ma thèse.

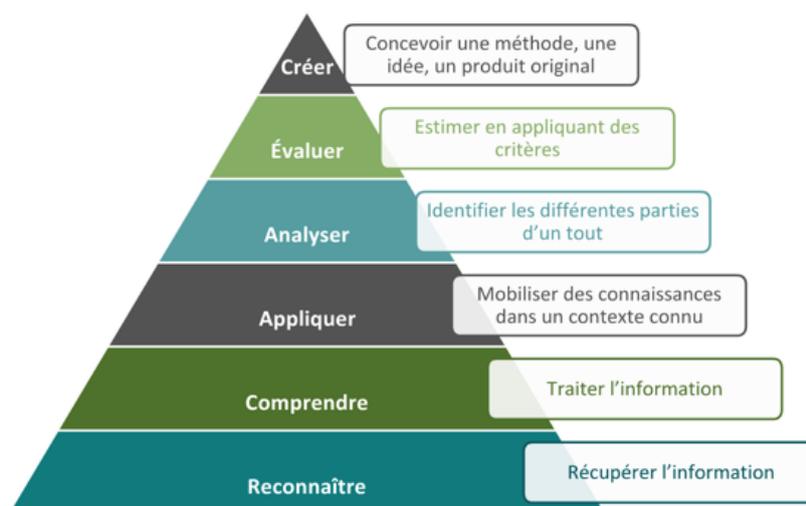
⁵⁸ UNESCO, *Education 2030*, <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002456/245656F.pdf>. Ainsi que *L'éducation dans un monde qui change : de quelles compétences avons-nous besoin ?* 2016, consulté le 25 juillet 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=IN-FAwqL7dg>

En effet, dans la version originale, le sommet désignait l'évaluation, qui se retrouve en deuxième position, et la synthèse a disparu, au profit du verbe d'action « créer » qui se retrouve ainsi comme une sorte de compétence supérieure.

Figure 1 : Les 5 compétences de l'EDD

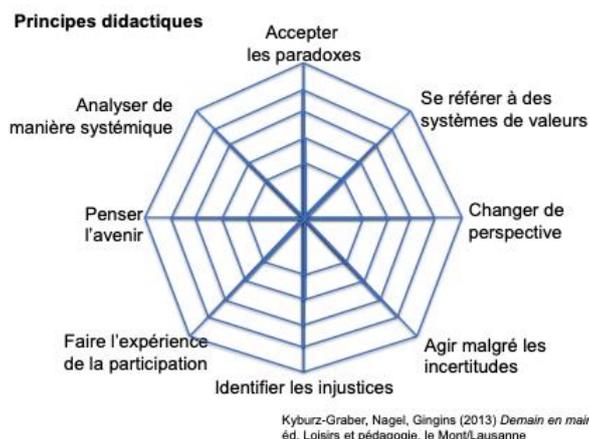


Figure 2 : La taxonomie de Krathwohl (2002)



En Suisse, des « principes didactiques » (Kyburz-Graber, Nagel, Gingins, 2013) précisent les objectifs que devrait atteindre une EDD en termes de compétences cognitives, créatives et émotionnelles. Elles sont présentées sous la forme d'un « radar », offrant ainsi la possibilité aux enseignants et aux élèves de visualiser les quelles, parmi ces compétences, ont été plus ou moins développées.

Figure 3 : Les principes didactiques d'une EDD



Enfin, les aspects économiques influençant très fortement les gouvernements et par conséquent leurs politiques éducatives, the World Economic Forum a présenté ses dix compétences⁵⁹.

Selon les résultats de ces différents travaux et les analyses des compétences curriculaires de Pellaud (2014, 2018, 2019), il est possible d'élaborer une grille comparative qui met en évidence une typologie des compétences qui se déclinent sous la forme de : compétences logico-mathématiques ; compétences créatives ; compétences émotionnelles / relationnelles ; compétences mixtes, nécessitant plusieurs des compétences précédentes.

Tableau 1 : Synthèse des compétences

Typologies des compétences	World Economic Forum (pour 2020)	Unesco Education 2030	Métacompétences (Majou-Mulnet, 2015)	Principes didactiques Kyburz-Graber, Nagel, Gingins (2013)
Compétences logico-mathématiques	Résoudre des problèmes complexes	Analyser et résoudre des problèmes	Identifier	Analyser de manière systémique
		Faire preuve d'initiative	Comprendre	
			Re-problématiser une réalité complexe	
Compétences créatives	Etre créatif	Etre créatif, ingénieux, curieux	Prospective : envisager le futur d'une manière créative en tenant compte de la complexité	Penser l'avenir
	Faire preuve de flexibilité cognitive	Persévérant		Changer de perspective
Compétences émotionnelles / relationnelles	Gérer du personnel	Aptitudes interpersonnelles et sociales de haut niveau	Clarifier ses valeurs	Se référer à des systèmes de valeurs

⁵⁹ Forum économique mondial, 2016, consulté le 23 juillet 2018 : <https://fr.weforum.org/agenda/2017/10/la-competece-dont-votre-enfant-a-besoin-pour-son-futur-emploi-9d68f18a-5869-4784-b9a7-e4ad534272e9>

		Tolérance, respect	Coopérer	Identifier les injustices
	Se coordonner avec les autres	Collaborer	Collaborer	Faire l'expérience de la participation
	Faire preuve d'intelligence émotionnelle	Empathie	Mettre les compétences individuelles au service du collectif	
	Négocier			
	Orientation service (reconnaître les besoins des autres pour y répondre le mieux possible)	Développer les compétences, les valeurs et les attitudes nécessaires pour mener une vie saine et épanouissante		
Compétences mixtes - nécessitant plusieurs des compétences précédentes	Juger et prendre une décision	Prendre des décisions éclairées	Evaluer et exercer son pouvoir d'action	Agir malgré les incertitudes
	Penser de façon critique	Penser de façon critique	Se positionner	Accepter les paradoxes

Nous projetons pour nos futures recherches d'utiliser cette grille pour analyser les objectifs que prévoient les programmes sénégalais et en faire émerger les éléments compatibles.

Dans le cadre de l'éducation aux changements climatiques pour un développement durable, la notion de compétence retenue intégrera plusieurs des dimensions énoncées plus haut. La compétence ne sera pas restreinte à un ensemble de savoirs (savoir, savoir-faire, savoir-être) mais intégrera le savoir de l'éducation aux changements climatiques : l'agir. Toutefois l'agir ne se limite pas au savoir-agir, il intégrera le vouloir et le pouvoir donc le pouvoir agir selon le contexte. Pour nous la compétence doit être comprise comme la réponse originale, efficace et intégrative. Ces critères nous permettent ainsi d'apprécier le degré de la compétence. Enfin, la compétence ne doit après se concevoir que dans un contexte, ce qui conduit être attentifs aux contextes de formation, fondamentaux dans le cadre l'acquisition des compétences.

ANNEXE : QUESTIONNAIRE

QUESTIONNAIRE SUR LES REPRESENTATIONS DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES CHEZ LES PROFESSEURS DES ECOLES AU SENEGAL

Les données de ce questionnaire seront exclusivement utilisées à des fins scientifiques.

I. Identification :

- I.1 Age : I.2 Genre :
I.3 Grade : I.4 Discipline :
I.5 Cours tenu(s) : I.6 Ville/
Village :
I.7 Ethnie : I.8 Religion.....

II. Le développement durable

II.1 Avez-vous déjà entendu parler du développement durable ? (entourez la réponse)
OUI NON

II.2 Si oui, qu'entendez-vous par là ? Que signifie pour vous cette notion ?

.....
.....
.....

II.3 Dans quelle(s) circonstance(s) avez-vous entendu parler du développement durable ?

.....
.....

II.4 Avez-vous déjà eu une formation sur le développement durable ? (entourez la réponse)

OUI NON

II. Si oui, par qui a-t-elle été délivrée ?

III. Les changements climatiques

III.1 Avez-vous déjà entendu parler du concept de changement climatique ? (entourez la réponse)

OUI NON

III.2 Quelles sont, selon vous, les principales conséquences du changement climatique ? (entourez la ou les réponses possibles)

- (i) Hausse de la température terrestre
- (ii) Perturbation du cycle naturel du carbone
- (iii) Déforestation

(iv) Hausse du niveau de la mer et de la fonte des glaces

(v) Disparition des espèces animales et végétales

(vi) Catastrophes naturelles

III.3 Quelles sont les causes de ces changements climatiques (entourez la ou les réponses possibles)

- (i) Les hommes
- (ii) Les effets du système solaire

- (iii) El Niño
- (iv) L'Albédo
- (v) Autres

III.4 quels sont les objets d'étude du changement climatique ? (entourez la ou les réponses possibles)

- (i) Le reboisement
- (ii) L'effet de serre
- (iii) L'eau
- (iv) Les conséquences du réchauffement de la planète
- (v) Le système climatique
- (vi) Les gaz à effet de serre
- (vii) La consommation d'énergie
- (viii) Les énergies renouvelables
- (ix) Autres.....

III.5 Enseignez-vous les changements climatiques aux élèves ? (entourer la réponse)

OUI

NON

III.6 Si oui, dans quelle manière enseignez-vous les changements climatiques

- (i) Méthode pédagogique (utilisée) ?.....
- (ii) Outils pédagogiques (employés) ?.....
- (iii) Matériels (disponibles) ?.....
- (iv) Compétences (visées) ?
.....
.....

III.7 Dans quelle matière enseignez-vous les changements climatiques ?

1 Vivre ensemble

2 vivre dans son milieu

3 Autres

III.8 Quelle(s) différence(s) faites-vous entre enseigner les changements climatiques et éduquer aux changements climatiques ?

.....
.....

III.9 Considérez-vous que les connaissances en matière de changements climatiques sont présentes dans les programmes de formation des enseignants ?

- (i) Si Oui (justifiez).....
.....

- ABRIC, J.C (1987). *Coopération, compétition et représentations sociales*, Cousset, Delval.
- ABRIC, J.C (1976). *Jeux, conflits et représentations sociales*, thèse d'Etat, Université d'Aix en Provence.
- ACADEMIE DES SCIENCES DE PARIS (2010). « Le changement climatique », Rapport sur le site académie des sciences de Paris (consulté le 5 novembre 2016).
- ACKBARALLY, N. (2013). *Climate Change Teaches Some Lessons*. Interpress Service News Agency. <http://www.ipsnews.net/2013/07/climate-change-teaches-some-lessons>.
- AEBLI, H. (1983). *Douze formes d'enseignement de base. Une didactique générale sur une base psychologique*. Stuttgart.
- AEBLI, H. (1981). *Penser : l'ordre de faire. Volume II : Processus de pensée. Résolution de problèmes et conceptualisation, organisation du savoir, supports de pensée : image et langage, apprentissage et développement, aspects philosophiques*. Stuttgart.
- AKKARI, A., PAYET, J.P. (2010). *Transformations des systèmes éducatifs dans les pays du Sud. Entre globalisation et diversification. Raisons éducatives*. 336 p.
- ALAYA, A. (2010). *L'Éducation à l'Environnement en Tunisie. Analyse des valeurs relatives à la nature et à l'environnement dans les conceptions d'enseignants et d'élèves et dans les manuels scolaires*. Thèse Universités Lyon 1 et Tunis 1 (ISEFC).
- ALCAMO J. (1994). *IMAGE 2.0, Integrated Modelling of Global Climate Change*, Kluwer Academic Publishers.
- ALCAMO J., SHAW R., HORDIJK L. (1990). *The RAINS Model of Acidification: Science and Strategies in Europe*, Dordrecht, Netherlands, Kluwer.
- ALLEGRE C. (2010). *Imposture climatique ou fausse écologie*, Ed. Plon.
- AMBROSI P., COURTOIS P. (2004). « Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire », *Natures, Sciences et Sociétés*, vol 12, p. 375 - 386.
- ALLEN T.F.H, TAINTER J.A, HOEKSTRA T.W (2003). *Supply Side Sustainability*, Columbia University Press.
- ALPE Y. et LEGARDEZ A. (2000). « Questions socialement vives, enjeux sociaux et didactiques : la création d'un enseignement d'éducation civique juridique et sociale en France », 13ème congrès international La recherche en éducation au service du développement des sociétés, Association mondiale des sciences de l'éducation, Université de Sherbrooke, Canada
- AMBROSI P., COURTOIS P. (2004). « Impacts du changement climatique et modélisation intégrée, la part de l'arbitraire », *Natures, Sciences et Sociétés*, vol 12, p. 375 - 386.
- ANGELA B, YVES A. (2012). *Les "éducatifs à", un changement de logique éducative ? L'exemple de l'éducation au développement durable à l'université*. Spirale : revue de recherches en éducation, Association de pédagogie et de didactique de l'École normale de Lille, pp.197-209. <hal-00962201>)

ARRHENIUS S. (1896). On influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophic Magazine of Sciences*, vol. XLI, n° 251, p. 237-276. Disponible sur Internet : http://chimie.scola.ac-paris.fr/sitedechimie/hist_chi/text_origin/arrhenius/Arrhenius2.htm (consulté le 25 février 2008).

ARNOULD P. (2014). *Au plaisir des forêts, Promenade sous les feuillages du monde*, Fayard.

ASTOFI, J.P., DAROT, E., GINSBURGER-VOGEL, Y., TOUSSAINT, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences*. Paris - Bruxelles : De Boeck Université.

AUDIGIER F. et TUTIAUX-GUILLON N. (2008). « Compétences et contenus. Les curriculums en questions », in Bruxelles, « Perspectives en éducation et formation, Bruxelles, De Boeck. 210 p

BACHELARD, G. (1934). *La formation de l'esprit scientifique*, J. Vrin éd.

BADER, B., SAUVE L. (2011). *Education, Environnement et développement durable : vers une écocitoyenneté critique*. Presses de l'Université de Laval. Canada.

BALA G., DUFFY P.B, TAYLOR K.E (2008). « Impact of Geoengineering Schemes on the Global Hydrological Cycle », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol 105, n°22, june, p. 7664 - 7669.

BANATHY, Bela H. (1991). *Systems design of education: A journey to create the future*. Educational Technology.

BANGAY C, BLUM N. (2010). Education responses to climate change and quality: Two parts of the same agenda? *International journal of Education Development*.

BARKER T., SERBAN-SCRIECIU S. (2010). "Modeling Low Climate with E3MG: Towards a New Economics Approach to Simulating Energy-Environment-Economy System Dynamics", *The Energy Journal*, vol 31, Special Issue, January, p. 137 - 164.

BARNOLA, J. M., RAYNAU, D. Y. S. N., KOROTKEVICH, Y. S., et LORIUS, C. (1987). Vostok ice core provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329(6138), 408.

BARTHES, A., ALPE, Y. (2015). *Utiliser les représentations sociales pour l'analyse des savoirs en éducation : exemple de l'éducation au développement durable*, L'Harmattan.

BATESON, G. (1980). *Men are grass : Metaphor and the world of mental process*. Lindisfarne Association.

BÄTTIG, B. (2002). "Ein wenig sollte in der Schule ein Mitspracherecht haben können, aber nicht zu viel." Eine Studie zur Jugendbeteiligung in der Schule. Bachelor, Universität Fribourg.

BAUCHET, P. GERMAIN, P. (2003). *L'éducation, fondement du développement durable en Afrique*, Presses Universitaires de France. Collection des Cahiers des Sciences Morales et Politiques.

BAUER N. (2018). REMIND - MAGPIE Model, CNRS Summer School on IAM, Clermont-Ferrand, France, june, 59 p.

BAUER N., BAUMSTARK L., LEIMBACH M. (2012). The Remind-R Model : The role of renewables in the low carbon transformation – first best vs second best worlds, climate change, DOI : 10.1007/s10584011-0129-2.

BAUER N., EDENHOFFER O., KYPREOS S. (2008). Linking Energy System and Macroeconomic Growth Models, *Journal of Computational Management Science* 5, 95-117.

BAUDELLOT Ch. ESTABLET R. (1971). *L'École capitaliste en France* P., Maspero, in-8, br., couv. à rabats, 340 pp., tableaux et graphiques. (GD23B) Collection Cahiers libres 213-214.

BEAUGRAND G., GOBERVILLE E. (2010). « Les conséquences des changements climatiques en milieu océanique », *VertigO*, hors-série n°8, octobre

BECKER M. (1989). "The role of climate on present and past vitality of silver fir in forest in the Vosges Mountains of north-eastern France", *Can. For.Res.*, vol 19, p. 1110-1117.

BEERLER, A. (1999). *Nous aidons trop. Apprendre à apprendre à l'école primaire en tant qu'éducation pour le travail indépendant.* Zug. BERTALANFFY L V. (1968). *General System Theory. Foundations, Development, Applications*, George Braziller, New York, p. 132.

BERTCHY, F. ; KÜNZLI, Ch. (2004). Die Studierenden arbeiten an der Theorie-Praxis-Schnittstelle. Projekt realisiert im Rahmen des Forschungsprojektes "Bildung für nachhaltige Entwicklung". *Gaia*, 13 (4), pp. 303-306.

BERTSCHY, F., GINGINS, F., KUNZIL, C., DI GIULIO, A. und KAUFMANN-HAYOZ, R. (2007). *Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schulpflicht. Abschlussbericht zum Kompetenzmandat des CDIP: "Nachhaltige Entwicklung in der Grundausbildung - Genauigkeit der Konzepte und Anpassung des Schullernens"*. Bern: CDIP.

BIGOHE J.B., KIAYA, N., MIMBORO, D., BINZANGI, K. (2014). *L'enseignement de l'éducation au développement durable à l'école primaire en RDC: état des lieux et perspectives.* In A. Diemer & C. Marquat (Eds), *Eduquer au développement durable* (pp. 451 - 468). De Boeck.

BJERKNES V. (1904). « The Problem of Weather Prediction, as Seen From The Standpoints of Mechanics and Physics », translated from the original german by Allen R. Greenberg, *NOS, Meteorologische Zeitschrift*, January.

BRUNER, J. S. (1974). *Projet de théorie pédagogique.* Berlin.

BLANCHARD E.V. (2011). « L'origine des modèles intégrés du changement climatique », *Recherches internationales*, n°89, janvier-mars, p.181-211.

BÖHME, Jeanette et KRAMER, Rolf-Torsten. *Zur Triangulation der empirischen Ergebnisse und Entwurf zu einer Theorie schulischer Partizipation.* In : *Partizipation in der Schule.* VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2001. p. 153-188.

BONO, E. de (1994). *Comment les enfants apprennent à penser correctement Le programme d'apprentissage ludique.* Düsseldorf.

BOUTRON C.F, CANDELONE J.P, HONG S. (1993). « Le plomb dans les neiges et les glaces du Groenland », *Pollution atmosphérique*, Juillet-Septembre, p. 128-131.

BOURDIEU P. et PASSERON J.C. (1970). *La Reproduction. Éléments pour une théorie du système d'enseignement*. Paris : Éditions de Minuit une encyclopédie pour aujourd'hui. Paris : ESF, p. 61-76.

BOURG, D. et WHITESIDE, K. *Vers une démocratie écologique. Le citoyen, le savant et le politique*, 2010, vol. 34, p. 72.

BOURGRAIN DUBOURG, A., DULIN, A. (2013). *L'éducation à l'environnement et au développement durable tout au long de la vie, la transition écologique*. Les avis du Conseil Economique Social et Environnemental. Décembre. 120 p.

BOSMAN, C., GERARD, F.M, ROEGIERS, X. (2000). *Quel avenir pour les compétences ?* Bruxelles : de Boeck Université.

BOWERS, C.A. (2001). *Educating for Eco-Justice and Community*. Athènes : University of Georgia Press

BRACONNOT P., PLANTON S. (2014). *Miss TERRE, Modélisation Intégrée du Système TERRE, LEFE*, 13-15 janvier, Toulouse, 19 p.

BREGEON, J. (2008). *Rapport du groupe de travail interministériel sur l'éducation au développement durable*.

BROUSSEAU, G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble. La Pensée Sauvage.

BURBULES, N.C. et Berk, R. (1999). *Critical thinking and critical pedagogy: relations, differences and limits*. In Popkewitz, T.S. et Fendler, L. (dir.), *Critical theories in education: Changing terrains of knowledge and politics* (p. 45-65). New York : Routledge.

BRUCKNER T. and al. (2014). *Energy Systems*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CANDELONE JP, HONG S, PELLONE C, BOUTRON CF. (1995). "Post-industrial revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metal as documented in central Greenland snow and ice", *Geophysic Res*, vol 100, p. 16605-16616.

CANNON-BOWERS, Janis A. et SALAS, Eduardo. *Reflections on shared cognition*. *Journal of Organizational Behavior: The International Journal of Industrial, Occupational and Organizational Psychology and Behavior*, 2001, vol. 22, no 2, p. 195-202.

CARNOT S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Chez Bachelier, Paris.

- CARSON, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin Company Boston
- CASTY C., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J., BHOM R. (2005). "Temperature and precipitation variability in Europe Alpe since 1500", *Inter Journal of Climatologie*, vol 25, p. 1885-1880.
- CAVAILLES J. (1994). *Oeuvres complètes de philosophie des sciences*. Hermann Editeurs des arts et des sciences Paris.
- CEP/AC.13/2004/8 (2004). *Projet de stratégie de la CEE pour l'éducation au développement durable*. Nations Unies, Conseil économique et social, Commission économique pour l'Europe, Comité des politiques de l'environnement. Deuxième réunion régionale sur l'éducation au développement durable, Rome, 15-16 juillet 2004.
- CHANEL O. et ali. (1999). *Plomb dans l'environnement : quels risques pour la santé ?* INSERM, 451 p.
- CHAUVEAU L. (2017). « Eutrophisation des eaux : ça ne s'arrange pas », *Science et Avenir*, 21 septembre.
- CHECKLAND, P. (1981). *Systems thinking, systems practice*.
- CLAUSSEN, B. (1996). *La crise environnementale du point de vue des sciences sociales. Bases techniques de l'éducation environnementale. Matériel d'étude pour l'éducation environnementale*. Hambourg : Institut des sciences de l'éducation comparée.
- CLEMENT, P., CARAVITA S. (2011). *Education pour le développement durable, et compétences des élèves dans l'enseignement secondaire*. Unesco, 95 p.
- CLEMENT, P. (2004). « Science et idéologie : exemples en didactique et épistémologie de la biologie : Sciences, Médias et Société », *Colloque Ecole Normale Supérieure Lettres et Sciences Humaines*, Lyon, 15, 16 et 17 juin.
- CMED, R. B. (1987). *Notre avenir à tous*. Montréal, Fleuve, 51.
- COLE, M. (1991). *On socially shared cognition*. In L.B. Resnick, J. Levine, S.D. Behrend (Eds.), *Perspectives on socially shared cognition*. Washington, DC: American Psychological Association.
- COMMONER B. (1972). *L'encerclement, problèmes de survie en milieu terrestre*, Seuil.
- COMONER, B. (1971). *The Closing Circle*, Alfred A. Knopf Editions. New York.
- CONKLIN W. (2014). *Stratégies pour développer la pensée critique et créative*, Montréal : Chenelière éd. 2014, 233 p.
- CONRAD, J. (2000). *Développement durable : quelques clarifications conceptuelles ou la tentative héroïque de clouer un pudding au mur*. Rapport FFU 00-07. Berlin : Centre de recherche sur les politiques. Environnementales.
- COUSTAROUX M. (2013). *Génie Mathématiques et Modélisation, option Statistiques*, INSA-INRA- Toulouse.
- CRUTZEN P.J (2002). « Geology of Mankind », *Nature*, vol 415.

DALMEDICO D.A. (2007). Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques. Recherche La Découverte.

DANIC, I. (2006). La notion de représentation pour les sociologues : Premier aperçu, ESO, 25, décembre, 29 – 32.

DEELSA (2002). Direction de l'Emploi, du travail et des affaires sociales. Comité de l'éducation. Definition and selection of competences (deseco): theoretical and conceptual foundations. Strategy paper. Organisation de coopération et de développement économiques. (Version française intitulée : La définition et la sélection des compétences clés – Résumé <http://www.oecd.org/dataoecd/36/55/35693273.pdf> (03.02.03).

De la CNUCED, S. (1992). Rapport de la Réunion du Groupe d'experts sur l'intégration et la coopération économiques régionales et sous régionales entre pays en développement. UNCTAD/ECDC/229, 6 août.

DENHEZ F. (2008). Une brève histoire du climat, L'œil neuf.

DEVELAY, M. (1992). De l'apprentissage à l'enseignement. Paris. ESF, éditeur.

DEWEY, J. (1962). L'école et l'enfant, Paris, Delachaux et Niestlé.

DIEMER, A. (2019), *Modéliser des phénomènes complexes : Penser système, Cartographier et Scénariser*, Editions Oeconomia.

DIEMER A., DIERICKX F., GLADKHYK G., MORALES M., PARRIQUE T., TORRES J. (2017). European Union and Sustainable Development, Editions Oeconomia.

DIEMER A., NDIAYE A., GLADKYKH G. (2017). « Le climat, du savoir scientifique aux modèles à intégration assignée », Revue francophone du développement durable, n°9, mars, p. 6 – 52.

DIEMER, A. (2016). Le développement durable et les économistes. Editions Oeconomia.

DIEMER A. (2015). Le développement durable et les économistes, Editions Oeconomia.

DIEMER, A., MARQUAT C. (2015a). L'éducation au développement durable, quels enjeux pour les ESPE ? Le printemps de la recherche, réseau ESPE, 23 mars, Paris, 10 p.

DIEMER, A., MARQUAT, C. (2015b). Regards Croisés Nord Sud sur le développement durable. De Boeck

DIEMER A., MARQUAT C. (2014). Education au développement durable : enjeux et controverses, De Boeck.

DIEMER, A., MARQUAT, C. (2014). L'éducation au développement durable. Editions De Boeck

DIEMER, A. (2013a). L'éducation au développement durable, une affaire de représentation. Revue Francophone du développement durable, 1, mars, 30 – 59.

DIEMER, A. (2013b). L'éducation systémique, une réponse aux défis posés par le développement durable. Education relative à l'environnement, 11, 27 – 42.

DIEMER A., FIGUIERE C., PRADEL M. (2013). *Ecologie politique vs écologie industrielle, quelles stratégies pour le développement durable*, Editions Oeconomia.

DIEMER, A. (2011). *De la représentation du développement durable à la construction de savoirs transversaux*, Les cahiers du CERIUM, Montréal, septembre-octobre, 1- 28.

DIEMER A. (2004). « Le développement durable et la dynamique des systèmes », document de travail, n°2004/05, HERMES, Université de Reims, 24 mai, 12 p.

DI GIULIO, A. (2004). *L'idée de durabilité dans la compréhension des Nations Unies. Revendication, signification et difficulté*. Münster, LIT.

D'ODORICA P., LAIO F., PORPORATO A., RIDOLFI L., RINALDO A., RODRIGUEZ-ITURBE I. (2010). *Ecohydrology of terrestrial Ecosystems*”, BioScience, vol 60, n°11, December, p. 898 – 907.

DOISE, W. (1985). *Les représentations sociales : définition d'un concept*, Connexions, 45, 243 – 253. DOISEoise, W., MUGNY, G. (1981). *Le développement social de l'intelligence*. Paris : InterEditions.

DOWLATABADI H., MORGAN M.G (1993). « *Integrated Assessment of Climate Change* », Science, vol 259, (5103).

DUFRESNE J.L (2018). « *Calcul intensif et climat* », Pôle de modélisation, Institut Pierre Simon Laplace, « *Penser Pétaflops* », 13 mai, 27 p.

DURDEL, A. (2002). *Le concept de l'éducation en tant que construction. Orientation et potentiel d'action du concept éducatif*. Hambourg.

DURKHEIM, E. (1898). *Représentations individuelles et représentations collectives*, Revue de Métaphysique et de Morale, VI, mai, 1 – 22.

DÖRING, R. ; OTT, K. (2001). *Concepts de durabilité*. Journal of Economic and Business Ethics, 2 (3), p. 315-339.

DOWLATABADI H., MORGAN M.G (1993). « *Integrated Assessment of Climate Change* », Science, vol 259 (5103).

E/CN.17/1998/6/Add.2 (1998). *Renforcement des capacités, éducation et sensibilisation du public, science et transfert d'écotechnologie. Rapport du Secrétariat général. Additif. Éducation, sensibilisation du public et formation. II. 2. Nations Unies. Conseil économique et social. Commission du développement durable. Sixième session, 20 avril-1er mai*

EL JAI B., PRUNEAU D., KHATTABI A., BENBRAHIM S. (2017), *L'utilisation de Facebook pour la cocréation de mesures d'adaptation aux changements climatiques au Maroc*, *Revue Francophone du Développement durable*, n°9, mars, p. 83-98.

EPD-97/CONF.401/CLD.1 (1997). *Éduquer pour un avenir viable : une vision transdisciplinaire pour l'action concertée*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

EUZEN A., LAVILLE B., THIEBAULT S. (2017). *L'adaptation au changement climatique, une question de sociétés*, CNRS Société.

- EUROPEAN COMMISSION (2016). EU Reference Scenario 2016 – Energy, transport and GhG emissions, trends to 2050, july 15th, Luxembourg Publications Office, 220 p.
- EASTES, R-E. (2013). Processus d'apprentissage, savoirs complexes et traitement de l'information : un modèle théorique à l'usage des praticiens, entre sciences cognitives, didactique et philosophie des sciences, Thèse de doctorat, Université de Genève.
- EYMARD C. (2004). Essai de modélisation des liens entre éducation et santé, *Revue Questions vives, éduquer à ou pour la santé, quels enjeux pour la formation et pour la recherche ?* Volume 3 -Numéro5.
- FABRE, M. (2014). Les éducations à : problématisation et prudence. *Les cahiers du CERFE, Education et socialisation*, 36.
- FARMAN J.C, GARDINER B.G, SHANKLIN J.D (1985). « Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClOx/NOx Interaction », *Nature*, vol 315, p. 207 – 210.
- FELOUZIS, G., FOUQUET-CHAUPRADE, B., CHARMILLOT, S., et IMPERIALE-ARFAINE, L. (2016). Inégalités scolaires et politiques d'éducation. *Cnesco, Les Inégalités scolaires d'origines sociales et ethnoculturelles*.
- FIGUIERE, C., BODIN, B., DIEMER, A. (2014). *Economie politique du développement durable*. De Boeck.
- FREIRE, P. (1974). *La pédagogie des opprimés*, Maspero.
- FISHER, G.N (1987). *Les concepts fondamentaux de la psychologie sociale*, Paris, Dunod.
- FLAMENT, C. (2011). Structure, dynamique et transformation des représentations sociales, in Abric J.C (dir), *Pratiques sociales et représentations*, PUF.
- FLAMENT C. (1989). Structure et dynamique des représentations sociales in D. Jodelet (dir), *Les représentations sociales*, PUF.
- FLECHET G. (2017). "Quand les systèmes saturent", *CNRS Le Journal*, 16 octobre.
- FOUCAULT M. (1969). *L'archéologie du savoir*, Paris Gallimard.
- FOUCAULT M. (1969). *L'archéologie du savoir*, Paris Gallimard.
- GAMBIER Y. (1987). « Problèmes terminologiques des pluies acides : pour une socioterminologie », *META*, vol 32, n°3, septembre, p. 314 – 320.
- GARNIE, C., SAUVE, L. (1998-1999). Apport de la théorie des représentations sociales à l'éducation relative à l'environnement. *Conditions pour un design de recherche, Education relative à l'environnement*, 1, 65-77.
- GAUCHET, M. *L'avènement de la démocratie (Tome 3)-A l'épreuve des totalitarismes (1914-1974)*. Éditions Gallimard, 2013.
- GAYFORD C. (2002). Controversial environmental issues: a case study for the professional development of science teachers. *International Journal of Science Education*, vol. XXIV, n° 11, p. 1191-1200.
- GIDDENS M. (2018). MESSAGEix, Cutting Edge Research and Challenges, CNRS Summer School, Clermont-Ferrand, France, June, 33 p.

GIEC (2013). « Changements climatiques, les éléments scientifiques, résumé à l'intention des décideurs », Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évaluation du climat.

GIEC (2007). 26th session of the IPCC, Bangkok, April 30-May 4, Geneva Switzerland.

GIEC (2001). Bilan des changements climatiques : les éléments scientifiques, PNUD-OMM, Groupe de travail I.

GIORDAN, A. (1986). Environmental Education, teaching and learning processes, UNESCO-PNUE.

GIORDAN, A., De Vecchi, G. (1987). Les origines du savoir, éd. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.

GIORDAN, A. (1998). Apprendre ! éd. Belin, Paris.

GIORDAN, A. (2002). Une autre école pour nos enfants, Delagrave.

GIORDAN, A., PELLAUD, F., Eastes, R-E (2004). Des modèles pour comprendre l'apprendre : de l'empirisme au modèle allostérique in *Gymnasium Helveticum*, mai.

GIORDAN, A., PELLAUD, F. (2008). Comment enseigner les sciences, éd. Delagrave, Paris.

GIRAL, J., CHAMBOREDON, M.C, LEGARDEZ, A. (2008). Former au développement durable et à la citoyenneté par le débat situé et argumenté et la co-construction de savoirs environnementaux critiques, Colloques des Mines, Albi.

GIRAULT, Y., LHOSTE, Y. (2010). Opinions et savoirs : positionnement épistémologiques et questions didactiques, in Opinions et savoirs. Recherches en didactique des sciences et technologies, 1, INRP Editions.

GIRAULT, Y., LANGE, J.M, FORTIN-DEBART, C., SIMMONNEAUX, L., LEBEAUME, J. (2007). La formation des enseignants dans le cadre de l'éducation au développement durable : problèmes didactiques. Education relative à l'environnement, 6, 119-136.

GLADKYKH G., SPITTLER N., DIERICKX F. (2017). "Renewable Energy: Characteristics and Representation in Macroeconomic Energy-Climate Models sources for climate change models" in Diemer A. et al. (eds), European Union and Sustainable Development, Editions Oeconomia.

GODARD, O. (2007). Pour une morale de la modélisation économique des enjeux climatiques en contexte d'expertise. In *Les modèles du futur* (pp. 203-226). La Découverte.

GOFFIN, L. (1997). L'éducation relative à l'environnement, un défi pour le XXIème siècle. Conférence forum international Planèt' ErE, Montréal.

GOFFIN, L. (1992). Problématique de l'environnement. Fondation universitaire luxembourgeoise - Arlon.

GOOSSE H. ((2015). Climate System Dynamics and Modelling, Cambridge University Press.

- GORZ, André. Capitalisme, socialisme, écologie: désorientations, orientations. Galilée, 1991.
- GUENEWALD, D.A. (2005). More than one profound truth: Making sense of divergent criticalities. *Educational Studies*, 37(2), 206-215.
- GULDIMANN, T. (1996). Apprentissage indépendant : par la prise de conscience métacognitive et l'extension du répertoire des stratégies cognitives et métacognitives. P. Haupt, Berne
- GUILIA T, FRANCESCO P, Olivier L. (2013). Climate change proposol integrating the physical and social sciences ScienceDirect-ELSEVIER
- GUILLEMOT H. (2009). « Comment évaluer un modèle numérique du climat », *Revue anthropologique des connaissances*, vol 3, n°2, p. 273 - 293.
- GUILLEMOT H. (2006). « Les modèles numériques du climat » in Dahan A. (ed), *Les modèles du futur*, Paris, La Découverte.
- CRUTZEN, Paul J. (2002). The "Anthropocene". In : *Journal de Physique IV (Proceedings)*. EDP sciences, p. 1-5.
- HAAN, G. de ; HARENBERG, D. (1999). *Education au développement durable*. Université libre de Berlin, BLK, Bonn. Numéro 72.
- HA-DONG M., MATARASSO P. (2006). « Comment intégrer l'économie, l'énergie et le climat ? », *Pour la Science*, dossier 52, p. 92 - 97.
- HANH THICH NHAT (2011). *Planting seeds, Practicing Mindfulness with children*. Parallax press.
- HAGEGE, H. (2015). Et les compétences spirituelles alors ? La clé de la durabilité est celle du bonheur ! *Actes du Colloque Former au monde demain*.
- HARPER K.C (2008). *Weather by the numbers, the genesis of modern meteorology*, MIT.
- HAYS J.D., IMBRIE J., SHACKELTON N.J. (1976). "Variations in the Earth's orbit", *pacemakers of the ice age Science*, 192, p. 1121-1132.
- HEIDORN K.C (2004). « L.F Richardson: Building the Forecast Factory", *The Weather Doctor's Weather Almanach*.
- HOR, K. (2014). *An Advocacy Journey towards Education for Sustainable Development in Singapore*. <http://www.theodyssey.sg/resources/advocacy-journey-towards-education-sustainable-developmentsingapore>.
- HOURCADE J.-C. (1993). Quand le long terme s'invite dans l'actualité. *Projet*, automne, vol. CCXXXV, p. 47-54.
- HOURCADE J.C, LE TREUT H. (2002). *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution*, CIRED, LMD, SMASH, Rapport de Synthèse, Juillet, 29 p.
- HOURDIN F. (2011). « Les paramétrisations physiques » in Jeandel C. et Mosseri R. (dir), *Le climat à découvert*, Editions CNRS, p. 162 - 165.

HUBERT, M. (1999). *Apprendre en projets*. Lyon: Chroniquesociale.

IIASA MESSAGE 2017. International Institute of Applied Systems Analysis. <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAG E.en.html> (accessed October 15, 2018).

IUCN, UNEP, WWF. *World Conservation Strategy. Living Resource Conservation for Sustainable Development*. Gland, Switzerland, IUCN, UNEP, WWF, 1980.

JACOBSON, J.M. et WILENSKY U. (2009). *Systèmes complexes en éducation : Importance scientifique et pédagogique et implications pour les sciences de l'apprentissage*

JACQUIER M.C (2017). « Le trou de la couche d’ozone est bien en train de disparaître », *Futura Planète*, 15 septembre.

JACQUINOT-DELAUNAY, G. (2007). *Éducation et communication à l'épreuve des médias. Hermès, La Revue*, (2), 171-178.

JANK, W. MEYER, H. (1996). *Modèles didactiques*. Francfort / Main.

JEANDEL C., MOSSERI R. (2011). *Le climat à découvert*, Editions CNRS.

JODELET D. (1997). *Représentation sociale : phénomènes, concept et théorie* » in S. Moscovici (dir), *Psychologie sociale*, Paris, PUF.

JODELET, D. (1991). *Les représentations sociales*, Paris, PUF.

JODELET, D. (1991). *Représentation sociale*, Grand Dictionnaire de la psychologie, Paris, Larousse.

JONNAERT, P., VAN DER BORGHT, C. (1999). *Créer des conditions d'apprentissage*. De Boeck. Bruxelles

KAISER, F. G., & FUHRER, U. (2003). *Ecological behavior's dependency on different forms of knowledge. Applied psychology*, 52(4), 598-613.

KAUFMANN-HAYAZR. (2006). *Human action in context: A model framework for interdisciplinary studies in view of sustainable development. Umweltpsychologie* 10(1), pp. 154-177.

KELLY D.L, KOLSTAD C.D (1999). « *Integrated Assessment Models For Climate Change Control* » in Folmer H. and Tietenberg T. (eds), *International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000: A Survey of Current Issues*, Cheltenham, UK, Edward Elgar.

KIEKEN H. (2003). « *Genèse et limites des modèles d'évaluation intégrée* », *Annales des Ponts et Chaussées*, n°107-108, p. 84 – 91.

KELLNER, D. (1978). *Ideology, marxism and advanced capitalism. Socialist Review*, 42, 33-65.

KINCHELOE, J.L. (2004). *Critical Pedagogy - Primer*. New York: Peter Lang.

KLAFKI, W. (1996). *Nouvelles études sur la théorie et la didactique de l'éducation. Enseignement général contemporain et didactique constructive-critique*. Weinheim.

KNORR W., SCHNITZLER K.G (2006). "Enhanced albedo feedback in North Africa from possible combined vegetation and soil formation processes", *Climate Dynamics*, 26, p. 55 – 63

KRIEG-PLANQUE, A. (2010). La formule "développement durable" : un opérateur de neutralisation de la conflictualité. *Langage et société*, (4), 5-29.

KÜBLER, D., KISSLING-NÄF, I.; ZIMMERMANN, W. (2001). Quelle est la durabilité de la politique forestière suisse ? Une contribution à la discussion sur les critères et indicateurs. Bâle.

KUHN S.T (2008). *La structure des révolutions scientifiques*, Paris Flammarion.

KINCHELOE, J.L. (2004). *Critical Pedagogy – Primer*. New York: Peter Lang.

KÜNZLI, Ch. (2006). *Education au développement durable : concept didactique et mise en œuvre au niveau inférieur*. Thèse, Prof. Walter Herzog, Institut de l'éducation. Université de Berne. Manuscrit non publié

KYBURZY-GRABER, R; HÄGGER, D; WYRSCH, A. (2000). *L'éducation environnementale socio-écologique en pratique. Obstacles, conditions, potentiel*. Université de Zurich : Lycée d'enseignement supérieur.

LACAZE J.C (1998). *L'eutrophisation des eaux marines et continentales*, Ellipses.

LANGE, J.M. (2014). *Education au développement durable : intérêts et limites d'un usage scolaire des investigations multi-référentielles d'enjeux*, Cahiers du CERFEE, Education et socialisation, 36.

LANGE, J.M., MARTINAND, J.L. (2010). *Éducation au développement durable et éducation scientifique : balises pour un curriculum*. In A. HASNI et J. LEBEAUME (Eds), *Nouveaux enjeux de l'éducation scientifique et technologique : visées, contenus, compétences, pratiques* (pp. 125 -154). Presses de l'université d'Ottawa.

LANGE, J. M., Victor, P. (2011). *Un nouveau métier : éduquer au développement durable*. *La Revue Durable*, 42, 36-39.

LANGE, Jean-Marc et VICTOR, Patricia. *Didactique curriculaire et «éducation à... la santé, l'environnement et au développement durable»: quelles questions, quels repères?*. Didaskalia (Paris), 2006.

LANGE, M.F. (2001). *Dynamiques scolaires contemporaines au Sud*. In M.F. Lange (Ed.), *Des écoles pour le Sud. Stratégies sociales, politiques étatiques et interventions du Nord*. Autrepart, 17, pp. 5-12.

LASKAR J., ROBUTEL P. (1993). "The chaotic obliquity of the planets", *Nature*, 361, p. 608-612.

LATOUCHE, S. *L'imposture du développement durable ou les habits neufs du développement*. *Mondes en développement*, 2003, no 1, p. 23-30.

LATOUCHE, B. (2011). *Sur la pratique des théoriciens*. In *Savoirs théoriques et savoirs d'action* (pp. 131-146). Presses Universitaires de France.

LAWRENCE C. Hamilton (2010). *Education politics and opinions about climate change evidence for interaction effects* Springer.

LE BOTERF, G. (1994). De la compétence. Essai sur un attracteur étrange, Paris, Les Editions d'organisation, 16-18.

LEGARDEZ A. (2017), Questions socialement vives, éducation au développement durable et changements climatiques, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°9, mars, p. 112 - 121.

LEGARDEZ, A., ALPE, Y. (2013). Le curriculum sournois de l'éducation au développement durable : l'exemple de l'usage de certains concepts, *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, pp. 91 - 108.

LEGARDEZ, A., SIMMONEAUX, L. (2011). Développement durable et autres questions d'actualité. Questions socialement vives dans l'enseignement et la formation, *Educagri*.

LEGARDEZ, A. (2004). Transposition didactique et rapport aux savoirs : enseignements de questions économiques et sociales, socialement vives, *Revue Française de Pédagogie*, 49, 19-27.

LEGARDEZ, A. (2004). L'utilisation de l'analyse des représentations sociales dans une perspective didactique : l'exemple de questions économiques, *Revue des sciences de l'éducation*, 30, 3, 647-665.

LEISEROWITZ, A., MAIBACH, E., ROSER-RENOUF, C., et SMITH, N. (2010). Climate change in the American mind: Americans' global warming beliefs and attitudes in January 2010. *Yale and George Mason University. Yale Project on Climate Change*.

LEGENDRE R. (2005, 2e éd.). Dictionnaire actuel de l'éducation. Montréal : Guérin.

LEGENDRE R. (2005, 2e éd.). Dictionnaire actuel de l'éducation. Montréal: Guérin

LEIMBACH M., BAUMSTARK L., EDENHOFER O. (2010). Mitigation costs in a globalized world: climate policy analysis with Remind-R, *Environmental Modeling and Assessment*, vol 15, p. 155 - 173.

LEIMBACH M., BAUER N., BAUMSTARK L., LUKEN M., EDENHOFER O. (2010). Technological Change and International Trade, Insights from Remind, *Special Issue of the Energy Journal*, vol 31, p. 109 - 136.

LEPLAT J. (2004). L'analyse psychologique du travail, *Revue européenne de psychologie appliquée*, 54, 101-108.

LE TREUT H. (2017). Comment fonctionne le climat ? Disponible en ligne, www.climaten-question.fr

LE TREUT H., MAGNAN A. (2014). *Changement climatique, tous vulnérables ?* Editions Rue d'Ulm.

LE TREUT H. (2009). *Nouveau climat sur la terre, comprendre, prédire, régir*, Flammarion.

LE TREUT H. (2006). *Changements climatiques : perspectives et implications pour le XXIe siècle*. Discours à Séance solennelle de rentrée des cinq académies du 24 octobre 2006, sur le thème l'homme et la nature.

- LE TREUT H. (2005). Evolution climatique : les modèles et leurs limites, dossiers CNRS accessible www.cnrs.fr/cv/dossiers/divers/pdspm/idp2005/05/Letreut/pdf (consulté le 20/11/2016).
- LE TREUT H., JANCOVICI J.M (2001). *L'effet de serre, allons-nous changer le climat ?* Flammarion.
- LORIUS, C., JOUZEL, J., Ritz, C., MERLIVAT, L., BARKOV, N. I., KOROTKEVICH, Y. S., et KOTLYAKOV, V. M. (1985). A 150,000-year climatic record from Antarctic ice. *Nature*, 316(6029), 591.
- LUDERER G., LEIMBACH M., BAUER N., KRIEGLER E. (2011). Description of the REMIND R Model, <http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/sustainable-solutions/remind-code-1>
- MANNE A.S, MENDELSON R., ROCHELS R.G (1993). "MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GhG Reduction Policies", *Energy Policy*, vol 23, p. 17 - 34.
- MANNE A.S, ROCHELS R.G (1990). "CO2 Emission Limits, An Economic Cost Analysis for the USA", *Energy Journal*, vol 12, p. 87 - 107.
- MARCOTE, P. V., et Suárez, P. Á. (2006). Fondement et étude d'une stratégie méthodologique visant une éducation orientée vers la durabilité. *Vertigo-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 7(3).
- MARECHAL J.F (2014). « Les politiques dans l'impasse », *Sciences Humaines*, n°258, avril.
- MARX, Karl. *Le capital*. Lachâtre, 1875.
- MATAGNE, P. (2013). Education à l'environnement, éducation au développement durable, la double rupture. *Education et socialisation*, 33, 9 p.
- MATARASSO P. (2007). « La construction historique des paradigmes de modélisation intégrés : William Nordhaus, Alan Manne et l'apport de la Cowles Commission » in Dalmedico A.D (ed), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.
- MATARASSO P. (2003). « Evaluation intégrée et modélisation du changement climatique », *Annales des Ponts et Chaussées*, p. 71 - 79.
- MARCEL Guchet, *Le Monde*. 02/09/2012
- MARIE, M. (1869). *Les questions sociales*. Libraires de Paris.
- MARIN, J. (1987). *Exploitation, biologie et dynamique du stock de langouste rouge de Corse, Palinurus elephas Fabricius* (Doctoral dissertation, Université d'Aix-Marseille II).
- MAROY, C. (2006). Les évolutions du travail enseignant en France et en Europe : facteurs de changement, incidences et résistances dans l'enseignement secondaire. *Revue française de pédagogie*, 155, 111-142.
- MARTIN, R. *Langage et croyance: les " univers de croyance" dans la théorie sémantique*. Editions Mardaga, 1987.

MBACKE, Ahmadou Bamba (1887) *La Quête du Bonheur des deux Mondes* -

MATLABOUL FAWZEYNI www.daaraykamil.com

McNEILL J.R (2010). *Du nouveau sous le soleil, une histoire de l'environnement mondial au XXe siècle*, Seyssel Champ Vallon, *L'environnement a une histoire*, 523 p.

MEADOWS D., BOOTH- SWEENEY L. (2010). *The Systems Thinking Playbook*, Chelsea Green Publishing.

MEADOWS D.H, RANDERS J., MEADOWS D. (2004). *Limits to Growth, The 30-year Update*, Chelsea Green Publishing.

MEADOWS D.H, MEADOWS D.L, RANDERS J. (1992). *Beyond the Limits*, Earthscan Publications Limited.

MEADOWS D.H, MEADOWS D.L, RANDERS J., BEHRENS III W.W (1972). *The Limits to growth*, Universe Books Publishers.

MEN. (2005b). *Programme décennal l'éducation et de la formation, plan d'action de la deuxième phase 2005-2007*, Dakar, Ministère de l'enseignement préscolaire, de l'élémentaire, du moyen secondaire et des langues nationales.

MEIRIEU, P. (2001). *Eduquer à l'environnement : pourquoi ? Comment ?* Conférence, 17p.

MEIRIEU P. (1987). *Apprendre ... oui, mais comment*. Paris. ESF (1999), 17e édition.

MERLE P. (2009). *La démocratisation de l'enseignement*. Paris : La Découverte.

MESSNER S., STRUBEGGER M. (1995). *User' s Guide for MESSAGE III*. Laxenburg, Austria. MESSNER S., SCHRATTENHOLZER L.

MESSAGE-MACRO: *Linking an energy supply*. MEYER, H. (2004). *Qu'est-ce qu'une bonne éducation ?* Berlin.

NICOLESCU, B. (1996). *La transdisciplinarité*. CIRET

MINSCH, J .; EBERLE, A .; MEIERr, B .; SCHNEIDEWIND, U. (1996). *Courage pour la conversion écologique. Stratégies d'innovation pour les entreprises, la politique et les réseaux d'acteurs*. Bâle.

MONJO, R. *La «forme scolaire» dans l'épistémologie des sciences de l'éducation*. *Revue française de Pédagogie*, 1998, p. 83-93.

MONMONIER M. (1999). *Air Apparent: How Meteorologists Learned to Map, Predict and Dramatize Weather*, The University of Chicago Press.

MOUHOT J.F (2014). « Peut-on tirer des leçons du passé ? », *Sciences Humaines*, n°258, avril.

MOUHOT J.F, TESTOT L. (2014). "Le froid, le chaud et l'histoire", *Sciences Humaines*, n°258, avril.

MOUSSEAU, M. (2002). *Une limitation économique à la zone de paix démocratique et de coopération*. *Interactions internationales*, 28 (2), 137-164.

MORIN, E. (2014). *Enseigner à vivre. Manifeste pour changer l'éducation*. Actes Sud.

MORIN E. (2005). *Introduction à la pensée complexe*. Editions du Seuil.

MORIN, E. (2000). *Les sept savoirs nécessaires à l'éducation du futur*. Seuil.

MULNET, D. (2014). *Quelles compétences pour quelle éducation au développement durable* in Diemer A., Marquat C. (dir), *Education au développement durable. Enjeux et Controverses*. De Boeck.

MURGA, M. A., 2006. *L'éducation nécessaire : synergies entre développement et éducation*, MURGA M. A. (coord.), *Développement local et Agenda 21*, Pearson Prentice Hall, Madrid, 189-214.

NATIONS-UNIES, (2015). *Accord de Paris*. Disponible sur : http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/french_paris_agreement.pdf

NATIONS-UNIES, (2015). *Objectifs de Développement Durable (ODD)*.

NATIONS-UNIES, (2011). *Objectifs du Millénaire pour le développement*. ONU

NATIONS-UNIES, (2002). *Rapport du Sommet mondial pour le développement durable*. Johannesburg. Afrique du Sud.

NEUMAYER, E. (1999). *Durabilité faible ou forte. Explorer les limites de deux paradigmes opposés*. Cheltenham, Northampton.

NICOLESCU, B. (1996). *La transdisciplinarité*. Monaco : éditions du Rocher.

NORDHAUS W. (2017). "Evolution of Modeling of the Economics of Global Warming: Changes in the Dice Model, 1992 - 2017", Cowles Foundation Discussion Paper, n° 2084, 22 p.

NORDHAUS W. (2016). "Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies", Cowles Foundation, Discussion Paper, n°257, 44p.

NORDHAUS W., BOYER J. (1999). "Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming", Chapter 1, Yale University, October 25, 10 p.

NORDHAUS W. (1998). *Economics and Policy Issues in Climate Change, Resources for the Future*, New York.

NORDHAUS W. (1992). "An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases", *Science*, vol 258, November, p. 1315 - 1319.

NORDHAUS W. (1991). "To Slow or not to slow: The Economics of the Greenhouse Effect", *Economic Journal*, vol 101, p. 920 - 937.

NORDHAUS W. (1977). "Economic Growth and Climate: The Carbon Dioxide Problem", *The American Economic Review*, vol 67, n°1, p. 341 - 346.

NORDHAUS W. (1974). « Resources as a Constraint on Growth », *American Economic Review*, vol 64, n°2, May, p. 22 - 26.

NORDHAUS W. (1973). « The allocation of energy resources », *Cowles Foundation Papers*, n° 401.

NORDHAUS W. (1973). "World Dynamics, Measurement Without Data", *The Economic Journal*, vol 83, n° 332, p. 1156 - 1183.

- NORDHAUS W., TOBIN J. (1972). "IS Growth Obsolete?", in Nordhaus W., Tobin J. (eds), *Economic Research, Retrospect and Prospect*, vol 5, Economic Growth, NBER, p. 1 – 80.
- NASA (2005). NASA's Earth Observatory on December 20, 2002, under the title "Melting Snows of Kilimanjaro", March 25th
- OELKERS, J. (2004). L'éducation, la durabilité et la structure de l'école. Conférence au colloque "Education pour le développement durable" le 9 novembre 2004 à l'Université pédagogique de Kreuzlingen.
- OELKERS, J. (1990). Utopie et réalité. Un essai sur l'éducation et les sciences de l'éducation. *Zeitschrift für Pädagogik*, 36 (1), p. 1-13.
- ORAKES N., CONWAY E.M (2012). *Les marchands de doute*, Editions le Pommier.
- OR2D (2014). Quelles compétences pour favoriser le passage de l'éducation à l'environnement à l'éducation au développement durable. Rapport intermédiaire, IFADEM, décembre, 51 p. <http://www.or2d.org>
- OTT, K. (2001). Une théorie de la durabilité «forte». *Nature et Culture*, 2 (1), pp. 55-75.
- PACHAURI, R. K., et REISINGER, A. (Eds.). (2008). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse*. GIEC.
- PAGONI, M., TUTIAUX-GUILLON, N. (2012). Les éducations à... nouvelles recherches, nouveaux questionnements, *Spirale*, 50.
- PARSON E.A, FISHER-VANDEN K. (1997). "Integrated Assessment Models of Global Climate Change", *Annual Review of Energy and Environment*, vol 22, p. 589 – 628.
- PATRICK J. (2015). « Les paradigmes scientifiques selon Thomas Kuhn. Philosophie, science et société (en ligne) [http:// www.philosophies.com](http://www.philosophies.com) (consulté 20 novembre 2016).
- PENAY G. (2017). Eutrophisation : Manifestations, causes, conséquences et prédictibilité, Colloque de restitution ESCO – eutrophisation, synthèse, novembre, 144 p.
- PAVLOVA, M. (2007). Two pathways, one destination: TVET for a sustainable future. Background paper for the virtual Conference. UNESCO-UNEVOC, 22 octobre – 10 novembre.
- PELLAUD, F., et GAY, P. (2017). Des connaissances au passage à l'acte : les complexités de l'éducation au développement durable. *Revue francophone du développement durable, Hors-série 5*, p. 6-17.
- PELLAUD F. (2017), Changements climatiques et transition énergétique : complexité, approche systémique et cartes conceptuelles, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°9, mars, p. 99 – 120.
- PELLAUD, F. (2013). EDD, ça veut dire quoi ? *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars.

- PELLAUD, F., ROLLE, L., GREMAUD, B., BOURQUI, F. (2012). L'éducation en vue d'un développement durable : enjeux, objectifs et pistes pratiques interdisciplinaires, *Revue interdisciplinaire de didactique*, Québec.
- PELLAUD, F. (2011). *Pour une éducation au développement durable*, Quae Editions.
- PELLAUD, F. (2000). L'utilisation des conceptions du public lors de la diffusion d'un concept complexe, celui de développement durable, dans le cadre d'un projet en muséologie. Thèse de doctorat, Université de Genève.
- PERRNOUD P. (1993). « Curriculum : le formel, le réel, le caché », in Houssaye, J. [dir.]. *La pédagogie : une encyclopédie pour aujourd'hui*. Paris : ESF, p. 61-76.
- PIAGET, J. (1998). *De la pédagogie*, éd. Odile Jacob, Paris.
- PIAGET, J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Paris Delachaux et Niestlé.
- PIKE, G., SELBY, D. (1999). *In the global classroom* Bd. 1 & 2. Toronto.
- PLATON, *Œuvres complètes. Le Politique*, édition de Léon Robin, Belles Lettres (CUF), Paris, 1970
- PONGIGLIONE, F. (2012). The key role of causal explanation in the climate change issue. *THEORIA. Revista de Teoría, Historia y Fundamentos de la Ciencia*, 27(2), 175-188.
- PROST A. (1992). *Éducation, société et politiques. Une histoire de l'enseignement en France de 1945 à nos jours*. Paris: Seuil.
- PRUNEAU D., DEMERS M., KHATTABI A. (2008), *Eduquer et Communiquer en matière de changements climatiques: Défis et Possibilités*, *Vertigo*, La revue en sciences de l'environnement, vol 8, n°2, octobre, p. 1 - 10.
- PRUYT E. (2013). *Small Dynamics Models for Big Issues*, Delft Library, The Netherlands
- RAFFIN, F., BARON S. (2011). Dossier d'analyse sur la notion des représentations, *Evaluation de l'UE 1A, Diplôme universitaire d'éducation au développement durable*, ESPE Clermont Auvergne.
- RANDALL D.A (2000). *General Circulation Model Development*, Academic Press.
- RASKIN P., MONKS F., RIBEIRO T., VAN VUUREN D., ZUREK D. (2005). Global scenarios in historical perspective. In: Carpenter, S.R., et al. (Eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios: Findings of the Scenarios Working Group*. Island Press, Washington, DC, pp. 35-44.
- RESUME DU RAPPORT MONDIAL DE SUIVI SUR L'EDUCATION (2016) : l'éducation pour les peuples et la planète : créer des avenir durables pour tous
- REYNOLDS, W. M. (2010). Reynolds adolescent depression scale. *The Corsini Encyclopedia of Psychology*, 1-1.
- RIAHI K., ROEHRL R.A (2000). Greenhouse gas emissions in a dynamics-as-usual scenario of economic and energy development. *Technol Forecast Soc Change*, 63, 175-205. doi:10.1016/S0040-1625(99)001110.

- RICHARDSON L.R (1922). *Weather Prediction By Numerical Process*, Cambridge University Press.
- ROHDE R.A (2006). *Global warming*, <http://www.globalwarming.com> (consulté le 26/05/2015).
- ROPË, F., et Tanguy, L. (1994). *Savoirs et compétences. Paris : L'Harmattan.*
- ROUQUETTE, M.L (1994). *Sur la connaissance des masses : essai de psychologie politique.* Presses Universitaires de Grenoble.
- ROSNAY, de J. (1977). *Le macroscopie.* Editions du Seuil.
- ROSNAY, de J. (1991). *L'écologie et la vulgarisation scientifique.* Musée de la Civilisation.
- ROTHMAN D.S, AGARD J., ALCAMO J. (2007). *The Future Today*, in United Nations Environment Programme, in *Global Environment Outlook 4.* UNEP, Nairobi, pp. 397-454.
- RUDDIMAN W.F (2009). *La charrue, la peste et le climat*, Randall.
- RUDDIMAN W.F (2005). *Plaws, Plaques and Petroleum*, Princeton University Press.
- SACHS, I. (1981), *Initiation à l'écodéveloppement*, Privat.
- SARABHAI, K. V., SUBRAMANIAM, S.M. (2014). *ESD and Biodiversity Education. Background paper for the DESD Global. Monitoring and Evaluation Report.*
- SAUVÉ, L (2013). *Au cœur des questions socio-écologiques : des savoirs à construire, des compétences à développer. Éducation relative à l'environnement. Regards-Recherches-Réflexions, (Volume 11).*
- SAUVÉ L et ORELLANA, I. (2008). *Conjuguer rigueur, équité, créativité et amour : L'exigence de la criticité en éducation relative à l'environnement [Éditorial]. Éducation relative à l'environnement : Regards-Recherches-Réflexions, 7, 7-20.*
- SAUVÉ L., BERRYMAN T. et BRUNELLE R. (2007). *Three Decades of International Guidelines for Environment Related Education: A Critical Hermeneutic of the UN Discourse.* *The Canadian Journal of Environmental Education*, vol. 12, p. 33-55.
- SAUVÉ L. (2006). *L'organisation et la structuration du secteur de l'éducation en réponse au programme onusien du développement durable.* In *Former et éduquer pour changer nos modes de vie*, *Liaison Énergie-Francophonie*, n° 72, décembre 2006, p. 33-41.
- SAUVÉ, L., MACHABEE, L. (2000). *La représentation : point focal de l'apprentissage, Education relative à l'environnement*, 2, 183-194.
- SAUVÉ, L. (1997). *Pour une éducation relative à l'environnement.* Montréal : Guérin Editeur.
- SAUVÉ, L. (1994). *Pour une éducation relative à l'environnement.* ESKA, Paris.
- SIRAJ-BLATCHFORD, J. (2014). *Matarajio' project: Gender equality in Kenya.* <http://327sustainability.wordpress.com/2014/06/03/matarajio-project-gender-equality-in-kenya>.

- SIMMONNEAUX, J. (2013). Quelques postures épistémologiques pour une éducation au développement durable ? *Revue Francophone du développement durable*, 1, mars, pp. 75 - 90
- SCHAEFFER, R. (1972). R. SCHAEFFER et GF BERTSCH, *Phys. Lett.* 38B, 159 (1972). *Phys. Lett.*, 38, 159.
- SCHEUNPFLUG, A., SCHRÖK, N. (2000). Apprentissage global. Introduction à un concept pédagogique d'éducation au développement. Stuttgart.
- SCHNEIDER S., LANE J. (2005). "Integrated Assessment Modeling of Global Climate Change: Much Has Been Learned - Still a Long and Bumpy Road Ahead", *The Integrated Assessment Journal*, vol 5, n°1, p. 41 - 75.
- SCHNEUWLY, B., BRANCKART, J-P. (1985). *Vygosky aujourd'hui*, éd. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.
- SCHOLZ, G. (2003). Apprentissage social à l'école primaire - Contre la disparition de l'éducation politique. Dans : *Impliquer les enfants - Apprendre la démocratie ?* K. Burk, A. Speck Hamdan, H. Wedekind (éd.), Francfort / Main. pp. 39-53.
- SCHWANITZ V.J (2013). "Evaluating Integrated Assessment Models of Global Climate Change", *Environmental Modeling and Software*, vol 50, p. 120 - 131.
- SITE CNRS/GRENOBLE, Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (consulté le 8/12/2016).
- SHERWOOD S., BONY S., BOUCHER O., BRETHERTON C., FORSTER P., GREGORY J.M, STEVENS B. (2015). "Adjustments in the forcing - feedback framework for understanding climate change", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 96, n°2, February, p. 217 - 228.
- SNDD.<http://www.environnement.gouv.sn/sites/default/files/documenttheque/SNDD.pdf> (consulté le 28/04/2017).
- SOKOLOV A.P and ali. (2005). The MIT Integrated Global System Model 5IGSM), Version 2, Model Description and Baseline Evaluation, Science Global Policy Change, Report n°124, July, 46 p.
- STEFFEN, Will, CRUTZEN, Paul J. et MCNEILL, John R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 36, no 8, p. 614-622.
- STEHFEST E., VAN VUUREN D., BOUWMAN L., KRAM T. (2014). Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). (http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/PBL-2014Integrated_Assessment_of_Global_Environmental_Change_with_IMAGE_30-735.pdf)
- STENGERS, I. (2005). En introduction au livre de Querrien, A. *L'école mutuelle, une pédagogie trop efficace ?* éd. les empêcheurs de penser en rond.
- STEURER, R. (2002). *Le discours de croissance en science et en politique. De l'euphorie de la croissance sur les « limites de la croissance » à la durabilité.* Berlin.

STERN (2007) Stern, NH et la Grande-Bretagne. (2007). *L'économie du changement climatique : la revue Stern*. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.

STERN, E., MOLLER, K. (2004). L'acquisition de connaissances accessibles en tant qu'objectif de l'enseignement primaire. *Journal des sciences de l'éducation. Domaines de recherche en sciences de l'éducation en général*, 134, p. 25-36.

STERN, E. (2003a). Apprendre- le levier le plus important du développement spirituel. *Universitas. Orientation dans le monde de la connaissance*, 58 (5), pp. 454-464.

STERN, E. (2003b). Apprendre- le levier le plus important du développement spirituel. 2ème partie. *Universitas. Orientation dans le monde de la connaissance*, 58, (6), pp. 567-582

STERN, E., SCHUMACHER, R. (2004). Apprendre à l'école maternelle. Manuel électronique pour le cours type "Early Education" à FH Neubrandenburg.

SYIHLA, V., et LINN, M. C. (2012). A design-based approach to fostering understanding of global climate change. *International Journal of Science Education*, 34(5), 651-676.

TANNENBERG V.L (2017). *Le changement climatique, une menace pour la démocratie*, Buchet - Chastel.

TESTARD, J. (2003). *Le Vivant manipulé*, Éd. Sand, 189 pp. (ISBN 2-7107-0706-3).

TESTOT L. (2012). L'histoire du climat, *Les grands dossiers des sciences humaines*, n°25.

THAYER, R. E., NEWMAN, J. R., et MCCLAIN, T. M. (1994). Self-regulation of mood: Strategies for changing a bad mood, raising energy, and reducing tension. *Journal of personality and social psychology*, 67(5).

THEYS, J. (2010). Trois conceptions irréductibles de l'environnement. *Écologies Urbaines, Paris, Economica*, 15-24.

THOMASHOW, M. (1995). *Ecological Identity: Becoming a Reflective Environmentalist*. Cambridge: MIT Press.

TOL R.S.J, FANKHAUSER S. (1998). "On the Representation of Impact in Integrated Assessment Models of Climate Change", *Environmental Modeling and Assessment*, vol 3, p. 63 - 74.

TOSTAN (2013). *Seven Female Solar Engineers Share Knowledge at Tostan Solar Power Workshop*.Dakar.

TURCHANY, G., GY, Füleky, TURCSÁNYI, K., et al. Problèmes, précédents et perspectives de développement durable. *Liget*, 2007, vol. 6, n ° 6, p. 58-69.

UNESCO (2018). *Issues and trends in Education for Sustainable Development, Education on the move, Education 2030*, Leicht A., Heiss J. and Byun W.J (Eds.), Unesco France, 271 p.

UNESCO (2017). *Faire face au changement climatique : guide sur l'action climat destiné aux établissements scolaires*

UNESCO (2016). Résumé du Rapport Mondial de Suivi sur l'Éducation. L'éducation pour les peuples et la planète : CREER DES AVENIRS DURABLES POUR TOUS.

UNESCO (2016). L'Éducation au changement climatique et la COP22.

UNESCO (2014). Shaping the Future we want, UN Decade of Education for Sustainable Development (2005 - 2014). Final Report, UNESCO France. Paris, ISBN 978-92-3-100053-9, 198 p.

UNESCO (2012). Education pour le développement - Bonnes pratiques en matière de biodiversité,6, UNESCO - secteur de l'éducation. Paris. France, 112 p.

UNESCO (2009), *Contextes et structures de l'EDD*, Décennie des Nations Unies pour l'éducation au service de l'éducation au développement durable.

UNESCO (2006). L'éducation non formelle. Bureau de l'information au public, 2 p.

UNESCO (2005a). United Nations Decade of Education for Sustainable Development (2005 - 2014). International Implementation Scheme, UNESCO Education Sector, ED/DESD/2005/PI/01, 31 p.

UNESCO (2005b). UN Decade of Education for Sustainable Development, 2005 - 2014. ED/2005/PEQ/ESD/3, Division for the promotion of Quality Education., 10 p.

UNESCO (2005c). UNESCO and Sustainable Development, 44 p

UNESCO (2000). Cadre d'action de Dakar. L'éducation pour tous : tenir nos engagements collectifs texte adopté par le Forum sur l'éducation pour tous, Dakar, Sénégal, 26-28 avril 2000, Paris, Unesco.

UNESCO (1997). General Conference ; 29th ; Actes de la Conférence générale, vingt-neuvième session, Paris 21 octobre-12 novembre.

UNESCO (1996). Learning, a treasure within. Paris, 51 p.

UNFECC (2017). Protocole de Kyoto à la Convention cadre des Nations-Unies pour le Changement Climatique, 1998 (unfecc.org).

UNDP, H. (2007). Human development report 2007/2008. Fighting climate change : Human solidarity in a divided world. *Human development report*.

UNITED NATIONS (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1, 41 p.

URGELLI, B. (2008). Éducation aux risques climatiques. Premières analyses d'un dispositif pédagogique interdisciplinaire.

VAN VUUREN D., KRAM T., STEHFEST, E. (2015). IMAGE STRATEGY DOCUMENT 2015-2020. <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2015-image-strategy-document1797.pdf>

VAN VUUREN D.P, KOK M.T.J, GIROD B., LUCAS P.L, DE VRIES B. (2012). Scenarios in global environmental assessments: key characteristics and lessons for future use, *Global Environ. Change*, 22 (4), 884-895.

VASQUEZ T. (2002), *Weather Forecasting Handbook*, 5th Edition, Weather Graphics Technologies, Austin.

- VERGES, P. (1994). Les représentations sociales de l'économie : une forme de connaissance, in Jodelet D. (dir), *Les représentations sociales*, PUF.
- VIEILLE-BLANCHARD E. (2007). "Croissance ou stabilité ? L'entreprise du Club de Rome et le débat autour des modèles », in Dalmedico D.A. (ed), *Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques*. Recherche La Découverte.
- VINCENT, G. *L'éducation prisonnière de la forme scolaire? Scolarisation et socialisation dans les sociétés industrielles*. Presses universitaires de Lyon, 1994.
- VYGOSTKY, L.S. (1934). *Pensée et langage*. Paris. Editions sociales (1985).
- VIVIEN, F.D, LEPART, J., Marty, P. (2013). *L'évaluation de la durabilité*. Indisciplines. Editions QUAE.
- VOGEL, J.H., ALARCON, R., SAENZ GARCIA M., MORALES, M., LINDSTROM, R. (2000). *El Cartel de la biodiversidad*. CARE, Proyecto SUBIR.
- WALS A. E. J. (2014). *Social Learning-oriented ESD: meanings, challenges, practices and prospects for the postDESD era*. Background paper for the DESD Global Monitoring and Evaluation Report.
- WALSH, K. (1994), « On the Influence of the Andes on the General Circulation of the Southern Hemisphere », *Journal of Climate*, vol 7, n°6, p. 1019 - 1025.
- VERGES, P. (1994a). Les représentations sociales de l'économie : une forme de connaissance. In D. Jodelet (dir.), *Les représentations sociales* (p. 387-405). Paris : Presses universitaires de France (1^{re}éd. 1989).
- VERGES, P., ALBERTINI, J.-M. et LEGARDEZ, A. (1995). *Mental representations of the economy: A key factor in economic progress, French report*. Paris et Aix-en-Provence : CNRS.
- WITTEZAELE J-J et GARCIA T. (1992). *À la recherche de l'École de Palo-Alto*, Seuil, Paris, (ISBN 2020136260)
- WHITE S. (2011). *The Climate Rebellion in the Early Modern Ottoman Empire*, Cambridge University Press.
- WHITE S. (2014). « Crises climatiques, 15 000 ans d'histoire », *Sciences Humaines*, n°258, avril.
- WHITE S., PFISTER C., MAUELSHAGEN F. (2017), *Palgrave Handbook of Climate History*, Palgrave MacMillan. <https://www.banquemonnaie.org/fr/news/press-release/2018/06/13/mdb-climate-finance-hit-record-high-of-us352-billion-in-2017>
- XIE, Y., ALLEYNE, A. G., GREER, A., et DENEAULT, D. (2013). Fundamental limits in combine harvester header height control. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 135(3), 034503.
- YIN, Q., TAN, J. M., BESSON, C., GELETIL, Y. V., MUSAEV, D. G., KUZNETSOV, A. E., ... et HILL, C. L. (2010). A Fast Soluble carbon-free molecular water oxidation catalyst based on abundant metals. *Science*, 1185372.

ZACCAI, E. (2002). Le Développement durable : dynamique et constitution d'un projet.

ZAHATCHOUK, J.M (2008). Travail par compétences et socle commun, Repères, Sceren, CRDP d'Amiens.

ZARIFIAN, P. (1994). Compétences et organisation qualifiante en milieux industriels in F. Minet, M. Parlie, S. de Witte (dir), La compétence, mythe, construction ou réalité ? Paris, l'Harmattan.

ZWANG A, GIRAULTt Y. (2012). Quelle(s) spécificité(s) pour l'Éducation au Développement Durable (ÉDD) ? In : *Spirale. Revue de recherches en éducation*, n°50. Les éducations à... : quelles recherches, quels questionnements ? Sous la direction de Maria Pagoni et Nicole Tutiaux-Guillon. pp. 181-195.