



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

TITRE

**Que reste t'il de la transition énergétique : des scénarios prospectifs aux
stratégies bas carbone des compagnies pétrolières**

Thèse présentée et soutenue publiquement le 11 décembre 2025 à 15h
pour l'obtention du titre de Docteur en Sciences Economiques

par

Chafia BESSALEM

sous la direction de Arnaud DIEMER

Membres du Jury

Présidente du jury : Pascale Combes-Motel (UCA)

Rapporteur : Sylvie Ferrari (BSE)

Rapporteur : Emmanuel Raufflet (HEC Montréal)

Suffragant : Alain Grandjean

Directeur de thèse : Arnaud Diemer (UCA)

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 l'auteur.

Avant-propos

Notre thèse de recherche est rattachée au laboratoire CERDI de l'Université Clermont Auvergne sous la direction d'Arnaud Diemer, spécialiste en dynamique des systèmes. Elle s'inscrit dans le cadre des travaux du Centre d'Excellence Jean Monnet (ERASME), tournés vers le développement durable.

L'idée de cette recherche est née d'un besoin de mieux comprendre les scénarios prospectifs des compagnies du secteur pétrolier et gazier et leurs liens avec les feuilles de routes aux impératifs climatiques. Cette thèse est le questionnement d'un parcours professionnel de plus de vingt-cinq années d'expérience au sein de la compagnie Sonatrach, acteur majeur du secteur énergétique et économique de l'Algérie. Cette expérience a permis d'avoir une vision des enjeux, des transformations, des difficultés et des résistances auxquels font face les groupes pétroliers pour s'aligner sur l'objectif de neutralité carbone

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le professeur Arnaud Diemer, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon sujet en le rendant possible grâce à son soutien scientifique, son aide et sa patience indéfectibles et la qualité de son encadrement

Je tiens à remercier l'équipe ERASME, qui m'a offert, à travers ma participation aux séminaires qu'elle a organisés, de m'approprier les outils de modélisation systémique (VENSIM et STELLA), essentiels à la conduite de mes travaux de recherche.

Enfin, espérons que notre modeste contribution ait pu apporter les éléments de réponses et/ou donner des pistes de réflexion à explorer pour appréhender la complexité du système énergétique et les leviers de sa transition énergétique pour un mix plus propre.

Que reste t-il de la transition énergétique ? : des scénarios prospectifs aux stratégies bas carbone des compagnies pétrolières

Résumé en français : Le système énergétique mondial est marqué par de multiples tensions en lien avec la sécurité des approvisionnements, les conflits géopolitiques et les défis climatiques. Engagés dans la transition énergétique, les différents Etats ont dû concevoir des feuilles de route dont l'objectif principal est la neutralité carbone. Si la réduction des émissions de gaz à effet de serre constitue le fil rouge des scénarios prospectifs, elle n'est pas déclinée de la même manière dans le plan d'actions des Etats et celui des acteurs privés, en l'occurrence, les compagnies pétrolières et gazières, qui sont responsables de plus de la moitié des émissions mondiales de GES. La thèse interroge l'avenir de la transition énergétique et l'objectif de la neutralité carbone à l'horizon 2050. Elle se propose de mettre en lumière les complexités du système énergétique mondial en mobilisant les travaux relatifs aux scénarios, à la prospective et à la modélisation systémique incarnée par la dynamique des systèmes. Notre recherche s'est structurée autour de trois axes de travail. Le premier axe propose une lecture de la littérature sur les scénarios. Quatre approches (Scenario planning, Prospective, Three horizons, Narrative Shared Socioeconomic Pathways) sont présentées et analysées en spécifiant les trajectoires futures possibles, les éventuelles ruptures de tendance et les enjeux d'un changement de paradigme. Le deuxième axe précise la place des scénarios prospectifs dans les politiques et les feuilles de route nationales. En s'appuyant sur le cas français, nous avons mis en lumière les scénarios proposés par quatre institutions nationales (ADEME, RTE, Négawatt et The Shift Project) en nous appuyant sur les diagrammes de boucles causales (CLD) proposés par la dynamique des systèmes. Les résultats de cette méthode de modélisation contrastent avec les approches dites sectorielles (énergie, logement, mobilité...) largement utilisées dans les rapports de ces institutions. Enfin, dans un troisième et dernier axe, nous avons analysé les feuilles de route nationales de 4 pays (Algérie, Etats-Unis, France, Royaume-Uni) au regard des stratégies de six compagnies pétrolières et gazières (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Sonatrach et Total Energies). Cette démarche qui se veut avant tout systémique et prospectiviste tend à souligner que la neutralité carbone est largement subordonnée aux choix stratégiques des compagnies pétrolières et gazières. Si leurs investissements dans les énergies renouvelables sont encore modérés, ils s'insèrent dans une gestion de portefeuille dans laquelle le mix énergétique (et donc les investissements dans les énergies fossiles) et la valeur actionnariale sont encore bien présents.

Mots clés : Dynamique des systèmes, feuille de route, neutralité carbone, scénarios, transition énergétique

What is left of the energy transition? : from futures-oriented scenarios to oil companies' low-carbon strategies

Abstract : The global energy system is characterized by multiple tensions related to security of supply, geopolitical conflicts, and climate challenges. Committed to the energy transition, various countries have developed roadmaps whose main objective is carbon neutrality. While reducing greenhouse gas emissions is the common thread running through prospective scenarios, it is not addressed in the same way in the action plans of governments and private actors, namely oil and gas companies, which are responsible for more than half of global GHG emissions. The thesis questions the future of the energy transition and the goal of carbon neutrality by 2050. It aims to highlight the complexities of the global energy system by drawing on work related to scenarios, foresight, and systemic modeling embodied by system dynamics. Our research is structured around three areas of work. The first area offers an interpretation of the literature on scenarios. Four approaches (scenario planning, foresight, three horizons, narrative shared socioeconomic pathways) are presented and analyzed, specifying possible future pathways, potential trend disruptions, and the challenges of a paradigm shift. The second axis specifies the place of prospective scenarios in national policies and roadmaps. Using the French case as an example, we highlighted the scenarios proposed by four national institutions (ADEME, RTE, Négawatt, and The Shift Project), drawing on the causal loop diagrams (CLDs) proposed by system dynamics. The results of this modeling method contrast with the so-called sectoral approaches (energy, housing, mobility, etc.) widely used in the reports of these institutions. Finally, in a third and final axis, we analyzed the national roadmaps of four countries (Algeria, the United States, France, and the United Kingdom) in relation to the scenarios of six oil and gas companies (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Sonatrach, and Total Energies). This approach, which is primarily systemic and futures-oriented, tends to emphasize that carbon neutrality is largely dependent on the strategic choices made by oil and gas companies. While their investments in renewable energies are moderate, they are part of a portfolio management strategy in which the energy mix (and therefore investments in fossil fuels) and shareholder value are still very much present.

Key words : : Energy transition, Low carbon strategy, Roadmap, Scenarios, System Dynamics

Liste des Abréviations

AIE /IEA	Agence Internationale de l'Énergie/ International Energy Agency
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CLD	Causal Loop Diagram (Diagramme de boucles causales)
ENR/EnR	Énergies Renouvelables
GES	Gaz à Effet de Serre
CERDI	Centre d'Études et de Recherches sur le Développement International
ERASME	École de Recherche Appliquée sur les Systèmes, les Modèles et l'Économie
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
LTECV	Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte
SNBC	Stratégie Nationale Bas-Carbone
NSSP	Narrative Shared Socioeconomic Pathways
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Énergie
PNIEC	Plan National Intégré Énergie-Climat
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
SFD	Stock and Flow Diagram (Diagramme de stocks et flux)
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
VENSIM	Logiciel de modélisation systémique
ENR	Énergies Renouvelables
ONU	Organisation des Nations Unies
EU	Union Européenne
ODD	Objectifs de Développement Durable
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
WEO	World Energy Outlook
CDN	Contributions Déterminées au niveau National
IRENA	International Renewable Energy Agency

NZE Net Zero Emissions
APS Announced Pledges Scenario
STEPS Stated Policies Scenario
SDS Sustainable Development Scenario
CCUS / CCS Carbon Capture, Utilization and Storage
PIB Produit Intérieur Brut
IAM Integrated Assessment Models
GW Gigawatt
MW Mégawatt
CO₂ eq Équivalent dioxyde de carbone
BAU Business As Usual Inflation Reduction Act (États-Unis)
IRA Inflation Reduction Act (États-Unis)
LT-LEDS Long-Term Low Emission Development Strategies
SNDH Stratégie Nationale de Développement de l'Hydrogène (Algérie)
NDC Nationally Determined Contribution
OGDC Oil and Gas Decarbonisation Charter
OPEP Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
PV Photovoltaïque
VE Véhicule Électrique

PLAN DE LA THÈSE

Avant-propos	p. 3
Résumé en français	p. 4
Résumé en anglais	p. 5
Abréviations	p. 6
Introduction	p. 9
Article 1 :Les transitions énergétiques à l’horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective	p. 34
Article 2 Les scénarios de transitions énergétiques de la France à l’horizon 2050, quelques éléments de compréhension	p. 101
Article 3 Les stratégies et les scénarios des compagnies pétrolières à l’horizon 2050, freins ou catalyseurs des feuilles de route nationales de la transition énergétique ?	p. 165
Conclusion	p. 222
Bibliographie	p. 230

Introduction

Le système énergétique mondial est marqué par de multiples tensions en lien avec la sécurité des approvisionnements, les problématiques géostratégiques accentuant le déséquilibre du marché International de l'énergie et les défis climatiques. Ces dynamiques interconnectées mettent en exergue l'urgence d'une transformation radicale du système énergétique, dans un cadre où les enjeux environnementaux, socioéconomiques deviennent de plus en plus interdépendants (AIE, 2024 ; IPCC, 2022 ; Persson et al., 2021).

La transition énergétique s'est donc imposée comme un défi à l'échelle mondiale. Considérée comme une réponse incontournable aux enjeux du changement climatique, à l'épuisement des ressources fossiles et aux tensions géopolitiques qui perturbent l'équilibre mondial (IPCC, 2022 ; Rockström et al., 2009), elle est entrée dans le vocabulaire scientifique, politique et juridique. Bernadette Mérenne Schoumaker¹ (2019) rappelle que le concept de transition énergétique est né en Allemagne, via l'Öko-Institut², dans les années 1980. La transition énergétique désigne *“le passage d'un système reposant sur des énergies de stock (pétrole, charbon, gaz, uranium), très centralisées entre les mains de gros opérateurs, à un système reposant sur des énergies de flux (éolien, solaire, biomasse) décentralisées avec de nombreux producteurs, auquel s'ajoutent des actions en matière de sobriété et d'efficacité énergétiques ainsi que des mesures pour lutter contre les inégalités et la vulnérabilité dans le domaine de l'énergie”*. Olivier Labussière et Alain Nadaï (2018, 2024) précisent que la transition énergétique est avant tout un processus socio-technique avec des dimensions politiques, spatiales et temporelles. L'énergie de transition est décrite comme l'ensemble des transformations à l'oeuvre, incluant les technologies, les marchés, les infrastructures, les choix institutionnels, les pratiques sociales : *“The notion of energy transition commonly refers to a deliberate transformation of present sociotechnical energy systems necessary for the emergence of more sustainable, less carbon-dependent and less energy intensive energy systems”* (Labussière, Nadaï, 2018). Cette définition rejoint celle de Vaclav Smil (2010), qui dans son ouvrage *Energy Transitions : History, Requirements, Prospects*, associait la transition énergétique à des *“fundamental processes behind the evolution of human societies : they both drive and are driven by technical, economic and social changes”*.

¹ <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/transition-energetique>

² L'Öko-Institut est un institut allemand de recherche sur l'environnement reconnu d'utilité publique et dont le siège est situé à Fribourg-en-Brigau.

Les rapports officiels et les institutions internationales/nationales se sont très vite emparés du vocable. La loi française “Loi de transition énergétique pour la croissance verte” (LTECV) du 17 août 2015 (loi n°2015-992) stipule que *“la transition énergétique vise à agir pour le climat, en fixant à la France des objectifs fixés et des moyens d’actions, à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d’énergie”*. Sur son site internet, daté du 13 décembre 2016, le Ministère de la Transition Écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche, précise que la transition énergétique *“vise à préparer l’après pétrole et à instaurer un modèle énergétique robuste et durable face aux enjeux d’approvisionnement en énergie, à l’évolution des prix, à l’épuisement des ressources et aux impératifs de la protection de l’environnement”*. La transition énergétique est donc quantifiée : elle doit permettre une réduction des émissions de gaz à effet de serre (-40% entre 1990 et 2030), une baisse de la consommation énergétique de 50% en 2050 et une augmentation de la part des énergies renouvelables (32% en consommation finale brute en 2030). Il n’y a pas de définition précise de la transition énergétique dans les rapports de l’Agence Internationale de l’Energie (AIE), toutefois cette dernière la décrit comme un processus par lequel les pays passent vers des systèmes énergétiques plus durables, avec une baisse des émissions de carbone, un mix énergétique plus propre et une efficacité énergétique accrue. Même constat du côté du GIEC (2022), qui décrit dans le chapitre 6 *Energy Systems* du Working Group III (Rapport AR6) ce qu’est une transition vers des net-zero energy systems avec des scénarios compatibles avec +1.5 °C ou +2 C° : *“Net -zero energy systems will share common characteristics, but the approach in every country will depend on national circumstances. Common characteristics of net-zero energy systems will include : (i) electricity systems that produce no net CO2 or remove CO2 from the atmosphere; (ii) widespread electrification of end uses, including light-duty transport, space heating, and cooking ; (iii) substantially lower use of fossil fuels than today; (iv) use of alternative energy carriers such as hydrogen, bioenergy, and ammonia to substitute for fossil fuels in sectors less amenable to electrification; (v) more efficient use of energy than today; (vi) greater energy system integration across regions and across components of the energy system; and (vii) use of CO2 removal.. to offset any residual emissions”*³. Le chapitre 1 *Introduction and Framing* insiste notamment sur la distinction entre transition et transformation dans les systèmes socio-techniques : *“ This report uses the term transition as the process, and transformation as the overall change or outcome, of large-scale shifts in technological, economic and social systems, called socio-technical systems in the innovation literature. Typically, new technologies, ideas and associated systems initially grow slowly in absolute terms, but may then ‘take-off’ in a phase of exponential growth ... These dynamics arise from interactions between innovation (in technologies, companies and other organisations), markets, infrastructure and institutions, at multiple levels”*.

³ <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-6>

Depuis l'Accord de Paris de 2015, la transition énergétique a été retranscrite sous la forme d'un message : *“il est impératif pour les États, les entreprises ainsi que les citoyens de réévaluer leurs modes de production et de consommation énergétique”* (AIE, 2021). La COP 28 a réitéré cette nécessité en soulignant l'importance d'une sortie progressive des énergies fossiles et en appelant à redoubler les investissements dans les technologies à faibles émissions de carbone (UNFCCC, 2023). Ces transformations requièrent une collaboration entre les acteurs économiques, les décideurs politiques et les communautés concernées. Le secteur pétrolier, qui contribue à près de la moitié des émissions mondiales de gaz à effet de serre (IEA, 2020), se trouve au centre de cette mutation. Les compagnies pétrolières à travers ces majors doivent faire face à une double exigence : d'une part, diminuer leurs émissions directes (Scopes 1 et 2) et indirectes (Scope 3), et d'autre part, préserver leur rentabilité dans un environnement marqué par une forte volatilité des prix et des tensions géopolitiques (Pescatori et al., 2021 ; Diemer, 2008).

Problématique et Hypothèses de Recherche

Dans ce contexte incertain, la transition énergétique qui doit amener les États vers la neutralité carbone, risque d'être fortement compromise. Au-delà des feuilles de route nationales qui tendent à communiquer le plan d'actions et les cibles à atteindre pour 2050, il convient également de prendre en compte les stratégies émanant du secteur privé, en l'occurrence, celles des compagnies pétrolières et gazières. Quelles stratégies peuvent-elles adopter pour perdurer, s'adapter ou évoluer dans un environnement en mutation ? Cette réflexion revêt une importance singulière dans les nations dont l'économie repose largement sur les hydrocarbures, à l'instar de l'Algérie. Ces compagnies ont déjà pris les devants en engageant des stratégies bas carbone reposant sur la diversification et l'investissement dans des énergies moins polluantes, comme l'hydrogène, les énergies renouvelables ou dans les technologies de captage ou de séquestration du carbone (Total Energies, 2024 ; BP Energy Outlook, 2023). Cependant, ces stratégies largement médiatisées, soulèvent de nombreuses questions : Sont-elles assez ambitieuses pour répondre aux impératifs du réchauffement climatique et aux objectifs des feuilles de route nationales des différents États ? Quelle place accordent-elles aux scénarios et aux projections à long terme ? Quels sont les leviers d'actions susceptibles de transformer le système énergétique mondial ? Quelles sont les trajectoires et les futurs possibles dans un environnement aussi incertain ?

Pour répondre à ces questions, qui renvoient directement à l'avenir de la transition énergétique, nous avons formulé trois hypothèses de travail:

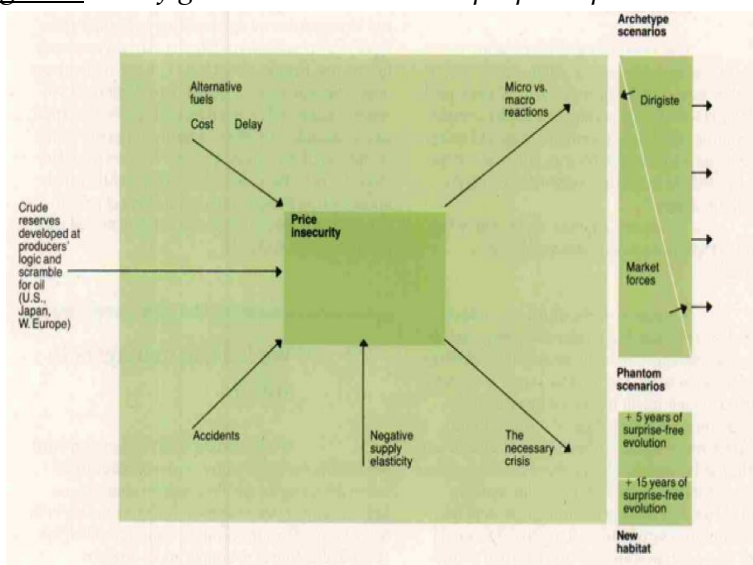
Hypothèse 1

Les scénarios, du point de vue méthodologique, apportent un nouveau regard sur l'utilisation des modèles. Leur vision du futur (basée sur le récit et les narratives) et leur démarche prospectiviste contrastent avec les modèles prévisionnistes de nombreux organismes de conjoncture. Cette pratique méthodologique fait partie du management stratégique des compagnies pétrolières.

Les scénarios qui accompagnent depuis plusieurs années, les programmes de transition énergétique lancés par les décideurs publics et les grandes institutions internationales (OCDE, IEA...) sont devenus de véritables outils de décision pour penser l'avenir et le prédire. Ils reposent principalement sur des hypothèses et des options en lien avec des enjeux politiques, des solutions technologiques et des comportements socio-économiques (O'Neill et al., 2017, Curry & al., 2008, Godet, 1994 ; Wack, 1985). Comme le soulignent Pinson et Vanier (2017), « les scénarios prospectifs ne doivent surtout pas être pris comme des prédictions ou des injonctions », mais visent à éclairer et sensibiliser en présentant les conséquences possibles de tendances existantes. Une étude de la littérature nous a permis de faire un état de l'art sur la prospective et les méthodes employées (Alba, Reich, 2001, Godard, 1998). Les scénarios déclinés à l'échelle des grandes firmes multinationales et des Etats-nations revendiquent tous, un héritage emprunté à quatre approches complémentaires du scénario.

- Le Scénario Planning a été développé par Pierre Wack dans les années 1960 - 1970 pour la société Shell juste avant la grande crise pétrolière de 1973-1974. Le défi posé aux dirigeants de la société Shell était simple : que se passerait-il si le monde était confronté à une crise pétrolière ?

Figure 1 : Configuration des scénarios proposés par Pierre Wack



Source : Wack (1985, p. 87)

Dans son article intitulé *Scénarios, shootings the rapid* (1985), Wack part du postulat que " les scénarios traitent de deux mondes : le monde des faits et le monde des perceptions. Ils explorent les faits mais ciblent les perceptions dans la tête des décideurs" (1985, p. 140). Leur but est de rassembler et de transformer des informations stratégiquement importantes en nouvelles perceptions. Le scénario planning nous permet ainsi d'imaginer différentes possibilités et de développer des plans pour y faire face. C'est cette approche qui a été développée au sein de la compagnie Shell et qui lui a permis de concevoir des outils de pensée collective destinés à appréhender le futur (Schoemaker, Van Der Heidjen, 2011, p. 166). Les scénarios s'inscrivent à la fois dans une vision stratégique (direction) et opérationnelle (analyse détaillée d'un ensemble d'options stratégiques).

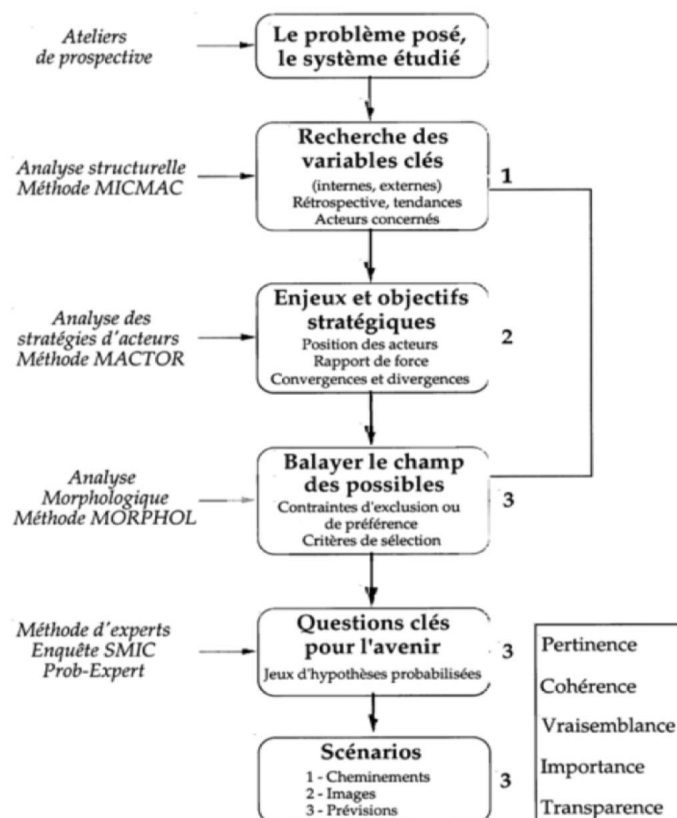
D'un point de vue méthodologique, cette approche met l'accent sur deux points : (i) les scénarios décrivent des mondes différents, et pas seulement des résultats différents dans le même monde, (ii) l'objectif n'est pas tant d'avoir un scénario qui fonctionne, mais d'avoir un ensemble de scénarios qui mettent en évidence les principales forces motrices du système, leurs interrelations et les incertitudes critiques. Le scénario planning se présente ainsi comme une technique de prospective utilisée pour l'analyse et la planification stratégiques à moyen et long terme. Il ne tente pas de prédire lesquels se produiront, mais identifie, par le biais d'un processus formel, un ensemble limité d'exemples de futurs possibles qui constituent un point de référence précieux pour évaluer les stratégies actuelles ou en formuler de nouvelles. Adapté aux managers et à la vision du management stratégique, le scénario planning a généré beaucoup d'émulations dans les firmes multinationales.

- *La prospective*, remise au goût du jour par Gaston Berger (1957, 1959) et Pierre Massé (1959), propose quant à elle de regarder au loin, de discerner quelque chose dans le futur. Pour Michel Godet, " l'attitude prospective est née d'une révolte de l'esprit contre le joug du déterminisme et le jeu du hasard " (2007, p. 6). Elle se présente comme le rapprochement entre la méthode des scénarios (*Scenario planning*) et la planification stratégique (*Strategic planning*), permettant aux entreprises de passer de la réflexion prospectiviste à la déclinaison d'actions stratégiques (Godet, 1990). La prospective s'est donc très vite positionnée à l'interface de la planification à la française (donnant lieu à la création du Commissariat au Plan) et à la nécessité de fixer des objectifs clairs aux patrons de l'industrie (entreprises nationalisées mais également privées).

Pour mettre en œuvre une telle démarche, Godet (1977) a conçu ce qu'il appelle *la méthode des scénarios*. Cette dernière tente de concevoir des futurs possibles et d'explorer les chemins qui y mènent. Elle combine deux approches : (i) L'approche littéraire, qui s'attache à construire des scénarios par la réflexion et le raisonnement. La prospective prend ainsi la forme de construction de récits racontables de l'avenir. Comme le précise Thierry Gaudin, le qualificatif de racontable signifie " qui ne soit pas

en contradiction avec les résultats de la science" mais également "qui soit intelligible et audible pour le public auquel il s'adresse" (Gaudin, 2013, p. 5). On retrouve cette approche sous la forme de narratives ou de récits (de nombreux logiciels de modélisation intègrent aujourd'hui la dimension "raconter une histoire" (telling a story) dans le processus de quantification). (ii) l'approche formalisée (modèle), qui alimente la réflexion sur les scénarios et permet de vérifier leur validité. Cette approche intégrée comprend deux phases : la construction du noyau (délimitation du système, détermination des variables essentielles, analyse explicative du rôle joué par ces variables) et l'élaboration des scénarios (rapports de forces entre les acteurs, jeux d'hypothèses probabilistes sur certains domaines déterminants, construction de scénarios - scénario de référence et plusieurs scénarios contrastés). Afin de rendre cette méthode opérationnelle, des outils informatiques (MICMAC, MACTOR, MORPHOL, SMIC) ont été développés à chacune des grandes étapes de la prospective. La méthode des scénarios consiste ainsi "à rendre les mécanismes d'évolution compatibles avec les jeux d'hypothèses retenus, à décrire de manière cohérente le cheminement entre la situation actuelle et l'horizon choisi, en suivant l'évolution des principales variables du phénomène que l'analyse structurelle avait identifiées" (Godet, 1983, p. 118).

Figure 2 : La méthodes des scénarios

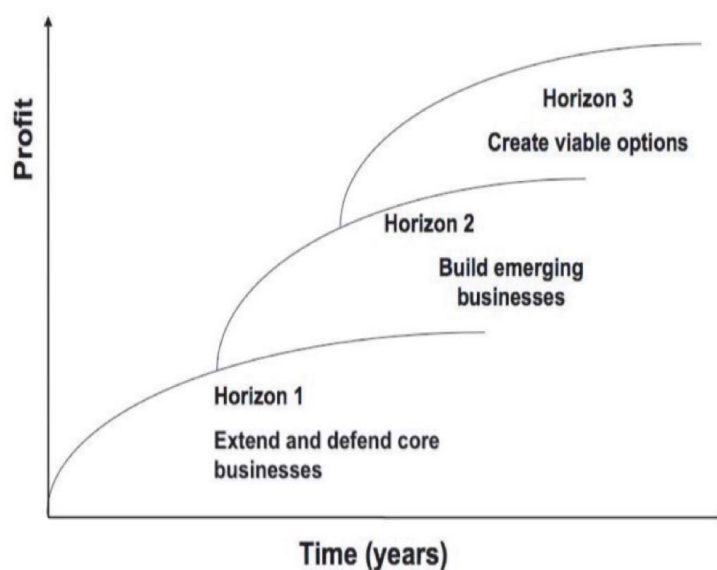


Source : Godet (1994, p. 168)

Afin d'éviter que les futurs possibles et que les scénarios qui en découlent ne soient que de simples extrapolations du passé, il convient de repérer les ruptures potentielles entre la situation observée et l'image du futur projetée. Ce sont ces observations qui permettent de comprendre la position des acteurs, leurs stratégies, leurs perceptions du problème et de son évolution.

- La méthode des *Three Horizons* a été présentée pour la première fois dans un ouvrage de Mehrdad Baghai, Stephen Coley et David White (1999), *The Alchemy of Growth*. Les auteurs proposaient aux managers de s'engager simultanément dans des perspectives à court, moyen et long terme, présentées comme une série de courbes évolutives, chacune ayant plus de valeur que la précédente.

Figure 3: Le modèle Three Horizons

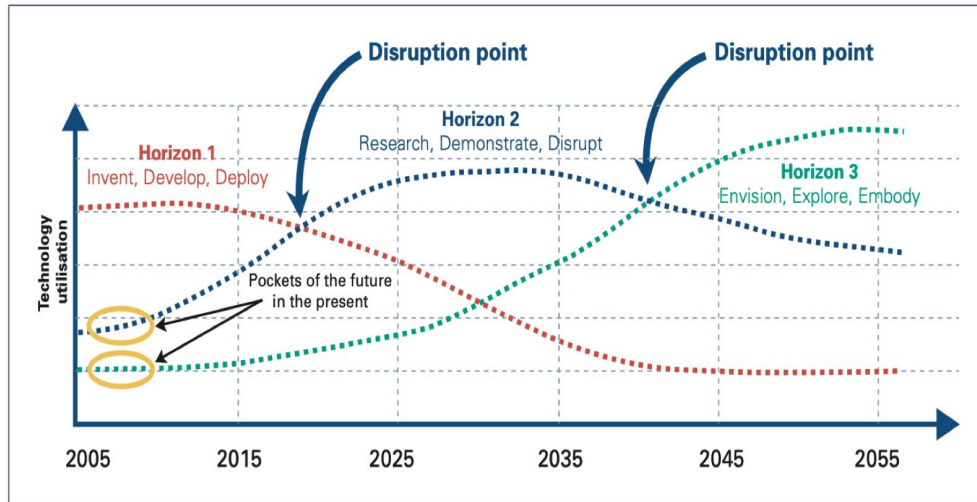


Source : Mehrdad, Coley & White (1999)

Par la suite, le modèle a été adapté par Sharpe et Hodgson (2006) afin de répondre à la demande du gouvernement britannique qui souhaitait lancer un projet de prospective pour les systèmes d'infrastructures intelligents. L'étude comportait une modification importante du modèle. Plutôt que de reprendre les horizons sous la forme de vagues d'évolution successives, les auteurs ont préféré caractériser les trois horizons comme existant en parallèle, mais avec différents niveaux d'influence sociale et publique. *L'horizon 1* (Inventer, développer, déployer) qui se situe à environ une décennie dans le futur, couvre le déploiement de capacités techniques nouvelles (mais comprises) pour résoudre les problèmes et saisir les opportunités au sein des systèmes sociotechniques dominants. *L'horizon 2* (Recherche, Démonstration, Perturbation) qui se situe à environ 25 ans dans le futur, considère que de nouveaux modèles d'utilisation des technologies vont perturber le statu quo. Les découvertes peuvent survenir à tout moment, redéfinissant le sens du possible. *L'horizon 3* (Envisager, Explorer, Incarner), qui se situe à environ 50 ans dans le futur, stipule que nous

cherchons à regarder au-delà de l’horizon de la science connue et donc à imaginer des inventions imprévisibles. Ceci peut générer une discontinuité fondamentale dans l’histoire (exemple de l’intelligence artificielle).

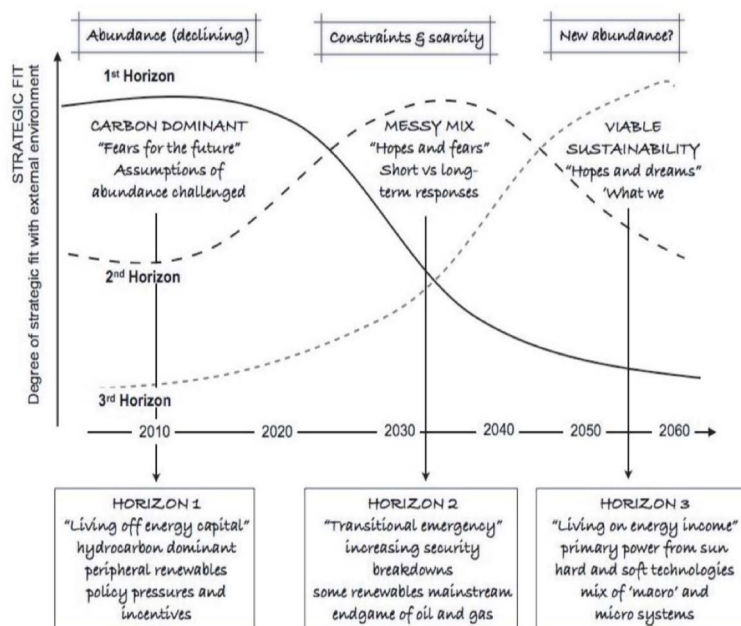
Figure 4 : Three Horizons pour anticiper les développements technologiques



Source : Sharpe & Hodgson (2006, p. 3)

Replacée dans le contexte énergétique et la neutralité carbone (2050), l’articulation entre les trois horizons permet de visualiser les enjeux en matière de sécurité, d’efficacité ou de sobriété énergétique (Sharpe, Hodgson, Page, 2006; Curry, Hodgson, Kelnar, Wilson, 2006; Curry & Hodgson; Collste & al., 2019).

Figure 5 : Three Horizons and Energy Security



Source : Sharpe, Hodgson, Page (2006), Curry, Hodgson (2008)

L'horizon 1 est essentiellement négatif. Les hypothèses sous-jacentes d'abondance énergétique qui l'ont façonné sont remises en question. Cela crée un espace dans lequel le changement est largement considéré comme inévitable, mais il n'y a pas d'accord sur le type de changement. *L'horizon 2* est l'avenir émergent à court et moyen terme, dans lequel nous connaissons les limites de notre situation, mais nous ne disposons pas des ressources nécessaires pour y répondre efficacement. *L'horizon 3* représente une articulation d'un futur possible dans lequel les limitations ont été surmontées. Il s'agit d'une vision positive de l'avenir (exemple d'un monde à 100% énergie renouvelable).

Pour des entreprises du secteur de l'énergie, le modèle des trois horizons permet de créer une feuille de route pour la transition énergétique progressive et cohérente, d'identifier les technologies à soutenir ou à abandonner, d'équilibrer une rentabilité à court terme et une innovation de long terme. Horizon 1 peut permettre d'optimiser des centrales existantes pour réduire les coûts ou prolonger leur rentabilité. Horizon 2 permet d'investir dans les panneaux solaires ou les services énergétiques innovants. Horizon 3 puise dans l'expérimentation via l'hydrogène vert ou le stockage de l'énergie à grande échelle.

Pour un pays, le modèle des trois horizons permet de créer des scénarios de transition énergétique, utiles pour la politique industrielle et climatique, d'intégrer les risques de dépendance technologique en diversifiant les investissements ou de préparer le pays au long terme sans sacrifier la stabilité énergétique immédiate. Horizon 1 repose sur l'amélioration des infrastructures existantes, la réduction de la pollution et des GES, l'application de mesures incitatives pour des gains immédiats de la transition énergétique. Horizon 2 comporte des mesures qui peuvent aller de la subvention aux véhicules électriques (point de bascule du système ?), le développement d'infrastructures de recherche à l'échelle du pays ou encore le soutien à des projets pilotes d'énergie renouvelable (biomasse). Horizon 3 introduit la planification stratégique sur 20 - 30 ans pour décarboner complètement l'économie, développer des filières industrielles nouvelles (énergies marines) ou en créer des réglementations favorisant l'innovation.

Le passage aux trois horizons suppose cependant qu'ils ne soient pas séquentiels (ils coexistent et interagissent), que les ressources doivent être équilibrées (H1 finance H2 et H3, H2 finance H3), qu'il soit possible d'identifier des indicateurs de succès pour chaque horizon (émissions réduites, part de marché des technologies propres, infrastructures installées), que la démarche favorise une vision systémique de la transition, reliant technologie, économie et politique.

- Les Narratives for Shared Socioeconomic Pathways (N SSP) constituent le nouveau cadre de scénario qui est utilisé ces dernières années dans les travaux sur le changement climatique, et notamment ceux du GIEC. Les Shared Socioeconomic

Pathways (SSP) sont définis comme " des voies de référence décrivant des tendances alternatives plausibles dans l'évolution de la société et des écosystèmes sur une échelle de temps d'un siècle, en l'absence de changement climatique ou de politiques climatiques " (O'Neill, 2014, p. 387). Ils se composent de deux éléments : (i) un scénario narratif et (ii) un ensemble de mesures quantifiées.

L'une des questions clés de ce processus est de savoir comment sélectionner un ensemble limité de SSP pour servir le plus efficacement possible les objectifs présents dans l'architecture de la matrice de scénarios. Deux approches sont généralement adoptées. La première combine un petit nombre de facteurs socio-économiques clés en un ensemble de trajectoires plausibles mettant en évidence les différentes directions dans lesquelles le monde pourrait évoluer (Nakicenovic et al., 2000). La seconde adopte l'approche inverse de la première, en identifiant d'abord les résultats qui intéressent la recherche sur le changement climatique, puis les combinaisons de facteurs socio-économiques clés qui sont susceptibles de produire ces résultats, (Raskin et al. 1998). O'Neil et al (2014, 2017) ont utilisé cette dernière approche pour s'assurer que le choix des SSP produisait un ensemble de voies de développement aussi pertinentes que possibles pour l'objectif du cadre de scénarios (qui est d'explorer l'incertitude de l'atténuation, de l'adaptation et des impacts associés aux changements climatiques et socio-économiques). Pour ce faire, les auteurs ont défini un espace de résultats dans lequel les défis socio-économiques et environnementaux sont représentés sur deux axes : un axe décrit les défis liés à l'adaptation, l'autre les défis liés à l'atténuation (l'espace de défis à couvrir par les SSP est divisé en cinq "domaines" avec un SSP situé dans chaque domaine, représenté par une étoile). L'hypothèse ici est que pour caractériser les incertitudes relatives aux implications du changement climatique en matière d'atténuation ou d'adaptation, il est nécessaire de décrire les conditions socio-économiques futures qui rendraient l'atténuation et l'adaptation relativement difficiles ou relativement faciles (O'Neill, 2017).

Dans les axes de la figure 6, le terme socio-économique représente un large éventail d'aspects de la société, qui renvoie aux systèmes socio-écologiques. Il s'agit notamment des aspects démographiques, politiques, sociaux et culturels, des aspects institutionnels, du mode de vie, de l'économie et de la technologie, ainsi que des conditions des écosystèmes et des services écosystémiques qui ont été affectés par l'activité humaine, comme la qualité de l'air et de l'eau, la biodiversité, ainsi que la forme et la fonction des écosystèmes. *Le SSP1* est le scénario le plus optimiste. Il décrit un monde qui se dirige vers un développement durable et respectueux de l'environnement. Un monde où on verra moins d'inégalité entre les nations. Il y aura moins de consommations de biens matériels. *Le SSP2* est le scénario médian qui décrit un monde qui reste sur les tendances actuelles. Les institutions mondiales et nationales continuent à déployer des efforts pour la protection de l'environnement et le développement durable mais le bilan reste insuffisant pour atteindre les objectifs du

développement durable (ODD). La dégradation des milieux naturels se poursuit, les inégalités de revenus persistent et des défis majeurs continuent à se faire sentir. *Le SSP3* dessine une trajectoire chaotique dans laquelle le monde est marqué par la rivalité régionale et les conséquences qui en découlent. Les nationaux se concentrent sur les questions de sécurité interne à l'échelle nationale et régionale. Cet état de fait impacte la croissance économique dont l'évolution sera lente et non respectueuse de la protection de l'environnement. *Le SSP4* est celui de la trajectoire divisée par les inégalités entre les nations et au sein de ces mêmes nations. Une petite élite mondiale est responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus faciles à mettre en place. La plus grande partie de la population reste pauvre et vulnérable. *Le SSP5* est le scénario le plus défavorable. Il dessine un horizon dans lequel le monde est caractérisé par une croissance rapide, fondée sur une forte consommation d'énergie fossile polluante et des technologies émettrices de carbone.

Figure 6 : Les trajectoires socio-économiques partagées appliquées au couple climat - énergie



Source : O'Neil et al. (2014, p. 391)

La pertinence des NSSP dans notre cadre d'analyse suppose que les entreprises (ici les compagnies pétrolières et gazières) puissent utiliser ces narratives pour tester leur résilience de leurs modèles d'affaires ou produire des sortes de matrices de stress test.

Dans le premier cas, le scénario NSSP 1 (soutenabilité), les entreprises sont amenées à investir dans les technologies vertes, les énergies renouvelables, l'économie circulaire. Ce sont des opportunités de marché (marché bas carbone, finance verte). Le risque est un déclin rapide des secteurs fossiles (que l'on peut utiliser par un titre qui aurait une valeur 0). Le scénario NSSP (tendance actuelle) s'appuie sur une transition plus lente, des opportunités modérées. La stratégie repose sur une diversification progressive et des scénarios mixtes (investissements massifs dans les gisements de pétrole, investissements plus modérés dans les énergies renouvelables). Le scénario NSSP 3 (fragmentation) s'inscrit dans le cadre d'une mondialisation réduite et des chaînes de valeur fragiles. La stratégie s'appuie sur des relocalisations et la sécurisation des ressources. Le scénario NSSP 4 (inégalités) crée des marchés dualisés (premium vs low cost), la stratégie consiste à adapter les offres à des contextes très disparates, gérer des risques réputationnels. Enfin, le scénario NSSP 5 (croissance fossile) produit des opportunités pour les industries fossiles à court et moyen terme. Le risque est la forte vulnérabilité en cas de retournement climatique ou politique brutal. Dans le second cas, la matrice de stress - test peut créer des scénarios du type *What if* : si NSSP 1 s'impose, comment aligner le business model avec les attentes sociétales ? Si le NSSP 5 continue à perdurer, comment intégrer le risque de retournement politique ou climatique ?

Au final, les compagnies pétrolières peuvent ainsi construire des scénarios internes alignés sur les NSSP, traduire certains indicateurs (demande énergétique, prix du carbone, disponibilité des ressources, régulation) ou encore utiliser les NSSP pour la prospective stratégique et le reporting Climat.

Ce qui est vrai pour les compagnies pétrolières, l'est également pour les Etats. Mais dans ce cas, les NSSP sont mobilisés pour concevoir des politiques publiques robustes face à des futurs incertains. Le scénario NSSP repose sur la coopération internationale, un investissement massif dans les énergies renouvelables, le renforcement de la justice sociale. Le scénario NSSP 2 tend à maintenir une politique de transition progressive, sans rupture. Le scénario NSSP 3 renforce l'autonomie énergétique, sécurise les matières premières, développe une stratégie nationale plutôt que mondiale. Le scénario NSSP 4 fait de la transition énergétique, un moyen de lutter contre les fractures sociales (c'est la conception de l'Energy Justice) internes et externes pour éviter les instabilités. Le scénario NSSP 5 peut permettre de profiter de la croissance du fossile pour investir massivement dans la R & D tout en prévoyant des mécanismes de sortie rapides.

Ainsi, les Etats peuvent mobiliser les NSSP pour tester la robustesse des politiques énergétiques et climatiques, explorer des arbitrages budgétaires (infrastructures fossiles vs renouvelables) et préparer une sorte de diplomatie énergétique (coopération vs rivalités régionales).

Hypothèse 2

La déclinaison de la méthodologie des scénarios dans un contexte national peut permettre d'appréhender des approches tendanciennes, normatives, exploratrices ou radicales. Le risque repose cependant sur l'absence de vision systémique et la prépondérance des modèles sectoriels (énergie, logement, mobilité...). Les compagnies pétrolières ont pris l'habitude de formuler des rapports sur leur vision du secteur énergétique sans pour autant converger vers les scénarios nationaux.

Quel que soit la typologie des scénarios (exploratoires, normatifs, tendanciels, radicaux), chaque scénario propose des trajectoires possibles et chiffrés, sur les émissions des GES, le mix énergétique à l'horizon 2050, les usages énergétiques, les investissements engagés, les transformations sociétales et comportementales, les incertitudes liées aux technologies innovantes, à l'évolution économique et climatique. Ces scénarios prospectifs peuvent néanmoins montrer certaines limites qui peuvent minimiser leur portée analytique. Les scénarios tendanciels peuvent montrer un ralentissement et une stagnation institutionnelle et technologique qui ne permettront pas à la société et aux pays de respecter leurs engagements de réduction des GES et d'atteindre les objectifs climatiques fixés. Les scénarios normatifs peuvent reposer sur des propositions ambitieuses dont la mise en œuvre reste difficilement réalisable. Les scénarios exploratoires peuvent suggérer de modéliser plusieurs trajectoires en explorant diverses hypothèses dont la cohérence systémique reste difficile à démontrer. Dans l'ensemble, ces scénarios n'ont pas forcément accordé dans leurs trajectoires futures, la place à la dimension sociale et son rôle essentiel dans l'acceptation et la réussite des stratégies énergétiques qui en découlent. De même, ces approches n'abordent que d'une manière marginale, les stratégies et les feuilles de route engagées par les grandes compagnies pétrolières, qui restent des acteurs des systèmes énergétiques mondiaux. A la lumière de ces constats, il devenait essentiel de travailler sur des scénarios intégrés qui prennent en considération dans une approche holistique et simultanée les dimensions sociales, économiques, environnementales et politiques en vue de mieux aider les décideurs dans les choix stratégiques en matière de transition énergétique.

En réduisant le champ méthodologique au strict cadre national (ici la France), nous avons cherché à nous appuyer sur la typologie des scénarios (exploratoires, normatifs, tendanciels, radicaux) afin de rendre compte des propositions formulées par les quatre institutions suivantes : l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour la transition écologique), RTE ((le gestionnaire du réseau de transport d'électricité), The Shift Project et NegaWatt (association rassemblant des spécialistes des énergies). Leurs scénarios peuvent avoir une influence sur les décisions publiques que prendra le gouvernement français dans les 25 prochaines années et conduire les acteurs du secteur énergétique (notamment les compagnies pétrolières) à

accompagner ou au contraire à freiner la transition énergétique. Ces stratégies s'inscrivent dans le cadre des débats politiques sur la Stratégie de la France Energie-Climat et en rapport avec les engagements de l'Accord de Paris pour contenir le réchauffement climatique sous le seuil des + 2 °C.

- L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) s'est livrée en 2021, à un exercice de scénarisation des grandes trajectoires que pourrait prendre la transition écologique. Cet exercice inspiré des scénarios d'évolution socio-économique mondiale utilisés par le GIEC (2018), a la particularité de se baser sur : (i) la réalisation de plusieurs scénarios contrastés d'atteinte de la neutralité carbone pour la France en 2050 avec une évaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; (ii) une comparaison multicritère de ces scénarios, notamment technico-économiques, sociaux et environnementaux, des conditions de leur réalisation et de leurs conséquences ; (iii) une rétrospective, un état des lieux et une trajectoire tendancielle jusqu'en 2050. Les scénarios proposés sont des récits contrastés sur le contexte économique, technologique et territorial, les modes de vie, la gouvernance. Ce sont des récits de société autant que des perspectives techniques. Les scénarios sont classés de 1 à 4 en fonction de la place accordée à la sobriété énergétique. Les scénarios 1 et 2 sont les scénarios qui misent le plus sur la sobriété et la technologie, les scénarios 3 et 4 penchent plutôt vers la technologie.

Le Scénario S1 "Génération frugale" mise pleinement sur la sobriété. C'est un scénario dans lequel les « low tech » ont une place prépondérante. Ce scénario mise sur la rénovation massive des bâtiments plutôt que sur la construction d'habitations neuves. Ce scénario reste le plus sobre et le plus optimiste en matière environnementale. Dans ce scénario, il est prévu un changement des modes de vie avec des habitudes alimentaires modifiées (consommation de viande divisée par trois, 70% de consommation de nourriture bio). L'achat se fait en grande majorité localement. Les grandes villes sont délaissées au profit des zones rurales, de la réduction de la mobilité et de la rénovation de l'habitat. 70% des matières de l'industrie sont recyclées. Avec ces hypothèses, la consommation d'énergie diminuerait de 55% en 2050 par rapport à 2015, soit une émission de 74 millions de tonnes de CO₂, auxquelles il faudrait retirer l'absorption de 116 millions de tonnes par les puits naturels (forêts, océans, ...). Ce qui correspond à une émission nette de - 42 millions de tonnes de CO₂. L'ADEME souligne que ce scénario de sobriété risque d'avoir un impact sur la société française, puisque la rationalisation dans les intrants des modes de vie pourrait engendrer un clivage social.

Le Scénario S2 "coopération territoriale" repose sur une dynamique de coopération, de gouvernance ouverte et sur une économie de partage. Ce scénario vise une coopération sur le territoire avec une réindustrialisation ciblée. On mise sur le captage et le stockage du carbone dans le sol (mais d'une manière faible). Ce deuxième scénario

fait aussi appel à la sobriété, mais dans le sens de l'entraide et du partage entre les ménages les plus modestes. Comme le scénario de génération frugale, on assiste à une modification des modes de vie, qui privilégient les liens sociaux. Selon l'ADEME, avec ce scénario de partage nous arrivons à atteindre des émissions négatives nettes de - 28 millions de tonnes de CO2 émises en 2050.

Le Scénario S3 "technologies vertes" introduit la décarbonation activée par le développement de l'hydrogène, une forte exploitation de la biomasse (via un usage intensifié des forêts) et une électrification des procédés et des usages. On retient dans ce scénario, un modèle d'aménagement très centré sur les métropoles, cela se traduit par la construction-déconstruction plutôt que la rénovation. Le potentiel de captage et de stockage de carbone permet d'atteindre la neutralité, malgré une sobriété moins importante mais avec une efficacité plus forte dans les processus. La sobriété est observée dans les secteurs alimentation, transport, la mobilité, la rénovation de l'habitat...mais elle reste modérée comparativement aux deux premiers scénarios. Le recours à la technologie verte est à l'origine des économies d'énergie et de l'intégration de l'écocoefficience énergétique. Par cette trajectoire, la France peut diminuer sa consommation d'énergie de 40% en 2020. Les émissions de gaz à effet de serre seront de - 9 millions de tonnes de CO2 émis en 2050.

Le scénario S4 "pari réparateur" est un scénario « Business As Usual (BAS) » dans lequel il existe une continuité de nos modes de vie actuels, basés sur la consommation de masse (la nature y est exploitée comme une ressource, mais de manière non rationnelle). La forte urbanisation continue de se développer, un exode rural est observé et par conséquent la mobilité s'accroît. La pollution sera engendrée sans l'application de taxe d'incitation, l'agriculture intensive se poursuit avec un impact sur la biodiversité. Un pari fort est observé sur l'efficacité et la réduction des consommations d'énergie d'où un retour massif vers le captage et le stockage de carbone et une forte mobilisation des leviers de décarbonation. Selon l'ADEME avec ce scénario, la France peut atteindre la neutralité carbone, avec un million de tonnes de CO2 émises en 2050.

Tous ces scénarios soulignent le fait que la neutralité carbone est un chemin difficile, que la réduction de la demande d'énergie doit passer par l'efficacité énergétique et la sobriété (ce qui nécessite une modification radicale des modes de vie et des systèmes productifs), que la préservation du vivant est un atout majeur (captage du carbone, production de biomasse, les pratiques agricoles), que le passage rapide aux énergies renouvelables est une nécessité.

- RTE (Réseau de transport d'Électricité) a une mission légale de prospective et à l'habitude d'élaborer des études prospectives de référence à échéance de 10 à 15 ans. Le 25 octobre 2021, RTE a rendu public un rapport intitulé Futurs énergétiques 2050. Ce travail, qui a donné lieu à des coopérations et des partenariats avec des

organisations spécialisées, a mobilisé 40 personnes et est venue en réponse à une saisine de Mme Elisabeth Borne qui était alors Ministre de la transition écologique et solidarité (2019). Ce rapport est inédit, car la prospective est effectuée sur un horizon de 30 ans, c'est une première pour RTE. Il intègre les scénarios du GIEC et donc la dérive climatique en France et en Europe.

Le modèle RTE simule le modèle électrique à l'échelle européenne pour chaque heure de chaque année pendant 30 ans. Il intègre à chaque heure 200 chroniques (météo, vent, soleil, température, hydraulité en de nombreux points du territoire, etc.) pour en tirer les conséquences en termes de production des ENR mais aussi de consommation. Deux leviers sont activés : (i) le premier levier est l'efficacité énergétique : Par efficacité énergétique, nous entendons l'amélioration des performances énergétiques des équipements électroménagers, informatiques et éclairage, la rénovation thermique des bâtiments, l'amélioration des procédés industriels et enfin l'efficacité gagnée en basculant vers l'électricité. L'étude RTE reprend à son compte l'objectif français de 40% d'efficacité énergétique entre 2020 et 2050. (ii) Le deuxième levier c'est l'électrification massive de l'usage dépendant aujourd'hui des énergies fossiles, pétrole et gaz. Il est fait référence particulièrement aux véhicules particuliers, aux procédés industriels (les hauts fourneaux électriques et les moyens de chauffage par chaleur électrique doivent se substituer aux chaudières à fioul et à gaz).

L'étude de RTE répond donc au besoin de documenter les options de mix électrique pour 2050, leurs atouts et leurs limites, leurs impacts et leurs conséquences. RTE a dimensionné six scénarios de mix électrique pour l'horizon 2050 qui sont issus de la concertation (ils reflètent les différentes aspirations recueillies dans le cadre de la consultation publique). Ces scénarios sont organisés en deux familles. La famille M tend vers 100% de renouvelables en 2050 (ou 2060). Dans cette famille, trois scénarios sans nouveaux réacteurs nucléaires sont proposés. La famille N repose sur la construction de nouveaux réacteurs nucléaires (ce qui fait passer la part du nucléaire entre 25% et 50% en 2050). Aucun scénario ne repose sur une seule technologie. Le scénario N 1 repose sur la construction de six nouveaux réacteurs entre 2035 et 2045 puis de continuer sur le rythme d'une paire tous les cinq ans. Le scénario N 2 propose une accélération du rythme de construction des nouveaux réacteurs nucléaires. Dans ce scénario, la France a 14 EPR, soit 1/3 de nucléaire dans le mix électrique à l'horizon 2050, en prenant en compte le nucléaire historique qui sera présent en 2050. Le scénario N 3 combine une prolongation des réacteurs existants (presque tous) jusqu'à 60 ans avec l'accord des autorités de sûreté nucléaire. On construit 14 EPR, c'est autant d'énergies nouvelles que dans N 2, mais avec la construction de petits réacteurs nucléaires à sels fondus (Molten Salt Reactor, MSR) pour 4 GWh, avec la prolongation des réacteurs existants à l'horizon 2060. Le nucléaire atteint dans ce scénario 50% du mix électrique.

Les scénarios M sont des scénarios 100% renouvelables. Le scénario M0 repose sur une sortie accélérée pour arriver à 100% d'ENR en 2050. Le scénario M1 vise une sortie naturelle du nucléaire sans nouveaux réacteurs nucléaires et donc une sortie du nucléaire en 2060. Le scénario M 23, 100% d'ENR en 2060, est centralisé dans des grands parcs éoliens et solaires. C'est un scénario qui recherche des économies d'échelle pour diminuer les coûts. Il est donc plus économique que le scénario M1 qui reste décentralisé. Dans l'ensemble de ces scénarios, la clé est le rythme de développement des ENR.

- NégaWatt est une association à but non lucratif, créée en 2001. Elle rassemble une vingtaine d'experts impliqués dans des activités professionnelles liées à l'énergie. NégaWatt a publié le 26 octobre 2021, son 5ème scénario de transition énergétique pour la France. Son approche est avant tout systémique et repose sur le triptyque (sobriété, efficacité et renouvelable). C'est une démarche bottom up, en allant des usages et en remontant vers les ressources. *La sobriété* consiste à agir collectivement et individuellement sur le niveau d'usage en priorisant et en redimensionnant les services rendus (logique proche de l'économie de la fonctionnalité). *L'efficacité* repose sur une réduction du ratio usage/ressources, il s'agit d'améliorer les performances à toutes les étapes de la supply chain (c'est avant tout une performance technique). *Les énergies renouvelables* (ENr) traduisent le remplacement de ressources reposant sur des stocks finis et émettant des GES par des ressources identifiées par des flux soutenable et n'émettant pas ou peu de GES. Le point de départ de la démarche NégaWatt est une reconstitution du paysage énergétique français, à partir d'une démarche bottom-up. C'est l'agrégation des données de l'ensemble des usages de l'énergie, qui permet d'obtenir la consommation totale d'énergie finale puis primaire. Sous la forme d'un diagramme SANKEY, cet état des lieux a fait ressortir que la France consommait 88% d'énergie primaire (et donc de ressources énergétiques non renouvelables) avec une efficacité énergétique de 67% entre l'offre d'énergie primaire et la demande d'énergie finale fournie aux différents secteurs.

Le scénario NégaWatt s'articule autour des notions d'offre et de demande d'énergie. Il décrit principalement les changements concernant la demande en énergie dans quatre domaines d'activités, le bâtiment (un des plus grands consommateurs d'énergie), le transport, l'industrie et l'agriculture.

Dans le cadre du bâtiment, le scénario NégaWatt considère que la démolition et la rénovation du parc résidentiel ne peuvent pas suffire à transformer la consommation énergétique du parc bâti. Le rythme actuel de rénovation est insuffisant. D'ici à 2050, le scénario NégaWatt retient 10 millions de bâtiments à construire et 25 millions à rénover selon une méthode permettant de garantir une réduction suffisante de leur consommation d'énergie : un tel volume à traiter nécessite une forte accélération du rythme annuel de rénovation, qui doit passer de 33 000 logements à rénover par an au

niveau BBC en 2020 pour atteindre près de 800 000 opérations par an avant 2030, puis se maintenir jusqu'à 2050.

Dans le secteur du transport, le scénario Négawatt retient 3 leviers prioritaires : (1) la baisse du trafic routier motorisé, (2) la réduction du trafic aérien (avec plus de trafic ferroviaire) et (3) le développement de la voiture électrique (outil massif de décarbonation).

Dans le secteur Industrie et biens de consommation fait partie d'un scénario Négamat qui vient accompagner le scénario Négawatt. Ce scénario Négamat est composé de trois volets. Le premier volet s'intéresse aux flux de matériaux (en tonnes) mais aussi le flux de biens de consommation et d'équipement (en tonnes également), combinés à *un module d'économie circulaire*, qui permet de mieux diagnostiquer la demande et son évolution, à *un module stratégie industrielle* pour suivre les importations et les exportations de la France, à *un module de déchets* pour mieux évaluer la capacité de recyclage et enfin à *un dernier module sur l'empreinte matière*. Le deuxième volet concerne l'intensité énergétique qui représente l'efficacité énergétique dans le processus industriel. Le troisième et dernier volet est la consommation d'énergie en TWh, dans lequel on peut estimer les externalités comme les émissions des GES, le transport de marchandises, les émissions de particules fines, et plus généralement le bilan carbone. Le lithium et l'acier ont fait l'objet de focus particuliers, eu égard à la place qu'ils occupent dans la transition énergétique.

Le secteur de l'agriculture intègre les enjeux liés à l'usage des terres, de la sylviculture, des puits de carbone et de l'alimentation. Le scénario Négawatt s'appuie sur le scénario Afterres 2050 réalisé par l'association Solagro depuis 2011 (mis à jour en 2016 et 2022), qui repose sur une réflexion systémique (révision du système de production et redimensionnement de l'agriculture). Ce scénario propose l'utilisation de la biomasse, des terres ainsi qu'un équilibre entre le changement climatique et la protection de la biodiversité. Les mesures se résument en quatre volets : adaptation, atténuation, séquestration et substitution. Les leviers doivent combiner à la fois des actions sur la production et des actions sur la consommation.

Le secteur énergétique vient parachever cette étude. Le scénario Négawatt prévoit la fin du recours aux fossiles, avec une sortie progressive des énergies fossiles jusqu'en 2050. Un effort de substitution du gaz fossile par du gaz vert est proposé. Il n'est pas envisagé la prolongation de réacteurs nucléaires déjà existants au-delà d'une durée de fonctionnement de 50 années. On envisage la fermeture de certains déjà à 40 ans et l'abandon de tout projet de construction de nouveaux réacteurs. Un rythme de fermeture progressif des réacteurs nucléaires est proposé entre les 4e et 5e visites décennales, le dernier réacteur étant fermé en 2045. Ce rythme tient en compte des enjeux énergétiques, de sûreté nucléaire et des enjeux économiques et sociaux.

- Le Shift Project, fondé en 2010, est un Think Tank dédié à une économie décarbonée. Il produit des analyses rigoureuses et propose des solutions innovantes pour la transition énergétique en Europe. Il influence le débat public et les politiques énergétiques et climatiques par des événements et campagnes d'influence. Le Shift Project a initié un *Plan de Transformation de l'Économie Française* (PTEF) en 2020, visant à décarboner l'économie secteur par secteur. Ce plan repose sur quatre piliers : une approche globale et systémique, respectant les lois physiques et économiques ; une focalisation sur les ressources peu abondantes, en accordant une attention particulière à l'emploi ; des propositions pragmatiques et réalisables pour une décarbonation cohérente, visant une réduction des émissions de GES de 5 % par an ; ne pas compter sur la croissance économique ni sur les évolutions technologiques non prouvées.

Les propositions formulées par The Shift Project, pour faire face à la crise énergétique dans le secteur résidentiel sont structurées autour de quatre axes : (1) *faire preuve de sobriété dans les constructions existantes*. Cet axe propose une décarbonation des logements neufs grâce aux seuils d'émissions de la réglementation RE2020, qui modernise l'industrie du bâtiment vers un avenir bas carbone. Cependant, la quantité de constructions neuves, source majeure d'artificialisation des sols et d'émissions de GES, doit être reconsidérée. Le PTEF recommande une diminution progressive des nouvelles constructions, en accord avec la démographie, et la conversion des logements vacants en résidences principales, nécessitant des mises à niveau et une évolution de la répartition de l'emploi. (2) *Massifier la rénovation énergétique globale et performante*. La rénovation des logements est essentielle pour décarboner l'économie. Le PTEF propose de rénover rapidement les habitations en utilisant des enveloppes performantes et des énergies renouvelables. L'objectif est de rénover un million de logements par an en dix ans, ciblant en priorité les plus énergivores. (3) *Décarboner la chaleur* : Cet axe souligne l'urgence de promouvoir la substitution des énergies fossiles dans les logements existants. Afin de faciliter une transition rapide vers les énergies décarbonées pour le chauffage. Le PTEF prévoit de remplacer tous les chauffages fossiles par des sources bas carbone, en raccordant 5 millions de logements collectifs à des réseaux de chaleur et en installant des pompes à chaleur pour plus de 10 millions de logements. La sobriété énergétique reste un levier secondaire mais important. (4) *Mobiliser le bâtiment comme puits de carbone*. Cet axe préconise de réduire l'utilisation de matériaux à forte empreinte carbone par unité de surface et d'augmenter l'usage de matériaux à faible empreinte carbone, tels que les matériaux biosourcés.

Fort de cette présentation des scénarios des quatre institutions (ADEME, RTE, NégaWatt et The Shift Project), nous avons cherché à tester notre hypothèse de travail (hypothèse 2) de deux manières : (1) Quels sont les principaux leviers d'action susceptibles de nous mener vers la neutralité carbone ? (2) En quoi une approche systémique (ici la mobilisation de la dynamique des systèmes et des diagrammes de

boucles causales) peut mettre en lumière les dynamiques “dominantes” (archétypes) de la transformation du système énergétique.

Hypothèse 3

La scénarisation de la transition énergétique repose principalement sur des feuilles de route nationales qui précisent les engagements des pays en matière de neutralité carbone ou de réduction des émissions de GES et les actions permettant d’atteindre ces objectifs. Ces feuilles de route intègrent une réflexion sur les scénarios et une vision du futur (2050). Quelle est la place des compagnies pétrolières et gazières dans ces schémas prospectifs ? Est-ce que le management stratégique de ces compagnies s’inscrit bien dans un plan de transition énergétique ? Les compagnies pétrolières sont-elles un frein ou un catalyseur de la transition énergétique ?

Si de nombreux pays et institutions nationales ont l’habitude de produire des scénarios, la plupart de leurs actions restent inscrites dans un schéma de transition énergétique. C’est ce que l’on a coutume d’appeler la feuille de route. Cette feuille de route permet de cerner l’ambition et les objectifs d’une transition énergétique, les moyens qui sont injectés et les acteurs à mobiliser. La place des compagnies pétrolières et leur rôle à jouer dans la transition énergétique, peut être effectif ou clairement évoquée. Pour tester l’hypothèse 3, nous avons analysé les feuilles de route de 4 pays (Algérie, France, Etats-Unis, Royaume-Uni) qui accueillent 6 grandes compagnies pétrolières (BP, Chevron, Exxon Mobile, Shell, Sonatrach, Total Energy). A la lueur des documents officiels (Plan National Intégré Énergie - Climat - PNIEC - et Programmation pluriannuelle de l’énergie - PPE - en France, Net Zero Strategy Build Back Greener et British Energy Security Strategy au Royaume Uni, American Strategy to secure the supply chain for a robust clean energy transition and US National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap aux Etats Unis, Programme national de développement des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique, Stratégie nationale pour le développement de l’hydrogène en Algérie). Nous avons cherché à savoir ce que disent ces feuilles de route sur la marche à suivre du secteur pétrolier et si les compagnies pétrolières étaient mentionnées dans les plans d’actions.

En France, les document officiels (PNIEC, PPE) fixent les objectifs pour 2030 et 2035, les scénarios et les besoins d’investissement. Ils insistent sur la gouvernance, la concertation avec les acteurs économiques et les trajectoires de sortie des énergies fossiles. Les documents parlent des acteurs économiques, du secteur industriel et de la nécessité d’une transition pour les secteurs les plus émetteurs. Ils ne ciblent pas de compagnies pétrolières car leur approche est sectorielle (réglementation, appels d’offres, obligations...). Au Royaume-Uni, le Net Zero Strategy Build Back Greener (2021, 2022) et le British Energy Security Strategy (2022) font référence à la stratégie de décarbonation vers 2050 et la stratégie axée sur la sécurité d’approvisionnement et de déploiement des capacités nationales. Ces documents insistent sur les politiques

sectorielles (électricité, industrie, transports), introduisent des mesures pour accélérer les renouvelables tout en explicitant clairement une orientation sur la gestion et la transformation du secteur pétrolier/gazier (North Sea). Il est fait mention du rôle du régulateur (Oil & Gas Authority), de la révision des licences d'exploitation, du soutien à la conversion des compétences ou encore des chaînes d'approvisionnement (offshore, éolien flottant, hydrogène). Les compagnies pétrolières et gazières ne sont pas clairement mentionnées cependant la stratégie britannique s'adresse explicitement au secteur pétro-gazier pour lui rappeler ses obligations climatiques, les mesures nécessaires pour réduire les émissions de GES en amont (extraction, logistique), la nécessité de travailler en concertation, l'intégration des tests de compatibilité climat des projets d'investissements ou encore la réorientation des capacités vers des filières propres. Aux Etats-Unis, les deux documents officiels - *America's Strategy to Secure the Supply Chain for A Robust Clean Energy Transition* (2022) et *US National Clean Hydrogen Strategy And Roadmap* (2021 - 2023) - du Département de l'Energie (DOE) listent d'une part, les chaînes d'approvisionnement (batteries, parc éolien, panneaux solaires, semi-conducteurs...) qu'il convient de sécuriser et les actions gouvernementales à mener (investissements, subventions, soutien au recyclage...) et d'autre part les objectifs stratégiques associés à l'hydrogène (développement de marchés, collaboration privé-public, incitations publiques). Les textes évoquent clairement le secteur privé, industriel et les opérateurs de l'énergie fossile en tant que partenaires potentiels (stakeholders, parties prenantes). La feuille de route de l'hydrogène mentionne de manière explicite l'usage du réseau industriel existant des opérateurs du fossile (raffinage) et les possibilités de production à partir de combustibles fossiles associées à des techniques de capture du CO₂ (conversion d'installations). De manière générale, les textes officiels appellent à une collaboration industrie - État via des incitations et la détermination d'un cadre réglementaire. Enfin, le cas algérien occupe une place particulière dans notre analyse, étant donné les relations étroites qu'il entretient avec la société. Les documents officiels - *Programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique* (2011 - 2030) et *la Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène* (2023) - fixent à la fois un programme d'investissement dans les énergies renouvelables (une cible de 22 GW, une part importante du solaire et des objectifs d'exportation de l'énergie en Afrique et en Europe) et l'ambition de créer une filière hydrogène (projet pilote, phases de déploiement). Les feuilles de route nationales associent explicitement les grandes entreprises nationales, notamment Sonatrach et Sonelgaz, aux comités de réflexion et à la mise en œuvre de la stratégie nationale de l'énergie (Sonatrach fait partie du comité national de la stratégie hydrogène). La société Sonatrach joue un rôle important (savoir-faire dans le raffinage, la pétrochimie, la participation à des projets hydrogène, partenariat avec d'autres compagnies pétrolières occidentales...) dans la transition énergétique du pays (Sonatrach est même désignée comme l'acteur clé de la feuille de route nationale).

Ces trois hypothèses rappellent que dans un contexte de transition énergétique, il est important de cerner les stratégies des acteurs et les scénarios nationaux permettant d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Les feuilles de route soulèvent finalement deux questions importantes : (1) Comment cerner les principales évolutions des énergies fossiles à l'horizon 2050 ? En sachant que les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique supposent de remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables. (2) Comment une compagnie pétrolière peut-elle anticiper et se préparer à de tels changements ? Quels scénarios peut-on imaginer pour 2050 ?

La méthodologie de recherche

La méthodologie de cette thèse repose sur trois corpus fondamentaux : (1) l'analyse de la littérature et la constitution d'une typologie (scenario planning, prospective, les trois horizons et les Narrative Shared Socioeconomic Pathways) des scénarios (corpus présenté dans l'hypothèse 1); (2) la mobilisation de la dynamique des systèmes pour appréhender les trajectoires et les leviers d'action des scénarios de transition énergétique nationaux (le cas de la France) via les diagrammes de boucles causales (hypothèse 2) et un modèle stock flux (hypothèse 3); (3) une étude documentée des feuilles de route nationale (Algérie, Etats Unis, France, Royaume Uni) et des scénarios produits par 6 compagnies pétrolières et gazières (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Sonatrach, Total Energies).

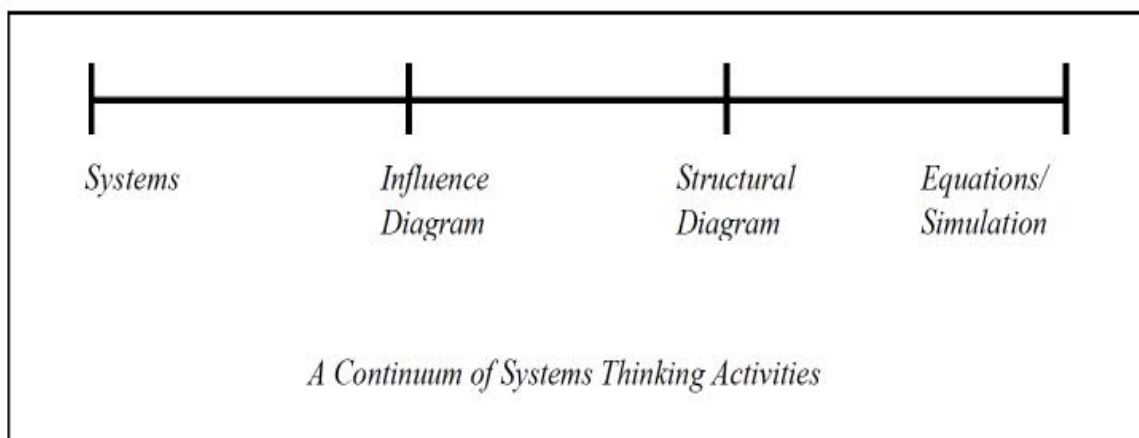
(1) *La méthode des scénarios* s'efforce de concevoir des futurs possibles et d'explorer les cheminements qui y conduisent. Elle combine deux approches : (i) l'approche littéraire qui s'attache à construire des scénarios par la réflexion et le raisonnement (les *Narrative Shared Socioeconomic Pathways* ont remis au goût du jour l'approche littéraire, notamment dans les scénarios d'atténuation et d'adaptation au changement climatique) ; (ii) l'approche formalisée qui alimente la réflexion sur les scénarios et permet d'en vérifier la validité. Cette approche intégrée comprend deux phases : la construction de la base (délimitation du système, détermination des variables essentielles, analyse explicative du rôle joué par ces variables) et l'élaboration des scénarios (rapports de force entre les acteurs, jeux d'hypothèses probabilisées sur certains domaines déterminants, construction de scénarios - scénario de référence et plusieurs scénarios contrastés). Les quatre approches mobilisées (scenario planning, prospective, three horizons, narrative shared socioeconomic pathways) dans l'hypothèse 1 donnent un éclairage sur les différentes manières de penser le futur.

(2) *La dynamique des systèmes* - popularisée par J.W Forrester dans les années 60 et 70 via les diagrammes de boucles causales et les diagrammes de stocks flux - renvoie à l'étude des systèmes de rétroaction dynamique via l'utilisation de la simulation informatique (Forrester, 1961, 1968, 1969). La dynamique des systèmes s'applique aux problèmes dynamiques survenant dans des systèmes sociaux, économiques ou

écologiques complexes. Littéralement, tout système dynamique est caractérisé par l'interdépendance, l'interaction mutuelle, la rétroaction d'informations et la causalité circulaire (Sterman, 2000). Le concept de rétroaction est au cœur de l'approche de la dynamique des systèmes. Les diagrammes de boucles de rétroaction de l'information et de causalité circulaire sont des outils permettant de conceptualiser la structure d'un système complexe et de communiquer des informations basées sur des modèles (il s'agit également de prendre en compte les délais temporels des boucles de rétroactions).

La méthodologie repose sur le passage d'une pensée systémique (Systems Thinking) à la mobilisation de la dynamique des systèmes (System Dynamics). Barry Richmond (1991) la divisait en quatre étapes : (i) *la conceptualisation d'un système* (System Design) qui permet de comprendre la structure du système (limites du système, concepts de boucles de rétroaction, des niveaux et des taux, d'état observé, d'écart, d'action souhaitée, de stocks et de flux), (ii) *l'influence des diagrammes* et la mobilisation des polarités via l'utilisation du diagramme des boucles de causalités (ou boucles d'influence), identification de la dominance et de la non-linéarité des boucles, concept de changement endogène; (iii) *la réalisation de diagrammes structurels* présentant la relation flux (entrants, sortants) - stocks et introduisant le modèle quantitatif, (iv) *la mise en équations du modèle et la simulation* des différents scénarios via l'outil informatique (via les logiciels Vensim et Stella).

Figure 7 : Les activités Systems Thinking



Source : Richmond (1991)

Le diagramme des boucles causales (CLD) et le diagramme Stocks flux (SFD) ont été mobilisés dans les articles 2 et 3. Les CLD ont mis en évidence l'enchaînement des facteurs d'influence d'une dynamique temporelle et l'identification des leviers d'actions présents dans des boucles de sobriété ou d'efficacité énergétique associées aux scénarios de l'ADEME, RTE, Négawatt et du Shift Project. Le SFD a permis de

cerner les dynamiques temporelles des stratégies des compagnies pétrolières et gazières à partir des relations stocks flux (investissements dans les énergies renouvelables et les énergies fossiles, capacité des infrastructures, revente des actifs, intensité carbone) et de la gestion de portefeuille (rentabilité des actifs, prise de risques). Le SFD est une étape nécessaire pour quantifier le modèle et générer des simulations.

(3) *une étude documentée des feuilles de route nationales (Algérie, Etats Unis, France, Royaume Uni) et des scénarios produits par six compagnies pétrolières et gazières (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Sonatrach, Total Energies).* Si le fait de penser système et d'adopter une vision holistique permet d'appréhender des problèmes socialement et scientifiquement complexes, il est cependant nécessaire d'accompagner ce mouvement de modélisation en identifiant les acteurs (position, rapports de force, convergences et divergences) et les controverses (susceptibles d'émerger et de ralentir les délais de réponse du dit système). C'est cette approche qui nous a amené à comparer les feuilles de route nationales aux stratégies des compagnies pétrolières et gazières, à mieux cerner le réalisme de certains scénarios et la difficulté d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050

Articulation des travaux de la thèse

La présente thèse a pour objectif d'étudier la dynamique temporelle des systèmes énergétiques (nationaux et mondiaux) ainsi que de questionner le rôle des scénarios (démarche prospective) menant à la neutralité carbone. Elle s'est articulée autour de la publication de trois articles scientifiques qui concourent à la compréhension de la complexité du système énergétique et sa multi-dimensionnalité :

- Le premier article publié en 2022 et intitulé "*Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective*" propose un état des lieux du contexte énergétique mondial, en apportant des clés de lecture en matière de scénarisation du futur. Le scenario planning, la prospective, la démarche des trois horizons ou encore les Narrative Shared Socioeconomic Pathways apportent une réflexion sur les temporalités court-terme et long-terme des différentes boucles de rétroaction menant à la neutralité carbone. A travers une analyse critique de ces scénarios et notamment celle de l' AIE et du CME, il ressort que la transition énergétique n'est pas un processus de transformation linéaire ou sectoriel, mais doit être considéré comme une dynamique systémique, qui va au-delà de la simple substitution de l'énergie fossile ou d'un changement technologique.

- Le deuxième article, publié en 2024 et intitulé « *Les scénarios de transitions énergétiques de la France à l'horizon 2050, quelques éléments de compréhension* », a été consacré au cas français, en apportant une analyse descriptive des hypothèses, des caractéristiques et des méthodes des scénarios énergétiques nationaux de RTE (le gestionnaire du réseau

de transport d'électricité), Négawatt (association et institut rassemblant des spécialistes des énergies), de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) et l'association Shift-project. Dans cet article, les scénarios ont été présentés sous la forme de diagrammes de boucles causales (CLD) issus de la dynamique des systèmes (utilisation du logiciel Vensim) pour schématiser les interactions entre les flux d'énergie, de matières et des capitaux, et faire ressortir les effets de rétroaction positive et/ou négative présents dans les différents scénarios étudiés. Ces boucles ont mis en valeur les leviers du changement propices à la sobriété ou l'efficacité énergétique.

- Le troisième et dernier article, publié en 2025 et intitulé *“Les stratégies et les scénarios des compagnies pétrolières à l'horizon 2050, freins ou catalyseurs des feuilles de route nationales de la transition énergétique ?”* fait un focus sur les stratégies bas carbone des six grandes compagnies pétrolières et gazières (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Sonatrach et Total Énergies) et sur leur compatibilité avec les objectifs et les cibles des feuilles de route nationales. Ce papier souligne que si les compagnies pétrolières se sont bien engagées sur la voie de la neutralité carbone en investissant massivement dans les énergies renouvelables, les technologies de capture du carbone, l'hydrogène ou encore les bioénergies, ces efforts cachent très souvent des investissements encore plus importants dans les énergies fossiles (exploration et exploitation de nouveaux gisements) et une gestion de portefeuille destinée à optimiser la valeur financière de la compagnie. Dès lors, et ce malgré l'urgence climatique, il semblerait que les scénarios de compagnies telles que Chevron ou ExxonMobil qui misent sur 50% d'énergies fossiles en 2050, soient bien plus réalistes que la cible de la neutralité carbone affichée par les Etats. Les énergies fossiles devraient encore occuper une place de choix dans le mix énergétique à l'horizon 2050.

Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective

Chafia BESSALEM, Arnaud DIEMER, Cécile BATISSE

Université Clermont Auvergne, CERDI, ERASME, HVL, Postgrowth Institute

Résumé : La question énergétique est au cœur du triptyque du développement durable, d'un côté, il s'agit d'assurer la sécurité énergétique nationale en tenant compte de l'état des ressources et des perspectives géostratégiques de dépendance, de l'autre, il convient de maintenir une compétitivité induisant une croissance pourvoyeuse d'emplois, et ce malgré une énergie plus rare et donc plus chère. Enfin, il est nécessaire de tenir compte de la contrainte environnementale (émissions de gaz à effet de serre, changement climatique) qui impose des choix drastiques et immédiats pour réduire les risques encourus. La démarche prospective et la formulation de scénarios constituent à ce jour une réponse des institutions internationales, des gouvernements et des différents acteurs de la sphère privée aux incertitudes qui touchent le secteur énergétique mondial. Penser les transitions énergétiques revient ainsi à admettre que le système énergétique est complexe, que les changements technologiques doivent être compatibles avec les mutations économiques, sociales et géopolitiques. Le passage aux énergies renouvelables n'est pas un simple mécanisme de substitution, il constitue une transformation majeure du système énergétique mondial dans un contexte de hausse des prix de l'énergie.

Mots clés : Energie, Narrations, Pétrole, Prospective, Scénarios, Shared Socioeconomic Pathways

Introduction

Le contexte énergétique mondial est caractérisé par une forte demande d'énergie primaire due principalement à l'augmentation de la croissance économique des nouvelles puissances émergentes, à savoir l'Inde et la Chine. Dans son rapport *World Energy Outlook* (2021), l'Agence internationale de l'énergie (AIE) souligne que « les pressions sur le système énergétique ne vont pas fléchir dans les décennies à venir » (la population mondiale pouvant croître de près de 2 milliards de personnes d'ici à 2050). Cette projection n'est pas sans conséquence sur l'épuisement des ressources énergétiques qui, dans leur majorité, restent non renouvelables, ainsi que sur l'empreinte environnementale engendrée par les émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est d'ailleurs ce constat qui oblige les gouvernements (mais également les grandes multinationales) à repenser les modes de production et de consommation afin de se mettre en conformité avec la feuille de route des Nations Unies, notamment les Objectifs du Développement Durable (ODD). Il devient même nécessaire d'anticiper ces changements afin de prévenir les impacts négatifs d'une croissance économique irrespectueuse de son environnement et de prendre conscience des limites planétaires (Persson & al., 2021 ; Steffen & al., 2015 ; Rockström & al., 2009).

L'énergie, et plus précisément le système énergétique, constitue un véritable enjeu de société (Diemer, 2008). Notre rapport à l'énergie est à la fois le carburant de l'économie et le responsable du réchauffement climatique. Une éventuelle pénurie de

ressources (fossiles) dès 2030 ravive les débats autour du Pic Oil (chute de la production de pétrole) et des investissements colossaux à mener dans les énergies renouvelables. Selon le rapport 2020 du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), les investissements mondiaux dans les capacités électriques d'origine renouvelable ont atteint 282 milliards de dollars en 2019 (hors grandes centrales hydroélectriques), dont 138 milliards d'euros pour l'éolien et 131 milliards d'euros pour le solaire (PNUE, 2020). La moitié de ces investissements a été réalisée en Chine (83 milliards d'euros) et aux Etats-Unis (55 milliards d'euros). Malgré des investissements évalués à près de 1 700 milliards de dollars d'ici 2030 (AIE, 2021), soit l'installation de nouvelles capacités électriques d'origine renouvelable à hauteur de 630 GW pour le solaire photovoltaïque et de plus 960 GW pour l'éolien (soit quatre fois plus que le niveau de 2020), nous sommes encore loin de ce qui serait nécessaire pour répondre aux besoins de la population mondiale tout en limitant la hausse de la température à moins de 2°C (Accords de Paris, 2015).

Dans cette course internationale visant à atténuer les effets du réchauffement climatique, la démarche prospective et la production de scénarios sont devenues des outils qui font partie de la panoplie des grandes organisations internationales, des think-tanks, des instituts de recherche, des gouvernements et des grandes multinationales. Il s'agit à la fois de cerner les principales évolutions énergétiques à l'horizon 2030 - 2050, d'appréhender la période de l'après pétrole (et donc de la place des énergies fossiles dans un mix énergétique) et de construire la société décarbonée de demain via des investissements massifs dans les énergies renouvelables.

Le présent papier entend aborder ces différents enjeux en cherchant à répondre à la question suivante : *Comment la méthode des scénarios peut-elle être mobilisée pour cerner l'évolution du système énergétique mondial et penser les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050 ?*

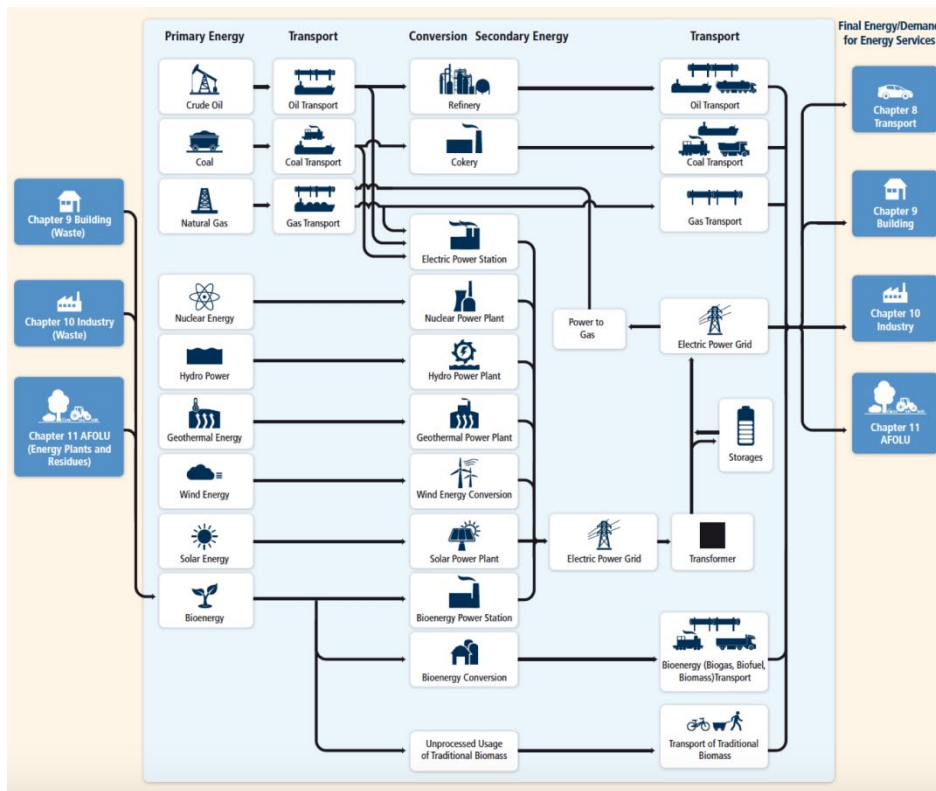
Pour aborder cette problématique, nous procéderons en trois temps. Dans un premier temps, nous présenterons les principales caractéristiques et les enjeux du système énergétique mondial. Par système énergétique, nous entendons ici un ensemble complexe de flux (combustibles, carburants, électricité) reliant des stocks de ressources primaires (charbon, pétrole, gaz naturel, biomasse, nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire...) à des consommations finales satisfaisant de besoins de mobilité (véhicules), de chaleur (fours, chaudières, chauffage), d'éclairage, de force motrice (moteurs). La notion de système énergétique s'appuie sur une infrastructure, un ensemble d'interactions et une mise en réseau des différents acteurs. C'est cette rigidité du système actuel couplée avec l'augmentation de la population mondiale et la croissance économique des pays émergents qui remet en cause la stratégie de substitutions des énergies fossiles par les énergies renouvelables et qui inscrit le mix énergétique dans le long terme (2050). Dans un deuxième temps, nous montrerons que cette projection dans l'avenir du système énergétique mondial nécessite d'introduire les notions de scénarios et de prospective, lesquelles nous invitent à considérer les phénomènes à

partir d'un ensemble de facteurs et de leurs interrelations, à intégrer la dimension du temps long ou encore à prendre en compte les discontinuités et les ruptures de trajectoires. Enfin, dans un troisième et dernier temps, nous analyserons les scénarios proposés par les grandes institutions internationales afin de cerner les grandes tendances pour les 30 prochaines années.

Contexte : un système énergétique en transition

Un système énergétique se définit comme un ensemble d'interactions entre des acteurs, des flux et des stocks, allant de l'extraction de l'énergie primaire à l'utilisation d'énergie finale pour fournir des biens et des services (Pfenninger & al., 2014, GEA, 2012). En d'autres termes, le système énergétique englobe "les processus combinés d'acquisition et d'utilisation de l'énergie dans une société ou une économie donnée" (Jacquard, 2005). Bruckner et al. (2014, p. 516) définissent le système énergétique en deux composantes, le secteur de l'offre comprend " tous les processus d'extraction, de conversion, de stockage, de transmission et de distribution de l'énergie qui fournissent de l'énergie finale aux secteurs d'utilisation finale (industrie, transport et bâtiment, ainsi que l'agriculture et la sylviculture) " et le secteur de la demande mesure les secteurs d'utilisation finale de l'énergie (Fig. 1).

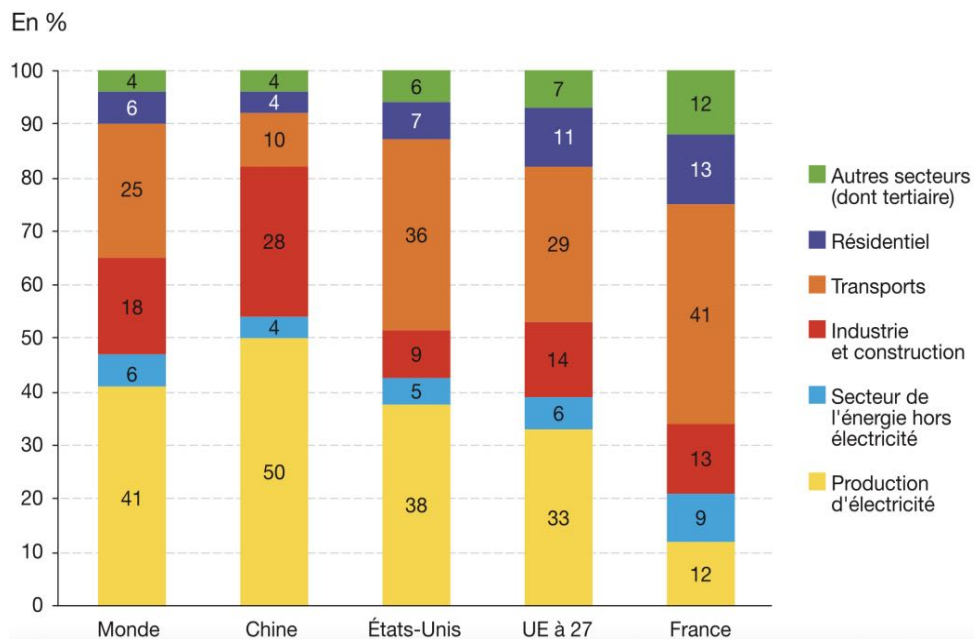
Figure 1 : Architecture du système énergétique



Source : Bruckner & al. (2014, p. 519)

Le système énergétique est la pierre angulaire du système mondial. Premièrement, la croissance économique a besoin d'une certaine quantité d'énergie (flux et stocks) à un prix bas pour continuer à croître (Diemer, 2008). Toutefois, une croissance trop forte exerce une pression sur le prix de l'énergie qui peut réduire la croissance économique (même si cette corrélation n'est pas vraiment forte, Stern, 1993). Deuxièmement, le secteur de la production d'énergie est le plus grand contributeur aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (IAE, 2020). En 2018, ce secteur (production d'énergie hors électrique + production d'électricité) était responsable de 47% du total des émissions de CO2 (Fig. 2).

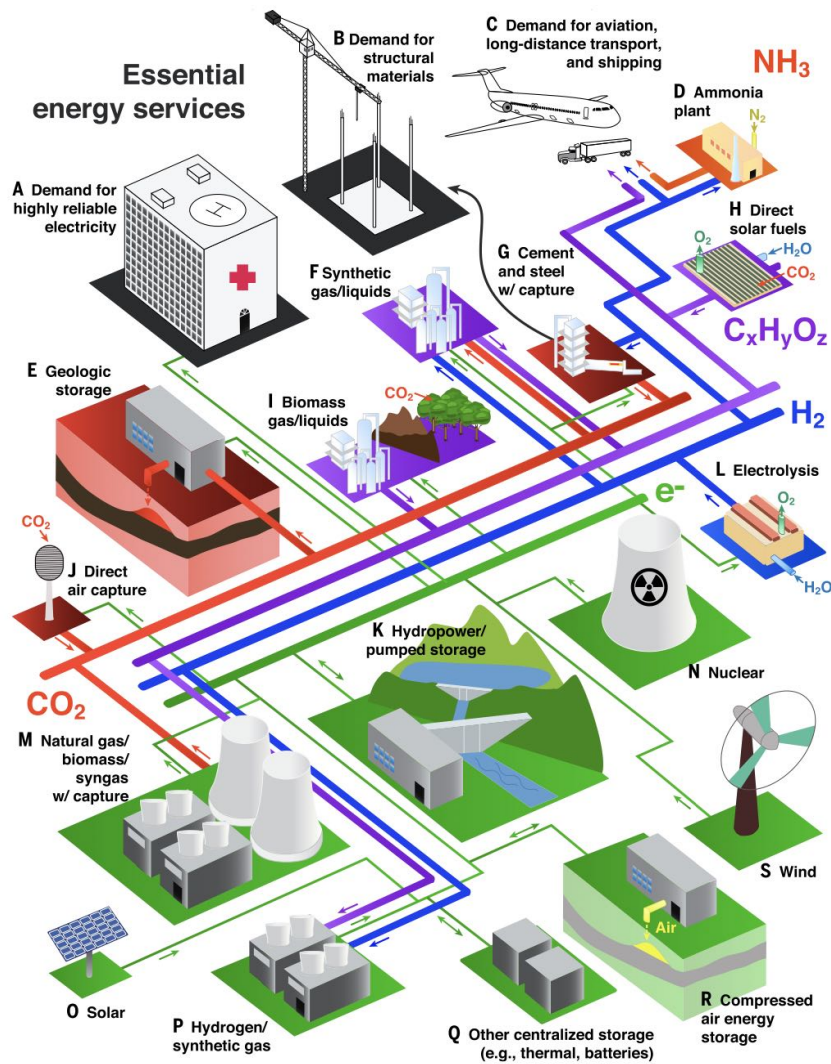
Figure 2 : Origine des émissions de CO2 due à la combustion d'énergie



Source : IAE (2020)

De multiples options sont possibles pour réduire les émissions de GES du secteur de la production énergétique (Herbst, Toro, Reitze, Jochem, 2012), notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des émissions dans l'extraction des combustibles, la conversion de l'énergie, les énergies renouvelables, la capture et le stockage du dioxyde de carbone (Davis & al., 2018). Troisièmement, l'avenir de l'espèce humaine exige une transformation fondamentale du système énergétique (Balzani, 2019), le défi n'est pas seulement de remplacer les ressources en combustibles fossiles par des alternatives à faible émission de GES, mais aussi d'engager les sociétés vers plus de sobriété (Maresca, 2014), ce qui signifie que nous devons réduire notre consommation d'énergie. Si les politiques de découplage et de décarbonisation sont les éléments clés des stratégies d'atténuation du changement climatique, ces stratégies sont nécessaires mais pas suffisantes (Eloi, 2012). Les forces qui déterminent l'évolution de la consommation finale d'énergie dans tous les secteurs ont un impact significatif sur l'évolution des systèmes de production d'énergie (Fig. 3).

Figure 3 : Schéma d'un système énergétique intégré ne rejetant pas de CO₂ dans l'atmosphère



Source : Davis & al. (2018, p. 1)

Le secteur de la production d'énergie convertit plus de 75 % de la production totale d'énergie primaire (PTEP) en d'autres formes, à savoir l'électricité, la chaleur, les produits pétroliers raffinés, le coke, le charbon enrichi et le gaz naturel. L'industrie (y compris l'utilisation non énergétique) consomme 84 % de l'utilisation finale de charbon, 26 % des produits pétroliers, 47 % du gaz naturel, 40 % de l'électricité et 43 % de la chaleur. Le transport consomme 62 % de l'utilisation finale des combustibles liquides. Le secteur du bâtiment est responsable de 46 % de la consommation finale de gaz naturel, 76 % des combustibles renouvelables et des déchets, 52 % de l'électricité. Le secteur de la fourniture d'énergie est également un grand consommateur d'énergie. Les pertes d'énergie, évaluées comme la différence entre les entrées (78 % de la PTEP) et les sorties (48,7 % de la PTEP) de ce secteur, représentent 29,3 % de la PTEP. La production totale d'énergie primaire est non seulement fonction de la demande des utilisateurs finaux pour des vecteurs énergétiques de meilleure qualité, mais aussi de l'efficacité moyenne mondiale relativement faible des processus de conversion, de

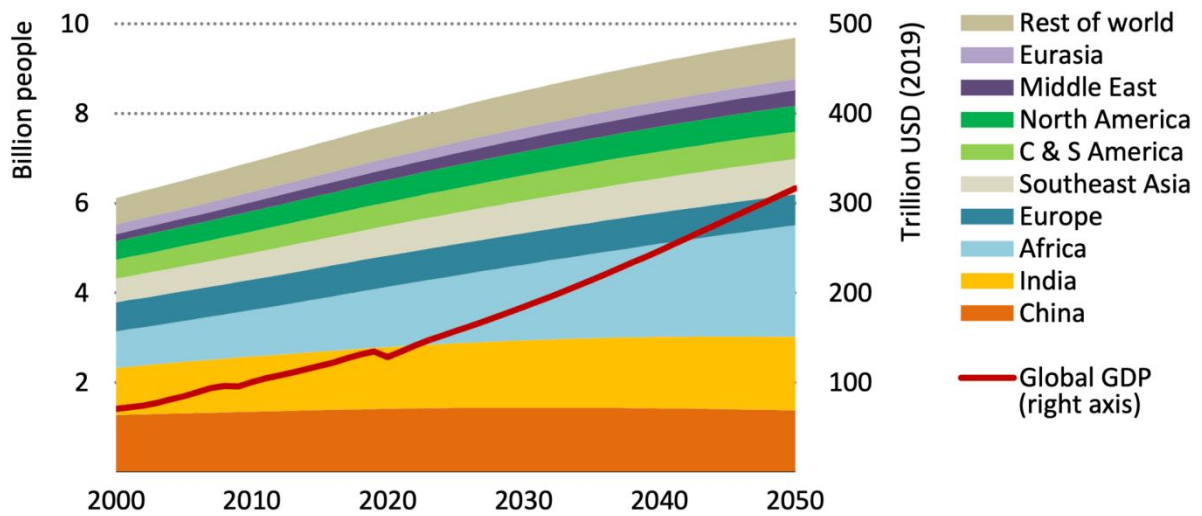
transmission et de distribution de l'énergie (efficacité de 37 % pour l'électricité produite à partir de combustibles fossiles et de 83 % pour la production de chaleur urbaine à partir de combustibles fossiles). La dynamique du système énergétique présente ainsi de nombreux défis et une chaîne complexe d'éléments moteurs dans le domaine macroéconomique (prix, demande, exportations, importations), industriel (secteurs, compétitivité, chaîne de valeur), social (précarité énergétique), environnemental (pollution, climat) ou sanitaire (santé humaine).

Si 80% de l'énergie consommée dans le monde est issue de ressources fossiles émettrices de gaz à effet de serre (pétrole, gaz, charbon) et responsables du dérèglement climatique, il existe de profondes disparités internationales en fonction des zones géographiques (Gazprom Energy Report, 2020). Le Moyen Orient utilise 98,8% d'énergies fossiles (45,9% de pétrole, 51,8% de gaz naturel et 1% de charbon). Rien de surprenant pour cette zone qui est la principale productrice d'hydrocarbures au monde. De son côté, le continent Africain dispose également de réserves de pétrole et de gaz naturel, mais sans commune mesure avec la zone du Moyen Orient. Son mix énergétique reste néanmoins très carboné (avec 91,3% d'énergie fossile). Le pétrole y occupe une place de choix (41,7%). La zone Asie et Pacifique a un mix énergétique comparable à celui de l'Afrique (87,4% d'énergie carbonée). La grosse différence entre les deux zones réside dans le charbon qui est extrêmement utilisé en Asie où il représente 47,5% de l'énergie consommée. Du côté, des pays de la Communauté d'États Indépendants regroupant la fédération de Russie et des pays tels que l'Ouzbékistan, le Tadjikistan, le Kazakhstan... Le mix énergétique est résolument tourné vers le fossile (89,5%), et en particulier vers le gaz naturel, ces pays disposant des principales réserves mondiales. Enfin, l'Amérique du Nord et l'Europe sont légèrement moins tournées vers les énergies rejetant du carbone (respectivement 81,7% et 73,6%)... Le nucléaire y occupe une place non négligeable (9,9 % pour l'Europe et 7,4% pour l'Amérique du Nord). L'Europe étant également la zone la plus impliquée en matière de développement de l'énergie renouvelable (9,8% de son mix énergétique).

Au-delà de ces disparités, il faut souligner le rôle majeur joué par deux drivers du système énergétique, la croissance de la population mondiale (Fig. 4) et bien entendu son corolaire, la hausse de la demande énergétique mondiale (Bobin, Nifenecker, Stéphan, 2021). Selon l'ONU (2020), la population mondiale devrait augmenter d'environ dix milliards en 2050¹, un accroissement de 2,5 milliards se produisant quasi exclusivement en Afrique subsaharienne (+ 1,6 milliard) et en Asie du Sud (+ 800 millions).

¹ Dans leur ouvrage *Empty planet : the Shock of Global Population Decline* (2019), John Ibbitson et Darrel Bricker n'hésitent pas à remettre en cause les prédictions de la Banque Mondiale et de l'ONU, en insistant sur le déclin démographique (thèse que l'on retrouve également chez Wolfgang Lutz, 2018, 2017).

Figure 4 : Population mondiale par régions et évolution du PIB



Source : IAE (2021a)

Ces régions chaudes, les plus pauvres et les plus fécondes ont un fort potentiel de développement, sous réserve de disposer des énergies adaptées à leur environnement (Wiesenfeld, 2013). Simultanément, le taux mondial d'urbanisation, proche de 54 % en 2021, devrait dépasser les 65 % en 2050, soit un accroissement de 2,5 milliards de citoyens, portant à 6 milliards la population totale vivant dans des agglomérations. Dans certaines grandes métropoles, les densités de population pourront dépasser les 15 000 habitants par km². Près de 70 % d'entre elles seront situées à moins de 100 kilomètres d'un littoral. Plus des deux tiers de l'énergie mondiale y sera consommée (Zaninetti, 2008). Fort de ce constat, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2020) estimait que la croissance des consommations énergétiques devrait avoisiner les 1% par an et ce, jusqu'en 2040. Malgré une forte croissance des énergies renouvelables, qui couvriraient 60 % de la croissance des besoins d'électricité, la part des combustibles fossiles ne serait que faiblement réduite. Il est donc nécessaire de concevoir de nouvelles trajectoires permettant au secteur mondial de l'énergie, responsable d'environ trois quarts des émissions mondiales de gaz à effet de serre, d'atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 (IEA, World Energy Outlook, 2021). La bonne santé du système énergétique mondial passe par une forte remise en cause des fondements du système actuel.

L'idée d'une transition énergétique incarne ce changement, elle renvoie plus précisément à des mesures de modifications structurelles des modes de production, de stockage, de transport, de distribution et de consommation de l'énergie (Jancovici, 2012). Elle concerne aussi les modifications apportées aux mix des sources énergétiques primaires et l'usage final de celles-ci (Lazar, 2014).

L'expression « *Transition énergétique* » est apparue au milieu des années 1970 pour conjurer les inquiétudes liées à la crise énergétique de 1973-1974. Comme le rappelle Jean-Baptiste Fressoz (2014, p. 2), « *Dire transition plutôt que crise rendait le futur beaucoup*

moins anxiogène en l'arrimant à une rationalité planificatrice et gestionnaire". Jimmy Carter a consacré près de cinq discours à la Nation sur ce thème, afin d'encourager ses concitoyens à renoncer au consumérisme et à renouer avec les valeurs chrétiennes de la sobriété. Du point de vue historique et selon Smil (2008), on recense trois transitions énergétiques majeures : (i) le passage de l'utilisation de l'énergie humaine et animale à l'utilisation de l'énergie mécanique, (ii) le remplacement des mouvements mécaniques par des machines à vapeur au XVIIIe siècle avec l'utilisation du charbon, (iii) l'expansion des usages de l'électricité et l'essor du pétrole dans les transports depuis le milieu du XXe siècle. Les deux derniers siècles ont connu le passage de l'ère de la biomasse à celle du charbon, puis du pétrole, du gaz et demain, peut-être, des renouvelables... selon un processus d'addition énergétique. De nos jours, la notion de transition énergétique renvoie à une série de thèmes clés (Revest, 2013) parmi lesquels on peut citer le mix énergétique, les bâtiments à énergie positive, la contrainte climatique, la décarbonisation, l'efficacité énergétique, l'empreinte écologique, l'énergie des flux, l'indépendance énergétique, la précarité ou la justice énergétique, la sobriété énergétique et la décroissance (Wirz, 2018) ou encore le triangle des régimes énergétiques (Lipietz, 2012).

Les singularités des transitions énergétiques

Pendant longtemps, la question énergétique s'attachait à répondre à la croissance de la demande énergétique (Ruedinger, Aykut, 2017), la question environnementale n'était pas prise en compte dans le processus de mutation énergétique et l'épuisement des ressources fossiles ne représentait pas une menace immédiate (même si le rapport Meadows, *Limits to Growth*, évoquait clairement la disparition des ressources naturelles dès 1972). De nos jours, des changements profonds sont à l'œuvre dans le domaine de l'énergie, résumés par le terme de *transition énergétique* (Duruissseau, 2014). Ces changements sont impulsés par un contexte énergétique complexe, caractérisé par la crainte d'un épuisement des ressources fossiles (et donc une hausse du prix de l'énergie, Pescatori, Stuermer, Valckx, 2021) et la nécessité de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre. D'une certaine manière, la transition énergétique s'impose d'elle-même (Naudet, Reuss, 2018, Arik, 2012). Cependant, elle peut prendre plusieurs formes selon les stratégies des pays et les visions des gouvernements. En France, la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte se présente comme une loi « d'action et de mobilisation » (Denolle, 2016) qui engage le pays tout entier (citoyens, entreprises, territoires, pouvoirs publics).

Elle doit permettre à la France de renforcer son indépendance énergétique, de réduire ses émissions de gaz à effets de serre et donne à tous des outils concrets pour accélérer la croissance verte (Diemer, 2015a). En 2016, la publication d'un arrêté fixant la programmation pluriannuelle des énergies renouvelables a même fixé l'objectif d'augmenter de 50% la capacité installée des énergies renouvelables d'ici 2023.

Ainsi, les tendances les plus saillantes en matière de transition énergétique sont basées sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (Bellevrat & al., 2013), elles-mêmes encadrées dans une transition sociétale (Association NegaWATT, 2021). L'association de ces deux éléments est censée assurer plus de 90 % des réductions nécessaires d'émissions de CO₂ liées à l'énergie à l'aide de technologies sûres, fiables, économiques et largement disponibles (IRENA, 2018). L'introduction des énergies renouvelables (Freris, Infield, 2021) peut être réalisée selon deux manières, par addition aux sources d'énergie existantes ou en remplacement de celles-ci :

- *L'additivité énergétique* consiste en l'exploitation de toute nouvelle source énergétique sans recourir au remplacement d'une source existante et exploitée. Malgré la découverte du pétrole et du gaz, le charbon continue à être exploité. L'avènement des énergies renouvelables n'a pas provoqué la disparition des énergies fossiles. Christian de Perthuis et Boris Solier (2018) considèrent que les transitions énergétiques opérées depuis le début de la révolution industrielle reposent sur un empilement des sources primaires, dans lequel les terriens mobilisent de nouvelles énergies sans renoncer à celles préexistantes.

- *La substituabilité énergétique* consiste en le remplacement partiel ou total d'une ressource énergétique par une autre plus disponible, plus respectueuse de la nature ou moins chère. Derry (2007) estime que la substitution énergétique est un concept en vogue principalement pour deux raisons. La première renvoie à la question du réchauffement climatique, la seconde au défi de la sécurité énergétique. Toutefois, il conclut que dans le contexte actuel du libre marché, la production de ces sources nouvelles s'additionne à la production existante et ne la remplace pas. Il ajoute qu'une planification énergétique à long terme est nécessaire pour réaliser une substitution énergétique effective. Concrètement, l'économie d'énergie constitue un moyen de réduire le « gaspillage » de l'énergie et de diminuer les émissions des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques (Renou, 1991). Elle consiste soit à avoir le même confort en consommant moins d'énergie ou d'améliorer le service rendu avec la même énergie consommée. De ce point de vue, il y a trois façons d'agir :

L'efficacité énergétique est le ratio entre le service énergétique produit et la quantité d'énergie utilisée pour le produire (Feidt, 2009), c'est la principale politique développée dans le cadre d'une transition énergétique (Boulanger, 2007). Elle passe par une modification profonde des modes de consommation mais aussi par des progrès technologiques (Pineau, 2021). Le secteur le plus apte à apporter le plus d'efficacité énergétique (via la réduction de la consommation d'énergie) est le secteur de l'habitat (Charlier, 2014). L'efficacité énergétique constitue un axe prioritaire de la transition énergétique allemande, notamment via le programme de soutien « *rénovation énergétique efficace* » financé par la Banque fédérale d'investissement (Oriol, 2020).

La *sobriété énergétique* est souvent associée à l'idée de modération ou à une utilisation plus intelligente de l'énergie (Villalba, Semal, 2018)). La sobriété est bien plus qu'un simple éco-geste (Maresca, 2014), elle traduit « *une démarche volontaire et collective de réduction de la consommation énergétique par des changements de comportements, de valeurs, de pratiques ou de modes de vie* » (Diemer, 2015b). Elle s'inscrit donc dans un changement de paradigme (Spittler & al., 2019), celui de la condamnation de la société de croissance et de ses injustices (Gladkykh & al., 2021, Jenkins & al., 2016), d'une action collective de citoyens (Sterling-Gregg & al., 2020), voire d'un basculement dans la décroissance (Diemer, 2021).

La *maîtrise de l'énergie* permet à la fois de réduire le prix de l'énergie et de faciliter l'efficacité et la sobriété énergétique. Il s'agit à la fois d'une maîtrise (Cormier, Teske, 2013) : (i) de la demande d'énergie en freinant les dépenses énergétiques ; (ii) de la production d'énergie en décidant de stopper le recours aux énergies destructrices de l'environnement et nuisibles aux humains, à savoir, les énergies fossiles et le nucléaire.

A côté de ces transformations majeures du système énergétique, il convient d'associer les changements technologiques ainsi que les mutations économiques, sociales et géopolitiques (Delepouve, 2016). Les systèmes énergétiques sont donc de plus en plus complexes, ce qui nous amène à parler de transitions énergétiques au pluriel.

Transitions énergétiques, secteurs énergivores et croissance économique

Les secteurs du bâtiment et des transports représentent à eux deux 60 % de l'énergie consommée dans le monde, près des deux tiers provenant des énergies fossiles émettrices de CO₂ (Lévy, 2021). Selon Gaudin (2018), dans les pays développés, trois grands types d'usages constituent schématiquement la consommation actuelle d'énergie : un tiers pour la production, l'industrie et l'agriculture, un tiers pour les transports et un tiers pour le chauffage des bâtiments, habitations et lieux de travail. Le secteur de transport dépend aujourd'hui à 95 % du pétrole pour son approvisionnement énergétique (Appert, 2018), en plus de sa consommation importante d'énergie, ce secteur est très émetteur de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. De son côté, Aoun (2018) estime que la dynamique n'est pas encore enclenchée dans les autres secteurs comme le transport et l'incertitude porte sur la vitesse et le rythme de cette transformation globale. Les habitats sont les lieux où l'énergie est la plus utilisée et où l'efficacité énergétique est de moindre importance mais d'autre part ils représentent le secteur le plus apte pour l'utilisation des énergies renouvelables notamment s'agissant des installations individuelles (Julian, 2021, Meunier, 2008).

Les transitions énergétiques sont ainsi une véritable opportunité pour la relance de l'économie en raison de l'importance des investissements qu'elles requièrent et des emplois que les nouvelles installations de services et de maintenance permettent de

créer. Selon ENEA CONSULTING (2018), les économies émergentes et en développement ont la possibilité et le potentiel de mettre les transitions énergétiques au cœur de leur dynamique de développement, sans avoir à payer, comme les pays industriels, le coût d'une refonte radicale d'infrastructures déjà développées. Cela montre les difficultés pour les pays développés d'opérer de véritables transitions énergétiques. Ces dernières devront s'appuyer sur les trois piliers que sont l'efficacité énergétique, la sobriété énergétique et l'introduction des énergies renouvelables, soit de façon additive (aux énergies existantes) ou en substitution de celles-ci. Ceci ouvre la voie à de nouveaux axes d'investissements ; des équipements, de la matière première, des services... Les secteurs clés sur lesquels la communauté internationale doit agir afin de réussir ces transitions énergétiques sont principalement : le bâtiment et la construction ; les transports ; la mobilité, l'industrie et les biens de consommation ; l'agriculture et alimentation ; la forêt et les puits de carbone.

L'efficacité énergétique (c'est une consommation à la fois modérée et optimale de l'énergie pour un service rendu) permettrait, si elle était généralisée, d'infléchir la courbe de demande en énergie. Sur le plan économique, elle impliquerait des investissements colossaux, pour adapter le mode de vie à ses différentes recommandations. Sur le plan technique, elle se traduirait par des changements technologiques (Chateau, 2016) : chaudière industrielle à meilleur rendement, bâtiment mieux isolé, moteur à meilleur rendement. Toutefois, les changements invoqués pourraient également prendre la forme d'une meilleure organisation (par exemple dans les transports, utilisation des transports en commun plutôt que de la voiture), d'une meilleure gestion (par exemple meilleure régulation des besoins de chaleur dans les usines ou dans les bâtiments), voire de la modération des besoins (baisse du chauffage la nuit dans les bâtiments). L'amélioration des rendements des équipements est un des axes de l'efficacité énergétique. Cet aspect est un levier de croissance (Fazeli, Davidsdottir, 2015). Dans le secteur du bâtiment, des modifications dans le cadre d'une réhabilitation des logements, des bureaux...ont pour effet de réduire la consommation d'énergie.

Dans une étude intitulée *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*, l'Agence internationale de l'énergie (2014) a rassemblé dans le monde entier des données confirmant les multiples avantages de l'efficacité énergétique. Il s'agit notamment de données concernant :

- *Les incidences macroéconomiques* : La réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration de la productivité résultant de l'efficacité énergétique peuvent avoir des effets positifs substantiels sur l'économie. La progression de la production attribuable à l'efficacité énergétique représenterait entre 0,25 % et 1 % de la croissance du produit intérieur brut (PIB). A l'avenir, le développement économique pourrait reposer sur les économies résultant de l'efficacité énergétique (Cochet, 2000), contrairement au paradigme actuel qui lie les dépenses de consommation à l'exploitation des énergies bon marché.

- *L'emploi* est stimulé directement ou indirectement à des degrés variables par les différentes politiques et par les conditions sur les marchés locaux du travail (ADEME, 2009). La création d'emploi doit être analysée en fonction des spécificités de chaque situation. Les estimations basées sur certaines études montrent que chaque million d'euros investi donne lieu à la création de 7 à 22 années d'emplois (IEA, 2014).

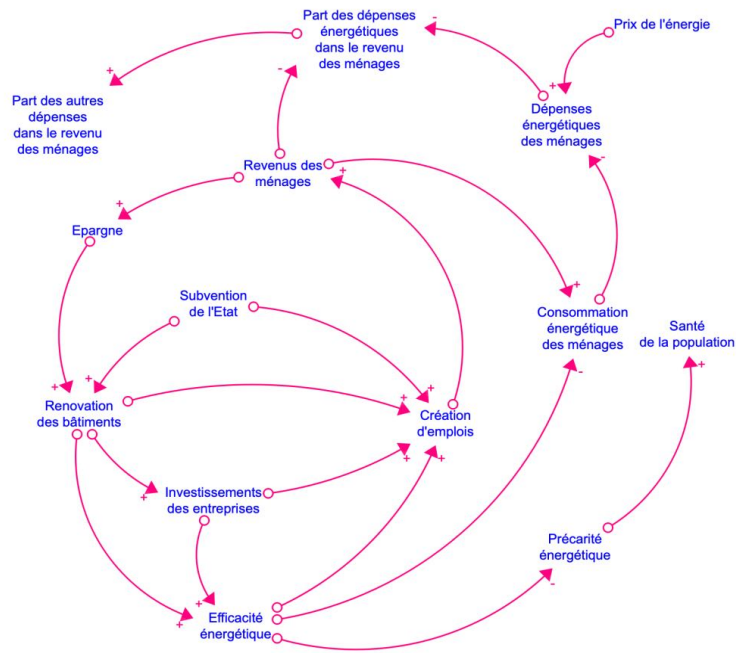
- *Les Incidences sur les budgets publics* : Les investissements dans l'efficacité énergétique peuvent accroître les recettes fiscales, augmenter la rentabilité de l'investissement et abaisser les coûts du chômage et de la protection sociale (Giraudet, Bourgeois, Quirion, 2020). Une étude des incidences macroéconomiques de la rénovation de bâtiments publics à l'échelle de l'Union Européenne a montré qu'un investissement annuel de 56 milliards de dollars pourrait créer 760 000 emplois chaque année et permettre une amélioration directe nette des budgets publics de l'ordre de 41 à 56 milliards de dollars par an, chiffres qui se situent entre 91 et 174 milliards de dollars, soit plus du double, lorsque l'ensemble des avantages pour toute l'économie sont pris en considération.

- *Les Incidences sur la santé et le bien-être* : Les effets positifs sur la santé sont invariablement plus prononcés dans les groupes vulnérables de la population : les enfants, les personnes âgées et les personnes déjà atteintes de maladies. Les symptômes de maladies respiratoires sont atténués, et le taux de mortalité excessif en hiver diminue dans les climats froids (Ezratty et al., 2009). L'efficacité énergétique peut avoir des effets bénéfiques sur la santé mentale en atténuant la précarité énergétique (Derdevet, 2013) et la désagréable sensation chronique de froid associée à l'anxiété, au stress, à la dépression et à la crainte de ne pas jouir d'une bonne santé. Les incidences sur la santé représentant 75 % de l'incidence totale et le rapport avantages/coûts pouvant atteindre 4 :1, plusieurs gouvernements ont placé l'efficacité énergétique au centre de leur politique en matière d'énergie pour remédier à la précarité énergétique (Devalière, 2008).

- *la productivité industrielle* : Les investissements dans l'efficacité énergétique peuvent avoir un intérêt stratégique pour les entreprises, les rendant plus compétitives, réduisant leurs coûts d'exploitation et d'entretien et améliorant leurs conditions de travail (Levacher, Clodic, Marechal, 2009). Lorsque les multiples avantages de l'efficacité énergétique sont pris en compte, la période de retour sur investissement est généralement réduite de moitié (Ballot-Miguet & al., 2019).

- *Les Incidences sur les prestations énergétiques* : Les fournisseurs de services énergétiques adoptent un nouveau paradigme qui fait dépendre leurs bénéfices des prestations et des multiples avantages qu'ils apportent aux consommateurs plutôt que de la vente d'un volume croissant d'unités d'énergie (Aymoz, 2018). Les avantages directs de l'efficacité énergétique pour les prestataires (Fig 5) comprennent la diminution des coûts de distribution et de production, et les avantages indirects, la réduction des coûts associés à la gestion des clients (Duplessis, 2009).

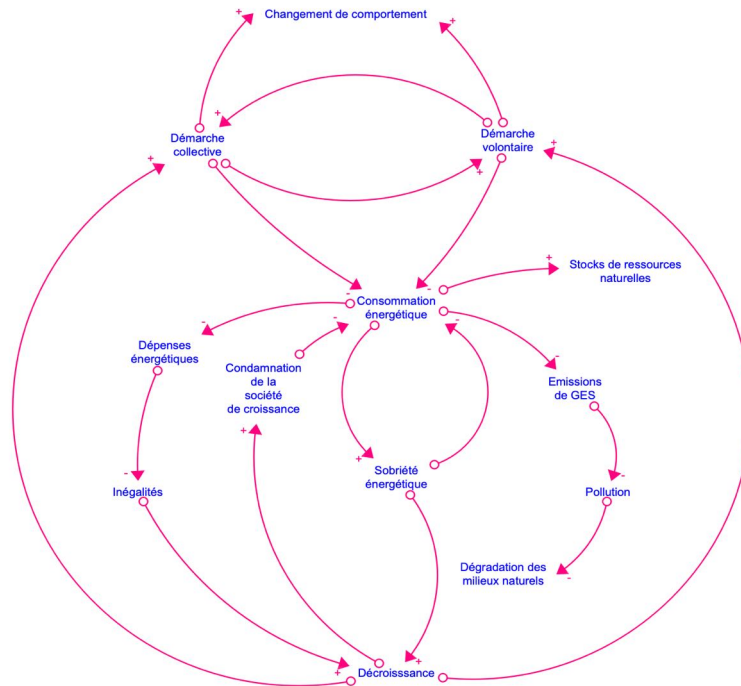
Figure 5 : Boucles causales de l'efficacité énergétique



Source : Les auteurs

La sobriété énergétique consiste en une limitation de l'utilisation de l'énergie aux besoins fondamentaux (Fig. 6), elle vise à réduire la consommation de l'énergie, via un changement de comportement et de modes de vie de la population (Toulouse, 2020).

Figure 6 : Boucles causales de la sobriété énergétique

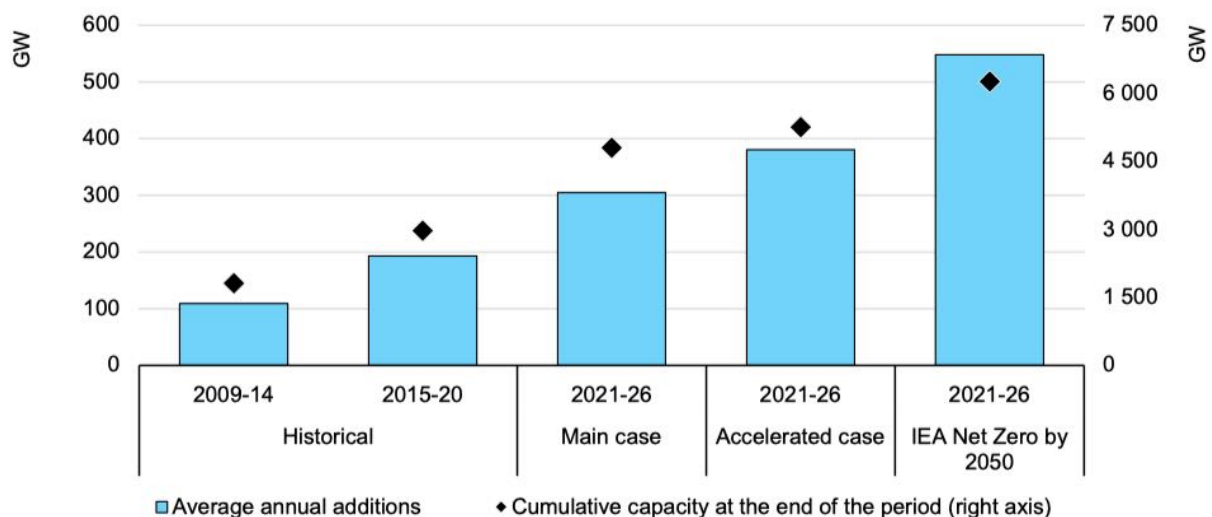


Source : les auteurs

Selon le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC, 2022, 2021, 2018), un changement de comportement et de modes de vie dans les pays développés permettrait de réduire la demande énergétique de 20 % sur le court terme et, éventuellement, de 50 % des niveaux actuels d'ici la moitié du siècle. Une remise en cause de notre rapport à l'énergie et l'adoption de comportements plus responsables et plus sobres en énergie apparaît ainsi comme une solution simple, efficace et à moindre coût qui permettrait de limiter significativement les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les conséquences économiques d'une politique de sobriété énergétique seraient avantageuses et permettraient non seulement de limiter les émissions de GES mais aussi de réduire la facture de consommation d'énergie (Association NegaWATT, 2018).

Au-delà des stratégies d'efficacité énergétique et/ou de sobriété énergétique, l'un des véritables drivers des transitions énergétiques, c'est la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. L'Agence Internationale de l'Énergie (Décembre, 2021) prévoit une augmentation de la capacité des énergies renouvelables de plus de 1 800 GW, soit plus de 60 % jusqu'en 2026. Un tel scénario représenterait près de 95 % de l'augmentation de la capacité électrique totale dans le monde. La République populaire de Chine reste le leader incontesté des énergies renouvelables (avec 43 % de la croissance mondiale), suivie par l'Europe, les États-Unis et l'Inde. Ces quatre marchés assurent à eux seuls près de 80 % de l'expansion de la capacité des énergies renouvelables dans le monde (Fig. 7).

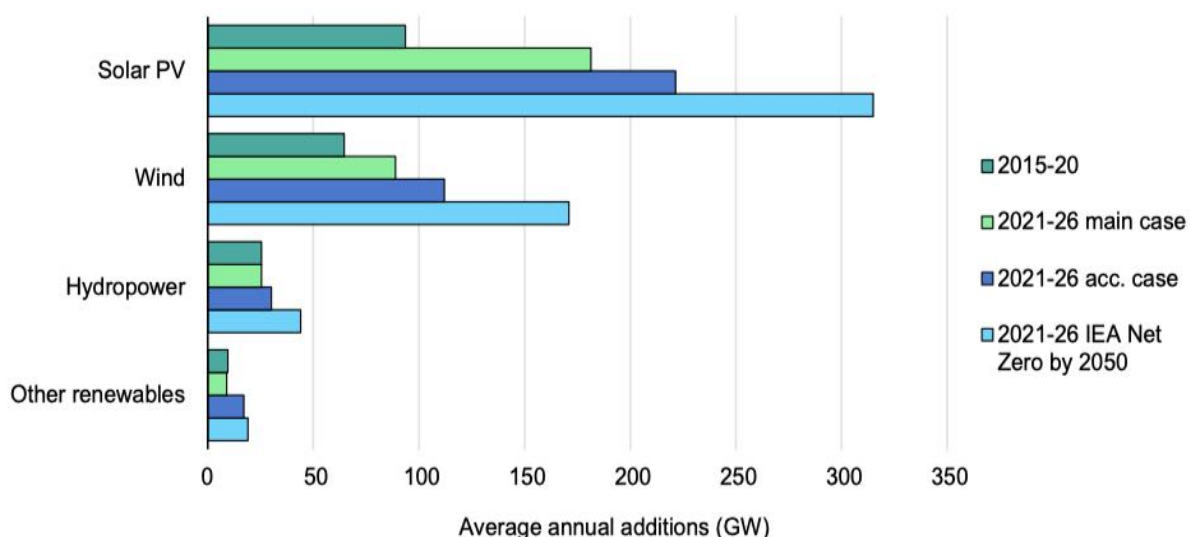
Figure 7 : Ajouts annuels moyens de capacités d'énergie renouvelable et capacité installée cumulée, historique, prévisions et scénario "Net zéro" de l'AIE, 2009-2026



Source : IEA (2021)

Malgré des investissements colossaux dans les énergies renouvelables, les prévisions relatives à la capacité de production d'énergie renouvelable restent nettement inférieures au niveau requis pour le scénario zéro émissions en 2050. Selon l'IEA (2021), les ajouts annuels moyens pour l'énergie solaire photovoltaïque doivent presque doubler au cours des cinq prochaines années par rapport aux prévisions du scénario principal (alors que le solaire photovoltaïque est déjà l'une des technologies les plus compétitives sur le marché). Même constat du côté de l'éolien, les capacités de production doivent plus que doubler pour atteindre le scénario zéro émissions (Fig. 8). Bien que les coûts de production de l'énergie éolienne terrestre soient moins élevés que ceux des combustibles fossiles dans la plupart des pays, des obstacles non économiques, notamment l'octroi de permis de construction et l'acceptation sociale, empêchent une expansion plus rapide. De son côté, l'hydroélectricité (y compris les projets de pompage-turbinage) est également confrontée à des obstacles non économiques et à des problèmes de configuration du marché. Enfin, d'autres sources d'énergie renouvelables, telles que la biomasse et la géothermie, peuvent également fournir de l'électricité renouvelable, mais le soutien politique reste limité et les coûts demeurent nettement supérieurs à ceux des sources d'énergie renouvelables variables. Au final, pour atteindre le niveau zéro net émissions, il semblerait qu'il faille déployer un portefeuille de toutes les technologies renouvelables, y compris celles qui peuvent fournir de l'électricité à faible teneur en carbone.

Figure 8 : Ajouts annuels moyens de capacité par technologie, réels, prévisions et scénario "Net Zero" de l'AIE, 2015-2026



Source : IEA (2021)

Méthodologie : scénariser les transitions énergétiques

L'architecture du système énergétique mondial est principalement caractérisée par sa rigidité (il est organisé autour de lourdes infrastructures qui acheminent l'énergie depuis le gisement jusqu'au consommateur final) et la place occupée par les énergies fossiles (il est alimenté à plus de 80 % par les trois grandes énergies polluantes que sont le pétrole (31 %), le charbon (29 %) et le gaz naturel (22 %)). L'évolution vers un mix énergétique émettant moins de gaz à effet de serre prendra donc du temps. Or, le réchauffement climatique tend à rappeler certains faits et certaines échéances à tenir. L'accord de Paris sur le réchauffement climatique entré en vigueur le 4 novembre 2016 et approuvé et signé par 197 pays (en 2020), visait à maintenir l'augmentation de la température mondiale à un niveau bien inférieur à 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels. En 2021, ces mêmes pays se sont retrouvés à la COP 26 de Glasgow pour accélérer leurs efforts et arriver à un nouveau consensus pour un plan d'actions face aux risques du changement climatique. Malgré l'écart entre les objectifs ambitieux inscrits dans le texte du projet de décision finale et la réalité (Jouzel, 2021), la COP 26 a mis au centre des débats, la fin programmée des énergies fossiles (notamment la suppression progressive du charbon et des subventions aux énergies fossiles) mais également les relations entre les pays Nord et les pays du Sud (Alvares, 2021). L'ensemble de ces résolutions se sont basées sur le nouveau rapport du GIEC (2021) mais également sur les scénarios développés par l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE, 2020, 2021) ou encore le Conseil Mondial de l'Énergie (CME, 2020). D'une certaine manière, les scénarios de transitions énergétiques à l'horizon 2050 sont des images projetées sur l'avenir, et donc dépendants des volontés des décideurs politiques (IEA, 2019).

Si un scénario comporte la description d'un futur et décrit les moyens nécessaires pour atteindre des objectifs (2050), il existe tout un appareillage méthodologique qu'il convient de mobiliser afin que le scénario soit intégré à la structure d'un modèle, aux hypothèses qui engageront la société à consentir des efforts pour réduire sa consommation d'énergie. Ce sont ces apports que nous souhaitons aborder dans ce qui suit. Les scénarios constituent une étape importante dans un modèle. Tout d'abord, ils complètent de longs développements liés à la structure du modèle. Ensuite, ils permettent de rappeler qu'un modèle est avant tout utile, c'est un outil d'aide à la décision. Enfin, ils introduisent une démarche prospective, une manière de penser l'avenir.

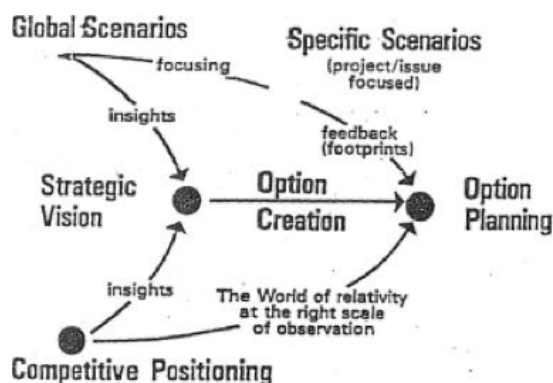
La littérature sur les scénarios s'appuie principalement sur quatre approches complémentaires et interdépendantes : *le scenario planning* (Wack, 1985), *la prospective* (Godet, 1990, 1994), la méthode des *Three Horizons* (Curry, Hodgson, 2008) et *les Narrative Shared Socioeconomic Pathways* (Kleger & al., 2013 ; O'Neil et al., 2014-2017).

Le Scénario Planning

Ce que l'on a coutume d'appeler en anglais "Scenario Planning" a été développé par Pierre Wack dans les années 1960 - 1970 pour la société Shell juste avant la grande crise pétrolière de 1973-1974. Le défi posé aux dirigeants de la société Shell était simple : que se passerait-il si le monde était confronté à une crise pétrolière ? : " *In the 1960s a pioneering team of economists, engineers and scientists had started work on Shell's first scenarios. They looked at how the future might unfold and the impact this could have on the company. By 1973 they had shared these early scenarios with Shell's management, daring them to think the unthinkable : What if the world faced an oil crisis ?*" (Shell, 2012, p. 8). Lorsque la guerre du Kippour éclate en octobre 1973, le soutien de l'Occident à Israël provoque la colère des États arabes riches en pétrole et déclenche un embargo pétrolier (Daures, Frisch, 1974). La pénurie de carburant a provoqué une récession mondiale et un effondrement massif des marchés boursiers (Stoffaes, 1982). Le monde vacille. Mais les décideurs de Shell étaient mentalement préparés au pire parce qu'ils l'avaient déjà imaginé (Jefferson, 2012, Schoemaker, Van Der Heijden, 1993). La croyance générale - que les réserves de pétrole étaient infinies - ne faisait désormais plus partie des hypothèses que les cadres de Shell appliquaient pour comprendre les soubresauts du marché du pétrole (Jefferson, Voudouris, 2011).

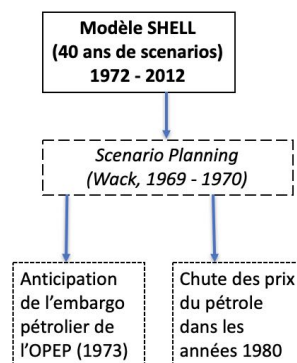
Cette nouvelle perception, ils la doivent principalement à Pierre Wack, surnommé le "Père des scénarios Shell". Dans son article *Scénarios, shootings the rapid*, publié en 1985 par la Harvard Business Review, Wack affirme que " *les scénarios traitent de deux mondes : le monde des faits et le monde des perceptions. Ils explorent les faits mais ciblent les perceptions dans la tête des décideurs*" (1985, p. 140). Leur but est de rassembler et de transformer des informations stratégiquement importantes en nouvelles perceptions. Ce processus de transformation n'est pas anodin, le plus souvent, il ne se produit pas, mais lorsqu'il se produit, il s'agit d'une expérience créative qui débouche sur des visions stratégiques hors de portée de l'esprit. Le scénario planning nous permet d'imaginer différentes possibilités et de développer des plans pour y faire face (Fig. 9).

Figure 9a : Global scenarios



Source : Wack (1984, p. 93)

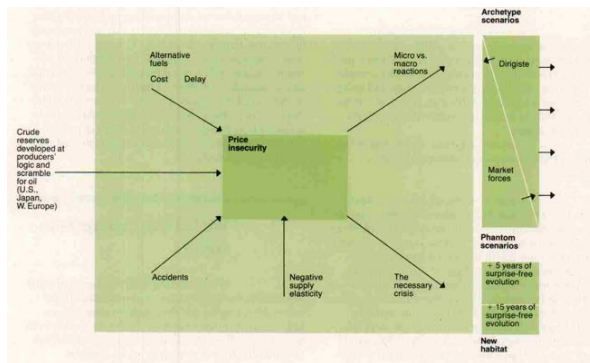
Figure 9b : Shell Model



Source : Les auteurs

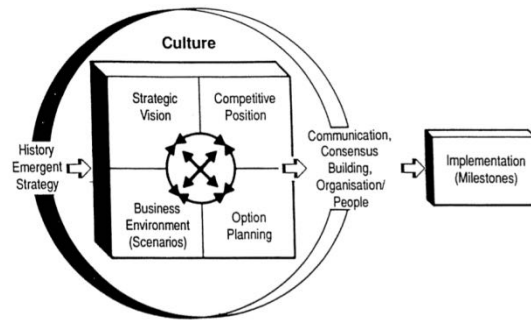
C'est cette approche qui a été développée au sein de la compagnie Shell et qui lui a permis de concevoir les scénarios "as a practical tool for systematic thinking in teams about the future" (Schoemaker, Van Der Heidjen, 2011, p. 166). Les scénarios donnent à une certaine crédibilité de la vision stratégique (sommet de l'entreprise) et fournissent une analyse détaillée à tout un ensemble d'options stratégiques (Fig. 10).

Figure 10a : Scénarios proposés par Wack Shell



Source : Wack (1985, p. 87)

Figure 10b : Les scénarios déclinés par



Source : Schoemaker, Van Der Heidjen (2011, p. 165)

D'un point de vue méthodologique, cette approche met l'accent sur deux points : (i) les scénarios décrivent des mondes différents, et pas seulement des résultats différents dans le même monde, (ii) l'objectif n'est pas tant d'avoir un scénario qui fonctionne, mais d'avoir un ensemble de scénarios qui mettent en évidence les principales forces motrices du système, leurs interrelations et les incertitudes critiques. L'utilisation de scénarios est particulièrement efficace lorsque : (a) l'incertitude est élevée, (b) des changements importants sont prévus, (c) une nouvelle stratégie à long terme a été conçue, (d) l'analyse des tâches cognitives révèle un problème récurrent dans un processus en cours, (e) les pratiques de modélisation démontrent un résultat inattendu, ou (f) des perspectives contradictoires conduisent à des attentes radicalement différentes. Cette méthode est d'un grand intérêt lorsque la prise de décision englobe des questions sociales, économiques, politiques, technologiques et environnementales. Le scenario planning permet à un groupe pluridisciplinaire d'identifier les questions centrales à traiter et de construire des récits sur l'avenir qui intègrent le spectre le plus large possible d'incertitudes et de tendances.

Dans ce qui suit, nous définirons un scénario comme (1) une description d'une situation future possible (futur conceptuel), (2) incluant les voies de développement qui peuvent conduire à cette situation future. L'objectif est de générer une orientation concernant les développements futurs à travers certains facteurs clés pertinents (key drivers) et certaines limites (leverage points). Le scénario a tout d'abord une fonction exploratoire (il sert à systématiser et à approfondir la compréhension existante des développements, conditions et influences contemporains). Le processus explore les développements futurs possibles en prenant le présent comme point de départ. La

question centrale est "Et si ?". Mais il peut également avoir une fonction normative, notamment lorsque le scénario est capable de produire un effet transformateur (un environnement futur initialement inconnu peut être transformé en un environnement futur dans lequel les développements sont assemblés en scénarios). Ce processus permet d'identifier des futurs souhaitables ou d'étudier comment réaliser des conditions futures. La question centrale est " Comment y arriver ? ".

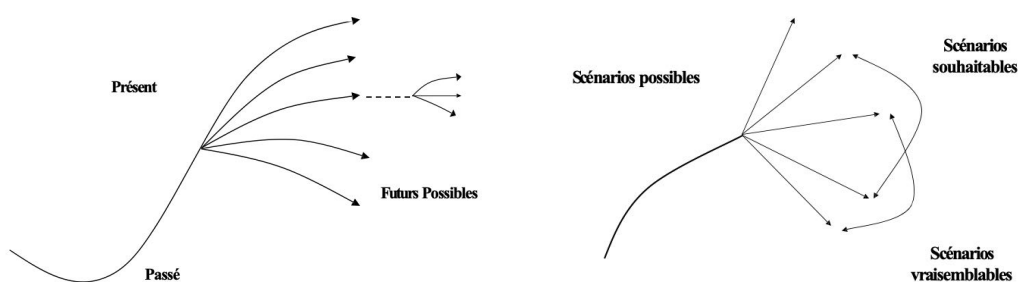
Le scénario planning se présente ainsi comme une technique de prospective utilisée pour l'analyse et la planification stratégiques à moyen et long terme. Elle est utilisée pour développer des politiques et des stratégies qui sont robustes, résilientes, flexibles et innovantes (FHSC, 2009). Les scénarios sont des histoires ou des récits (Schwartz, 1991) se déroulant dans le futur, qui décrivent comment le monde pourrait être, par exemple, en 2050. Ils explorent comment le monde changerait si certaines tendances se renforcent ou s'atténuent (approche que l'on retrouve dans la logique des boucles de polarité en dynamique des systèmes) ou si divers événements se produisent. Normalement, un ensemble de scénarios est proposé (entre deux et cinq) représentant différents futurs possibles, associés à différentes tendances et événements. Ces scénarios sont ensuite utilisés pour examiner ou tester une série de plans et d'options politiques : la conclusion est généralement que différents plans sont susceptibles de mieux fonctionner dans différents scénarios. Les scénarios peuvent également être utilisés pour stimuler le développement de nouvelles politiques, ou comme base d'une vision stratégique. Ils constituent également un moyen utile d'identifier les indicateurs d'alerte précoce qui signalent une évolution vers un certain type d'avenir. À tout moment, il existe un nombre infini de scénarios futurs possibles. Le scénario planning ne tente pas de prédire lesquels se produiront, mais identifie, par le biais d'un processus formel, un ensemble limité d'exemples de futurs possibles qui constituent un point de référence précieux pour évaluer les stratégies actuelles ou en formuler de nouvelles.

La prospective

La prospective, remise au goût du jour par Gaston Berger (1957, 1959), consiste à regarder au loin, à discerner quelque chose en avant : *"Avant d'être une méthode ou une discipline, la prospective est une attitude. C'est-à-dire que l'objectif doit ici précéder le substantif. Le sens de prospectif est évident. Formé de la même manière que rétrospectif, ce mot s'oppose à lui pour signifier que nous regardons en avant et non plus en arrière. Une étude rétrospective se tourne vers le passé, une recherche prospective vers l'avenir"* (1959, p. 20). Pierre Massé ajoute que si c'est une attitude qui refuse tout aussi bien la croyance aveugle que le scepticisme paralysant, la prospective est également *"une méthode qui cherche à se définir par rapport à la Prévision"* (1959, p. 92). Quelques années plus tard, Michel Godet, l'un des ambassadeurs français de la démarche prospective, précisera que *" l'attitude prospective est née d'une révolte de l'esprit contre le joug du déterminisme et le jeu du hasard "* (2007, p. 6). C'est donc tout naturellement qu'elle se présente comme

le rapprochement entre la méthode des scénarios (scénario planning) et la planification stratégique (Strategic planning), permettant aux entreprises de passer de la réflexion prospectiviste à la déclinaison d'actions stratégiques (Godet, 1990). La prospective devient tour à tour une aptitude de l'esprit (combinaison d'imagination et d'anticipation), un comportement (volonté d'agir, refus du fatalisme) et une compétence (elle nécessite l'utilisation d'outils) réunis pour envisager l'avenir plus sereinement. Cette façon de penser l'avenir permet de se situer par rapport au passé et de donner du sens au présent (Fig. 11). En cela, la prospective se distingue de la prophétie (qui appartient aux gourous) et de la prévision (trop teintée de données quantitatives et de tendances extrapolées).

Figure 11 : Scénarios possibles, souhaitables et vrais



Source : Godet (1977, 1994)

Selon Michel Godet (1983), toute réflexion prospective serait influencée par les 7 idées clés suivantes : (1) éclairer l'action présente à la lumière de l'avenir (approche préventive, anticipation des problèmes futurs) ; (2) explorer des futurs multiples et incertains (le futur ne peut être considéré comme une extension du passé) ; (3) adopter une vision globale et systémique² (les phénomènes à étudier sont complexes et interdépendants) ; (4) prendre en compte les facteurs qualitatifs et les stratégies des acteurs ; (5) se rappeler constamment que l'information et la prévision ne sont pas neutres ; (6) adopter le pluralisme et la complémentarité des approches ; (7) remettre en question les idées préconçues.

La prospective, en tant que réflexion pour éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles, impose une certaine anticipation (Hatem, 1993), en raison des effets conjugués de deux forces en présence. D'un côté, l'accélération du changement technique, économique et social nécessite une vision à long terme. De l'autre, les facteurs d'inertie liés aux structures et aux comportements commandent de "semmer maintenant pour récolter demain" (Godet, 1993, p. 10). Le plus souvent, les forces du changement et les forces d'inertie s'opposent et génèrent une résistance au

² Michel Godet considère que le mot "prospective" reste indissociable du mot "système" (1977, p. 62). Un système se présente sous la forme d'un ensemble d'éléments en relation. Le tissu relationnel entre les éléments, constitue la structure du système. L'analyse structurelle a pour objet de mettre en lumière la structure entre les variables qualitatives, quantifiables ou non, qui caractérisent le système.

changement. Une démarche prospective est donc nécessaire afin d'éviter que les fortes inerties se transforment en rigidités.

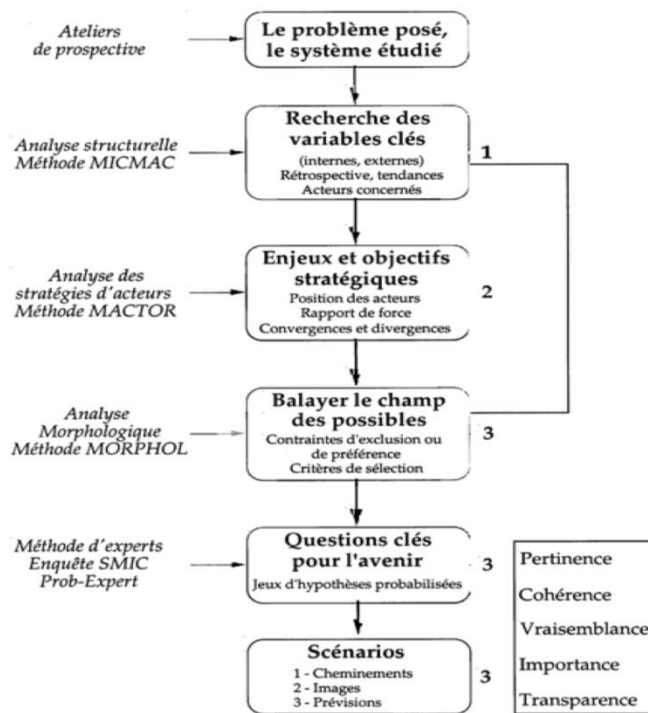
Pour mettre en œuvre une telle démarche, il convient d'utiliser *la méthode des scénarios* (Godet, 1977). Cette dernière tente de concevoir des futurs possibles et d'explorer les chemins qui y mènent. Elle combine deux approches : (i) l'approche littéraire, qui s'attache à construire des scénarios par la réflexion et le raisonnement ; (ii) l'approche formalisée (modèle), qui alimente la réflexion sur les scénarios et permet de vérifier leur validité. Cette approche intégrée comprend deux phases : la construction du noyau (délimitation du système, détermination des variables essentielles, analyse explicative du rôle joué par ces variables) et l'élaboration des scénarios (rapports de forces entre les acteurs, jeux d'hypothèses probabilisées sur certains domaines déterminants, construction de scénarios - scénario de référence et plusieurs scénarios contrastés). La méthode des scénarios consiste "à rendre les mécanismes d'évolution compatibles avec les jeux d'hypothèses retenus, à décrire de manière cohérente le cheminement entre la situation actuelle et l'horizon choisi, en suivant l'évolution des principales variables du phénomène que l'analyse structurelle avait identifiées" (Godet, 1983, p. 118). Afin de rendre cette méthode opérationnelle, des outils (applications informatiques) ont été développés à chacune des grandes étapes (Fig. 12) :

- MIMAC : identifier les variables, décrire les relations entre variables et mettre en avant les variables clés, il s'agit d'une analyse structurelle d'un modèle³ ;
- MACTOR : définir les acteurs et comprendre leur stratégie, analyser les influences entre acteurs et évaluer les rapports de force, identifier les enjeux stratégiques et les objectifs associés, positionner chaque acteur sur chaque objectif, identifier les convergences et les divergences, formuler des recommandations stratégiques cohérentes et poser les questions clés pour le futur⁴ ;
- MORPHOL : balayer le champ des possibles et réduire l'incertitude ;
- SMIC : formuler des hypothèses et choisir des experts, probabiliser des scénarios. Il s'agit notamment de mobiliser des techniques d'enquêtes et des séries d'interviews afin d'interroger un panel d'experts (Godet, 1983).

³ L'analyse structurelle comporte trois niveaux de lecture (Godet, 1977) : (i) *L'appréhension* consiste à repérer les frontières du système dans lesquelles le phénomène étudié, considéré comme un sous-système, est impliqué. Cela revient à établir la liste des variables qui caractérisent ce sous-système et son environnement. (ii) *La compréhension* entend recenser définitivement les variables caractérisant le système et repérer leurs relations dans une matrice d'analyse structurelle. (iii) *L'explication* permet de mettre en évidence la structure du système et propose une lecture de la matrice. Cette lecture comprend l'étude des effets directs, l'étude des effets indirects et l'analyse des effets feed-back (de ce point de vue, l'analyse structurelle rejoint les enseignements de la *dynamique des systèmes*, Forrester, 1968).

⁴ La méthode MACTOR a fait l'objet d'un certain nombre d'utilisations (Godet, 2001) : EDF (jeux des acteurs sur la maîtrise des coûts du nucléaire), SNCF (jeux des acteurs sur la concurrence entre modes de transport), la Datar (avenir des espaces ruraux).

Figure 12 : La méthodes des scénarios



Source : Godet (1994, p. 168)

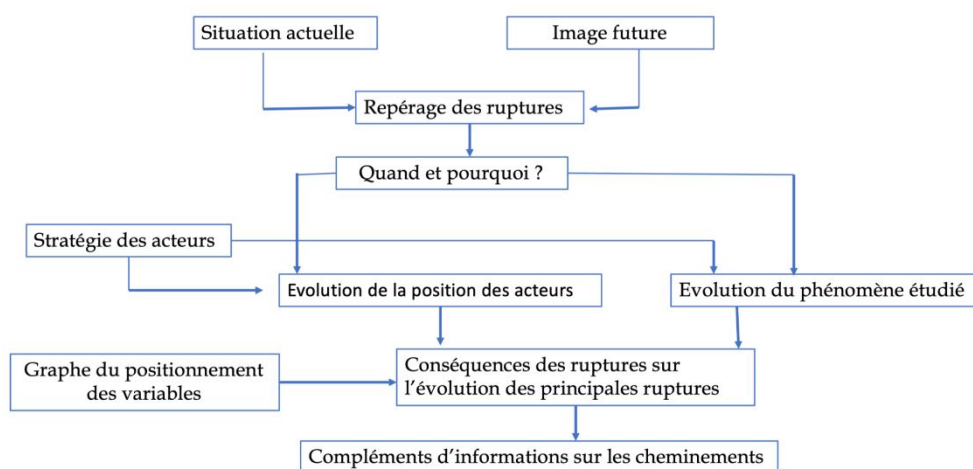
Plus récemment, plusieurs disciplines (Histoire des techniques, sociologie, anthropologie...) sont venues étayer la démarche prospectiviste (Gaudin, 2013, 2005). Une piste intéressante renvoie aux sciences cognitives, plus précisément aux travaux d'Harold Garfinkel (1967, 2007) et d'Edmund Husserl (1913, 1959), rassemblés sous la bannière de la phénoménologie et de l'ethnométhodologie : "Nous affirmons, à titre de politique de recherche, que la réalité objective des faits sociaux, en tant que réalisation continue des activités concertées de la vie courante... est le thème dominant des recherches en ethnométhodologie. Celles-ci analysent les activités de la vie quotidienne en tant que méthodes des membres pour rendre ces mêmes activités visiblement rationnelles et rapportables à toutes fins pratiques, c'est à dire descriptibles (observables et rapportables) comme organisations des activités ordinaires de tous les jours" (1967, 2007, p. 45).

La prospective s'apparenterait ainsi à la construction de récits racontables de l'avenir. Comme le précise Thierry Gaudin, le qualificatif de racontable signifie "qui ne soit pas en contradiction avec les résultats de la science" mais également "qui soit intelligible et audible pour le public auquel il s'adresse" (Gaudin, 2013, p. 5). Au final, la démarche prospective requiert de s'appuyer sur les deux approches mentionnées plus haut. (i) Une étude documentaire visant à définir le problème, à identifier les faits, les variables, les données (économiques, sociales, environnementales, politiques, culturelles...) et les facteurs qui influencent l'avenir. Une matrice Cross-Impact permet de synthétiser les résultats. Des entretiens auprès d'experts extérieurs sont susceptibles de conforter certaines intuitions ou de valider des hypothèses (la méthode Delphi consiste à consulter des experts scientifiques et techniques, et de traiter leurs avis comme des

oracles, faute de pouvoir vérifier la justesse de leurs intuitions). Ces consultations peuvent s'appuyer sur une grille préétablie ou alors sur des entretiens approfondis. (ii) Le passage au scénario via les récits.

Afin d'éviter que les futurs possibles ne soient que de simples extrapolations du passé, Thierry Gaudin propose *un procédé : "la prospective de rupture"* (Papon, 2000). Concrètement, cela revient à distribuer à chaque participant, quatre post-it, en leur demandant d'inscrire sur chacun un facteur de rupture. On recueille les post-it, on les présente à tous les participants, puis on regroupe ceux qui se ressemblent. Un tableau de la perception du changement par le groupe fera généralement apparaître quelques thèmes dominants. Pour chaque thème, un groupe de participants est chargé de l'illustrer par un récit romancé et racontable (au sens de l'ethnométhodologie). Ce qui prendra la forme d'un scénario, sera présenté en deux ou trois pages, puis exposé aux autres groupes. Dans le *Rapport Vigie 2020*, Cécile Désaunay et François de Jouvenel proposent un panorama de 16 scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050 qui fournissent des esquisses d'un paysage mondial en pleine turbulence. Le rapport explore des ruptures profondes et très probables (le réchauffement climatique, les crises sanitaires, des migrations de masse...) ou des ruptures plus superficielles (restructuration du commerce mondial autour de deux zones de libre-échange, l'apparition de cités- régions autonomes...). Ces scénarios de rupture ne reposent ni sur des prédictions, ni sur des prévisions, ils visent à éclairer le monde dans lequel nous vivons pour nous permettre d'imaginer le monde que nous souhaiterions voir (la figure 13) propose d'intégrer les ruptures entre une situation observée et une image du futur dans la méthode des scénarios proposée par Michel Godet). Ces scénarios, réalisés indépendamment les uns des autres, sont complétés par des récits de fiction qui ouvrent la discussion sur le monde des imaginaires (Atallah [2020] mobilise la science-fiction pour raconter le capitalisme).

Figure 13 : Scénarios, repérage des ruptures, cheminements



Source : Godet (2000)

Un autre procédé du scénario récit consiste à s'appuyer sur *la technique des 7 questions de SAMI Consulting*. Cette technique a été utilisée à l'origine par Shell pour des examens internes de stratégie. Elle a ensuite été développée pour des applications plus larges lorsque Shell et l'Université de St Andrews ont créé conjointement SAMI Consulting. Les sept questions ont pour objectif d'amener les participants à sortir du rôle qu'ils ont l'habitude de jouer tous les jours et à initier des déplacements (changement de décor ou de rôle). Il s'agit d'inviter les participants à parler de ce qu'ils considèrent comme important pour le futur, en se plaçant d'un point de vue, clairvoyant, optimiste, pessimiste, de sa situation interne, regard rétrospectif, regard prospectif et de l'épitaphe (Fig. 14).

Figure 14 : Les sept questions de SAMI Consulting

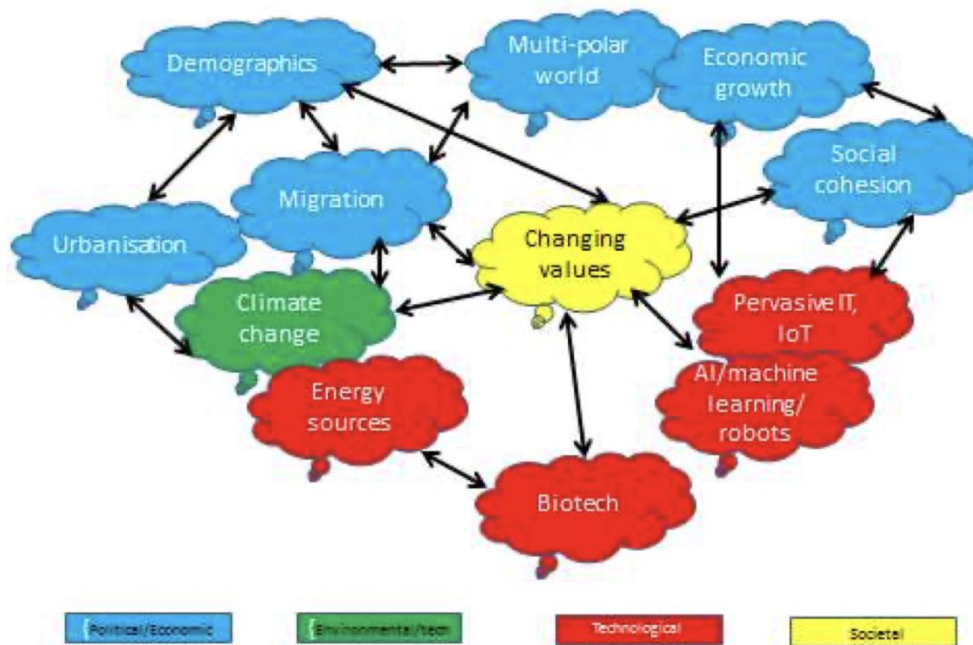
1. **Clairvoyant.**
If you could spend some time with someone who knew the future of, a clairvoyant or oracle if such existed, what would you want to know?
(i.e. what are the critical issues?)
2. **An optimistic outcome**
Optimistic but realistic. If things went well, how would you expect the to develop and what would be the signs of success?
3. **A pessimistic outcome**
How could the environment change to threaten? How could deteriorate?
4. **The internal situation**
From your knowledge of the culture, organisation, systems and resources (including people), which impact on, how would these have to be changed to achieve the optimistic outcome?
5. **Looking back 10/20 years**
What factors shaped as it is today?
6. **Looking forward**
What decisions need to be made in the near term to achieve the desired long-term outcome for?
7. **The Epitaph**
If you had a mandate, free of all constraints, what more would you do to ensure a successful future for?

Source : <https://samiconsulting.co.uk/techniques-seven-questions/>

Une fois, l'approche documentaire et le scénario combinés, il est possible d'identifier les facteurs clés de changement importants dans une réflexion prospective. Duckworth, Dunn, Ringland, Schultz et Williams (2018) ont identifié 12 facteurs de changement majeurs (démographie, monde multipolaire, croissance économique, cohésion sociale, changement climatique et environnemental, sources d'énergie, généralisation des technologies de l'information, présence des machines d'apprentissage, biotechnologie, migrations, urbanisation et changements dans les valeurs personnelles) qui relèvent des domaines économique, environnemental, technologique et sociétal (Fig. 15).

Pour chacun de ces moteurs, il est possible d'examiner l'effet qu'il a aujourd'hui, en 2030 et en 2050. L'analyse des facteurs de changement permet de répondre aux deux questions suivantes : (1) quelle est la compatibilité d'un scénario avec le contexte économique, environnemental, technologique et sociétal que l'on observe ? (2) quels sont les présupposés non exprimés dans un scénario relatif à la dynamique observée ? En d'autres termes, qu'est ce qui fait changer les choses, pourquoi et comment ?

Figure 15 : Les 12 facteurs de changements majeurs dans une réflexion prospective

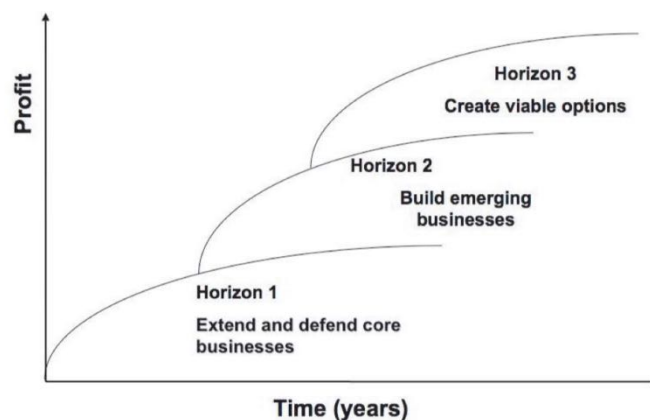


Source : Duckworth, Dunn, Ringland, Schultz, Williams (2008, p. 3)

La méthode des Three Horizons

Le modèle Three Horizons a été présenté pour la première fois dans un ouvrage de Mehrdad Baghai, Stephen Coley et David White (1999), *The Alchemy of Growth*. Les auteurs proposaient aux managers de s'engager simultanément dans des perspectives à court, moyen et long terme (Diemer, 2021), présentées comme une série de courbes évolutives, chacune ayant plus de valeur que la précédente (Fig. 16).

Figure 16 : Le modèle Three Horizons

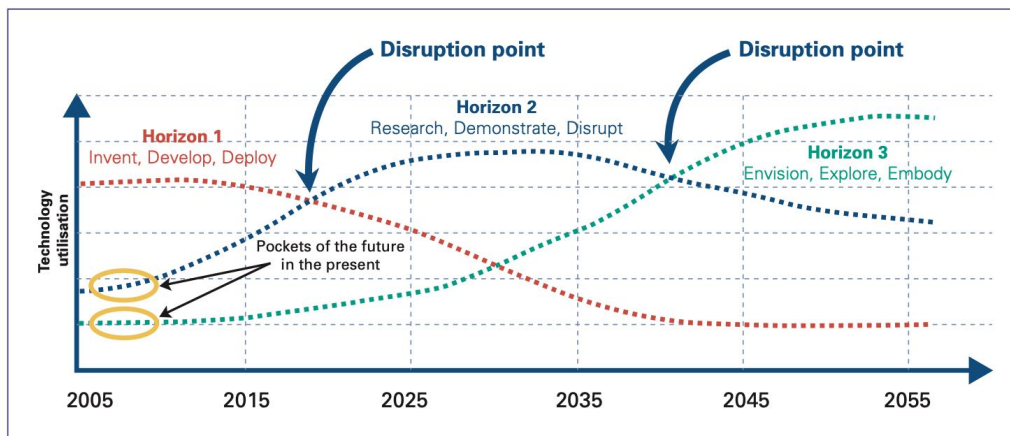


Source : Mehrdad, Coley & White (1999)

Par la suite, le modèle a été adapté par Sharpe et Hodgson (2006) afin de répondre à la demande du gouvernement britannique qui souhaitait lancer un projet de prospective pour les systèmes d'infrastructures intelligents. Il s'agissait notamment de répondre à la question suivante : comment mettre en place une feuille de route technologique sur longue période (50 ans) dans laquelle les technologies ne pouvaient pas être décrites mais où leurs caractéristiques (probables) pouvaient être identifiées ou anticipées : *"how science and technology could, over the next 50 years, be used to deliver infrastructure for transport, and its alternatives, that would be sustainable, robust and safe"* (Sharpe, Hodgson, 2006, p. 1).

L'étude comportait une modification importante du modèle. Plutôt que de reprendre les horizons sous la forme de vagues d'évolution successives, ils ont préféré caractériser les trois horizons comme existant en parallèle, mais avec différents niveaux d'influence sociale et publique (Fig. 17).

Figure 17 : Three Horizons pour anticiper les développements technologiques



Source : Sharpe & Hodgson (2006, p. 3)

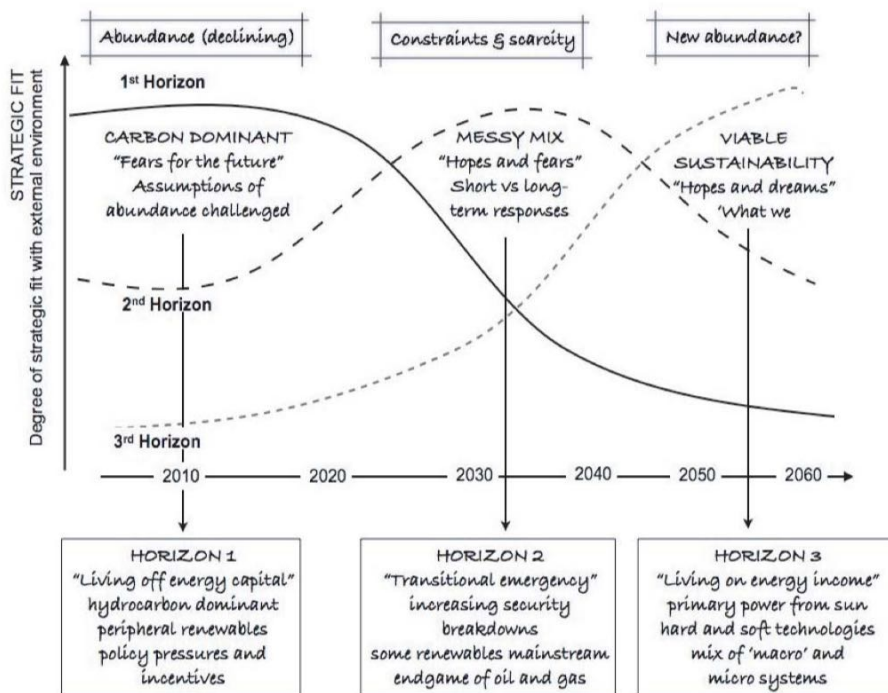
L'horizon 1 (Inventer, développer, déployer) qui se situe à environ une décennie dans le futur, couvre le déploiement de capacités techniques nouvelles (mais comprises) pour résoudre les problèmes et saisir les opportunités au sein des systèmes sociotechniques dominants. Il peut encore impliquer de nouvelles inventions, toutefois ces dernières font partie de l'art connu par les experts du domaine (exemple de l'application de la loi de Moore à l'industrie des semi-conducteurs : le nombre de composants sur les puces doublera tous les 18 mois environ).

L'horizon 2 (Recherche, Démonstration, Perturbation) qui se situe à environ 25 ans dans le futur, considère que de nouveaux modèles d'utilisation des technologies vont perturber le statu quo. Les découvertes peuvent survenir à tout moment, redéfinissant le sens du possible (exemple de l'émergence du World Wide Web). La validité de la vision prospective de l'horizon 2 repose en grande partie sur la recherche scientifique évaluée par les pairs et la culture des grands défis.

L'horizon 3 (Envisager, Explorer, Incarner), qui se situe à environ 50 ans dans le futur, stipule que nous cherchons à regarder au-delà de l'horizon de la science connue et donc à imaginer des inventions imprévisibles. Ceci peut générer une discontinuité fondamentale dans l'histoire (exemple de l'intelligence artificielle). L'horizon 3 suppose l'exploration d'un territoire inconnu, l'usage d'une carte précisant notre engagement à atteindre un objectif (ou un résultat) avec des ressources importantes. Ce type de vision est résolument tourné vers l'avenir cependant il est également possible de faire entrer l'avenir dans le présent de telle sorte qu'il attire la recherche et l'invention autour de lui, en vue d'atteindre de nouveaux objectifs (exemple d'une communauté urbaine à 100% énergie propre). Ces objectifs sont finalement des objectifs sociaux qui influencent l'orientation du développement technologique.

Par la suite, la méthode est devenue un outil permettant de comprendre la relation entre les conditions initiales (instant T0) et les mondes dépeints dans les 50 prochaines années. Ceci afin de s'assurer que les changements probables des différents éléments du système global représentés dans chaque scénario étaient plausibles (Curry, Hodgson, Kelnar, Wilson, 2006). Le modèle Three Horizons a été utilisé de manière plus extensive sur une série de problèmes du futur (notamment la mise en place des ODD, Collste & al., 2019). Le diagramme ci-dessous (Fig. 18) présente une application du modèle Three Horizons à la question de la sécurité énergétique (Sharpe, Hodgson, Page, 2006).

Figure 18 : Three Horizons and Energy Security



Source : Sharpe, Hodgson, Page (2006), Curry, Hodgson (2008)

L'horizon 1, décrit par Sharpe, Hodgson et Page (2006), est essentiellement négatif. Les hypothèses sous-jacentes d'abondance énergétique qui l'ont façonné sont remises en question. Cela crée un espace dans lequel le changement est largement considéré comme inévitable, mais il n'y a pas d'accord sur le type de changement.

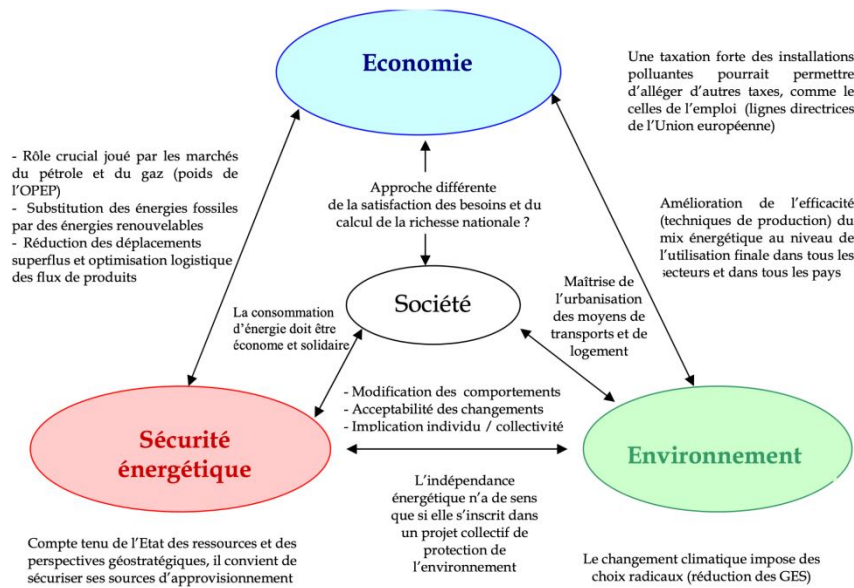
L'horizon 2 est l'avenir émergent à court et moyen terme, dans lequel nous connaissons les limites de notre situation, mais nous ne disposons pas des ressources nécessaires pour y répondre efficacement. L'accord politique est faible, la technologie est immature.

L'horizon 3 représente une articulation d'un futur possible dans lequel les limitations ont été surmontées. Il s'agit d'une vision positive de l'avenir (exemple d'un monde à 100% énergie renouvelable). Mais ce n'est pas un point de vue universellement partagé. D'autres défendent des versions concurrentes au scénario d'Horizon 3 (par exemple, le thorium, plus abondant que l'uranium, est présenté comme le nucléaire propre, ce qui relance les projets d'investissement dans le nucléaire).

Replacée dans un contexte plus actualisé (2050), l'articulation entre les trois horizons permet de visualiser les enjeux en matière de choix énergétiques. Dès lors que l'on se trouve dans l'horizon 1, on peut appréhender aux abords de ses limites, les éléments des futurs systèmes de l'horizon 3. Il s'agira notamment des technologies émergentes, des institutions sociales alternatives possibles et des modèles économiques différents. Cependant, ces éléments sont confrontés à deux défis s'ils doivent remplacer le système dominant représenté par l'horizon 1. Le premier est qu'ils doivent être mieux développés et mieux connectés, en montrant notamment qu'ils peuvent fonctionner à l'échelle sociale requise. Le second est qu'ils doivent gagner une bataille de valeurs sur le futur système d'approvisionnement énergétique. Dans l'horizon 2, il y a des conflits entre des groupes qui attachent des valeurs différentes au problème (sécurité d'approvisionnement vs résilience vs impact carbone vs prix bas vs sobriété). Les informations dont disposent tous les groupes sur l'avenir sont nécessairement incomplètes et, par conséquent, les revendications d'un groupe en faveur de l'avenir qu'il préfère sont inévitablement remises en question par les autres (on retrouve ici les principales oppositions : pro/anti-nucléaire, abandon définitif ou réduction du charbon, pro - anti hydrogène ...).

Par ailleurs, la concurrence entre ces valeurs est également influencée par les valeurs et les hypothèses qui ont forgé le système de l'horizon 1, car un système dominant ne disparaît pas, il ne s'estompe que lentement. Ces voix se font encore entendre avec force dans l'horizon 2. Ainsi, la nécessité de maintenir la sécurité de l'approvisionnement en énergie (Fig. 19) est souvent considérée comme un prérequis politique, toutefois elle a également profondément modifié le cadre conceptuel du développement durable (Diemer, 2008).

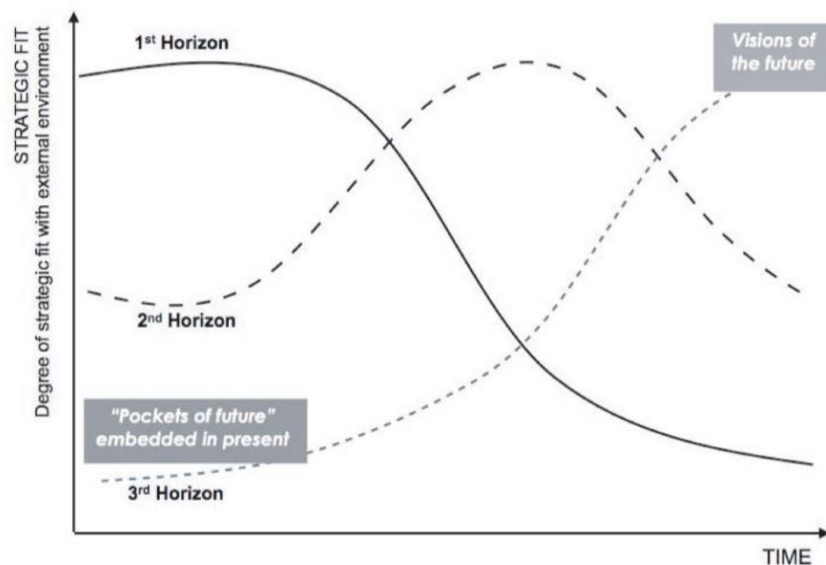
Figure 19 : La sécurité énergétique au prisme du développement durable



Source : Diemer (2008, p. 6)

Pour conclure, notons qu'explorer le futur par l'approche des Three Horizons, revient à les présenter sur un axe composé du temps en abscisse et du niveau d'adéquation stratégique avec l'environnement externe (de l'organisation ou du réseau) en ordonnée (Fig. 20). Ce dernier peut également être évalué en termes de degré d'acceptation des idées au sein de la société dans son ensemble (cela renvoie aux normes politiques, économiques, organisationnelles et culturelles ancrées dans une organisation ou un réseau).

Figure 20 : Le futur via l'approche des Three Horizons



Source : Curry, Hodgson (2008, p. 4)

L'horizon 1, à son extrémité gauche, est le monde dans lequel nous nous trouvons aujourd'hui, c'est la manière dont il est exprimé et représenté dans le discours dominant. La courbe en S qui s'éloigne vers la droite représente l'échec de tout modèle s'il ne s'adapte pas au changement, ce qui est, bien sûr, un aspect important de la théorie des systèmes ouverts. L'horizon 3, en revanche, représente un monde qui est souhaité par ceux qui proposent un modèle alternatif (un nouveau cadre politique, culturel ou institutionnel, un paradigme différent). En se projetant vers l'avenir, l'horizon 3 présente des propositions de transformation et changement profonds. Dans le présent, ces propositions peuvent être considérées comme des questions émergentes, et les preuves de leur existence sont protéiformes (groupes de militants, étude de faisabilité d'une agence, projections d'un institut de recherche, stratégie d'une entreprise...). En raison de sa nature (changement de cap), la trajectoire de l'horizon 3 est profondément influencée par les valeurs et d'une certaine manière, par une vision utopique de l'avenir. Dans l'horizon 2, nous parvenons à saisir ce qui est attendu dans l'horizon 3 et ce qui est mis en œuvre dans l'horizon 1. Dans le cas de l'énergie, les conflits peuvent porter sur des termes (énergie verte et énergie propre, énergie décentralisée et énergie centralisée, efficacité énergétique et sobriété énergétique, systèmes énergétiques autonomes et systèmes énergétiques intégrés).

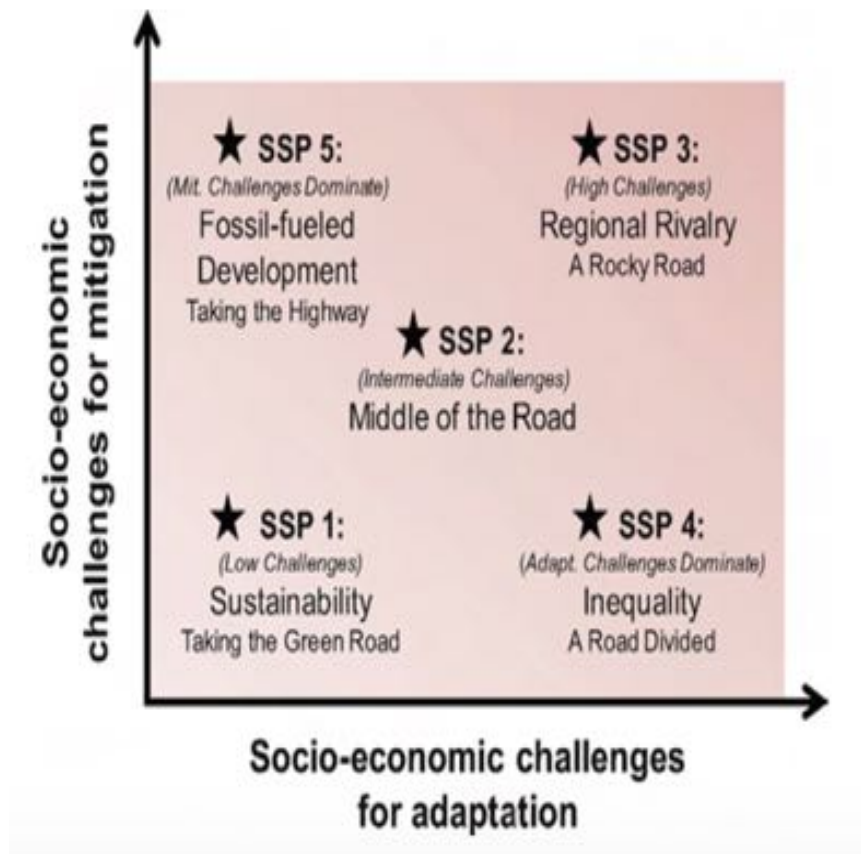
Les Narratives for Shared Socioeconomic Pathways

Les Narratives for Shared Socioeconomic Pathways (NSSP) constituent le nouveau cadre de scénario qui est utilisé ces dernières années dans les travaux sur le changement climatique. Les Shared Socioeconomic Pathways (SSP) sont définis comme " *des voies de référence décrivant des tendances alternatives plausibles dans l'évolution de la société et des écosystèmes sur une échelle de temps d'un siècle, en l'absence de changement climatique ou de politiques climatiques* " (O'Neill, 2014, p. 387). Ils se composent de deux éléments : (i) un scénario narratif et (ii) un ensemble de mesures quantifiées. Les SSP sont dits de référence, dans le sens où ils supposent l'absence de changement climatique ou d'impacts climatiques, et l'absence de nouvelles politiques climatiques. Le but ultime du processus global de développement de scénarios est de produire des scénarios intégrés qui incluront les aspects socio-économiques et environnementaux.

L'une des questions clés de ce processus est de savoir comment sélectionner un ensemble limité de SSP pour servir le plus efficacement possible les objectifs présents dans l'architecture de la matrice de scénarios. Deux approches sont généralement adoptées. La première combine un petit nombre de facteurs socio-économiques clés en un ensemble de trajectoires plausibles mettant en évidence les différentes directions dans lesquelles le monde pourrait évoluer (Nakicenovic et al., 2000). La seconde adopte l'approche inverse de la première, en identifiant d'abord les résultats qui intéressent la recherche sur le changement climatique, puis les combinaisons de facteurs socio-économiques clés qui sont susceptibles de produire ces résultats, (Raskin et al. 1998). O'Neil et al (2014, 2017) ont utilisé cette dernière approche pour

s'assurer que le choix des SSP produisait un ensemble de voies de développement aussi pertinentes que possibles pour l'objectif du cadre de scénarios (qui est d'explorer l'incertitude de l'atténuation, de l'adaptation et des impacts associés aux changements climatiques et socio-économiques). Pour ce faire, les auteurs ont défini un espace de résultats dans lequel les défis socio-économiques et environnementaux sont représentés sur deux axes : un axe décrit les défis liés à l'adaptation, l'autre les défis liés à l'atténuation (l'espace de défis à couvrir par les SSP est divisé en cinq "domaines" avec un SSP situé dans chaque domaine, représenté par une étoile). L'hypothèse ici est que pour caractériser les incertitudes relatives aux implications du changement climatique en matière d'atténuation ou d'adaptation, il est nécessaire de décrire les conditions socio-économiques futures qui rendraient l'atténuation et l'adaptation relativement difficiles ou relativement faciles (O'Neill, 2017). Dans les axes de la figure 16, le terme socio-économique représente un large éventail d'aspects de la société, qui renvoie aux systèmes socio-écologiques. Il s'agit notamment des aspects démographiques, politiques, sociaux et culturels, des aspects institutionnels, du mode de vie, de l'économie et de la technologie, ainsi que des conditions des écosystèmes et des services écosystémiques qui ont été affectés par l'activité humaine, comme la qualité de l'air et de l'eau, la biodiversité, ainsi que la forme et la fonction des écosystèmes.

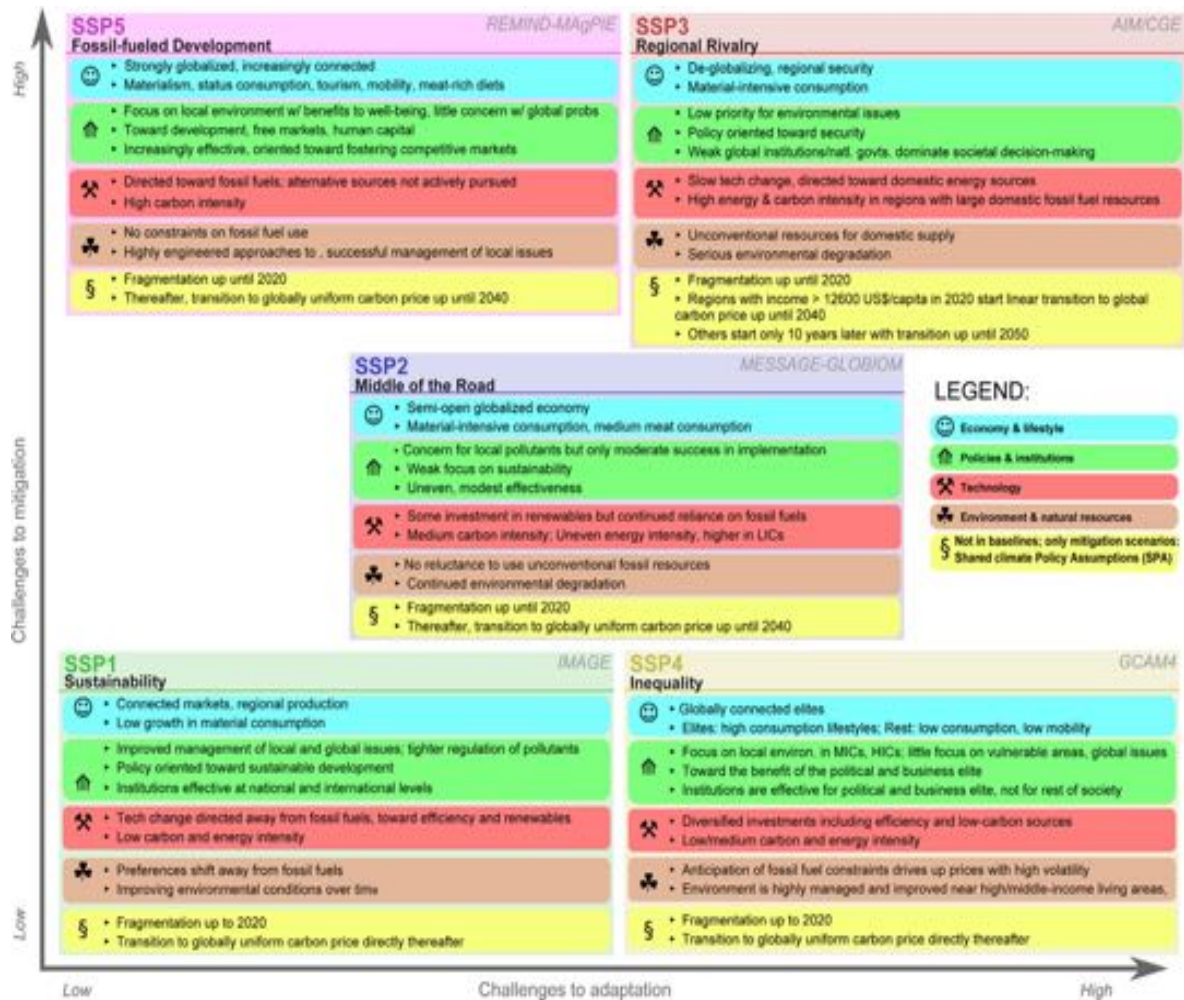
Figure 21 : Les trajectoires socio-économiques partagées appliquées au couple climat - énergie



Source : O'Neil et al. (2014, p. 391)

Cinq SSPs différents ont été proposés pour couvrir l'espace des défis d'adaptation et d'atténuation (voir figure 22).

Figure 22 : l'identification d'éléments et d'hypothèses narratifs spécifiques



Source : Bauer and al. (2017)

Pour chaque axe de défis, un ensemble de déterminants ont été identifiés par les experts des communautés IAM (Integrated Assessment Models). Six grandes familles de variables ont été jugées importantes à prendre en considération dans les SSP : démographie, développement humain, économie et mode de vie, politiques et institutions (à l'exclusion des politiques climatiques), technologie, environnement et ressources naturelles. Pour les principaux facteurs des défis à l'atténuation, il est fait référence aux facteurs d'utilisation de l'énergie et des terres, au progrès technologique et aux institutions politiques internationales. Dans le cas des défis à l'adaptation, les facteurs institutionnels, l'inégalité future et la pauvreté ainsi que la réalisation ou l'échec possible dans la réalisation des différents objectifs de développement sont considérés comme les variables les plus pertinentes.

Dans le contexte de la nouvelle génération de scénarios, les NSSPs décrivent des mondes qui relèvent les défis d'atténuation et d'adaptation qui sont en liens avec les facteurs de la société, et non avec ceux en lien avec l'ampleur du changement climatique ou à la rigueur de la politique d'atténuation (facteurs qui ne sont pas inclus dans les SSP). Les NSSPs décrivent ainsi des mondes qui ont des défis variés en matière d'atténuation et d'adaptation, construits à partir de déterminants importants associés à des enjeux environnementaux et sociaux économiques. Prises ensemble, ces considérations impliquent une méthode itérative entre les caractéristiques souhaitées des récits complets et l'identification d'éléments et d'hypothèses narratifs spécifiques (Fig. 23).

Figure 23 : l'identification d'éléments et d'hypothèses narratifs spécifiques

Scenarior	Narratif	Défi pour l'atténuation	Défi pour l'adaptation
SSP1 Développement durable	Forte coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie.	Faible	Faible
SSP2 Poursuite des tendances	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.	Moyen	Moyen
SSP3 Rivalités régionales	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.	Elevé	Elevé
SSP4 Inégalités	Développement marqué par de fortes inégalités entre et à l'intérieur des pays. Dégradation de la cohésion sociale et multiplication des conflits. Fossé croissant entre une élite connectée et mondialisée, responsable de la majorité des émissions de GES, et un ensemble fragmenté de populations à faible revenu, peu éduqué et vulnérable au changement climatique. Le secteur énergétique se diversifie entre sources d'énergie fortement carbonées et décarbonées. Les politiques environnementales se concentrent sur les enjeux locaux.	Faible	Elevé
SSP5 Développement conventionnel	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.	Elevé	Faible

Source : Riahi et al. (2017), O'Neill et al. (2015), Bauer et al. (2017)

Quatre récits (SSP1, SSP3, SSP4, SSP5) décrivent des défis élevés ou faibles à l'adaptation et à l'atténuation, correspondant à des développements de trajectoire SSP justifié. Le récit (SSP2) est central, il décrit des défis d'atténuation et d'adaptation modérés. Ce cinquième scénario occupe une place importante dans les NSSPs, la plupart des approches proposées auparavant pour concevoir des scénarios préconisaient un nombre pair pour décourager l'utilisation d'un seul scénario comme cas central (Kok et al., 2006). Ce qui a été en soi un échec, puisque l'utilisateur sélectionnait automatiquement un scénario comme « le plus probable » ou « le plus proche d'une référence de modèle ».

Le scénario central a été proposé, non pas pour qu'il soit considéré comme le plus probable parmi les cinq autres, mais pour garantir que les autres scénarios SSP occupent l'espace leur correspondant sans pour autant dériver vers la partie médiane de l'espace. Ceci reste vrai, si on se réfère à l'évolution historique des émissions de GES qui a souvent suivi des trajectoires proches de la limite supérieure de la fourchette des scénarios d'émissions antérieurs, tels que ceux du SRS (Second Report on Emission Scénario, Nakicenovic et al., 2000).

Le SSP1 : situé dans la partie inférieure de l'axe des abscisses de défi pour l'adaptation et la partie inférieure de l'axe des ordonnées pour le défi de l'atténuation, le SSP1 reste le scénario le plus optimiste. Il décrit un monde qui se dirige vers un développement économique durable et respectueux de l'environnement. Un monde où on verra moins d'inégalité entre les nations. Il y aura moins de consommations de biens matériels.

Le SSP2 : est le scénario medium qui décrit un monde qui restera sur les tendances actuelles. Les institutions mondiales et nationales continuent à déployer des efforts pour la protection de l'environnement et le développement durable mais le bilan restera insuffisant pour atteindre les objectifs du développement durable (ODD). La dégradation des milieux naturels se poursuit, les inégalités de revenus persistent et des défis majeurs continuent à se faire sentir (vulnérabilités des changements sociétaux et environnementaux).

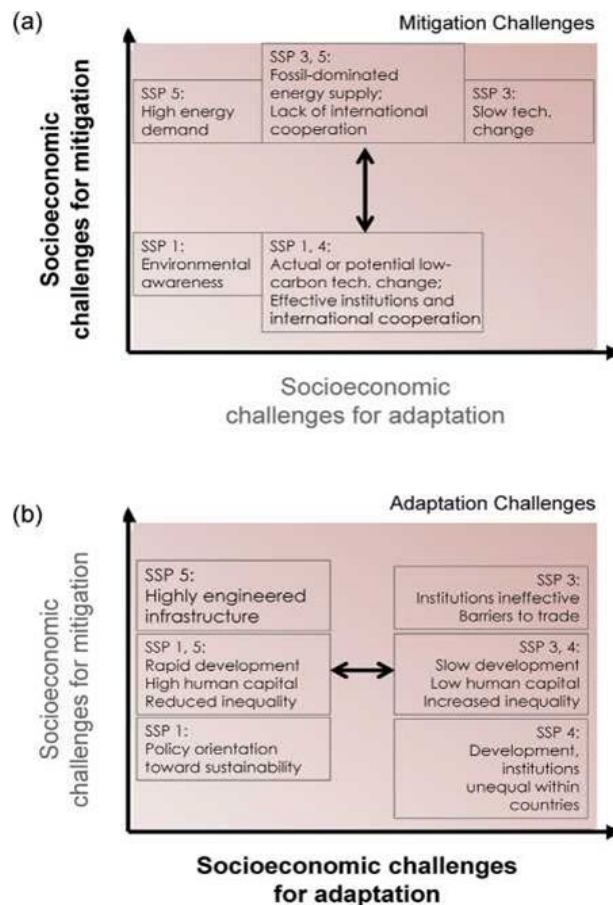
Le SSP3 : dessine une trajectoire cahoteuse dans laquelle le monde sera marqué par la rivalité régionale et les conséquences qui en découlent. Les nationaux se concentreront sur les questions de sécurité interne à l'échelle nationale et régionale. Cet état de fait impactera la croissance économique dont l'évolution sera lente et non respectueuse de la protection de l'environnement.

Le SSP4 est celui de la trajectoire divisée par les inégalités entre les nations et au sein de ces mêmes nations. C'est le scénario qui se place à droite du graphique, une petite élite mondiale serait responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus facile à mettre en place tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.

Le SSP5 est à l'opposé du SSP1. C'est le scénario le plus défavorable qui dessine un horizon dans lequel le monde est caractérisé par une croissance rapide, fondée sur une forte consommation d'énergie fossile polluante et des technologies émettrices de carbone. La hausse du niveau de vie permet en revanche d'augmenter la capacité d'adaptation.

Au regard des résultats des défis d'adaptation et d'atténuation décrits ci-dessus pour chaque SSP, il apparaît clair qu'une étroite relation existe entre les cinq scénarios et par conséquent il reste important de les considérer dans une dimension systémique.

Figure 25 : Les combinaisons particulières de défis représentés par chaque SSP



La figure 25 est un résumé des éléments du SSP qui contribuent à des défis élevés ou faibles à l'atténuation (a) et à l'adaptation (b). Les éléments répertoriés vers le haut ou le bas de l'espace des défis dans la figure (a) s'appliquent aux voies avec des défis élevés ou faibles à l'atténuation, respectivement, tandis que les éléments énumérés vers le côté gauche ou droit de l'espace des défis dans la figure (b) s'appliquent aux voies avec des défis d'adaptation faibles ou élevés, respectivement.

Exemple : un lien étroit existe entre SSP5 et SSP3 qui contribuent tous les deux à des défis élevés d'atténuation. Ceci est dû à la forte consommation des énergies fossiles pour SSP5 et pour SSP3 due à la rivalité régionale et au manque de capacité de coopération internationale pour la protection de l'environnement. A l'opposé, on observe des faibles défis à l'atténuation entre SSP1 et SSP4, ceci est dû à l'orientation générale vers le développement durable pour le SSP1 et aux fortes inégalités au sein et entre les nations dans le SSP4. De même, de grands défis à l'adaptation sont observés dans le SSP3 suite à des institutions inefficaces et des obstacles au commerce et dans le SSP4, marqué un développement lent et de faibles investissements dans le capital humain. En revanche, les faibles défis à l'adaptation sont justifiés dans le SSP5, caractérisé par un fort développement économique et des infrastructures connexes, et pour SSP1 dont la priorité est donnée au développement durable et à l'amélioration des conditions de vie.

Finalement, les scénarios énergétiques ne sont pas des exercices de prévisions, qui cherchent à prédire l'avenir avec la plus grande précision, mais un exercice chiffré d'exploration des futurs possibles, souhaitables et acceptables (David & al., 2014). La « *force des scénarios est qu'ils ne décrivent pas un seul futur, mais que plusieurs futurs réalisables ou souhaitables sont identifiés en parallèle* » (Mietzner et Reger, 2005, p. 235). Ils renvoient à une représentation possible du futur qui décrit le devenir du système énergétique, de l'économie, voire de la société dans son ensemble, sur une géographie donnée, qui peut être régionale, nationale ou internationale. De ce fait, ils permettent d'identifier **les leviers d'action** nécessaires pour la réalisation de ces visions.

Les scénarios énergétiques des grandes institutions internationales

Les transitions énergétiques sont basées sur des visions et des trajectoires propres à chaque Etat et Nation selon les objectifs de sa politique énergétique et les intérêts qui en découlent. Ces scénarios énergétiques ne sont pas des modèles linéaires constitués d'étapes et de phases structurées et cohérentes, mais ils dépendent d'un certain nombre de variables, parmi lesquelles la stratégie du pays d'origine, les moyens et les approches propres à chaque pays et région. Selon l'*Institut d'Études Stratégiques sur le Pétrole, le Gaz et les Biocarburants* (INEEP, 2020), l'évolution de la géopolitique du pétrole et du gaz naturel serait l'un des critères déterminants dans la définition de la stratégie, ainsi que les politiques des différents pays et de leurs compagnies pétrolières et gazières (le conflit Russe - Ukraine en est une parfaite illustration). Partant de ce postulat, il est possible de distinguer deux tendances mondiales, (i) celle des pays importateurs et (ii) celle des pays exportateurs de pétrole. L'Europe, la Chine et l'Asie qui, suite à leurs fortes dépendances à l'égard des importations de pétrole, stimulent la politique énergétique sur l'utilisation accrue des énergies renouvelables, contrairement aux Etats Unis qui depuis l'avènement de la découverte de gaz de schiste qui leur a permis de passer du statut de pays importateur à un pays exportateur de pétrole concurrençant les pays de l'OPEP dirigé par la Russie et les pays de Moyen orient. Sa politique de décarbonation de son mix énergétique est restée timide, comme en témoigne le rejet de l'accord de Paris, par le Président Donald Trump. Dans ce qui suit, nous examinerons les scénarios proposés par le Conseil Mondial de l'Énergie (CME) et celui de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).

Les scénarios du Conseil Mondial de l'Énergie

Dans son rapport de 2013, le Conseil Mondial de l'Énergie a proposé deux types de scénarios : le scénario JAZZ - focalisé sur l'équité sociale - donne la priorité (en s'appuyant sur la croissance économique) à l'accès individuel à l'énergie bon marché et le scénario SYMPHONIE, centré sur les enjeux environnementaux grâce à de bonnes pratiques et des politiques internationales coordonnées.

Les 2 scénarios représentent des visions alternatives de l'avenir qui permettent d'explorer différentes hypothèses et de déterminer la robustesse des évolutions potentielles. Si les scénarios les plus fréquents sont normatifs, le Conseil mondial de l'énergie (CME) a adopté une approche exploratoire. Dans ce contexte, « normatif » signifie que les scénarios sont utilisés pour guider le monde vers un objectif précis, par exemple une concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Avec les scénarios exploratoires Jazz et Symphonie, le CME propose aux décideurs un outil neutre, basé sur des faits, qui leur permet de mesurer les impacts potentiels de leurs choix sur l'avenir. Ces scénarios montrent que les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) resteront dominantes en valeur absolue à l'horizon 2050 et occuperont toujours une part importante dans le bouquet énergétique futur, soit 77 % pour le scénario Jazz et 59% pour le scénario symphonie contre 79% en 2010 et ce, malgré les taux de croissance les plus élevés des énergies renouvelables.

Le Conseil Mondial de l'Énergie (CME) révèle également que la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté d'environ 45 %. Il est prévu que cette hausse se poursuive mais à un rythme plus faible que pendant les décennies passées. Répondre à cette demande au niveau mondial et régional sera un vrai défi et ce malgré une augmentation de l'offre totale de l'énergie primaire de 61 % dans Jazz et 27 % dans Symphonie à l'horizon 2050. Dans Jazz, les émissions de CO₂ seront supérieures en 2050 à 44 milliards de tonnes par an, ce qui correspond à une augmentation de 45 % par rapport à 2010. Dans Symphonie, elles s'élèvent à 19 milliards de tonnes par an, ce qui correspond à une diminution de presque 40 % par rapport à 2010. Cette diminution de CO₂ repose sur une série de leviers d'action tels que le captage, l'utilisation et le stockage du carbone ou encore le changement de comportement des consommateurs. Cependant beaucoup de points d'ombre restent encore non élucidés d'ici 2050, notamment pour ce qui concerne le captage et le stockage du carbone, l'intermittence de l'énergie solaire et le stockage de l'énergie.

A partir des deux scénarios Symphonie et Jazz, le CME (2016) a proposé à l'horizon 2060, trois scénarios exploratoires afin de définir des trajectoires potentielles plausibles du secteur de l'énergie. En 2019, ces scénarios ont été étudiés par les membres du CME dans la région européenne d'ici 2040. Ils ont été conçus par les membres du CME en collaboration avec Accenture Strategy et l'Institut Paul Scherrer. Il s'agissait d'éclairer les gouvernements sur les décisions à prendre en matière de politique énergétique et les chefs d'entreprises dans la mise en place de leurs plans stratégiques et d'investissement.

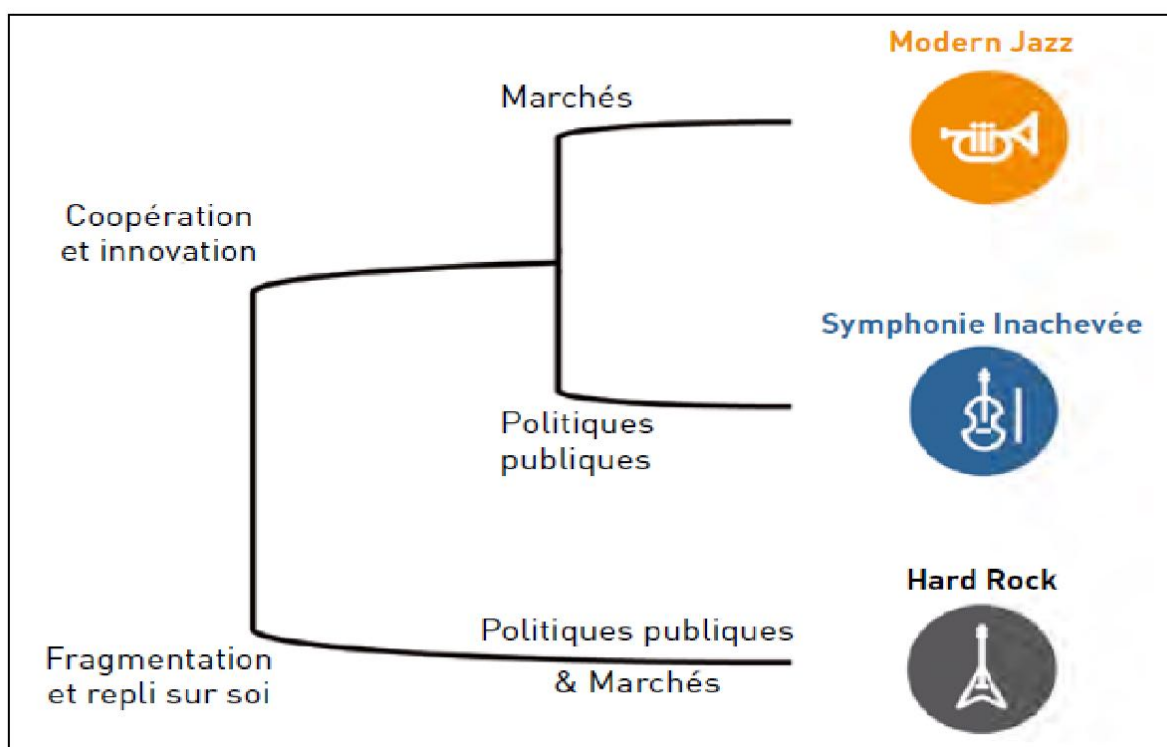
La conception de ces scénarios repose sur une approche qui a d'abord cherché à cadrer la problématique énergétique (cadre réalisé par le groupe d'experts), puis à construire des récits de scénarios et enfin à quantifier le système énergétique sur les échelles multirégionale et mondiale (modélisation). Les trois scénarios développés par le CME sont « Modern Jazz », « Symphonie inachevée » et « Hard rock ». Ces derniers peuvent être synthétisés comme suit :

Modern Jazz représente un monde numériquement accéléré marqué par l'innovation technologique et la recherche. C'est le scénario de transition énergétique de coopération axé sur le marché libre.

Symphonie inachevée dessine un monde qui va passer en 2060, vers un système énergétique mondial résilient, intégré et à faible émission de carbone, dans lequel les modèles de croissance économique seront durables. Ce scénario est comme le scénario Modern Jazz, un scénario de coopération.

Hard rock est un scénario qui explore les conséquences d'une croissance économique faible et non durable, due à des stratégies politiques tournées vers des intérêts nationalistes empêchant les pays de collaborer efficacement au niveau mondial, ce qui engendre un développement peu respectueux de l'environnement avec une attention limitée à l'atténuation des changements climatiques.

Figure 26 : Les conditions prises en compte par le CME pour élaborer les différents scénarios de la transition énergétique



Source : CME (2019)

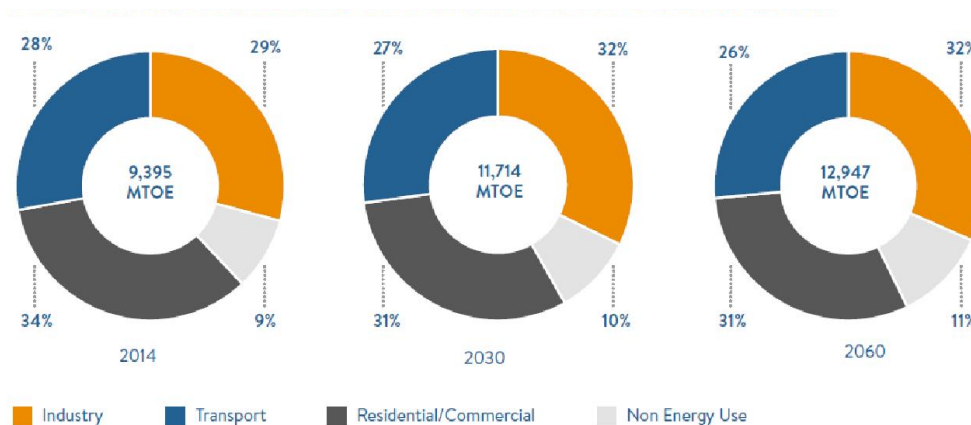
Ces trois scénarios permettent de cerner les enjeux liés à l'efficacité énergétique et la consommation primaire, la demande d'électricité, les énergies renouvelables (éolienne et solaire), la demande en combustibles fossiles et les émissions de carbone.

L'efficacité énergétique et la consommation d'énergie primaire

La demande d'énergie va plus que doubler. Jusqu'en 2060, les nouvelles technologies maintiendront la croissance de la demande d'énergie à un niveau modéré par rapport aux tendances historiques et contribueront à permettre aux économies industrialisées de passer plus rapidement à une croissance axée sur les services et la durabilité. L'intensité énergétique devrait s'améliorer tout au long de la période de projection dans les trois scénarios. La transformation digitale et l'avènement de l'intelligence artificielle sont présentés comme des changements contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique et au ralentissement de la demande énergétique primaire (un scénario qui nous semble très optimiste).

Dans le scénario Modern Jazz, la consommation d'énergie finale augmenterait de 25 % entre 2014 et 2030, avec une croissance moyenne de 1,4 % par an. Cela serait dû à l'augmentation de l'activité industrielle, à une demande croissante de transport et à une augmentation de l'accès à l'énergie, ce qui augmente la consommation résidentielle et commerciale. Cette consommation finale commence à ralentir considérablement au-delà de 2030, ralentissant de 0,3 % par an et s'établissant à 12 947 Mtep en 2060. Cela correspond à 38 % de plus que la consommation de 2014. Ce ralentissement est induit principalement par les modes de vie plus intelligents qui incluent les véhicules électriques, le télétravail, des appareils plus efficaces, des maisons et des bureaux connectés.

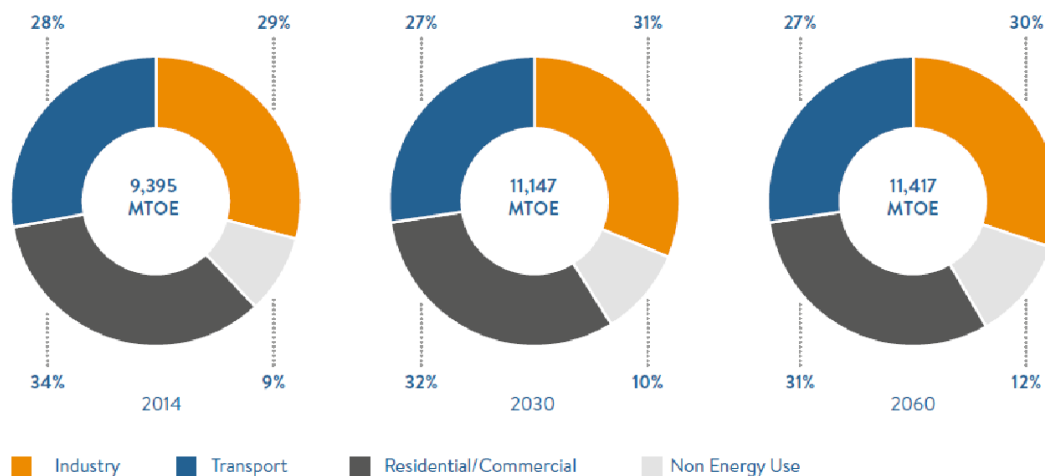
Figure 27 : la Consommation finale de l'énergie par secteur : Scénario MODERN DJAZZ



Source: The World Energy Council, Paul Scherrer Institute, Accenture Strategy

Dans le scénario Symphonie inachevée, la consommation finale totale d'énergie (TFC) croît de 19 % jusqu'en 2030 et atteint un plateau de 22 % jusqu'en 2060, avec une croissance moyenne de 0,4 % par an de 2014 à 2060. La croissance est largement tirée par l'augmentation de l'énergie livrée pour l'industrie et les transports (figure 28).

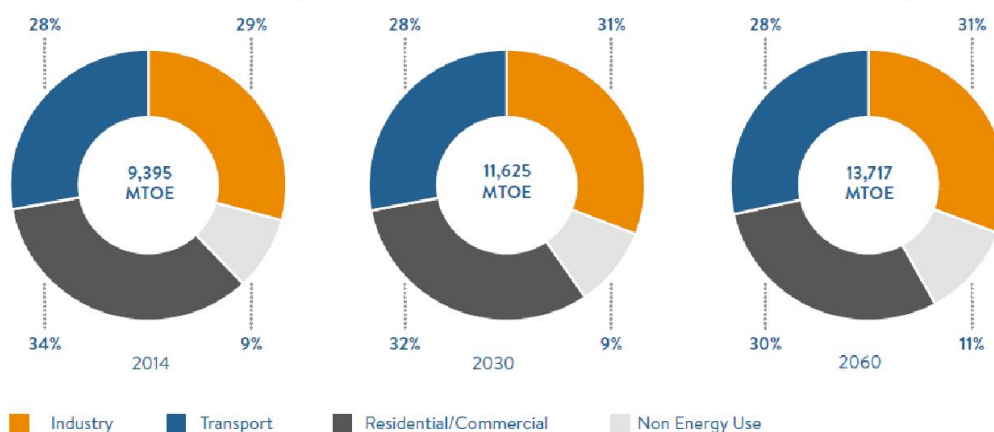
Figure 28 : la Consommation finale de l'énergie par secteur : Scenario SYMPHONIE INACHEVEE



Source: The World Energy Council, Paul Scherrer Institute, Accenture Strategy

Dans le scénario *Hard Rock*, un ralentissement mondial de la croissance économique assombrit les perspectives de l'énergie fournie par le secteur industriel. La demande industrielle d'énergie croît à un taux de 1,7 % par an de 2014 à 2030. Au-delà de 2030, la demande ralentit de 0,5 % par an jusqu'à atteindre 46% (figure 29).

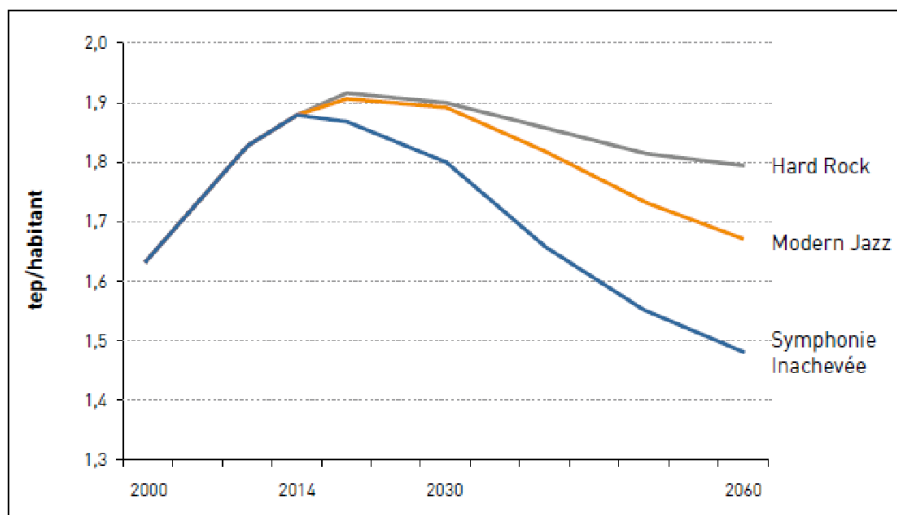
Figure 29 : la Consommation finale de l'énergie par secteur : Scenario harde Rock



Source: The World Energy Council, Paul Scherrer Institute, Accenture Strategy

La demande d'énergie primaire d'ici 2060 n'augmentera que de 10 % dans *Symphonie inachevée*, 25 % dans *Modern Jazz* et 34 % dans *Hard Rock*. La demande d'énergie primaire par habitant plafonne avant 2030 avec une consommation annuelle maximale d'énergie par habitant atteignant 1,9 TEP.

Figure 30 : La consommation d'énergie primaire par habitant va diminuer d'après les prédictions du CME et ce, quel que soit le scénario.



Source : CME (2019)

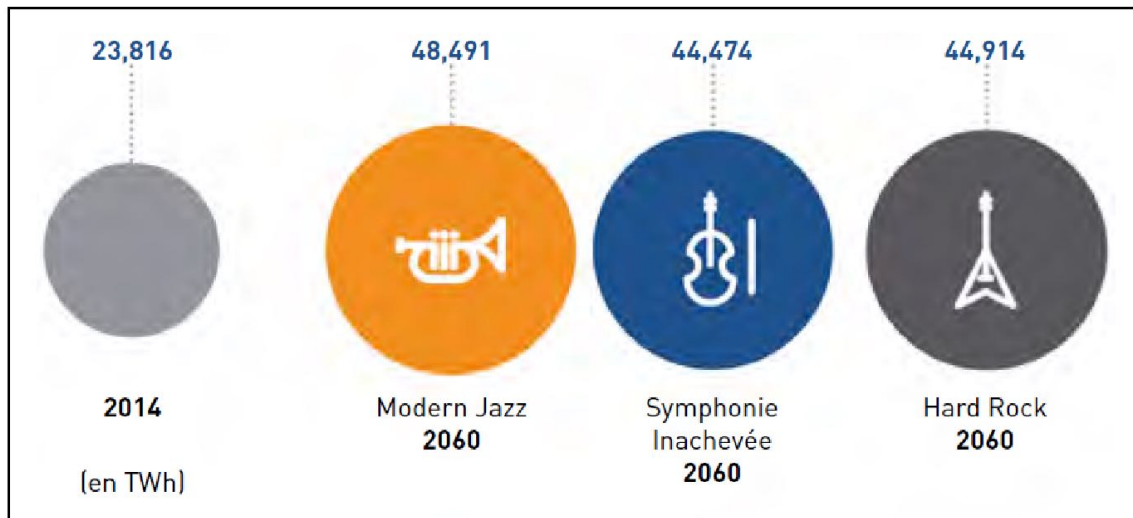
La demande d'électricité

La demande d'électricité doublera à l'horizon 2060. Avec la croissance économique et l'avancée technologique, les besoins en énergie électrique augmentent suite aux changements de mode de vie fondés sur une technologie consommatrice d'électricité.

D'ici 2030, l'électrification de la consommation finale passera à 20 %, contre 18 % en 2014 dans *Modern Djazz*. La croissance de la demande d'électricité est en moyenne de 1,9 % par an jusqu'en 2030 pour *Modern Djazz* et 1,6 pour *Symphonie inachevée*. Au-delà de 2030, la demande d'électricité continue de grimper au rythme de 1,4 % par an jusqu'en 2060 pour *Modern Djazz* et ralentit de 1,2% pour *Symphonie*. La production d'électricité a été multipliée par 2 depuis 2014 et la consommation finale d'énergie a atteint 28 %. L'électricité représenterait 29 % de la consommation d'énergie finale dans *Symphonie inachevée*. La production éolienne et solaire représente 30 % de la production totale d'électricité dans *Symphonie inachevée*, 28 % dans *Modern Jazz* et 25 % dans *Hard Rock* (AIE, 2016).

Cette augmentation de la demande d'électricité sera accompagnée par des investissements substantiels dans les infrastructures. Jusqu'en 2060, les investissements dans cette nouvelle génération d'électricité varient de 35 à 43 000 milliards de dollars (taux de change du marché de 2010).

Figure 31 : Consommation électrique des scénarios du CME



Source : CME (2019)

Les énergies renouvelables (Eolien et le solaire)

Le développement de l'énergie solaire et éolienne connaîtra un important essor dans les trois scénarios et dominera la production d'électricité jusqu'en 2060. Les progrès technologiques continus réduiraient les coûts d'investissement pour les panneaux photovoltaïques (PV) et l'énergie solaire en général. Cette tendance est rencontrée dans les trois scénarios, cependant elle est plus fortement observée dans *Modern Jazz* et *Symphonie inachevée* où les réductions de coûts sont supérieures à 70 %. Avec les ENR, la capacité de production électrique passerait de 20 % à 39 %.

Dans *Symphonie inachevée*, les avancées enregistrées dans les technologies de stockage de l'hydroélectricité et de l'air comprimé permettraient aux énergies renouvelables intermittentes d'atteindre 39 % de la production d'électricité d'ici 2060. En conséquence, la capacité solaire installée dépasse 1 100 GW d'ici 2030 et dépasse 4 700 GW d'ici 2060. La production passe de 198 TWh en 2014 à 1 694 TWh en 2030 et 7 943 TWh en 2060.

Modern Jazz voit les énergies renouvelables intermittentes atteindre 30 % de la génération grâce aux systèmes distribués, aux technologies numériques et à l'innovation des batteries. Jusqu'en 2060, la production solaire, éolienne et géothermique croît plus rapidement que toute autre source de combustible dans l'énergie primaire, avec une moyenne de 5,1 % par an sur la période (nouvelles capacités de production solaire).

Avec moins de capacité de construction d'infrastructures, *Hard Rock* connaît la pénétration la plus faible, avec une production solaire et éolienne atteignant 20 % d'ici 2060. Jusqu'en 2060, la production solaire, éolienne et géothermique croît plus

rapidement que toute autre source d'énergie primaire, avec une moyenne de 4,2 % par an sur la période. La production d'électricité solaire passe de 198 TWh en 2014 à 793 TWh en 2030 et à 3 270 TWh en 2060. La capacité solaire installée dépasse 919 GW d'ici 2030 et dépasse 2 350 GW d'ici 2060

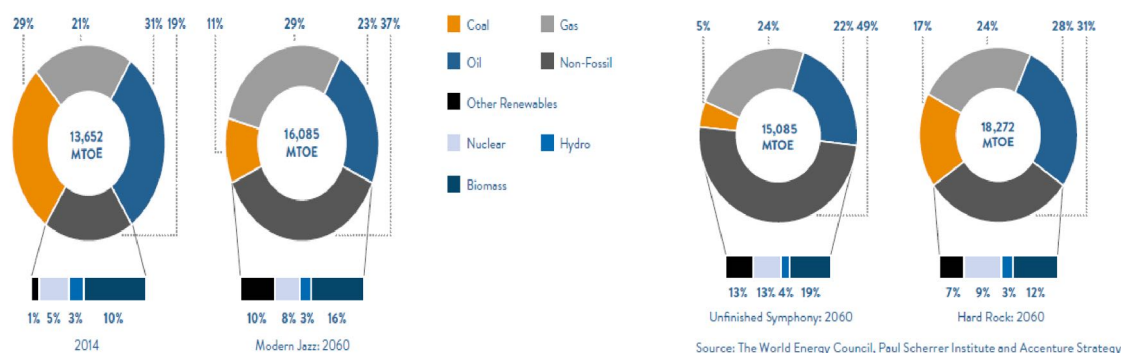
Pour les deux ressources (solaire et éolienne), les ajouts les plus importants seront observés en Chine, en Inde, en Europe et en Amérique du Nord.

La demande des combustibles fossiles

La part des combustibles fossiles dans l'énergie primaire tomberait à 70 % d'ici 2060 dans *Hard Rock*, à 63 % dans *Modern Jazz* et à 50 % dans *Symphonie inachevée*.

Dans le cas du charbon, *Symphonie inachevée* réalise les changements les plus drastiques avec des approvisionnements tombant à 724 Mb/J en 2060. L'accent mis sur la sécurité énergétique signifie que *Hard Rock* voit une plus grande dépendance au charbon et atteindra en 2040, 4044 Mb/J. Le principal facteur de variance est la mesure dans laquelle la Chine et l'Inde utiliseront le charbon jusqu'en 2060 (les résultats de la récente COP 21 à Glasgow tendent à montrer que le charbon occupera encore une place importante dans l'énergie primaire mondiale). Suivant les scénarios, le pic de demande de charbon pourrait être atteint en 2040. Pour le pétrole, il resterait majoritaire dans le secteur des transports. Sa part passerait de 92% en 2014 à 60% dans le scénario *Symphonie inachevée*, 67% pour *Modern Jazz* et 78% pour *Hard Rock*. Le pic se situerait en 2030 ou entre 2040 et 2050. Seul le gaz naturel continuerait à se développer pour remplacer le charbon (le récent conflit entre la Russie et l'Ukraine pourraient toutefois amener les pays occidentaux à réduire le recours au gaz russe ou à trouver des alternatives auprès d'autres producteurs).

Figure 32 : Evolutions du mix énergétique primaire de 2014 à 2060 selon les trois scénarios du CME.

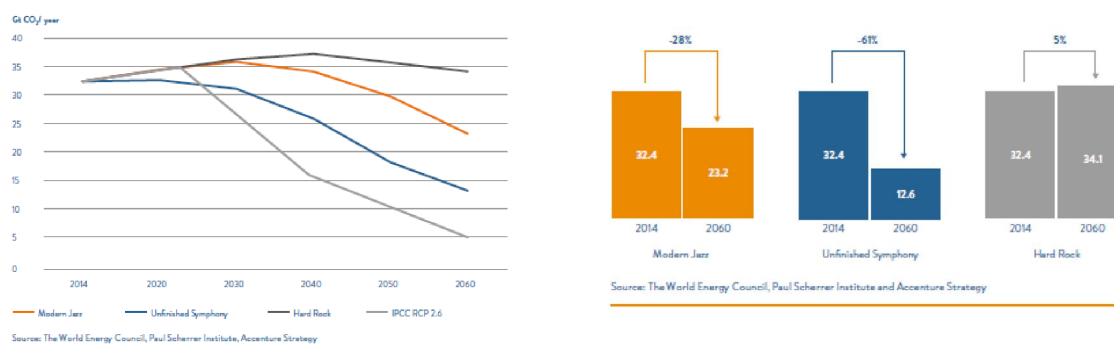


Source : CME (2019)

Les émissions de carbone

Les modifications de l'intensité énergétique et du mix énergétique primaire tendraient à réduire considérablement les émissions climatiques mondiales dans *Modern Jazz* et *Symphonie Inachevée*. *Hard Rock* rencontre des difficultés à relever le défi climatique.

Figure 33 : Emissions de CO₂ en 2014 et 2060 (gt CO₂/an)



De 2014 à 2060, les facteurs démographiques et économiques augmentent les émissions de carbone dans les trois scénarios. Ces effets sont de loin les plus forts dans *Modern Jazz*, car le PIB par habitant a plus que doublé au cours de la période et les modes de vie dépendants de la technologie nécessitent plus d'énergie. Toujours est-il que *Modern Jazz* parvient à une réduction globale de 28 % des émissions de carbone de 2014 à 2060 en déployant en grande partie des technologies qui réduisent fortement l'intensité énergétique et l'intensité carbone des TPES. *Symphonie inachevée* connaît les plus fortes réductions de l'intensité carbone de l'énergie, avec une moyenne de 2,2 % par an de 2014 à 2060. L'intensité énergétique diminue également de 2,6 % par an. Combinés, ces facteurs font chuter les émissions mondiales de carbone en 2060 à 61 % en dessous des valeurs de 2014. Pour *Hard Rock*, les émissions globales augmentent de 5 %, malgré une moindre pression à la hausse de la croissance économique. Les réductions d'intensité carbone et énergétique sont inférieures de moitié à celles des deux autres scénarios. Cependant et malgré une croissance économique plus faible dans *Hard Rock*, une innovation technologique rapide dans *Modern Jazz* et une action politique coordonnée dans *Symphonie inachevée*, aucun des trois scénarios n'est en mesure d'atteindre l'objectif défini à l'article 2 de l'Accord de Paris (maintien du réchauffement climatique en dessous de 2°C). *Modern Jazz* et *Hard Rock* sont en ligne pour un réchauffement de 3°C en 2060 et *Symphonie inachevée* se dirige vers un réchauffement légèrement supérieur à 2°C. De futures percées technologiques seront nécessaires pour rester en dessous du seuil de 2°C (même si les récents travaux du GIEC nous éloignent de plus en plus des objectifs de 2°C, et même 3°C). Selon le CME, ces percées nécessiteront le déploiement efficace de mécanismes politiques et de marché à travers des modèles économiques plus durables (prise en compte des impacts socio-environnementaux).

Chaque scénario met l'accent sur l'un des trois leviers du défi énergétique : la coopération internationale, la croissance économique soutenable et l'innovation technologique. Le challenge pour les leaders mondiaux de l'industrie est de s'appuyer sur la structure évolutive des systèmes énergétiques mondiaux tout en proposant de nouvelles politiques et des stratégies plus audacieuses. Chaque scénario donne un aperçu des secteurs à fort impact et met en évidence les domaines d'action à prendre en charge. Il s'agit notamment de réévaluer les allocations de capital et les stratégies d'investissements ; d'adapter les modèles d'affaires aux différentes régions (Asie et Moyen-Orient) ; redéployer le capital libéré vers des secteurs moins énergivores ; promouvoir les technologies bas carbone, ...

Les Scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) est une organisation internationale fondée en 1974, elle fait partie des agences de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Initialement conçue pour assurer la sécurité des approvisionnements énergétiques des 30 pays membres (dont la plupart sont des importateurs de pétrole), elle a étendu son expertise à tous les types d'énergie pour devenir une instance importante de conseil et de coordination de la politique énergétique mondiale (Heubaum, Biermann, 2015). Elle publie annuellement des études dont la plus connue est le WEO (World Energy Outlook) dans laquelle elle dresse un état des lieux du secteur énergétique et émet des hypothèses sur l'avenir.

Depuis 1993, l'AIE fournit des projections énergétiques à moyen et long terme à l'aide du modèle énergétique mondial (WEM), c'est un modèle de simulation à grande échelle conçu pour reproduire le fonctionnement des marchés de l'énergie. Le WEM est le principal outil utilisé pour générer des projections détaillées, secteur par secteur, région par région. Les scénarios WEO constituent l'une des principales sources d'information pour les acteurs économiques et politiques. Ils permettent de dégager des résultats chiffrés et d'aider les décideurs à mieux apprécier le contexte énergétique.

Contrairement aux éditions antérieures (qui ont toujours retenu dans les scénarios énergétiques passés, le maintien des énergies fossiles dans le mix énergétique), l'édition 2021 du WEO invite les parties concernées, à savoir les décideurs politiques et les dirigeants des grandes entreprises internationales, à cesser d'exploiter de nouveaux gisements d'énergies fossiles à partir de 2035, à interdire tout nouvel investissement dans centrales à charbon et à se reporter massivement sur les énergies bas carbone.

A l'horizon 2050, trois scénarios de transition énergétique et un scénario additionnel dit scénario intégré, ont été proposés : le scénario de zéro émission nette d'ici 2050 (NZE), le scénario d'engagements annoncés (APS), le scénario de politiques déclarées (STEPS) et le scénario de développement durable (SDS). NZE et SDS sont des scénarios normatifs, car ils sont conçus pour atteindre des objectifs respectifs compatibles avec la limitation de l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C pour NZE et à

l'objectif « bien en dessous de 2 °C » de l'Accord de Paris. APS et STEPS sont des scénarios exploratoires. Sur la base des données de départ, telles que des décisions politiques et des objectifs annoncés, différentes trajectoires sont explorées via la modélisation des systèmes énergétiques.

Les scénarios classiques

STEPS (Stated Policies Scenario) est un scénario tendanciel dit « laisser aller », c'est une projection qui traduit la continuité de la trajectoire des taux d'émissions de CO₂ par rapport à la situation actuelle, sans le déploiement d'effort important de réduction. Il a pour finalité de démontrer l'impact futur d'un système énergétique avec des décisions politiques restées inchangées par rapport au présent. *Sans efforts supplémentaires les températures moyennes continueront d'augmenter d'au moins +2,6°C au-dessus du niveau pré-industriel en 2100.*

SDS (Sustainable Development Scenario) correspond à un scénario énergétique de développement durable, il décrit une trajectoire future cohérente avec les objectifs de l'accord de Paris sur le maintien de la hausse moyenne de températures Mondiale à + 2 °C. *Sans le scénario SDS la température culmine en 2100 à environ +1,7°C du niveau pré-industriel.*

Les nouveaux scénarios de l'édition 2021

APS (Announced Pledges Scenario) suppose que tous les engagements climatiques pris par les gouvernements du monde entier, y compris les contributions déterminées au niveau national (CDN) et les objectifs nets zéro à plus long terme, seront atteints intégralement et à temps. *La température monte en 2100 autour de +2,1°C ; ce scénario n'atteint pas les émissions nettes zéro, donc la température n'est pas stabilisée.*

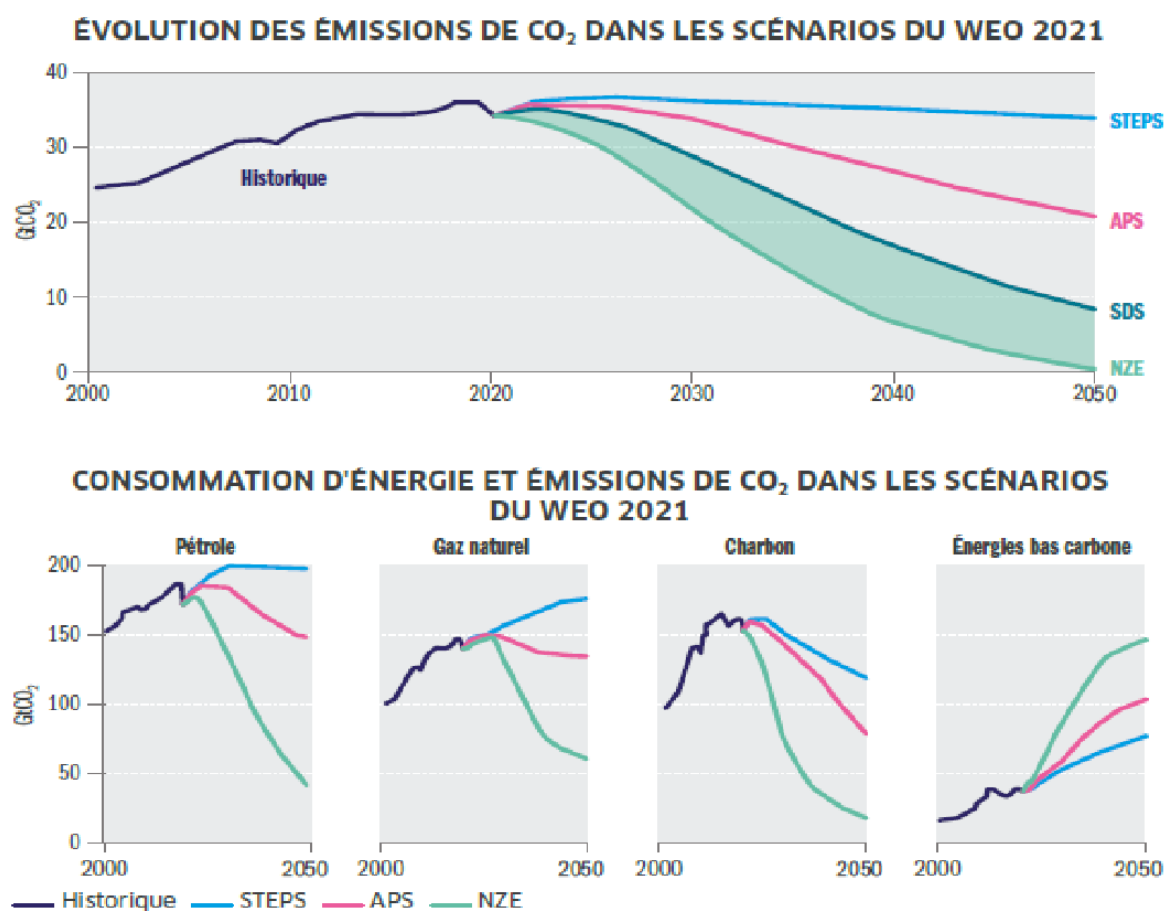
Et enfin, le scénario NZE (Net Zero Emissions) est un scénario de rupture et ambitieux pour la décarbonation globale du secteur énergétique. *La température est stabilisée à +1,5°C.*

Contrairement aux trois autres scénarios, le NZE est un scénario drastique et inédit pour l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Si le scénario tendanciel est sans effet (ou à effet négligeable) sur la réduction des émissions en 2030, le « zéro émission nette » engendre une baisse substantielle pouvant aller jusque 45%.

Dans cette génération de scénarios, il a été souligné et mis en exergue l'importance des politiques gouvernementales pour déterminer l'avenir du système énergétique mondial. C'est le facteur central à l'origine des variations des résultats observés dans les scénarios. Cependant, d'autres variables ont également été intégrées, notamment le contexte économique et démographique, les coûts et l'apprentissage de la technologie, les prix de l'énergie, les engagements de développement durable des entreprises et les facteurs sociaux et comportementaux.

Les projections prospectives des quatre scénarios sont élaborées par la combinaison du modèle énergétique mondial (WEM) de l'AIE (qui est utilisé pour produire les projections du World Energy Outlook annuel) et du modèle Energy Technology Perspectives (ETP). La combinaison des deux modèles permet de regrouper et de croiser un ensemble d'informations sur les marchés de l'énergie, les investissements, les technologies et les politiques qui seraient nécessaires pour la transition énergétique propre.

Figure 34 : Consommation des énergies et émissions CO₂ des scénarios WEO 2021



Source : AIE, World Energy Outlook 2021

Description des quatre scénarios

Le scénario des engagements annoncés (APS) suppose que l'ensemble des engagements annoncés par les gouvernements du monde entier avant la COP 26 soient respectés intégralement et réalisés dans les délais. Il s'agit notamment des Contributions Déterminées au Niveau National (CDN) soumises par les pays à la demande des Nations unies, et des politiques déclarées, comme celle visant la réalisation de l'objectif zéro émissions nettes retenue par un certain nombre de pays. La conception de ce scénario est basée sur tous les principaux engagements nationaux récents annoncés et qui ont fixé l'année 2030, comme objectif et d'engagements nets à

plus long terme de zéro émission de CO₂, sans tenir compte si ceux-ci ont été introduits dans la législation ou dans les CDN mises à jour. Elle est également basée sur tous les engagements pris dans les CDN nouvelles et mises à jour, qu'ils soient ou non étayés par des plans de mise en œuvre spécifiques. Le respect de ces engagements permettrait de faire chuter de 40% les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie d'ici à 2050

Mais ce scénario aboutirait à un réchauffement climatique de 2.1°C en 2100 ce qui est non compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris. Les engagements les plus importants pris en compte par WEO (2021) sont mentionnés dans le tableau suivant :

Figure 35 : Les engagements les plus importants pris en compte par WEO-2021

Les engagements pris en compte par WEO 2021	Les nouveaux engagements considérés dans la Note technique
❖ L'engagement de la Chine à atteindre la neutralité carbone d'ici 2060	❖ Le 12 octobre, les Émirats arabes unis ont annoncé leur objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.
❖ La NDC mise à jour des États-Unis et leur engagement à atteindre zéro émission nette, à l'échelle de l'économie, d'ici 2050	❖ Le 13 octobre, le président russe a annoncé que la Russie visait à devenir neutre en carbone d'ici 2060
❖ La NDC mise à jour de l'Union européenne et l'engagement d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050	❖ Le 23 octobre, l'Arabie saoudite a annoncé que le pays visait zéro émission nette de CO ₂ d'ici 2060
❖ L'engagement du Japon à devenir neutre en carbone d'ici 2050	❖ Le 26 octobre, l'Australie a annoncé son objectif d'atteindre le zéro net d'ici 2050.
❖ L'engagement de la Corée du Sud d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050	❖ Le 1er novembre, le Premier ministre de l'Inde a annoncé l'objectif d'atteindre zéro émission nette d'ici 2070 de même que des objectifs politiques renforcés pour 2030.
❖ L'objectif du Brésil d'atteindre zéro émission nette d'ici 2060, tel que décrit dans sa CDN mise à jour de 2020	❖ Le 4 novembre, l'Indonésie annonce le renforcement de son engagement à décarboner son secteur électrique

Source: IEA, Technical Note, 2021

Le scénario de stratégies énoncées (STEPS) est basé sur les stratégies en vigueur et fournit un point de repère plus prudent de l'impact de ces politiques au fil du temps. Selon ce scénario, la quasi-totalité de la hausse de la demande d'énergie d'ici 2050 pourrait être couverte par des sources bas carbone cependant les émissions annuelles de CO₂ resteraient à cet horizon « proches des niveaux actuels » et la hausse globale de température serait voisine de 2,6°C à l'horizon 2100 (AIE, 2021).

Le scénario zéro émission nette (NZE) est un scénario normatif, conçu pour atteindre un résultat spécifique. Il montre la trajectoire pour l'atteindre. Ce scénario représente un changement radical dans l'orientation des politiques et des investissements, il esquisse une voie étroite mais réalisable pour que le secteur mondial de l'énergie atteigne zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050. Le scénario NZE ne s'appuie pas sur des réductions d'émissions en dehors du secteur de l'énergie (qui représente 75% des émissions), mais suppose que les émissions non énergétiques seront réduites dans la même proportion que les émissions énergétiques. Il est cohérent avec la limitation de l'augmentation de la température mondiale à 1,5° C (avec une probabilité de 50%). La consommation d'énergie baisserait de 17%, celle du pétrole et du gaz naturel de 70%, celle du charbon serait marginale, celle d'électricité doublerait, celle-ci serait produite à 88% par des renouvelables (solaire, éolien et hydraulique) et à 8% par le nucléaire, avec un développement de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

La réduction drastique de l'utilisation des énergies fossiles, le développement rapide et massif des technologies propres et la généralisation des modes sobres et efficaces de la consommation de l'énergie sont les clés les plus significatives pour changer la politique énergétique mondiale, objectif d'atteindre zéro émission de CO₂ et un réchauffement climatique de 1,5°C. Le scénario NZE prévoit une croissance explosive des technologies d'énergie propre au cours de la prochaine décennie (valeur cumulée estimée à 27 000 milliards de dollars d'ici 2050). De ce fait, le rapport de l'AIE évoque *l'émergence d'une nouvelle économie de l'énergie* qui implique des interactions variées et souvent complexes entre les marchés de l'électricité, des carburants et du stockage, créant de nouveaux défis pour la réglementation et le marché.

La conception du NZE est basée, sur les principes suivants :

- L'adoption de toutes les technologies disponibles et les options de réduction des émissions, y compris celles qui sont actuellement au stade de démonstration ou du prototype. Elle n'implique pas l'adoption de technologies inconnues mais qui supposent une réduction significative du délai de déploiement à grande échelle des technologies actuelles en cours de développement. Le NZE vise également à limiter, dans la mesure du possible, le déploiement de technologies à émissions négatives.
- Une coopération internationale substantielle de tous les pays contribuant à l'objectif net zéro. La coopération accélère l'innovation et la diffusion technologique et facilite la réduction des émissions dans les économies émergentes et en développement.
- L'assurance d'une transition organisée, notamment en maintenant la sécurité énergétique, en minimisant la volatilité du marché de l'énergie et en évitant les actifs non durables.
- Une accessibilité à l'énergie pour tout le monde et conduisant à réduire la pollution atmosphérique (comme indiqué dans la section des objectifs de développement durable des Nations Unies).

Le scénario NZE, qui est au centre du rapport de l'AIE, place les énergies renouvelables au premier rang de la transition énergétique (en faisant de leur développement l'une des étapes-clés). La production d'énergie solaire et éolienne passerait ainsi de 10,4 EJ en 2020, à 60,5 EJ en 2030, et à 190 EJ en 2050. La capacité d'énergie solaire serait multipliée par près de 6 entre 2020 et 2030, et la capacité d'énergie éolienne par 5. L'énergie hydraulique augmenterait progressivement et l'énergie géothermique, ou marine, triplerait entre 2020 et 2030 pour atteindre 31,8 EJ en 2050. Cependant, ce développement massif est peut-être encore sous-estimé.

La biomasse devient une source d'énergie majeure dans le scénario NZE, passant de 62 EJ en 2020 à 102 EJ en 2050 (19 % de l'approvisionnement énergétique total). La superficie totale des terres consacrées à la production de bioénergie passerait alors de 330 millions d'hectares (Mha) en 2020, à 410 Mha en 2050, ce qui représente plus du quart du total des terres cultivées disponibles à l'échelle mondiale.

Le scénario NZE prévoit une augmentation significative de la capacité de production d'énergie nucléaire, en particulier sur les marchés émergents et dans les économies en développement. Le nucléaire fournirait 41,4 EJ en 2030, soit une augmentation de 41 % par rapport au niveau actuel, et atteindrait 60,6 EJ en 2050.

Parmi les mesures à prendre pour atteindre zéro émission de CO₂, la capture et le stockage du carbone se révèlent être des pistes importantes, le volume capturé serait multiplié par 41 de 2021 à 2030, permettant notamment l'utilisation de centrales électriques au charbon et au gaz, équipées de dispositifs de capture et du stockage. L'élimination du carbone étant presque inexistante aujourd'hui, les volumes éliminés seraient multipliés par plus de 300 d'ici à 2030.

L'hydrogène à faible teneur en carbone est un autre carburant qui suscite un regain d'intérêt et d'investissements, bien que pour le moment, la grande majorité de la production mondiale provienne de l'hydrogène fossile (y compris le captage du carbone sans séquestration permanente)

Selon l'AIE, il n'est, donc, plus nécessaire d'investir dans l'exploitation de nouvelles ressources d'énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon).

Comparaison des scénarios de l'AIE

La conception des scénarios est basée sur un ensemble de variables clés, il s'agit de la population mondiale, du prix du carbone, des ressources des énergies fossiles, des coûts de production d'électricité et autres coûts technologiques clés mais aussi des engagements des Etats et des gouvernements, ces derniers sont la principale cause des divergences entre les scénarios. Les scénarios exploratoires conduisent à des résultats différents en termes d'évolution de consommation d'énergie, d'émission de CO₂ et d'augmentation de la température ; les premiers constats saillants sont :

- *Le scénario NZE* est le plus ambitieux mais il requiert d'importants investissements. C'est aussi le seul qui permette de respecter l'objectif zéro émissions nettes d'ici 2050 avec une hausse de la température moyenne de l'ordre de 1,5°C. Ce scénario mise sur un développement de technologie permettant un déploiement considérable des énergies renouvelables.
- *Le scénario SDS* considéré comme point de repère permettrait une diminution des émissions mondiales de CO₂ d'environ 20% en 2050, zéro net en 2070 et une augmentation moyenne des températures de 1,7°C en 2100.
- *Le scénario APS* conduirait à une chute de 20% des émissions mondiales de CO₂ en 2030, 40% d'ici à 2050 et une hausse de la température moyenne de 2,1°C (soit bien au-dessus de l'objectif de 1,5°C).
- *Le scénario STEPS* conduirait au maintien d'un niveau d'émission de CO₂ proche du niveau actuel et à une hausse de la température moyenne de 2,6°C à l'horizon 2100 avec une augmentation continue au-delà de 2100.

Parmi l'ensemble des résultats et des préconisations des différents scénarios, on retiendra en particulier que :

- **Le déploiement des énergies renouvelables est au coeur de la transition énergétique**, sa part dans l'approvisionnement en énergie primaire passe à 12% d'ici 2050 (dont 1% de solaire, 1% d'éolien et 3% d'énergie hydraulique).

26% pour le scénario STEPS dont 6% de solaire, 4% d'éolien et 3% d'énergie hydraulique.

37% pour le scénario APS dont 10% de solaire, 8% d'éolien et 4% d'énergie hydraulique.

55% pour le scénario SDS dont 15% de solaire, 11% d'éolien et 5% d'énergie hydraulique.

Et 67% pour le scénario NZE dont 20% de solaire, 16% d'éolien et 6% d'énergie hydraulique.

Dans le NZE, le rythme sans précédent d'innovation et de développement technologique permettrait d'atteindre le niveau de production de 67% de l'approvisionnement en énergie en 2050 à partir des sources renouvelables. L'AIE considère que pour les scénarios APS et STEPS, les progrès en matière des énergies propres sont beaucoup trop lents. Pour l'APS, les investissements annuels dans l'énergie propre atteindraient environ 2300 milliards de dollars d'ici 2030, ils resteraient nettement inférieurs à celui de NZE qui s'élève à 4 000 milliards de dollars par an d'ici 2030.

- **La consommation des énergies fossiles diminue** (en proportions différentes) pour les 4 scénarios. En 2020, elle était de 79% dont 26% de charbon, 29% du pétrole et 24% du gaz naturel. A l'horizon 2050, elle passerait à :

66% pour le scénario STEPS dont 16% de charbon, 27% du pétrole et 23% du gaz naturel.

54% pour le scénario APS dont 12% de charbon, 22% du pétrole et 20% du gaz naturel.

36% pour le scénario SDS dont 6% de charbon, 15% du pétrole et 15% du gaz naturel.

22% pour le scénario NZE dont 3% de charbon, 8% du pétrole et 11% du gaz naturel.

La diminution de la part des énergies fossiles, malgré une augmentation de la population mondiale de 2 milliards, serait rendue possible grâce à une généralisation de la sobriété et de l'efficacité énergétique.

Dans NZE, il convient de cesser tout investissement dans les énergies fossiles. Les engagements nets de zéro mis en œuvre par les pays dans l'APS n'incluent pas d'objectifs sur la production, mais impliquent des efforts rigoureux pour minimiser les émissions de CO₂. Dans STEPS, la hausse de la demande de gaz naturel persiste à cause de la croissance de la demande en Chine, en Inde et dans d'autres pays d'Asie.

- **La part du nucléaire connaîtra une légère augmentation** par rapport à 2020 qui est de 5%, à l'horizon 2050 elle serait de :

5% pour le scénario STEPS.

7% pour le scénario APS.

9% pour le scénario SDS.

11% pour le scénario NZE.

L'expansion de l'énergie nucléaire est largement déterminée par la mise en chantier de centrales d'une capacité de 60 GW dans 19 pays (début 2021). Dans le scénario STEPS, plus de 65 GW (23 %) du parc nucléaire existant dans les économies avancées seront mis hors service d'ici 2030, contre 50 GW dans l'APS.

- **La biomasse solide** qui avait une part de 4% en 2020, sera à l'horizon 2050, de :

2% pour le scénario STEPS.

3% pour le scénario APS.

0% pour les scénarios SDS et NZE ce qui explique qu'il y a moins de consensus sur le rôle de la bioénergie.

Dans le STEPS et l'APS, 1,9 milliard de personnes dépendent encore de l'utilisation traditionnelle de la biomasse pour cuisiner en 2030.

Dans le NZE, l'accès universel à une cuisson propre sera possible en 2030 et l'utilisation traditionnelle de la biomasse sera complètement éliminée.

- **L'hydrogène a un rôle à jouer** notamment dans le scénario NZE.

- **Les options de gestion du CO₂**, s'agissant notamment du Captage et du Stockage du CO₂ (CSC - stockage souterrain) et du Captage du CO₂ et de son Utilisation (CCU - utilisation du CO₂ pour fabriquer des matériaux, des carburants, etc.) jouent un rôle significatif pour le SDS et NZE, les 2 autres scénarios intègrent un rôle plus limité. La figure 36 résume les consommations d'énergie dans les différents scénarios de l'AIE.

Selon l'AIE, il existe encore un écart important entre les scénarios APS et NZE qu'elle a baptisé « gaps ambition », car des engagements gouvernementaux ambitieux doivent être amplifiés pour résorber cet écart et contenir l'élévation de la température à 1,5 °C.

Figure 36 : Consommation mondiale de l'énergie dans les scénarios de l'AIE (2021)

Consommation primaire d'énergie en Mtep	Mondiale		Scénario repère SDS			Scénario NZE			Scénario APS			Scénario STEPS		
	Année	2020	Part (%)	2030	2050	Part (%)	2030	2050	Part (%)	2030	2050	Part (%)	2030	2050
Charbon	3721	26	2651	831	6	1 717	411	3	3380	1870	12	3587	2790	16
Pétrole	4094	29	4020	2135	15	3282	1008	8	4421	3525	22	4741	4736	27
Gaz naturel	3 313	24	3327	2035	15	3901	1450	11	3499	3181	20	3724	4156	23
Nucléaire	702	5	884	1228	9	889	1447	11	855	1158	7	812	967	5
Solaire	112	1	568	2061	15	764	2606	20	456	1533	37	380	1039	6
Eolienne	136	1	516	1502	11	681	2123	16	430	1228	10	344	748	4
Hydraulique	373	3	463	681	5	504	728	6	437	590	8	437	580	3
Bioénergie moderne	903	6	1576	2546	18	1713	2431	18	1354	2119	7	1254	1815	10
Biomasse	576	4	-	-	-	-	-	-	494	408	3	494	408	2
Autres	112	1	287	767	6	315	760	6	203	466	3	203	466	2
Total renouvelables	1 636	12	3408	7557	55	3979	8649	67	2880	5933	37	2603	4598	26
Total consommation primaire	13 017	100	14312	13803	100	13067	12969	100	15551	16108	100	16027	17768	100

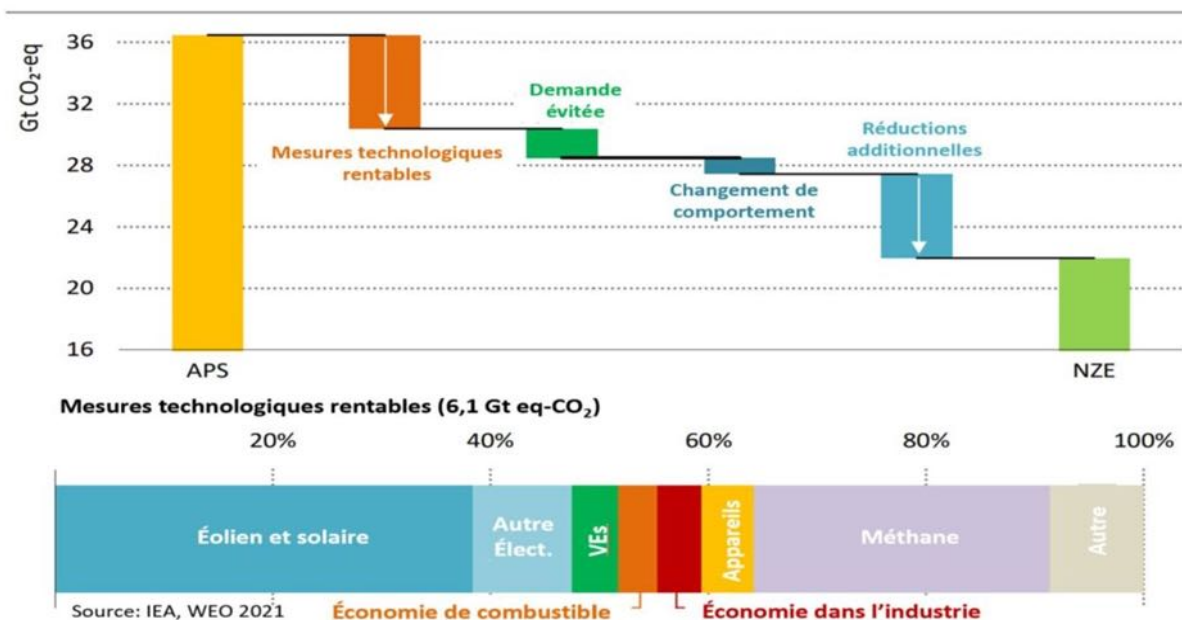
Comme l'illustre la figure 37, les quatre principales priorités d'action pour combler cet écart au cours de la prochaine décennie et préparer le terrain pour une nouvelle réduction rapide des émissions au-delà de 2030 sont les suivantes :

- **Assurer une avancée importante dans l'électrification propre** : un doublement, par rapport aux engagements actuels, du déploiement du solaire photovoltaïque et de l'éolien comme appui supplémentaire massif à l'électrification propre ; et une expansion forte d'autres moyens de production d'électricité bas-carbone, comme le nucléaire « là où il est acceptable » et une sortie rapide du charbon ;

- **Réaliser le plein potentiel de l'efficacité énergétique** : un effort accru sur l'efficacité énergétique et les changements comportementaux pour modérer la hausse de la demande énergétique. En effet, dans le scénario NZE de l'AIE, l'intensité énergétique de l'économie mondiale décroît de 4% par an entre 2020 et 2030, soit plus du double du rythme observé entre 2010 et 2020 ;

- **Prévenir les émissions de méthane provenant des opérations de combustibles fossile** : une réduction massive des émissions de méthane liées à la production d'énergie fossiles (mesure la plus « rentable » à court terme dans le secteur de l'énergie selon l'AIE) ;
- **Stimuler l'innovation en matière d'énergie propre** : un développement fort et un soutien massif à l'innovation en matière d'énergie propre. En effet, près de la moitié des réductions d'émissions en 2050 du scénario NZE proviennent de technologies aujourd'hui encore en phase d'expérimentation ou de prototypes (notamment pour favoriser le déploiement de l'hydrogène et de systèmes « CCUS » de capture, stockage et utilisation du CO₂).

Figure 37 : Répartition des mesures pour combler l'écart entre APS et NZE d'ici 2030



En plus de ces quatre mesures, l'AIE souligne aussi (i) que la finance constitue le "chaînon manquant" pour accélérer le déploiement de l'énergie ; (ii) que la diminution de la demande de charbon (projetée à 10% dans le scénario APS), est de 55% dans le scénario NZE – cet écart pouvant être comblé par la fin progressive des centrales au charbon, passant par l'arrêt de l'approbation de nouvelles constructions de centrales à charbon sans réduction d'émission et que (iii) la transition soit recentrée sur la composante humaine.

Maintenir l'objectif ouvert de réduction des émissions à 1,5°C

Les promesses nettes zéro annoncées et les NDC actualisées, reflétées dans leur intégralité dans le scénario APS, représentent les efforts ambitieux mondiaux déployés en matière climatique. Mais dans l'état actuel des choses, elles comblent moins de 20 % de l'écart en 2030 entre les scénarios STEPS et NZE. 12 Gt d'émissions supplémentaires de CO₂ doivent être réduites en 2030 afin de mettre le monde sur la bonne voie (NZE), et cela doit s'accompagner de réductions de près de 90 millions de

tonnes (Mt) des émissions de méthane provenant de l'exploitation des combustibles fossiles (équivalent à 2,7 Gt supplémentaires d'émissions de CO₂). S'aligner sur la trajectoire 1,5°C, nécessite, selon l'AIE des efforts supplémentaires que les gouvernements doivent accomplir. Pour cela, une feuille de route a été suggérée pour le secteur énergie avec un ensemble de mesures ambitieuses à prendre dès maintenant, si on veut contenir le réchauffement climatique à 1,5°C.

- **Une trajectoire de réduction des émissions très rapide dès la décennie 2020.** Renoncer dès à présent à tout nouveau projet d'exploration pétrolière ou gazière, et dès 2035, à la vente de voitures thermiques.

- **La demande et l'offre de l'énergie vont devoir s'ajuster :** Une baisse de près de 8% de la demande d'énergie devra être observée par rapport à 2021 et cela malgré une hausse de la croissance de la population (+ 2 milliard environ à l'horizon 2050). Cette baisse sera possible avec le recours à la sobriété, en agissant sur les changements de comportements en particulier dans le secteur du transport pour réduire significativement nos besoins énergétiques, mais également en agissant sur le potentiel de l'efficacité énergétique. La demande de charbon diminuerait de 600 millions tonnes équivalent charbon en 2050, le pétrole reculerait de 75 % à 24 millions de barils par jour et le gaz naturel diminuerait de 55 % à 1750 milliards de mètres cubes. Les seuls combustibles fossiles qui restent en 2050 seront utilisés dans la production de biens non énergétiques où le carbone est incorporé dans le produit (comme les plastiques), dans des usines couplées à des systèmes de captage, d'utilisation et de stockage du carbone (CCUS), et dans des secteurs à faibles émissions. Le scénario NZE prévoit une hausse de 25% de la demande mondiale finale en électricité sur la période 2020 - 2030, puis à un doublement d'ici 2050. Cette forte demande sera associée à l'électrification des usages énergétiques, principalement du secteur des transports (plus de 60%). La demande de l'industrie de production de l'hydrogène par électrolyse et les combustibles de synthèse joueront un rôle important dans le futur.

En ce qui concerne l'offre énergétique, l'AIE prévoit qu'en 2050, les deux tiers de l'offre énergétique mondiale proviendront des renouvelables (éolien, solaire, bioénergie, géothermie, hydro-énergie). De 2020-2030, un record sera enregistré pour le renouvelable, + 630 GW de solaire photovoltaïque supplémentaire en 2030 avec une capacité multipliée par 20 par rapport au niveau actuel et + 960 GW pour l'éolien, soit quatre fois plus que le niveau de 2020.

Les sources fossiles seraient restreintes à quelques usages (installations avec captage de carbone, plastique, secteurs avec technologies bas-carbone limitées). Le scénario NZE suppose une électrification massive des systèmes : la demande d'électricité aura doublé d'ici 2050 et serait produite à 90 % par des énergies renouvelables et 10 % du nucléaire qui verrait sa production et sa capacité mondiale doubler.

- Les besoins d'innovation et de technologies vertes suivraient une trajectoire étroite.

Ces projections susmentionnées ne sont réalisables que grâce à un effort considérable d'innovation et le recours aux technologies propres. La demande pour le secteur énergétique hydrogène serait multipliée par six et jouerait un rôle complémentaire à l'électricité, pour les batteries de nouvelle génération et le captage direct et le stockage du carbone. Dans son rapport 2021, l'AIE insiste sur la notion de « *trajectoire étroite* », car si les prédictions de diminution des émissions de CO₂ d'ici 2030 vont de pair avec des technologies disponibles, ça ne sera pas le cas pour 2050. La moitié de la réduction des émissions de CO₂ provient de technologies qui ne sont actuellement qu'au stade d'expérimentation.

- L'arrêt de tout nouveau projet dans les fossiles : dans son rapport 2021, l'AIE a appelé les parties prenantes, à savoir les Etats et les entreprises, à cesser immédiatement tout développement de nouveaux gisements d'énergies fossiles, à partir de 2035, à interdire tout nouvel investissement dans les centrales à charbon et de reporter massivement leurs investissements sur les énergies bas carbone (4 100 milliards d'euros par an). Dans le scénario NZE, les dépenses d'investissement totales du secteur de l'énergie augmentent annuellement d'environ 2,5 % du PIB pour arriver à 4,5 % du PIB en 2030, avant de baisser à 2,5 % en 2050. D'ici 2030, la grande majorité des investissements est consacrée aux technologies propres, dont la plus grande part est destinée à la production d'électricité (investissement annuel total passant d'environ 0,5 billion de dollars au cours des cinq dernières années à près de 1 700 milliards de dollars en 2030).

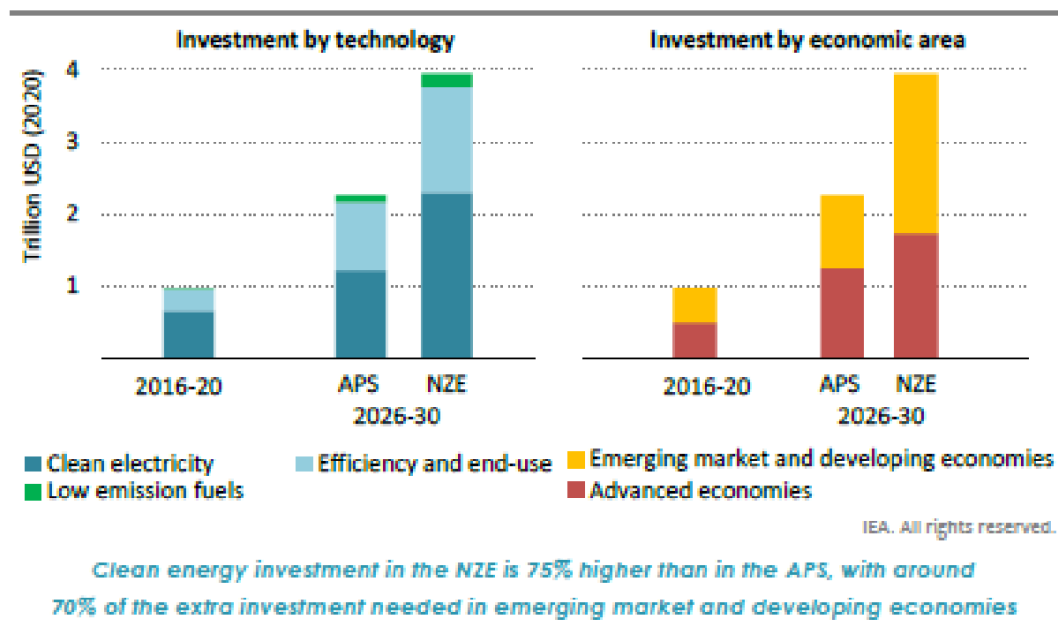
D'ici là, la part la plus importante de ces investissements sera dédiée à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. En une seule année, elle passera à 1 300 milliards de dollars, le plus grand montant jamais investi dans la production de combustibles fossiles en un an. Le record d'investissement dans l'approvisionnement en combustibles fossiles était de 1200 milliards de dollars en 2014.

En plus de ces mesures, l'AIE a souligné le rôle de la finance durable et de la composante humaine pour assurer cette transition énergétique à l'horizon 2050.

Mobilisation des investissements et de la finance

Les investissements liés à la transition énergétique propre passeront à environ 4 000 milliards de dollars par an d'ici 2030. Le scénario APS voit des progrès sur ce front, mais le niveau d'investissement requis dans le scénario NZE est trois quarts plus élevés. Cette expansion se traduit par une augmentation de 1 100 milliards de dollars par rapport au scénario APS (des investissements annuels dans la production d'énergie propre et les infrastructures électriques), une hausse de 500 milliards de dollars des investissements dans l'efficacité énergétique et la décarbonation des utilisations finales dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports.

Figure 38 : Taux des investissements en énergie propres et les investissements par type et par scénario sur la période 2026-2050



Dans le rapport AIE (2021), les besoins totaux en investissements énergétiques dans les scénarios se subdivise en quatre catégories :

Faibles émissions : investissements qui fournissent de l'énergie ou des services énergétiques à zéro émission (ou à très faible émission) notamment ceux en liens avec l'évolution du système énergétique. Les exemples incluent les énergies renouvelables, les carburants à faibles émissions, le CCUS et la capture directe de l'air.

Contingent : investissements qui pourraient fournir ou permettre une énergie ou des services énergétiques à zéro émission, autres que dans la première catégorie. Nous citerons l'investissement dans les réseaux électriques, l'électrification des équipements d'utilisation finale ou l'amélioration de l'efficacité des appareils électriques, et les véhicules électriques, qui reposent sur la décarbonation éventuelle de la production d'électricité.

Transition : investissements qui permettent de réduire les émissions mais ne fournissent pas eux-mêmes d'énergie ou de services énergétiques à zéro émission. Les exemples incluent des mesures d'efficacité ou de flexibilité qui réduisent l'utilisation de combustibles fossiles, des investissements dans la substitution des combustibles du charbon ou du pétrole par des alternatives moins polluantes

Combustibles fossiles : investissement qui ne permet pas de réduire les émissions à partir de 2021, soit les investissements dans le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Les exemples incluent les investissements dans les mines de charbon et dans les centrales électriques au charbon sans relâche.

La réalisation de transitions énergétiques propres et rapides dépend aussi de l'amélioration de l'accès à un financement à faible coût pour les projets d'énergie propre. Il est estimé qu'environ 70 % des investissements dans les énergies propres devront être réalisés par des développeurs privés, des consommateurs et des financiers en réponse aux signaux du marché énergétique et aux politiques définies par les gouvernements. Mais les acteurs publics de financement sont également nécessaires comme les SEO (State-Owned Entreprises) qui devront canaliser les capitaux privés. La mobilisation des investissements dans les énergies propres dépendra de l'obtention de financements auprès de sources locales et internationales. Pour la mobilisation des investissements internationaux, l'institution de financement du développement (IFD) et les banques multilatérales de développement (BMD) joueront un rôle central de catalyseur. Rappelons que 100 milliards de dollars par an dans le financement climatique est nécessaire pour respecter l'engagement pris par les pays développés. En 2020, les engagements de financement climatique déclarés par les banques multilatérales de développement (BMD) ont dépassé 65 milliards de dollars, soit plus du double du montant d'il y a cinq ans, et représentaient près de 30 % de leur financement total. Certaines BMD visent à faire passer les investissements climatiques de 30 % à plus de 50 % de leur portefeuille d'ici 2025.

De plus, pour que les transitions énergétiques puissent se dérouler dans de bonnes conditions, les développeurs et les financiers privés vont devoir augmenter le montant des capitaux alloués (notamment aux économies émergentes et en développement). L'importance croissante accordée à la finance durable doit encourager ces changements. *Cependant, tout le monde s'accorde sur le fait que ce financement durable n'est possible que les entreprises se fixent des objectifs crédibles (tenant compte des avancées de la Science, et donc des rapports du GIEC).* Ces objectifs doivent inclure des mesures de réduction des émissions et reposer sur des indicateurs de performance (KPI) permettant à la communauté financière de tenir compte de ces investissements contingents et de transition dans les taxonomies de la finance durable.

Si les transitions énergétiques renvoient aux changements technologiques, à l'utilisation de l'énergie renouvelable ou encore au financement des investissements, elles doivent être aussi centrées sur l'évolution des pratiques sociales et les modes de vie. Par mode de vie, on entend ici les modes de consommation, les modes d'habitat, la mobilité... Il est primordial de prendre en charge les bouleversements susceptibles d'être engendrés par ces transitions. C'est par exemple le cas de la pauvreté énergétique. Aucun système n'est durable s'il continue d'exclure une grande partie de la population mondiale de l'accès à l'énergie moderne. Cela signifie aussi placer les considérations d'emploi, d'équité, d'inclusion, d'accès et de développement durable au centre de ce processus. Le rapport de l'AIE (2021) avançait les chiffres de 13 millions de travailleurs supplémentaires d'ici 2030 dans le scénario APS, et de 26 millions dans le scénario NZE. Bien entendu, les citoyens devront participer à ce processus en axonnant le levier de la sobriété énergétique.

Conclusion

Face à l'urgence climatique (émissions des gaz à effet de serre, pollution atmosphérique, montée des températures et des eaux...) et l'éventuelle raréfaction des énergies fossiles, les principaux acteurs (institutions internationales et nationales, Etats, entreprises, consommateurs) du secteur énergétique (et des autres secteurs) sont amenés à changer leurs modes d'extraction, de production, d'échange, d'utilisation et de consommation de l'énergie. Les dernières recommandations du GIEC (IPCC, 2022) sont d'ailleurs très claires, il convient d'infléchir la tendance actuelle dans les trois ans qui viennent, sans cela, notre adaptation aux changements climatiques devra être brutale et contrainte. La notion de *transitions énergétiques* symbolise à elle-seule, cette nécessité de s'adapter aux modifications de son environnement.

C'est dans ce contexte de profonde incertitude, qu'une réflexion sur les scénarios à l'horizon 2030 - 2050 constitue un enjeu de taille. Penser l'avenir, c'est une manière d'imaginer un futur proche et lointain à la fois, c'est un moyen de changer de trajectoire, c'est une capacité à se projeter et à mettre tous les moyens nécessaires pour atteindre son objectif. Bien entendu, il existe des divergences importantes sur la manière de narrer ce futur. De nombreux Etats prônent avant tout la sécurité énergétique. Ils expriment ainsi leur volonté de ne pas dépendre, sur l'échiquier géopolitique, d'un fournisseur trop envahissant (voir tous les débats autour des gazoducs reliant la Russie à l'Europe, et la volonté d'agir sur la demande d'énergie fossile, IEA, 2022), D'autres font remarquer que les transitions énergétiques doivent s'appuyer sur une approche holistique. Il s'agit de prendre en compte toute la complexité du système énergétique, en insistant sur la *dimension sociale* (les conséquences d'une hausse du prix de l'énergie sur une population fragilisée, les inégalités d'accès, la précarité énergétique...), la *dimension géopolitique* (conflits et intérêts géopolitiques autour de l'exploitation et le transport du gaz et du pétrole), la *dimension environnementale* (émissions de GES, pollution atmosphérique), la *dimension culturelle* (comportement des consommateurs, mode de vie), la *dimension technologique* (investissements, brevets...) ou encore la *dimension économique* (évolution de la demande et de l'offre d'énergie, sobriété énergétique, prix de l'énergie ...).

De ce point de vue, les scénarios constituent un excellent exercice d'analyse et de compréhension des forces en présence, des images du futur que l'on projette et du niveau d'acceptabilité sociale du changement qu'elles nécessitent. Dans une approche systémique, le scénario conduit à décrire comment les choses devraient être. La scénarisation devient un champ de recherche qui s'inscrit au cœur de la modélisation du système énergétique... Nous ne sommes plus dans la logique « bien-pensante » de la trilogie (Business as Usual qui correspond à la vision pessimiste, scénario médian et vision optimiste) mais bien dans la définition d'hypothèses de travail. C'est un véritable changement de paradigme qu'il convient d'engager et la sobriété énergétique pourrait bien s'imposer comme l'un des principaux leviers de ce changement.

Références bibliographiques

- ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Synthèse*.
- ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Compressé*.
- ADEME (2013). *Les scénarios de transition énergétique 2030 - 2050*.
- ADEME (2009). *Marchés, emplois et enjeux énergétiques liés aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique. Situation 2007 - 2008*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ALVARES C. (2021). *COP 26, le pacte de Glasgow, reflet du déni climatique des pays riches*. Novethic, le 15 novembre. <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/le-pacte-de-glasgow-n-est-que-le-reflet-du-deni-climatique-des-pays-riches-150309.html>
- ANCEL F. (2018). *Perspectives Energies 2050*. Connaissance des Énergies, Editions.
- ANSARI D., HOLZ F., AL KUHLANI H. (2019). *Energy Outlooks Compared : Global and Regional Insights*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin.
- AOUN M.C (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, Connaissances des Énergies, 15-18.
- APPERT O. (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, Connaissances des Energies, 19-22.
- ASSOCIATION NEGAWATT (2021). *La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale*. Synthèse du scénario NegaWATT 2022. <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>
- ATTALAH M. (2020), *L'apport de la science-fiction, raconter le capitalisme...* in Desaunay C., De Jouvenel F. (eds), *Scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050*. Rapport VIGIE 2020, Futuribles International.
- AYMOZ G. (2018). *Les outils mis au service des pouvoirs publics pour promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments*. *Annales des Mines*, n°90, 45 - 48.
- BAGHAI M., COLEY S., WHITE D. (1999). *The Alchemy of Growth : Practical Insights for Building the Enduring Enterprise*. Perseus Books.
- BALLOT-MIGUET B., BUI-VIVAN F., DURAND J.P, GOUSSARD L., PETIT S., TIFFON G. (2019). *Industrie et grande distribution : sociologie de l'efficacité énergétique*. *La Revue de l'Energie*, n°646, 16 - 30.
- BALZANI V. (2019), *Saving the planet and the Human Society : Renewable Energy, Circular Economy, Sobriety*. Substantia. *International Journal of the History of Chemistry*, vol 3 (2), 9 - 15.
- BELLEVRAT A.R, RUDINGER A., COLOMBIER M., GUERIN E. (2013). *Scénarios de transition énergétique*. IDDRI. Working Paper, n°9, 13 juin.
- BERGER G. (1959). *L'attitude prospective*. Encyclopédie française, tome XX, *Le monde en devenir : histoire, évolution, prospective*. Paris. Société Nouvelle de l'Encyclopédie française. p. 20/54/12-14.

- BERGER G. (1957). Sciences Humaines et prévision. *Revue des deux Mondes* (1829-1971), 1er février, 417 - 426.
- BOBIN J.L, NIFENECKER H., STEPHAN C. (2021), *L'énergie dans le monde, bilan et perspectives*, EDP Sciences.
- BOULANGER P.M (2007)). Les barrières à l'efficacité énergétique. *Reflets et perspectives de la vie économique*, tome XLVI, 49 - 62.
- CDE (2018). Perspectives énergétiques 2050. Connaissance de l'énergie.
- CHANCEL L, SAUJOT M. (2013). Inégalités, vulnérabilités et transition énergétique, IDDRI, *Policy Briefs*, n°02/13 www.iddri.org
- CHARLIER D. (2014). Efficacité énergétique dans le bâtiment et paradoxe énergétique : quelles conséquences pour la transition énergétique. *Revue d'Economie Industrielle*, vol 148, 4^e trimestre, 229 - 262.
- CHATEAU B. (2016). Les politiques d'efficacité énergétique : problématiques, moyens et outils d'évaluation. *Encyclopédie de l'énergie*.
- CME (2013). *Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050*. Conseil Mondial de l'Énergie.
- COCHET Y. (2000). *Stratégie et moyens de développement de l'efficacité énergétique et des sources d'énergie renouvelables en France*. Rapport au Premier Ministre. <http://www.ofme.org/documents/actualite/200009/cochet.pdf>
- COLIN A., VAILLES C., HUBERTICE R. (2019), *Comprendre les scénarios de transition - Huit étapes pour lire et interpréter ces scénarios*, 4CE (Institute for Climate Economics).
- COLLSTE D., AGUIAR A.P D., HARMACKOVA Z.V, GALAFASSI D., PEREIRA L.M, SELOMANE O., DER LEEUW S. (2019). *Three Horizons for the Sustainable Development Goals : A Cross Scale Participatory Approach for Sustainability Transformations*. https://sustainability.sciencesconf.org/data/pages/52.Collste_2019.pdf
- CORMIER C., TESKE S. (2013), *Scenario for Energy transition*. Greenpeace France.
- CURRY A. (2012). The Scenarios Question in *The Future of Futures*. Association of Professional Futurists.
- CURRY A., HODGSON A. (2008). Seeing in Multiple Horizons : Connecting Futures to Strategy. *Journal of Futures Studies*. Vol 13 (1). 1 - 20.
- CURRY A., HODGSON A., KELNAR R., WILSON A. (2006). *Intelligent infrastructure systems : The scenarios - towards 2055*. London : Foresight Programme. Retrieved April 18, 2008, from http://www.foresight.gov.uk/Previous_Projects/Intelligent_Infrastructure_Systems/Reports_and_Publications/Intelligent_Infrastructure_Futures/Index.html
- DAVID B., DE LATTRE-GASQUET M., MATHY S., MONCOMBLE J.E, ROZENBERG J. (2014). Prospective énergétique : le possible, le souhaitable et l'acceptable. *Futuribles*, n°398, janvier-Février. 37 - 47.
- DAVIS S.J & al. (2018), Net-Zero Emissions Energy Systems. *Science*, n°360, june 29th, 1-2.

- DAURES P., FRISCH J.R (1974). Le nouveau contrat mondial : les effets de la crise énergétique sur l'équilibre international. *Revue d'Economie Politique*. Vol 84, n°5, 639 - 647.
- DELEPOUVE M. (2016), *Transition énergétique, changement de société*, Editions du Croquant.
- DEMAILLY D. & al. (2019), *I4CE, combining economic recovery with the climate. Institute for Climate Economics. Annual Report*.
- DENOLLE A.S (2016). Commentaire de la loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte. *Revue Juridique de l'Environnement*, vol 41, 99 - 104.
- DERDEVET M. (2013). La précarité énergétique : un chantier européen prioritaire. *Géoéconomie*, n°66, 37 - 50.
- DERY P. (2007). *Substitution énergétique Mythe ou réalité ? Rapport sur l'Énergie*.
- DESAUNAY C., DE JOUVENEL F. (2020), *Scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050. Rapport VIGIE 2020, Futuribles International*.
- DEVALIERE I. (2008). Au-delà des impayés d'énergie, comment appréhender la précarité énergétique ? *Population, vulnérabilités et inégalités écologiques*, vol 1, 191 - 201.
- DIEMER A. (2021), Pourquoi la sobriété énergétique doit s'imposer aux économies du Nord ? *Revue Francophone du Développement Durable*, n°18, octobre, p. 85 – 97.
- DIEMER A. (2015a). Loi sur la transition énergétique, croissance verte et développement durable. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 23 - 46.
- DIEMER A. (2015a), Une théorie décroissante de l'énergie. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 192 - 212.
- DIEMER A. (2008), La question énergétique au cœur du développement durable ? *Cahiers du CERAS*, janvier, 1 -32.
- DUPLESSIS B. (2009). Mise en œuvre des contrats de performance énergétique pour l'amélioration des installations de production frigorifique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005241/document>
- DNV GL (2020). La société norvégienne indépendante de classification.
- DUCKWORTH M., DUNN C., RINGLAND G., SCHULTZ W., WILLIAMS H. (2018), *Drivers of Change*. SAMI Consulting. Robust decisions in uncertain times. October, 28 p.
- DURUISSEAU K. (2014). *L'émergence du concept de transition énergétique. Quels apports de la géographie*. BSGLG, 63, 21 - 34.
- ELOI L. (2012), Faut-il décourager le découplage ? *Revue de l'OFCE*, n°120, p. 235 - 257.
- ENEA CONSULTING (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Énergies*, p. 57 - 60.
- ENGIE, (2021), *Dashboard de la transition énergétique*.
- EXXON MOBIL (2019). *Outlook for Energy Data*.

- EZRATTY V., DUBURCQ A., EMERY C., LAMBROZO J. (2009). Liens entre l'efficacité énergétique du logement et la santé des résidents : résultats de l'étude européenne LARES. *Environnement, Risques et Santé*, vol 8, n°6, 497 - 506.
- FEIDT M. (2009). Efficacité énergétique, quels critères ? *Termotehnica*, vol 2, 26 - 33.
- FAZELI R., DAVIDSDOTTIR B. (2015). Energy Modeling of Danish Housing Stock Using System Dynamics. Conference Paper, 33rd International Conference of System Dynamics, 1 - 19. https://www.researchgate.net/publication/281375438_Energy_Modeling_of_Danish_Housing_Stock_Using_System_Dynamics/figures?lo=1
- FHSC (2009). *Scenario Planning*. Guidance Note. Foresight Horizon Scanning Centre. Government Office for Science. October. 37 p.
- FORRESTER J.J (1968), *Principles of Systems*, Pegasus Communications.
- FRERIS L., INFELD D. (2021). *Les énergies pour une production d'électricité*. Dunod.
- FRESSOZ J.B (2014), *Pour une histoire désorientée de l'énergie*, 25èmes journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, Février, Créteil. Paris. HAL 00956441.
- FURJIMORIA S. (2017), SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways, *Global Environmental Change* 42, p. 268-283
- GARFINKEL H. (1967), *Studies in Ethnomethodology*. Englewood Cliffs. Prentice Hall. Traduction française, *Recherches en Ethnométhodologie*, PUF, 2007.
- GAUDIN T. (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, *Connaissances des Énergies*, p. 77-82.
- GAUDIN T. (2005), *La prospective*. PUF. Seconde édition (2013).
- GAUDIN T. et al. (1990). *2100, récit du prochain siècle*, Payot.
- GAZPROM (2020). *Energy Report*. August.
- GEA. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2012. ISBN 9781 10700 5198 hardback 9780 52118 2935 paperback.
- GIRAUDET L. G, BOURGEOIS C., QUIRION P. (2020). Efficacité économique et effets distributifs de long terme des politiques de rénovation énergétique des logements. *Economie et Prévision*, n°217, 43 - 63.
- GLADKYKH G., DAVIDSDOTTIR B., DIEMER A. (2021), When Justice Narratives meet energy system models : Exploring energy efficiency, sustainability and universal access in Sub-Saharan Africa. *Energy Research and Social Science*, 79, p. 1 - 17.
- GODET M. (2001), *Manuel de Prospective Stratégique*, tome 1, une discipline intellectuelle, tome 2, L'Art et la Méthode. Dunod.
- GODET M. (1993), *Apprendre à anticiper* in HAtem F. (ed), *La prospective, pratiques et méthodes*, Economica.
- GODET M. (1990). Integration of scenarios and Strategic Management. *Futures*. September, 730 - 739.

- GODET M. (1983). Impacts croisés : exemples d'applications. *Futuribles*. Novembre. 41 - 51.
- GODET M. (1977), *Crise de la prévision, Essor de la prospective*, Presses Universitaires de France.
- HATEM F. (1993), *La prospective, pratiques et méthodes*, Economica.
- HERBST A., TORO F., REITZE F., JOCHEM E. (2012), Introduction to Energy Systems Modelling, *Swiss Journal of Economics and Statistics*, vol 148, 111 - 135.
- HEUBAUM H., BIERMANN F. (2015). Integrating Global Energy and Climate Governance : The Changing Role of The International Energy Agency. *Energy Policy*, vol 87, p. 229 - 239.
- HUSSERL E. (1913), *Logische Untersuchungen, Erster Band. Prolegomena zur reinen Logik*. Halle a.d.S, Max Niemeyer. Traduction française Recherches Logiques, tome 1, *Prolégomènes à la logique pure*, PUF, 1959.
- IBBITSON J., BRICKER D. (2019), *Empty Planet, The Shock of Global Population Decline*, Penguin, Random House.
- IEA (2022). A 10-Point Plan to Cut Oil Use. *International Energy Agency*, march 18th, 17 p.
- IEA (2021). *Renewables, Analysis and Forecast to 2026*. Report. December.
- IEA (2021). *World Energy Outlook*, October.
- IEA (2021). *Net Zero by 2050, A Road Map for the Global Energy Sector*, Report, May.
- IEA(2020). *Global Energy Review*, July.
- IEA (2019). *World Energy Outlook 2020*, Executive Summary.
- IEA (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*.
- IIDF (2016). *La transition. Connaître et partager pour agir*. Octobre. Institut international de la francophonie.
- IPPC (2022), Climate change 2022, Mitigation of Climate change, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2913 p.
- IPPC (2021), Climate Change 2021 - The biophysical Science Basis. [archive], sur ipcc.ch (consulté le 15 août 2021).
- IRENA (2018). Rapport. *Agence Internationale pour les énergies renouvelables*.
- IRENA (2012). Rapport. *Agence Internationale pour les énergies renouvelables*.
- JACCARD M. K (2005), *Sustainable Fossil Fuels : The Unusual Suspect in the Quest for Clean And Enduring Energy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- JANCOVICI (2012). *Les limites énergétiques de la croissance*, Gallimard, Le débat, n°171, p. 80 - 95.
- JEFFERSON M. (2012). Shell Scenarios : what really happened in the 1970s, and what may be learned for Current World Prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, vol 79.

- JEFFERSON M., VOUDOURIS V. (2011). Oil Scenarios for Long Term Business Planning : Royal Dutch Shell and Generative Explanation, 1960 - 2020. *CIBS Working Papers Series n°18*. January, 41 p.
- JEMLI R., CHTOUROU N. (2019). *Mutation énergétique et développement durable : survol théorique*. In R. Feki, S. Redzepagic (eds), *Orienter l'investissement vers un développement durable et une croissance partagée*. CEMAFI International.
- JOUZEL J. (2021), COP 26, le problème c'est le fossé entre les textes et la réalité. *Libération*, 13 novembre.
- JULIAN M. (2021), *Evaluation et optimisation des stratégies visant à introduire les énergies renouvelables dans la production électrique pour l'habitat*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- JENKINS K., McCAULEY D., HEFFRON R., HANNES S., REHNER R. (2016), Energy justice : A conceptual review. *Energy Research and Social Science*, 11, p. 174–182,
- LATOUCHE S., HARPAGES D. (2013). *Le temps de la décroissance*. Le Bord de l'eau.
- LAZAR R. (2014), Transition énergétique : quels moyens pour diversifier le mix énergétique ? *Revue de l'Energie*, vol 622, p. 457 - 462.
- LEVACHER L., CLODIC D., MARECHAL F. (2009). Efficacité énergétique pour l'industrie, des technologies existantes aux solutions innovantes. ECLEER. https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2009/Communications/60.pdf
- LEVY J.B (2021), *Extraits du propos introductif du PDG d'EDF relatifs aux énergies renouvelables*. Commission du Sénat, le 10 novembre.
- LIPIETZ A. (2012). *Le Green Deal*. La Découverte.
- LUTZ W., GOUJON A., KCS., STONAWSKI M., STILIANAKIS N. (2018), *Demographic and Human Capital Scenario for the 21st century*. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
- LUTZ W., MUTTARAK R. (2017), Forecasting Societies Adaptive Capacities Through A Demographic Metabolism Model, *Nature Climate Change*, vol 7, 177 - 184.
- MARESCA B. (2014). *Sur le chemin de la sobriété énergétique. Engager les français au-delà des éco-gestes*. CREDOC, Consommation et modes de vie, n°265, 1 - 4.
- MEUNIER F. (2008), *Les énergies renouvelables*, Le cavalier Bleu.
- MIETZNER D., REGER G. (2004), *Scenario Approaches History, advantages and disadvantages*. EU Seminar. New Technologies Foresight, Forecasting & Assessment, Seville, 13 - 14 may, p. 48 - 61.
- NAUDET G., REUSS P. (2008), *Marchés et prix de l'énergie*, EDP Sciences.
- OCDE (2014). *Intensité énergétique*. In Economic, Environmental and Social Statistics, Éditions OCDE, Paris. DOI : <https://doi.org/10.1787/factbook-2014-43-fr>
- O'NEILL B. (2015), *The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century*, p. 169, 180.

- ORIOU J. (2020), Efficacité énergétique en Allemagne, Etat des lieux : novembre 2020, Office franco-allemand pour la transition énergétique, OFATE – DFBEW, p. 1-6.
- PAPON P. (2000), L'anticipation des ruptures. la prospective des sciences et techniques, et l'identification précoce des zones de rupture. *Futuribles*, n°366, Recherches, Sciences et Techniques.
- PERSOON L. & al. (2021). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science and Technology*. November, p. A – L.
- PERTHUIS C., SOLIER B. (2018). *La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique*. Chaire Economie du Climat. Septembre. <https://www.chaireconomie.duclimat.org/wp-content/uploads/2018/09/18-09-14-FLM-Transitions-énergétiques.pdf>
- PESCATORI A., STUERMER M., VALCKX N. (2021), La flambée des prix de l'énergie risque de durer jusqu'à l'an prochain, Fonds Monétaire International (FMI), Blog. <https://www.imf.org/fr/News/Articles/2021/10/22/blog-surg-ing-energy-prices-may-not-ease-until-next-year>
- PFENNINGER S., HAWKES A., KEIRSTEAD J. (2014), Energy Systems Modeling for Twenty-first Century Energy Challenges, *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol 33, p. 74 - 86.
- PINEAU P.O (2021). L'efficacité énergétique pour soutenir la transition énergétique : enrichir le Québec et lutter contre les changements climatiques. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2021/08/MemoireLoiEE_HEC-Pineau_aout2021.pdf
- RAGAZZI G. (2019). *Les modèles économiques dans la Transition Énergétique bas carbone à l'échelle locale*. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres.
- RENOU P. (1991), Modélisation des substitutions énergétiques dans les pays de l'OCDE, *Cahier du CEG*, n°10, hal-02432734.
- REVEST C. (2013). *Les termes clés de la transition énergétique*. Sciences et Techniques. <https://balises.bpi.fr/les-termes-cles-de-la-transition-energetique/>
- RIAHA K. (2017), The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications, *Global Environmental Change* 42, p. 153-168.
- ROCKSTRÖM J. & al. (2009). Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, vol 14, 1 – 26.
- RUEDINGER A., AYKUT S.C (2015), Les transitions énergétiques allemande et française. *Annuaire français de relations internationales*. Paris : La Documentation française, 16, 389-407.
- SCHWARTZ P. (1991). *The Art of Long View*. Doubleday Publisher.
- SCHOEMAKER P.J.H, VAN DER HEIJDEN C.A.J.M (1993). Strategic Planning at Royal Dutch. Shell. *Journal of Strategic Change*. Vol 2, 157 - 171.
- SER (2020). *L'évaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires*. Syndicat des Energies Renouvelables.

- SHARPE B., HODGSON A., LEICESTER G., LYON A., FAZEY I. (2016). Three Horizons : a Pathways Practice for Transformation. *Ecology and Society*. June, vol 21 (2), 16 p.
- SHARPE B. (2013). *Three Horizons : Patterning of Hope*. Triarchy Press. Axminster. Devon. UK.
- SHARPE B., HODGSON T. (2006). *Intelligent Infrastructure Futures Technology Forward Look*. Report for the Foresight Programme of the Office of Science and Technology (UK). London. http://databaseanswers.org/foresight/Technology_Forward_Look.pdf
- SHARPE B., HODGSON T., PAGE I. (2006). *Energy Security and Climate Change*. Discussion Paper. International Futures Forum. Aberdour.
- SHELL (2019). *Outlook for Energy : A perspective to 2040*. Report.
- SHELL (2012). *40 years of Shell Scenarios, 1972 - 2012*.
- SHELL (2008). *Shell Global Scenarios to 2025*, 2nd Edition.
- SPITTLER N., GLADKYKH G., DIEMER A., DAVIDSDOTTIR B. (2019), Understanding the Current Energy Paradigm and Energy System Models for More Sustainable Energy System Development. *Energies*, vol 12, 1584, 1-22.
- STEFFEN W. & al. (2015). Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*. February, vol 347, Issue 6223.
- STERLING GREGG J., NYBORG S., HANSEN M., SCHWANITZ V.J, WIERLING A., ZEISS J.P, DELVAUX S., SAENZ V., POLO-ALVAREZ L., CANDELISE C., GILCREASE W., ARROBBIO O., SCIULLO A., PADOVAN D. (2020), Collective Action and Social Innovation in the Energy Sector : A Mobilization Model Perspective. *Energies*, vol 13, p. 1 - 24.
- STOFFAES C. (1982). La vérité (économique) sur le prix du pétrole. *Politique étrangère*, vol 47, n°3, 595 - 616.
- TOTAL (2020). Communiqué de presse, résultat du quatrième trimestre 2020.
- TOULOUSE E. (2020). La sobriété énergétique. Une notion disruptive de plus en plus étudiée. *La Revue de l'Energie*, n°649, mars-avril, 21 - 32.
- VILLALBA B., SEMAL L. (2018). *Sobriété énergétique. Contraintes matérielles, équité sociale et perspectives institutionnelles*. Editions Quae.
- WEC (2013). *World Energy Scenarios : Composing Energy Futures to 2050*. World Energy Council.
- WIRZ H. (2018). Décroissance et sobriété : une nouvelle mission pour l'urbanisme ? *Tous Urbains*, n°22, 26 - 29.
- WIESENFELD B. (2013), *Promesses et réalités des énergies renouvelables*, EDP Sciences.
- ZAZINETTI (2008), Le peuplement de la Terre se concentre t'il sur les littoraux ? *Population et Avenir*, n° 689, p. 14 - 16.

Les scénarios de transitions énergétiques de la France à l'horizon 2050, quelques éléments de compréhension

Arnaud DIEMER, Chafia BESSALEM, Delice MUSAFILI ISIMBI
Université Clermont Auvergne (UCA), CERDI, ERASME, Clermont-Ferrand,
FRANCE

Résumé : Face à l'urgence climatique, de nombreuses institutions nationales sont amenées à proposer des scénarios de transitions énergétiques. Dans le cas de la France, l'ADEME, RTE, NEGAWATT et THE SHIFT PROJECT ont tour à tour esquissé leur vision à l'horizon 2030 et 2050. Ces scénarios proposent d'engager la France, sur le chemin de la sobriété et de l'efficacité énergétique, du mix énergétique dominé par les énergies renouvelables et/ou le nucléaire, de la mobilité douce ou encore de l'agroécologie et de la rénovation thermique des bâtiments. L'article que nous proposons, entend décrypter et analyser l'ensemble de ces scénarios afin de les comparer pour en faire ressortir les points communs mais également les divergences. Afin de synthétiser ces différentes visions, nous avons mobilisé la dynamique des systèmes et plus particulièrement les diagrammes de boucles causales. Ces outils permettent de comprendre les relations d'interdépendance qui sont générées au sein d'un scénario et de mieux cerner les enjeux des transitions énergétiques à l'échelle de la France.

Mots clés : Efficacité, Energie renouvelable, Scénarios, Sobriété

Introduction

La décarbonation du système énergétique mondial est au cœur de toutes les politiques publiques et industrielles, dès lors que les émissions de gaz à effet de serre (GES) issues des activités humaines ont pour conséquence un réchauffement climatique global. Le système mondial étant essentiellement consommateur d'énergies fossiles (plus de 80% de la consommation mondiale d'énergie), cette situation est dorénavant incompatible avec les engagements pris par les États en 2015 (Accords de Paris) et visant à limiter le réchauffement climatique à 2°C (GIEC, 2023). Cette pollution est principalement due à la combustion/oxydation du charbon, du gaz naturel (méthane) et d'hydrocarbures divers issus du pétrole (ressources qui restent épuisables et non renouvelables), pour les besoins potentiels du transport, du chauffage des bâtiments, de l'industrie, de l'agriculture (notamment suite à la mécanisation agricole) et donc des secteurs les plus consommateurs en énergie (Diemer, 2015a). Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les émissions mondiales de dioxyde de carbone liées à l'énergie ont augmenté de 6 % en 2021, pour atteindre 36,3 milliards de tonnes, niveau le plus élevé jamais atteint. Les experts estiment que 40 gigatonnes de CO₂ s'échappent et s'accumulent annuellement dans l'atmosphère.

Pour pallier à cette situation, les Etats se sont engagés dans une course visant à (i) réduire la consommation d'énergie en s'appuyant sur la sobriété et l'efficacité énergétiques (cela devrait permettre de prémunir les ménages et les entreprises contre

la flambée des prix de l'énergie, de diminuer les émissions de CO₂ et de faire baisser le déficit commercial) et à (ii) décarbonater l'énergie en réduisant la part des énergies fossiles (décarbonater signifie donc, trouver et développer de nouvelles sources d'énergie, dites bas-carbone parce qu'elles émettent peu de CO₂ par unité d'énergie fournie, pour remplacer définitivement l'usage des ressources fossiles). La décarbonation est un volet essentiel des projets de transition énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique des différents Etats. Cependant, pour généraliser le développement des sources d'énergies bas-carbone, il est impératif de déterminer avec rigueur leurs véritables potentialités (leur impact sur l'environnement, leur empreinte carbone sur tout le cycle de vie) et les conditions réelles, aussi bien physiques, technologiques, sociales et économiques,

autorisant leur déploiement à très grande échelle. Précisons que la stratégie de décarbonation du système énergétique et l'impératif de la réduction des émissions des GES ont amené bon nombre de pays à privilégier la voie du découplage (ce terme est utilisé pour désigner la possibilité d'une hausse du produit intérieur brut - PIB - accompagnée d'une baisse des consommations d'énergie et des impacts environnementaux) dans la modélisation et les scénarios prospectifs du système énergétique (Bessalem, Diemer, Batisse, 2022). Ces outils de décisions sont largement utilisés pour définir les stratégies bas-carbone sur les horizons 2030 et 2050. Dans le cas de la France (comme la Norvège, la Suède ou la Suisse), la consommation finale d'énergie présente une empreinte carbone acceptable. Selon RTE (gestionnaire de réseau de transport français), les émissions de CO₂ du secteur électrique français auraient diminué de près de 9 % en 2020 par rapport à l'année 2019. Cette performance est principalement due à la production d'énergie décarbonée (environ 29% de la consommation finale d'énergie en France est électrique, soit près de 470 TWh en 2019). Cette électricité est produite en majorité par le parc nucléaire (56 réacteurs en activité) et le parc hydroélectrique (même si l'engagement politique présidentiel s'est porté sur une diminution de la part de l'énergie nucléaire dans la consommation électrique totale afin qu'elle ne représente plus que 50% en 2035).

Dans cet article, nous allons nous intéresser aux scénarios énergétiques élaborés pour la France sur l'horizon 2030-2050 notamment ceux publiés par RTE (le gestionnaire du réseau de transport d'électricité), Négawatt (association et institut rassemblant des spécialistes des énergies), l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) pour la transition écologique) et le SHIFT-Project afin de comprendre sur quelles bases vont se forger les décisions publiques dans les 4 prochaines années. Dans la première partie, nous décrivons l'ensemble de ces scénarios, principalement leurs hypothèses, leurs caractéristiques et leur méthodologie. Nous présentons les scénarios à l'aide d'un diagramme de boucles causales (CLD) issues de la dynamique des systèmes (logiciels Stella et Vensim) afin de faire ressortir les principaux leviers suggérés par les quatre institutions que sont RTE, l'ADEME, NÉGAWATT et le SHIFT PROJECT. Un diagramme de boucles causales se compose de quatre éléments de base

: les variables, les liens entre elles, les signes sur les liens (qui montrent comment les variables sont interconnectées via des polarités positives ou négatives) et le signe de la boucle (qui indique le type de comportement que le système produira). En représentant un problème ou une question d'un point de vue causal, il est possible de visualiser les forces structurelles à l'origine du comportement d'un modèle (Richardson, 1997, Sterman, 2001, Lannon, 2012, Diemer, 2022). Dans une seconde partie, nous effectuons une analyse comparative et critique des différents scénarios, en soulignant les points communs et les points d'achoppement. Nous insistons également sur les limites méthodologiques et conceptuelles.

Description des scénarios énergétiques de la France

Dans le cadre des débats politiques sur la Stratégie de la France Energie-Climat et en rapport avec les engagements de l'Accord de Paris pour contenir le réchauffement climatique sous le seuil des + 2 °C, de nombreux scénarios de transition énergétique ont été proposés par des organisations nationales concernant le choix du mix énergétique du pays à l'horizon 2030-2050. Ces scénarios décrivent des trajectoires énergétiques du mix énergétique à l'horizon 2030-2050. Ces trajectoires de réduction des émissions de GES, pleines d'incertitudes et presque inconnues, doivent permettre d'atteindre un objectif de « neutralité carbone » d'ici 2050. Deux premières Stratégies Nationales Bas Carbone (SNBC) ont été proposées et ont permis de fixer les grands objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et les budgets carbone qu'elles doivent respecter pour les années à venir. Dans le présent article, nous allons nous intéresser aux scénarios élaborés et publiés à partir de 2021 par quatre organismes en France, à savoir : RTE, NégaWatt, ADEME et The SHIFT Project. Les quatre organismes suggèrent des transformations appropriées pour substituer les énergies fossiles par des énergies propres en 30 ans et accélérer de manière substantielle d'ici 2030. Ces exercices explorateurs chiffrés des futures énergétiques, permettent de traduire quantitativement les différentes visions ou aspirations normatives.

Les scénarios de l'ADEME

L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), établissement public à caractère industriel, coordonne dans le cadre de ses missions et cela depuis 2012, des réflexions prospectives sur la transition écologique française. Face à l'urgence climatique et afin de permettre à la France de respecter son objectif de neutralité carbone en matière de transition énergétique, l'ADEME a soumis fin 2021 son dernier exercice sur le sujet. Pour cet exercice, l'ADEME a élargi le cercle de la réflexion prospective pour ne pas se positionner sur le simple système énergétique, à savoir l'offre et la demande de l'énergie. Contrairement au premier exercice prospectif qu'a pu réaliser ADEME antérieurement, le champ a été élargi pour embrasser non seulement l'énergie et le climat comme précédemment, mais elle a dépassé ce cercle pour prendre en compte les ressources, l'usage des sols, l'évolution des modes de vie,

différents projets de société, etc. Elle a fait plusieurs choix méthodologiques structurants qui sont différents de ses visions prospectives précédentes. Cet exercice inspiré des scénarios d'évolution socio-économique mondiale utilisés par le GIEC (2018), a la particularité de se baser sur : (i) la réalisation de plusieurs scénarios contrastés d'atteinte de la neutralité carbone pour la France en 2050 avec une évaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; (ii) une comparaison multicritère de ces scénarios, notamment technico-économiques, sociaux et environnementaux, des conditions de leur réalisation et de leurs conséquences ; (iii) une rétrospective, un état des lieux et une trajectoire tendancielle jusqu'en 2050. La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur, électricité). Les paramètres étudiés couvrent notamment : la demande en énergies ; la consommation d'eau d'irrigation ; de matériaux de construction ; d'intrants agricoles et l'usage des sols ; la production et la gestion de déchets ; la production d'énergies et la composition du bouquet énergétique ; les importations et exportations ; le bilan des GES et les puits biologiques et technologiques de CO₂.

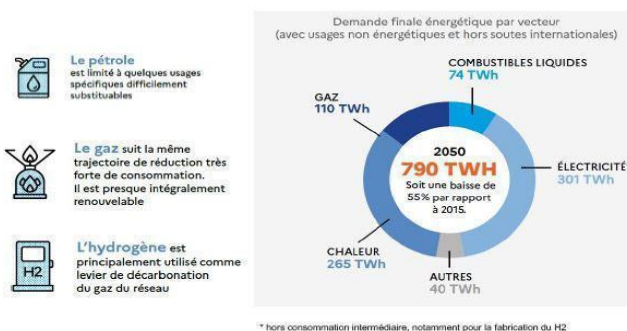
Descriptions des quatre scénarios

Les scénarios proposés sont des récits contrastés sur le contexte économique, technologique et territorial, les modes de vie, la gouvernance. Ce sont des récits de société autant que des perspectives techniques. Les scénarios sont classés de 1 à 4 en fonction de la place accordée à la sobriété énergétique. Les scénarios 1 et 2 sont les scénarios qui misent le plus sur la sobriété et la technologie, les scénarios 3 et 4 penchent plutôt vers la technologie.

- **Scénario S1 "Génération frugale"** : Comme son nom l'indique, il mise pleinement sur la sobriété. C'est un scénario dans lequel les « low tech » ont une place prépondérante. Nous qualifierons ce scénario de décroissance (Diemer, 2015b) car le recours aux low tech est un levier important pour les tenants de la décroissance (Kallis & al., 2018). Ce scénario mise sur la rénovation massive des bâtiments plutôt que sur la construction d'habitations neuves. Cela prend les traits d'une optimisation des logements vacants (pour éviter de construire trop de logements), d'une approche localisme avec moins de déplacements, moins de consommations. La proximité constitue le pari de l'avenir (Serge Latouche, l'un des pionniers de la décroissance, insiste sur la nécessité de "*revitaliser le terreau local*", 2004, p. 106). On est vraiment sur un retour à la proximité avec un fort pari sur la sobriété. Ce scénario reste le plus sobre et le plus optimiste en matière environnementale. Dans ce scénario, il est prévu un changement des modes de vie avec des habitudes alimentaires modifiées (consommation de viande divisée par trois, 70% de consommation de nourriture bio). L'achat se fait en grande majorité localement. Dans ce scénario, les grandes villes sont

délaissées au profit des zones rurales, de la réduction de la mobilité et de la rénovation de l'habitat. 70% des matières de l'industrie sont recyclées.

Figure 1 : Demande finale énergétique par vecteur (S1)

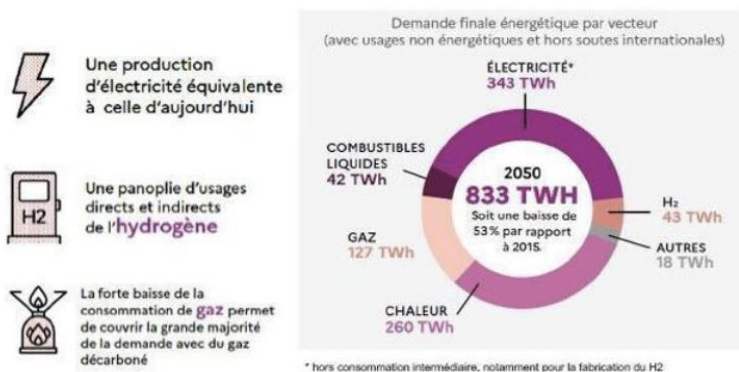


Source : ADEME

Avec ces hypothèses, la consommation d'énergie diminuerait de 55% en 2050 par rapport à 2015, soit une émission de 74 millions de tonnes de CO₂, auxquelles il faudrait retirer l'absorption de 116 millions de tonnes par les puits naturels (forêts, océans, ...). Ce qui correspond à une émission nette de - 42 millions de tonnes de CO₂. L'ADEME souligne que ce scénario de sobriété risque d'avoir un impact sur la société française, puisque la rationalisation dans les intrants des modes de vie pourrait engendrer un clivage social.

- **Scénario S2 "coopération territoriale"** : C'est un scénario très proche du scénario 1 mais on est beaucoup plus dans une dynamique de coopération, de gouvernance ouverte et sur une économie de partage. Ce scénario vise une coopération sur le territoire avec une réindustrialisation ciblée. Ici, on commence à miser sur le captage et le stockage du carbone dans le sol (mais d'une manière faible). Ce deuxième scénario fait aussi appel à la sobriété, mais dans le sens de l'entraide et du partage entre les ménages les plus modestes. Comme le scénario de génération frugale, on assiste à une modification des modes de vie, qui privilégient les liens sociaux. Selon l'ADEME, avec ce scénario de partage nous arrivons à atteindre des émissions négatives nettes de - 28 millions de tonnes de CO₂ émises en 2050.

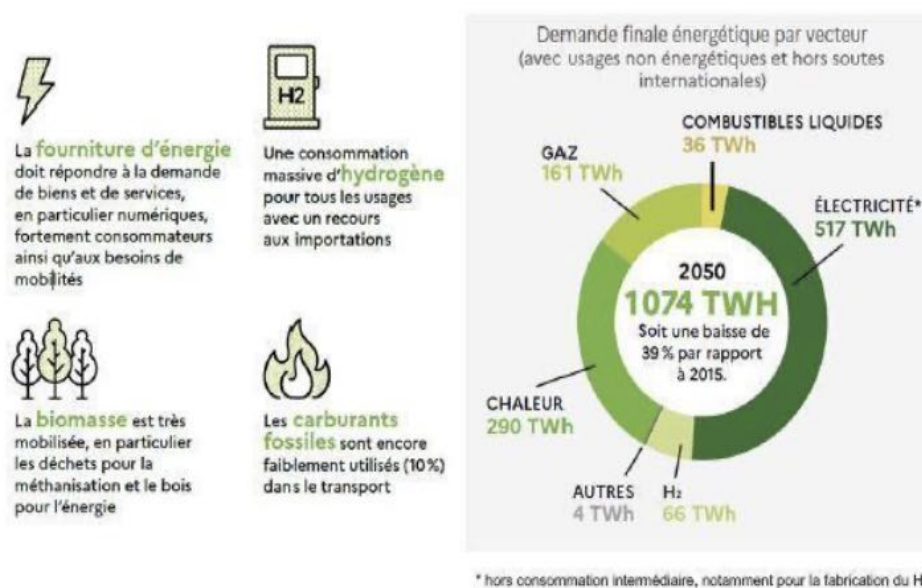
Figure 2 : Demande finale énergétique par vecteur (S2)



Source : ADEME

- **Scénario S3 "technologies vertes"** : Dans le 3^{ème} scénario, nous sommes entrés dans la croissance verte tirée par la technologie. C'est la décarbonation activée par le développement de l'hydrogène, une forte exploitation de la biomasse (via un usage intensifié des forêts) et une électrification des procédés et des usages. On retient dans ce scénario, un modèle d'aménagement très centré sur les métropoles, cela se traduit par la construction-déconstruction plutôt que la rénovation. Le potentiel de captage et de stockage de carbone est beaucoup plus fort que dans le scénario 2, ce qui permet d'atteindre la neutralité, malgré une sobriété moins importante mais avec une efficacité plus forte dans les processus. Dans le troisième scénario, la sobriété est observée dans les secteurs alimentation, transport, la mobilité, la rénovation de l'habitat...mais elle reste modérée comparativement aux deux premiers scénarios. Le recours à la technologie verte est à l'origine des économies d'énergie et de l'intégration de l'éco efficacité énergétique. Par cette trajectoire, la France peut diminuer sa consommation d'énergie de 40% en 2020. Les émissions de gaz à effet de serre seront de - 9 millions de tonnes de CO2 émis en 2050.

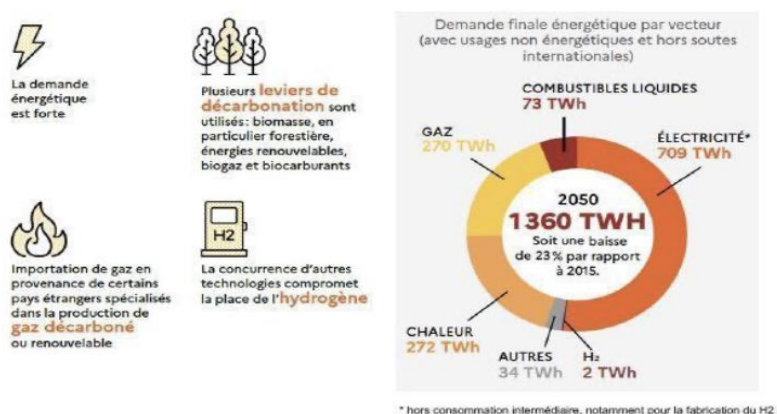
Figure 3: Demande finale énergétique par vecteur (S3)



Source : ADEME

- **Scénario S4 "pari réparateur"** : C'est un scénario « Business As Usual (BAS) » à l'opposé du scénario "Génération frugale", dans lequel il existe une continuité de nos modes de vies actuels, basés sur la consommation de masse (la nature y est exploitée comme une ressource, mais de manière non rationnelle).

Figure 4 : Demande finale énergétique par vecteur (S4)

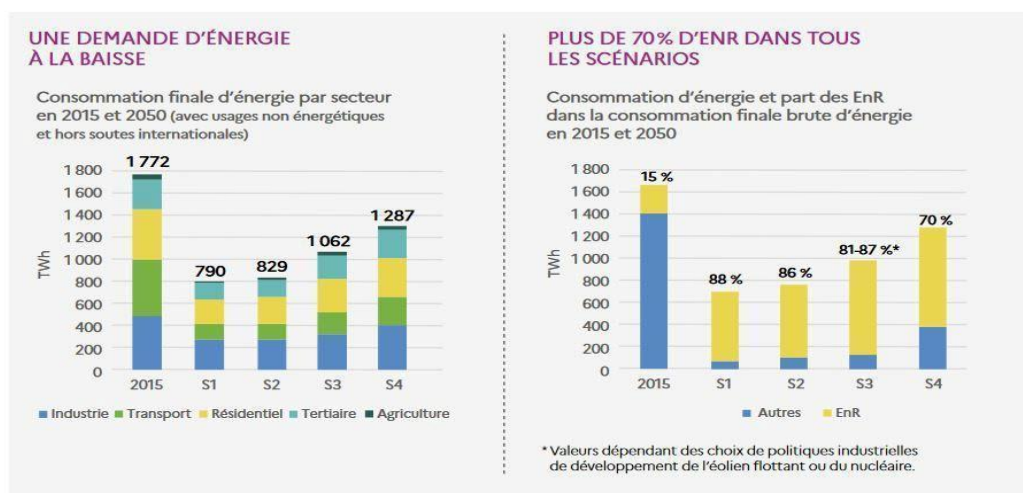


Source : ADEME

La forte urbanisation observée depuis quelques décennies, continue de se développer, un exode rural est observé et par conséquent la mobilité s'accroît. La pollution sera engendrée sans l'application de taxe d'incitation, l'agriculture intensive se poursuit avec un impact sur la biodiversité. Pour atteindre la neutralité carbone dans ce scénario, la France doit miser sur des technologies aux stades de démonstrations non encore éprouvés, d'où l'appellation de pari réparateur. Un pari fort est observé sur l'efficacité et la réduction des consommations d'énergie d'où un retour massif vers le captage et le stockage de carbone et une forte mobilisation des leviers de décarbonation. Selon l'ADEME avec ce scénario, la France peut atteindre la neutralité carbone, avec un million de tonnes de CO₂ émises en 2050.

Bien entendu, des différences notoires existent entre les quatre scénarios avec des conséquences environnementales, sociales et économiques propres à chaque scénario. Cependant, les scénarios misent sur le chiffre de 90% de voitures électriques et un mix énergétique composé à 70% d'énergies renouvelables d'ici 2050.

Figure 5 : Demande d'énergie et parts des EnR par scénario.



Source : ADEME

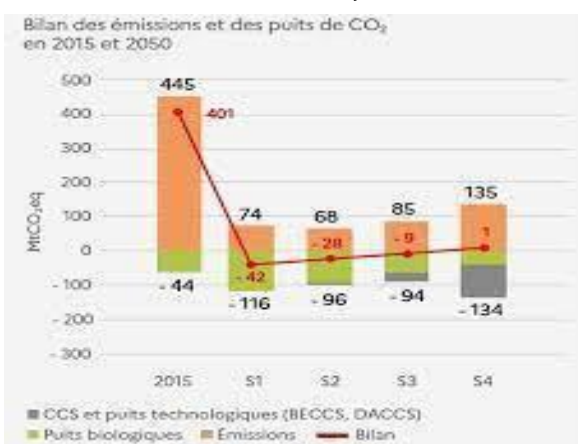
Les enseignements des quatre scénarios de l'ADEME

Sans pour autant conclure de manière hâtive sur les choix à faire en matière de scénarios, il est possible de cerner les principaux enseignements des quatre scénarios

→ ENS 1 : la neutralité carbone est un chemin difficile

Quel que soit le chemin suivi, la neutralité carbone reste un objectif difficile à atteindre. La figure 6 souligne l'importance de réduire de manière drastique nos émissions de GES. Dans les trois premiers scénarios, la réduction est un facteur de 6 à 7. Il va falloir agir vite, car les transformations sociales et techniques sont de grande ampleur.

Figure 6 : Bilan des émissions et des puits CO₂ entre 2015 et 2050



Source : ADEME

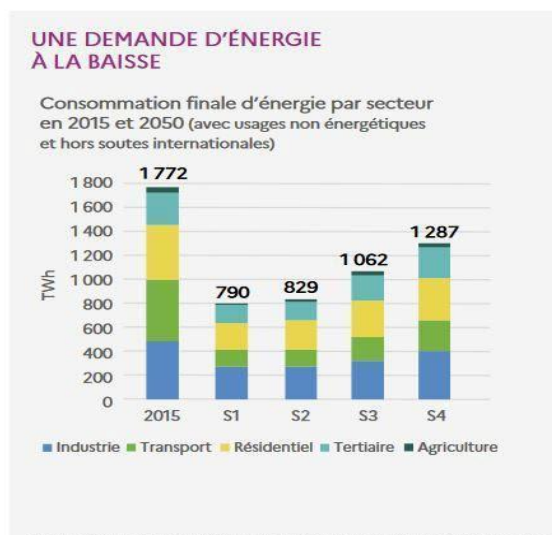
La neutralité carbone repose sur des paris humains et des paris technologiques importants. Les scénarios S1 et S4 semblent plus risqués que les autres. Le scénario S1 est clivant socialement. C'est un scénario qui nécessite un vrai accompagnement et un pari sur le changement de comportement pour arriver au niveau de sobriété. Le scénario S4 présente un risque élevé sur la faisabilité technique. La technologie est un vrai pari sur l'avenir et les technologies de captage de CO₂ ne pourront pas être mises en œuvre de façon massive avant 2050. Par conséquent, cela représente un pari fort sur les capacités de la France à stocker massivement le CO₂. Enfin, même si la réduction des émissions de CO₂ est forte dans tous les scénarios, elle varie quand même du simple au double entre les scénarios, ce qui se traduit par une pression plus ou moins forte entre les usages et les modes de vie pour atteindre ces niveaux de réduction. La place des puits technologiques de carbone sur les scénarios S3 et S4 est très importante.

→ ENS2 : Réduire la demande d'énergie et la maîtrise de la consommation des ressources

Pour réduire la demande d'énergie, facteur de la neutralité carbone, la France doit miser sur la sobriété et l'efficacité énergétique. Cela nécessite une modification radicale des modes de vie et des systèmes productifs. A titre d'illustration, la consommation d'énergie par secteur (exemple du secteur du transport) enregistre la baisse la plus

importante dans les scénarios 1 et 2. C'est surtout le résultat de la sobriété des usages et de l'évolution des besoins. On passe à 50% en mode actif par exemple dans le scénario 1 contre 20% en mode actif dans le scénario 4 (mode sobriété). Sur l'aspect efficacité énergétique, c'est le nombre de voitures neuves qui joue le rôle de levier.

Figure 7 : Consommation d'énergie par secteur entre 2015 et 2050



Source : ADEME

Pour les ressources naturelles, notamment la consommation des ressources hydriques, le scénario 4 prévoit une forte consommation, soit 4, 50 mdM³ en 2050 contre 2, 70 mdM³ dans le scénario 1.

Figure 8 : Besoin en eau d'irrigation en 2020 et 2050

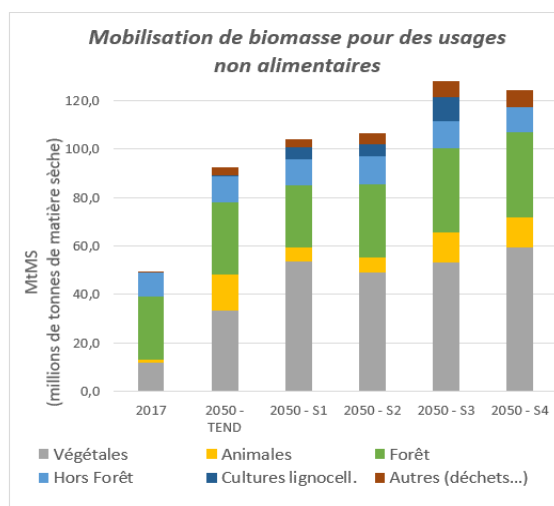


Source : ADEME

→ ENS 3 : Préserver le vivant

Préserver le vivant est un atout majeur. Trois leviers sont mobilisés. Le levier le plus important est celui du captage de carbone. Les puits de carbone naturels dans la biomasse (végétation et forêts) sont très largement utilisés dans les scénarios 1 et 2.

Figure 9 : Mobilisation de biomasse pour des usages non alimentaires



Source : ADEME

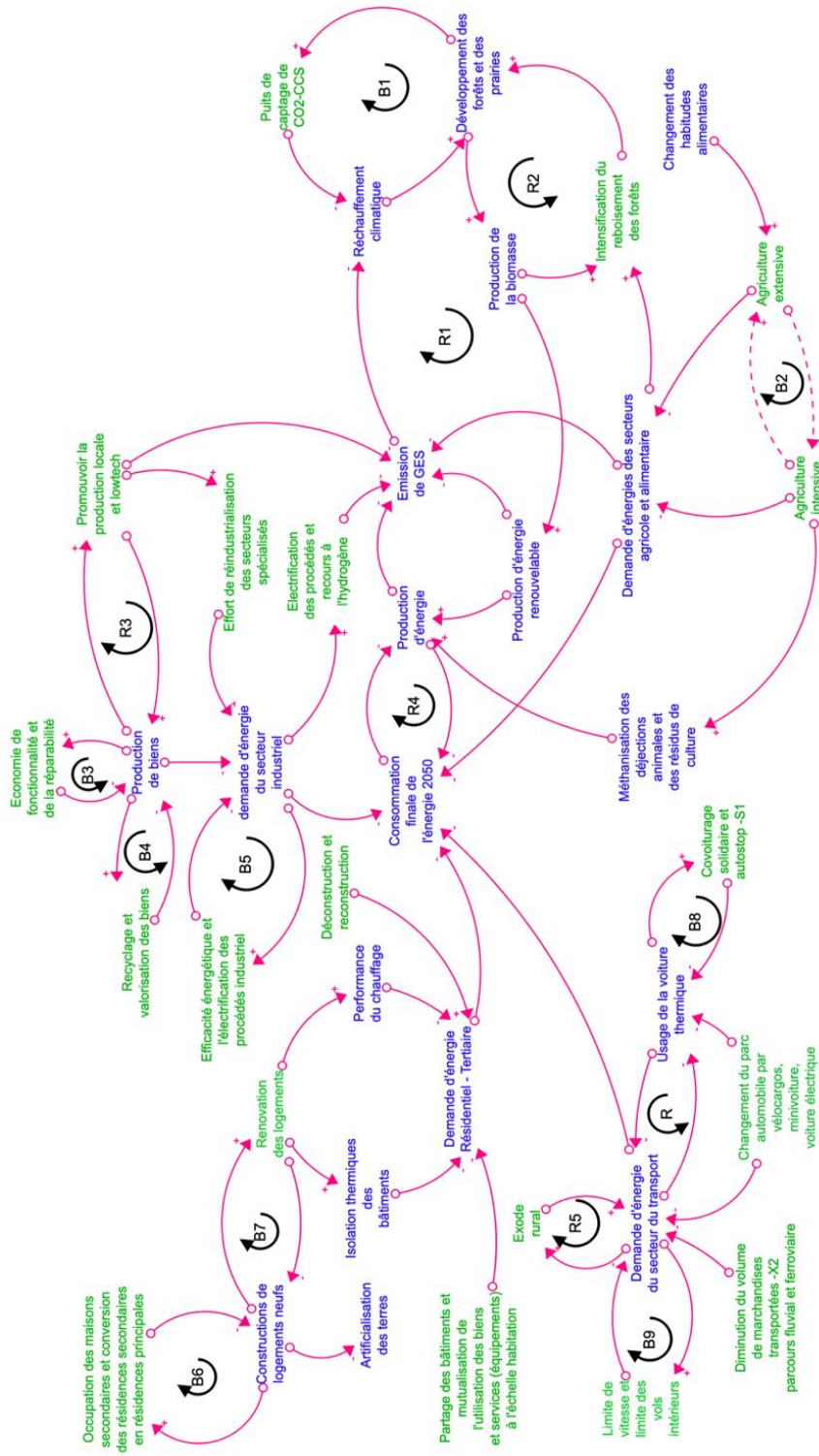
Le deuxième levier concerne la production de biomasse. La figure 9 (partie de gauche et centrale) montre un doublement des prélèvements dans tous les scénarios, avec des changements de pratiques agricoles. Les forêts et les prairies jouent leur rôle de stockage de carbone. C'est le volume de biomasse mobilisé qui permet de répondre aux besoins énergétiques et de matériaux. Le dernier levier est celui de la réduction des GES via la modification des pratiques agricoles. On a un potentiel de division par deux des émissions de GES en agriculture dans les scénarios 1 & 2.

→ ENS 4 : La place des énergies renouvelables dans le mix énergétique

Les scénarios anticipent un approvisionnement en énergies renouvelables compris entre 70 et 88%, une décarbonation du secteur du gaz, une part croissante de l'électricité dans tous les scénarios et surtout une part des énergies renouvelables hors réseau en nette augmentation (30 à 40% par rapport à 2015).

Il est possible d'appréhender les différentes dynamiques des scénarios ADEME à l'aide d'un digramme de boucles causales (CLD) introduisant les variables clés, leurs liens, les sens de polarité et les caractéristiques des boucles (figure 10). Les objectifs – neutralité carbone, sobriété et efficacité énergétique, production de biomasse, diminution de la consommation d'énergie, hausse des énergies renouvelables – reposent sur des leviers d'actions (variables en vert), qui sont souvent à l'origine de la polarité d'une boucle (les boucles de renforcement – *Reinforcing Loops* ont un signe positif, intensifier le reboisement permet d'augmenter la capacité d'absorption du CO₂... alors que les boucles de régulation – *Balancing Loops* – ont un signe négatif, la rénovation thermique des constructions peut freiner la construction de logements neufs et donc l'artificialisation des terres).

Figure 10.: Diagramme des boucles causales pour les scénarios de l'ADEME

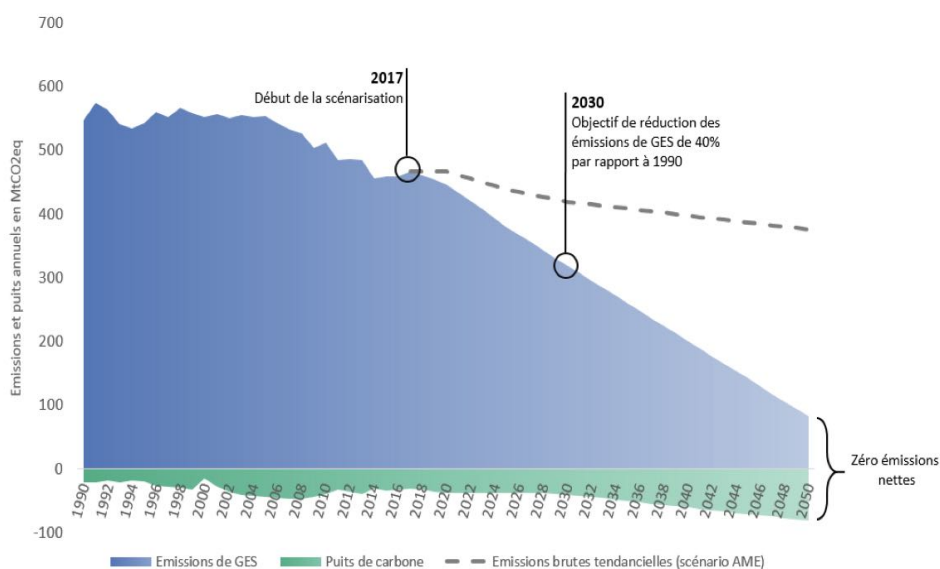


Les scénarios de RTE

La prospective est une mission légale de RTE (le gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité français). Ce dernier a l'habitude d'élaborer des études prospectives de référence à échéance de 10 à 15 ans. Le 25 octobre 2021, RTE a rendu public un rapport intitulé *Futurs énergétiques 2050*. Ce travail, qui a donné lieu à des coopérations et des partenariats avec des organisations spécialisées, a mobilisé 40 personnes et est venue en réponse à une saisine de Mme Elisabeth Borne qui était alors Ministre de la transition écologique et solidarité (2019).

Ce rapport est inédit, car la prospective est effectuée sur un horizon de 30 ans, c'est une première pour RTE. Il intègre les scénarios du GIEC et donc la dérive climatique en France et en Europe. Il a donné lieu à un dispositif de concertation qui a duré près de deux ans. Le cadrage de référence du rapport de RTE est la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), introduite par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance (LTECV). Adoptée pour la première fois en 2015, la SNBC a été révisée en 2018-2019 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (ambition rehaussée par rapport à la première SNBC qui visait le facteur 4, soit une réduction de 75% de ses émissions GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990). Ce projet de SNBC révisée a fait l'objet d'une consultation publique du 20 janvier au 19 février 2020. La nouvelle version de la SNBC et les budgets carbone pour les périodes 2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033 ont été adoptés par le décret du 21 avril 2020.

Figure 11 : Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire national 2005 - 2050



*Les émissions « tendancielles » sont calculées à l'aide d'un scénario dit « Avec Mesures Existantes » qui prend en compte les politiques déjà mises en places ou actées en 2017.

Source : SNBC, 2020, rapport de synthèse

Dans la figure 11, la neutralité carbone signifie que l'on émet autant que ce que les puits de carbone sont capables d'absorber. L'objectif est donc de réduire nos émissions d'environ 80 millions de tonnes par an (d'ici 2030, la France s'est engagée vis-à-vis de

l'Union Européenne (EU) à réduire de 55% ses émissions par rapport à 1990). Initialement, l'objectif était de réduire de 40% les émissions brutes, il a cependant été rehaussé à 55% sur les émissions nettes. Les émissions nettes étant les émissions positives moins les émissions absorbées.

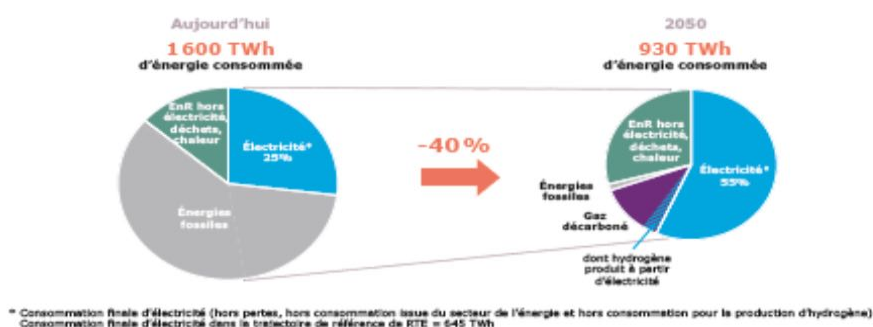
La question est donc de savoir comment suivre cette trajectoire de réduction des émissions. Le rapport *Futurs énergétiques 2050* de RTE doit permettre d'évaluer les objectifs de la SNBC et d'en mesurer les conséquences, mais également de préparer la révision de la stratégie française pour l'énergie et le climat qui doit avoir lieu en 2023 (depuis mai 2023, sept groupes de travail, réunissant de nombreux élus et acteurs de la transition énergétique étudient la trajectoire bas carbone de la France jusqu'à l'horizon 2050, leurs travaux doivent servir de point d'appui aux projets de programmation pluriannuelle de l'énergie et de stratégie nationale bas carbone).

En janvier 2021, un rapport a été publié conjointement par RTE et l'ADEME sur la faisabilité d'un mix énergétique avec une part importante des ENR. Ce rapport était un prérequis qui a permis à RTE de réaliser l'étude avec un mix 100 % ENR d'ici le milieu du 21e siècle. Ce rapport a été publié pour une consultation publique et a reçu plus de 4000 réponses. Le travail a été repris avec un nouveau cadre et la version finale du rapport a été publiée en 2021.

Caractéristiques de l'étude et modélisation du système énergétique de RTE

Le modèle RTE simule le modèle électrique à l'échelle européenne pour chaque heure de chaque année pendant 30 ans. Il intègre à chaque heure 200 chroniques (météo, vent, soleil, température, hydraulité en de nombreux points du territoire, etc.) pour en tirer les conséquences en termes de production des ENR mais aussi de consommation. Parce qu'il simule le système électrique à chaque heure, le système garantit la sécurité d'approvisionnement du pays. Donc, tous les mix énergétiques garantissent la sécurité d'approvisionnement du pays dans les mêmes conditions qu'aujourd'hui. Ce modèle permet d'établir des volumes de production par technologie, des volumes de flexibilité (des volumes de pilotage qui garantissent l'équilibre du système) et des volumes du réseau. Ses volumes de production, de flexibilité et de besoins de réseaux permettent de déterminer le coût complet du système électrique pour chaque scénario et de déterminer l'empreinte carbone pour chaque scénario. Le cadre de l'étude est celui de la sortie des énergies fossiles en 2050. Aujourd'hui, l'électricité est omniprésente dans la vie quotidienne des citoyens, mais elle n'est pas dominante dans le mix énergétique français. Elle représente seulement 25% dans la consommation finale contre 62% pour les énergies fossiles (43% pour le pétrole et 19% pour le gaz).

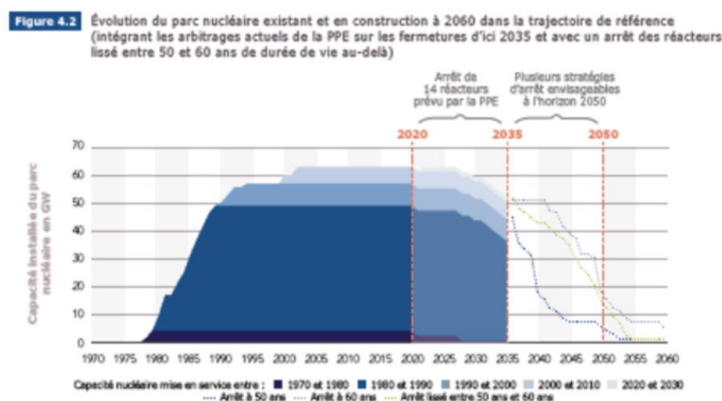
Figure 12 : Consommation finale d'électricité en 2050



Source : RTE (2021)

Deux leviers sont activés : (i) le premier levier est *l'efficacité énergétique* : Par efficacité énergétique, nous entendons l'amélioration des performances énergétiques des équipements électroménagers, informatiques et éclairage, la rénovation thermique des bâtiments, l'amélioration des procédés industriels et enfin l'efficacité gagnée en basculant vers l'électricité. L'étude RTE reprend à son compte l'objectif français de 40% d'efficacité énergétique entre 2020 et 2050. (ii) Le deuxième levier c'est *l'électrification massive de l'usage* dépendant aujourd'hui des énergies fossiles, pétrole et gaz. Il est fait référence particulièrement aux véhicules particuliers, aux procédés industriels (les hauts fourneaux électriques et les moyens de chauffage par chaleur électrique doivent se substituer aux chaudières à fioul et à gaz). Ces transferts d'usage supposent une restructuration du système électrique, car l'électricité va devenir la principale énergie du pays, en substitution du pétrole et elle représentera dans le futur 55% de la consommation d'énergie finale en 2050. Dans ce contexte, la France fait face à un double défi : *le premier défi*, c'est de produire plus d'électricité, car la consommation va augmenter suite à l'abandon du pétrole et de gaz ; *le second défi*, c'est de remplacer l'appareil de production nucléaire de deuxième génération, qui est entrain de vieillir et qui devra immanquablement fermer d'ici 2060 pour des raisons industrielles. Les choix technologiques sont donc au cœur du problème.

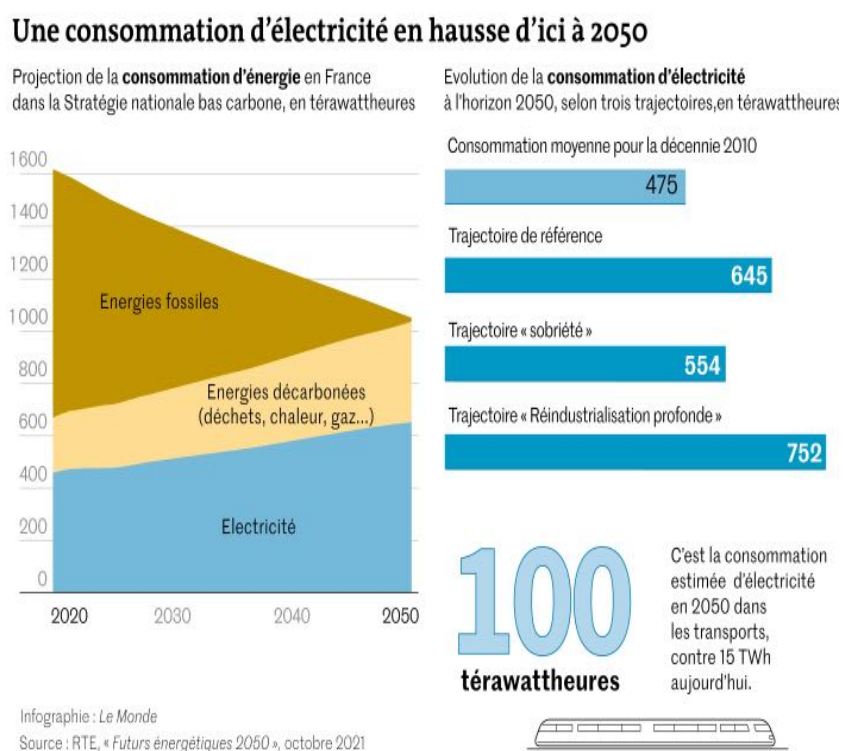
Figure 13 : Evolution du parc nucléaire existant et en construction à 2060



Source : RTE (2021)

L'étude de RTE répond donc au besoin de documenter les options de mix électrique pour 2050, leurs atouts et leurs limites, leurs impacts et leurs conséquences. Pour pouvoir effectuer ce type d'exercice, la première question à se poser est celle du niveau de consommation en 2050. La trajectoire de référence de l'étude reprend le cadrage de la SNBC actualisée. Trois drivers sont ici pris en compte : le PIB (produit intérieur brut), la démographie, et les politiques publiques les plus récentes (notamment la nouvelle stratégie hydrogène de la France). La reconstitution de cette nouvelle trajectoire conduit à retenir une consommation de référence en 2050 de 645 TWh. Le scénario de référence mise sur une consommation de l'ordre de 650 TWh /an en 2050 contre 470 aujourd'hui (soit une augmentation de près de 30%). Deux autres scénarios ont été étudiés par RTE, ils conduisent à faire varier les consommations d'environ plus ou moins 100 TWh par an, il s'agit d'un *scénario sobriété* à 550 TWh et un *scénario de réindustrialisation* profonde à 755 TWh. Les scénarios ont été conçus et analysés de manière indépendante, mais pour les choix des mix énergétiques futurs, ils ne sont pas exclusifs et peuvent être combinés avec une influence à la hausse ou à la baisse sur le niveau de consommation.

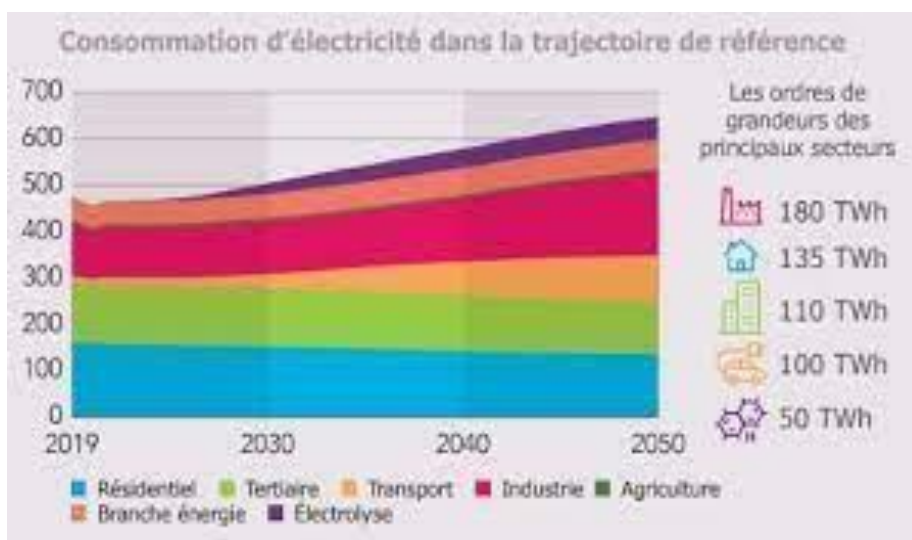
Figure 14 : Evolution de la consommation d'électricité à l'horizon 2050



Source : RTE (2021)

Notons que le scénario central retenu par RTE prolonge les modes de vie actuels des Français. Les modes de changements de mode de vie sont traités dans le *scénario sobriété*.

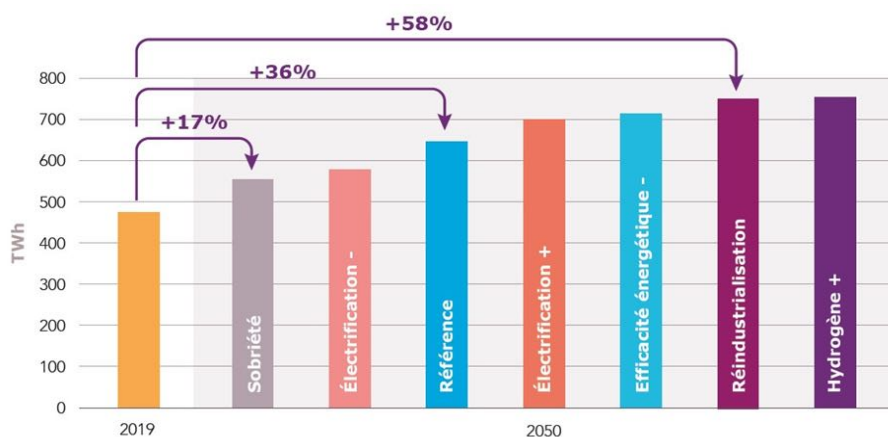
Figure 15 : Consommation d'électricité dans le scénario de référence



Source : RTE (2021)

Le scénario de sobriété repose sur un ensemble de leviers tels que le parc résidentiel, le tertiaire, les transports et les industries. Tous ces leviers supposent des changements plus ou moins profonds de comportement, de consommation ou de l'appareil productif et donc des modes de vie. Le rapport de RTE se veut être le plus explicite possible sur les gains résultant de la mobilisation des différents leviers, il ne se prononce pas sur leurs opportunités ou sur leur désirabilité. La variante sobriété est très similaire au scénario NégaWatt. Ce scénario permet de limiter la consommation à 555 TWh et repose sur des changements de comportements qui ont été chiffrés comme la part de télétravail (50 % contre 20 % dans la trajectoire de référence), l'augmentation des circuits courts pour les marchandises (conduisant à une baisse de 20 % des km/tonnes transportés contre 9 %), le nombre de personnes par véhicule (2,2 contre 1,7) ou l'allongement des durées de vie des équipements, le réemploi et le recyclage de matière.

Figure 16 : Comparaison de quelques scénarios à l'horizon 2050



Source : RTE (2021)

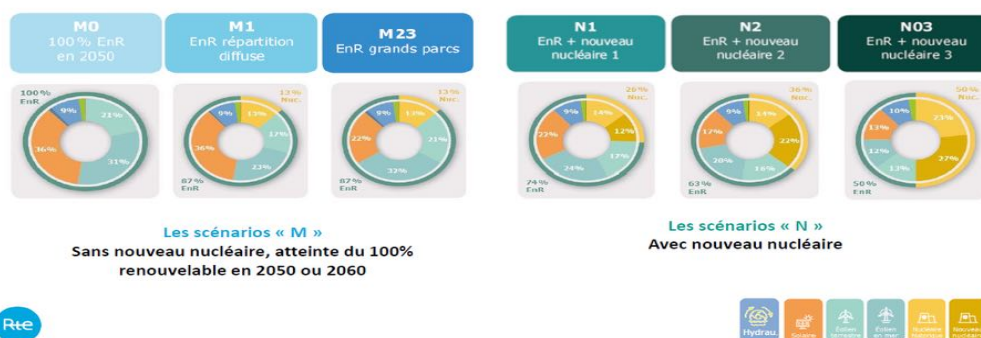
RTE a aussi étudié un *scénario de réindustrialisation profonde* de la France. Alors que la trajectoire de référence suppose un maintien de l'industrie manufacturière dans le PIB à 10%, le scénario de réindustrialisation profonde pousse cette industrie manufacturière à 12 % - 13% du PIB. C'est une inflexion majeure, d'une part, parce que ces industries créent des emplois, et d'autre part, parce que la relocalisation de la production en France repose sur une électricité décarbonée (l'empreinte carbone de la France peut ainsi baisser). A ces trois tendances (sobriété, référence, réindustrialisation), RTE ajoute une multitude de variantes pour jauger les effets de certaines variations de l'efficacité énergétique, du niveau d'électrification, du recours à l'hydrogène, etc., le tout dans le cadre de flexibilités plus grandes mais aussi de pointes de consommations plus importantes, y compris l'été à cause de la climatisation.

Il est possible ici de tirer trois premiers enseignements de ce rapport : (i) agir sur la consommation grâce à l'efficacité énergétique, voire la sobriété est indispensable pour atteindre les objectifs climatiques ; (ii) si la consommation d'énergie peut baisser, en revanche celle d'électricité va augmenter pour se substituer aux énergies fossiles (dans tous les cas, y compris dans le scénario sobriété, l'augmentation de la consommation est estimée à 16%), (iii) accélérer la réindustrialisation du pays, en électrifiant les procédés, augmente la consommation d'électricité mais réduit l'empreinte carbone de la France.

La scénarisation de RTE

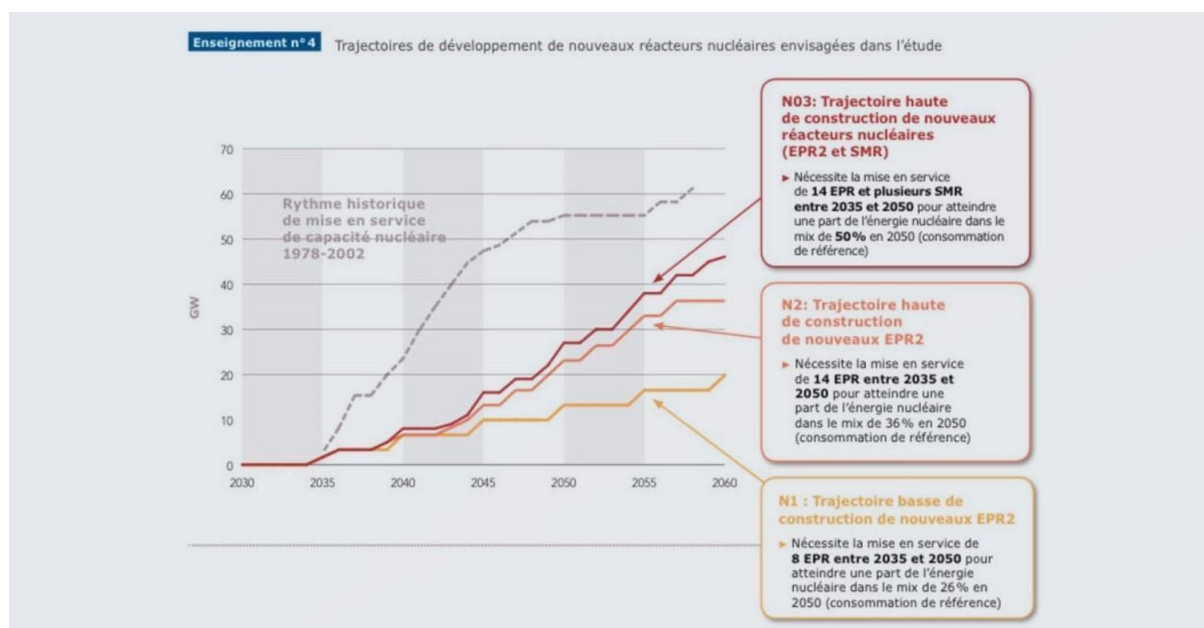
RTE a dimensionné six scénarios de mix électrique pour l'horizon 2050 qui sont issus de la concertation (ils reflètent les différentes aspirations recueillies dans le cadre de la consultation publique). Ces scénarios sont organisés en deux familles. La famille M tend vers 100% de renouvelables en 2050 (ou 2060). Dans cette famille, trois scénarios sans nouveaux réacteurs nucléaires sont proposés. La famille N repose sur la construction de nouveaux réacteurs nucléaires (ce qui fait passer la part du nucléaire entre 25% et 50% en 2050). Aucun scénario ne repose sur une seule technologie.

Figure 17 : Les six mix de production d'énergie électrique



Les scénarios N sont des scénarios ENR plus le nucléaire. Ces scénarios diffèrent sur le rythme de construction de nouveaux réacteurs nucléaires.

Figure 18 : Trajectoire de développement de nouveaux réacteurs envisageables



Source : RTE (2021)

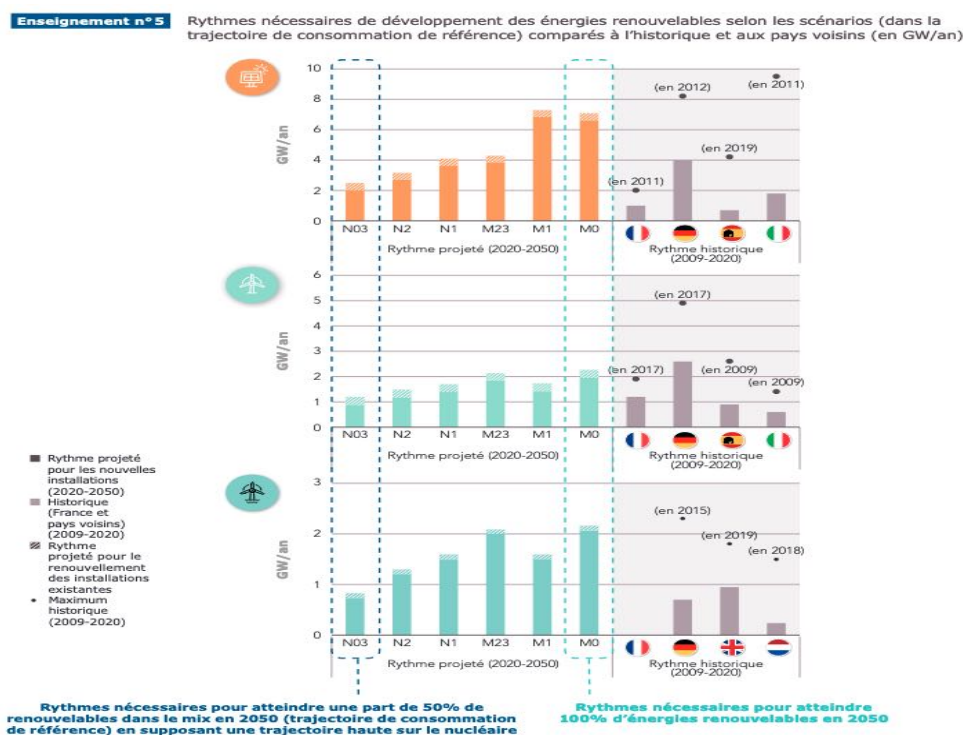
Le scénario N 1 repose sur la construction de six nouveaux réacteurs entre 2035 et 2045 puis de continuer sur le rythme d'une paire tous les cinq ans. Dans ce scénario, la part du nucléaire en 2050 est de 26% par rapport à la trajectoire de référence et elle diminue encore à l'horizon 2060. D'ici 2050, 8 réacteurs à eau pressurisée (European Pressurized Reactor, EPR) seront construits, pour avoir un quart de nucléaire dans le mix électrique. Le scénario N 2 propose une accélération du rythme de construction des nouveaux réacteurs nucléaires. Dans ce scénario, la France a 14 EPR, soit 1/3 de nucléaire dans le mix électrique à l'horizon 2050, en prenant en compte le nucléaire historique qui sera présent en 2050. La part de nucléaire est de 36% légèrement inférieure à 40% (et ce, jusque 2060). Le scénario N 3 combine une prolongation des réacteurs existants (presque tous) jusqu'à 60 ans avec l'accord des autorités de sûreté nucléaire. On construit 14 EPR, c'est autant d'énergies nouvelles que dans N 2, mais avec la construction de petits réacteurs nucléaires à sels fondus (Molten Salt Reactor, MSR) pour 4 GWh, avec la prolongation des réacteurs existants à l'horizon 2060. Le nucléaire atteint dans ce scénario 50% du mix électrique.

Dans l'ensemble de ces scénarios, les énergies renouvelables sont très présentes, c'est également le cas dans le scénario N 3 qui conduit à disposer d'un parc nucléaire de 50 GWh en 2050 avec des réacteurs existants et de nouveaux réacteurs. 50 GWh est la plus haute part de la filière industrielle. 50 GWh cela veut dire 50% pour la production d'électricité dans la trajectoire de la consommation de référence mais ça peut vouloir dire aussi entre 40% dans le scénario de réindustrialisation profonde et 60% dans le scénario de sobriété. Cette capacité nucléaire est en toute hypothèse insuffisante pour

couvrir les besoins de la France. Aussi, le respect de la neutralité carbone impose, dans tous les cas, le développement d'un socle minimum d'ENR. Dans le scénario N 3, ce socle est composé de 70 GWh de capacité solaire, de plus de 40 GWh de capacité éolienne à terre (soit 3 fois plus qu'aujourd'hui) et 22 GWh d'éolien en mer.

Les scénarios M sont des scénarios 100% renouvelables.

Figure 19 : Rythme de développement des énergies renouvelables selon les scénarios



Le scénario M0 repose sur une sortie accélérée pour arriver à 100% d'ENR en 2050.

Le scénario M1 vise une sortie naturelle du nucléaire sans nouveaux réacteurs nucléaires et donc une sortie du nucléaire en 2060. La spécificité du M1 par rapport à M23, c'est qu'il repose sur des ENR décentralisées, donc des petits projets (comme le placement de panneaux photovoltaïques (PV) sur les toitures). Sur M1, on cherche une répartition diffuse des installations sur le territoire. Plus de 200 GW de panneaux photovoltaïques d'une puissance de 35 GWh seraient déployés sur des toitures résidentielles (en 2050, il y aura une maison sur deux qui posséderait un PV).

Le scénario M23, 100% d'ENR en 2060, est centralisé dans des grands parcs éoliens et solaires. C'est un scénario qui recherche des économies d'échelle pour diminuer les coûts. Il est donc plus économique que le scénario M1 qui reste décentralisé. Dans l'ensemble de ces scénarios, la clé est le rythme de développement des ENR.

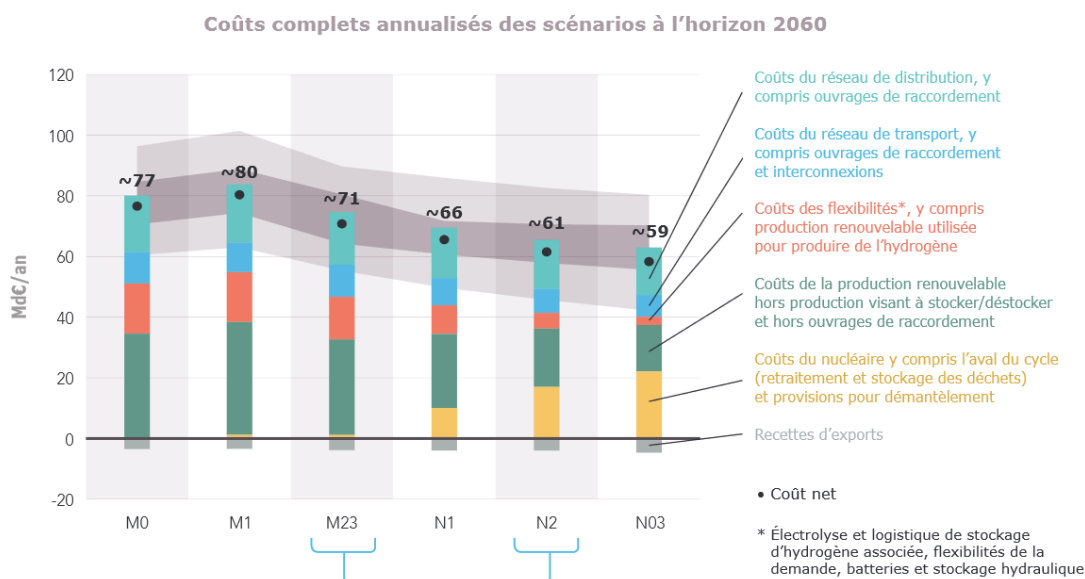
Les enseignements des scénarios du mix énergétique de RTE

Suite aux différents scénarios proposés par RTE, il est possible d'en tirer deux enseignements : (i) atteindre la neutralité carbone est impossible sans un développement significatif des énergies renouvelables ; (ii) se passer de nouveaux

réacteurs nucléaires implique des rythmes de développement des énergies renouvelables plus rapides que ceux des pays européens les plus dynamiques. De ce fait, le coût économique de la transition énergétique devient un enjeu majeur.

Figure 20 : Dépenses d'investissement dans le système électrique cumulées sur la période 2020-2060

Enseignement n° 6 Coûts complets (production + acheminement + flexibilités) en France selon les scénarios (dans la trajectoire de consommation de référence) à l'horizon 2060, dans le cas central et selon les variantes



Source : RTE (2021, p. 492)

Au total, les dépenses d'investissement à consentir pour le développement du système électrique dans les différents scénarios sont d'environ 750 à 1000 milliards d'€ sur la période 2020-2060, décomposés comme suit, 500 milliards pour les centrales de production, 250 à 350 milliards d'€ pour le réseau électrique et le reste 0 à 150 milliards d'€ pour les flexibilités. Un tel déploiement équivaudrait à un investissement de 20 à 25 milliards d'€ par an (à comparer à la moyenne des 13 milliards d'€ par an d'investissements réalisés au cours de la dernière décennie dans le système électrique français). Au vu de la dette publique française (3228 milliards d'euros en 2024), ces investissements sont tout simplement hors-sol.

La comparaison des coûts des différents scénarios de RTE permet de faire les trois constats suivants :

(i) les coûts de production sont approximativement identiques dans les scénarios avec ou sans nouveaux réacteurs nucléaires. En 2060, ceux-ci passeraient de 59 milliards d'€ par an pour le scénario le plus nucléarisé, à près de 80 milliards d'€ pour le scénario tout renouvelable (le plus axé sur le développement du solaire).

(ii) Les besoins de flexibilité sont déterminants sur le coût complet de chaque scénario. Tous les scénarios supposent de développer des flexibilités. Par flexibilité, il faut entendre les moyens qui permettent de piloter le système et de garantir la sécurité

d’approvisionnement (le pilotage de la demande des interconnexions, le stockage d’hydraulique, les batteries, les centrales thermiques qui fonctionnent demain à l’hydrogène). Le besoin supplémentaire de flexibilité est estimé par les travaux des experts entre 30 GWh et 70 GWh à l’horizon 2050 selon les scénarios.

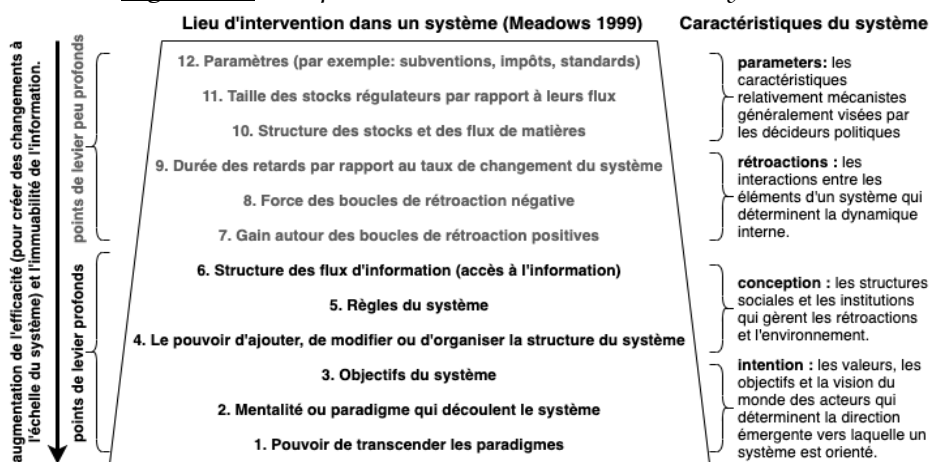
Les mix à forte pénétration de renouvelables et a fortiori à 100 % renouvelables supposent quant à eux des moyens de plus en plus importants. La construction ou le renouvellement de 40 à 60 nouvelles centrales thermiques à hydrogène, ce qui revient à doubler ou à tripler les centrales à gaz par rapport à aujourd’hui, est nécessaire pour les scénarios tendant à 100 % d’énergies renouvelables.

(iii) Plus le territoire comporte d’énergie renouvelable, plus les besoins de réseaux (transport et distribution) deviennent importants. Cela impacte le coût complet des scénarios. C’est l’un des points d’attention de l’étude RTE, les réseaux ne doivent pas être un facteur de ralentissement de la transition.

En résumé, l’évaluation économique des coûts de production, des flexibilités et des besoins en matière de réseaux, conduisent à rendre les scénarios avec un nouveau parc nucléaire moins coûteux à l’échéance 2050 et 2060 (un écart de l’ordre de 10 milliards d’€ entre les scénarios M23 et N2). Bien entendu, cette conclusion est sujette à caution car d’une part, le critère économique n’est pas nécessairement le seul dans la décision publique (on peut également prendre en compte des indicateurs tels que l’empreinte carbone, la technologie utilisée, l’empreinte matières ou encore la place des déchets) et d’autre part, l’avantage économique du nucléaire dans les évaluations RTE est conditionné à un financement qui ne s’écarte pas de celui des autres technologies bas carbone.

Les différents scénarios de RTE peuvent être visualisés dans un diagramme de boucles causales. Nous pouvons ici introduire les points leviers de Meadows (1999) qui permettent de comprendre les difficultés à impulser une dynamique de changement dans un système.

Figure 21 : Les points d’intervention dans un système



A partir d'un scénario de base (figure 22), introduisant les moteurs d'une économie (croissance économique, PIB, demande d'énergie, coût de l'énergie), il est possible de présenter les diagrammes des boucles causales des scénarios M (figure 23), N (figure 24), d'industrialisation profonde (figure 25) et sobriété (figure 26). Ces diagrammes mettent en valeur les leviers d'action (en vert), c'est-à-dire les moyens de modifier ce que l'on observe sur le territoire français. Dans le cas du scénario M, il existe des leviers de rang 12 (Meadows, 1999), à savoir la baisse des coûts de production, de rang 4 (la sobriété énergétique) et de rang 1 - c'est le changement de paradigme, ici la sortie du nucléaire.

Figure 22 : Le CLD du scénario de base

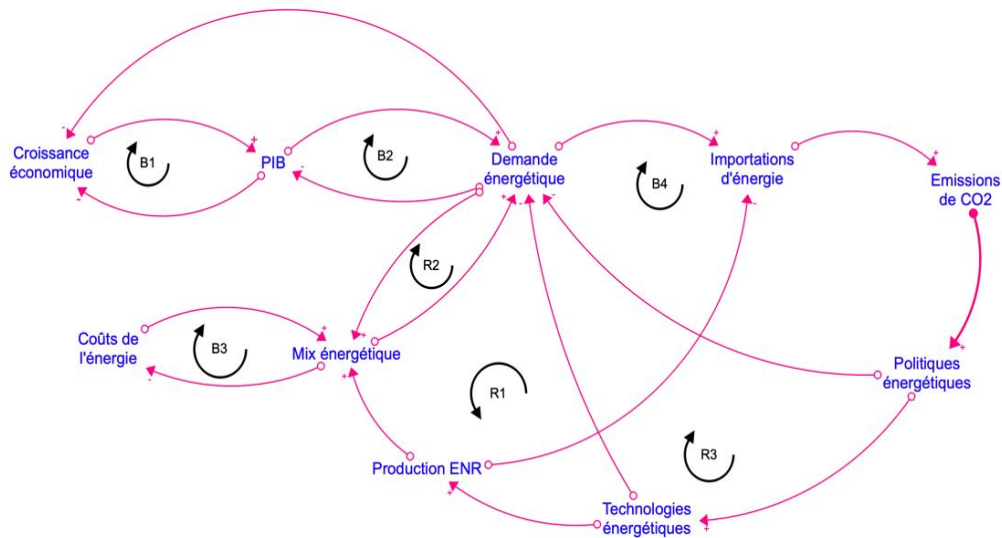


Figure 23 : Le CLD du scénario M

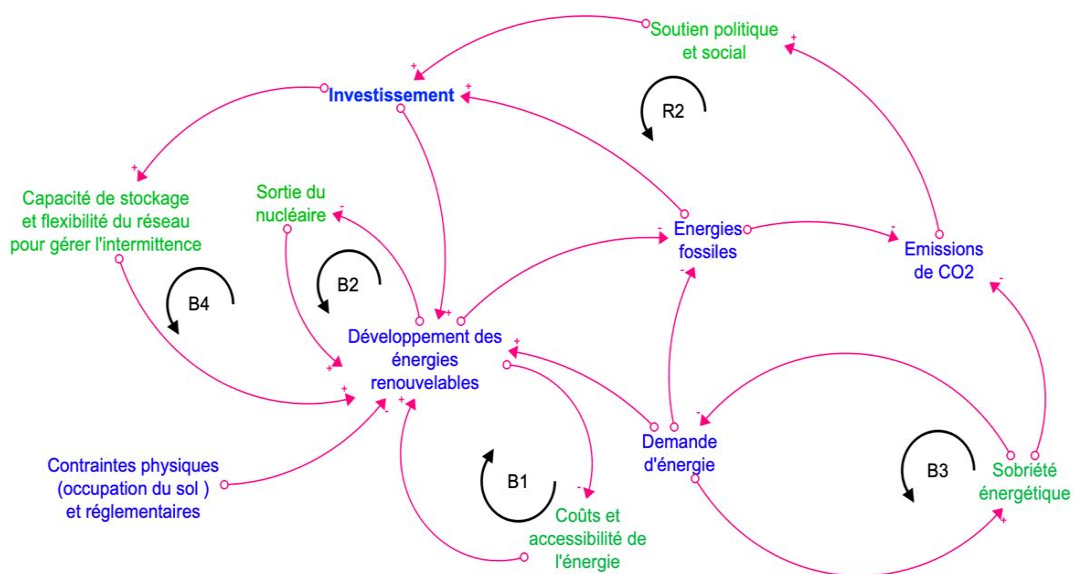


Figure 24 : Le CLD du scénario N

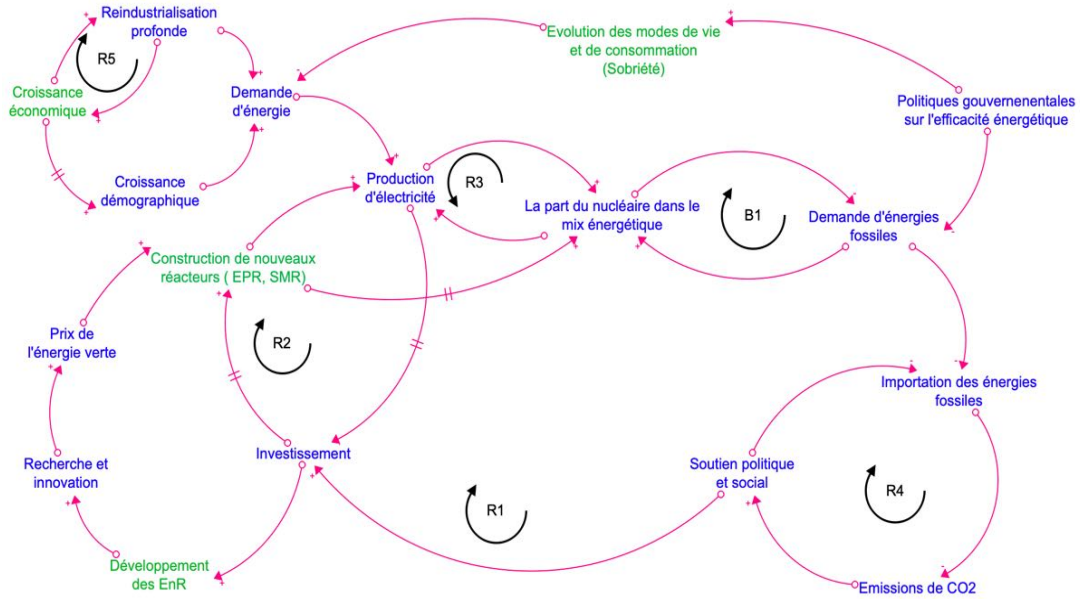


Figure 25 : Le CLD du scénario industrialisation profonde

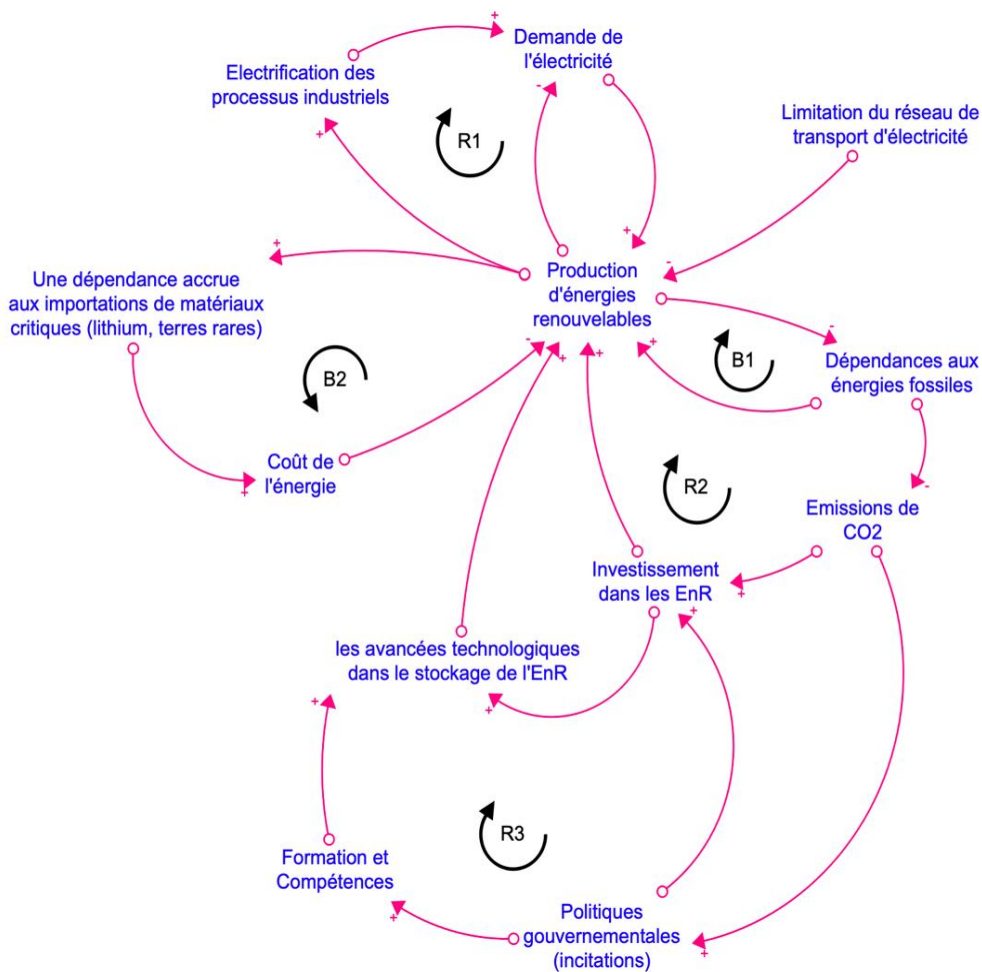
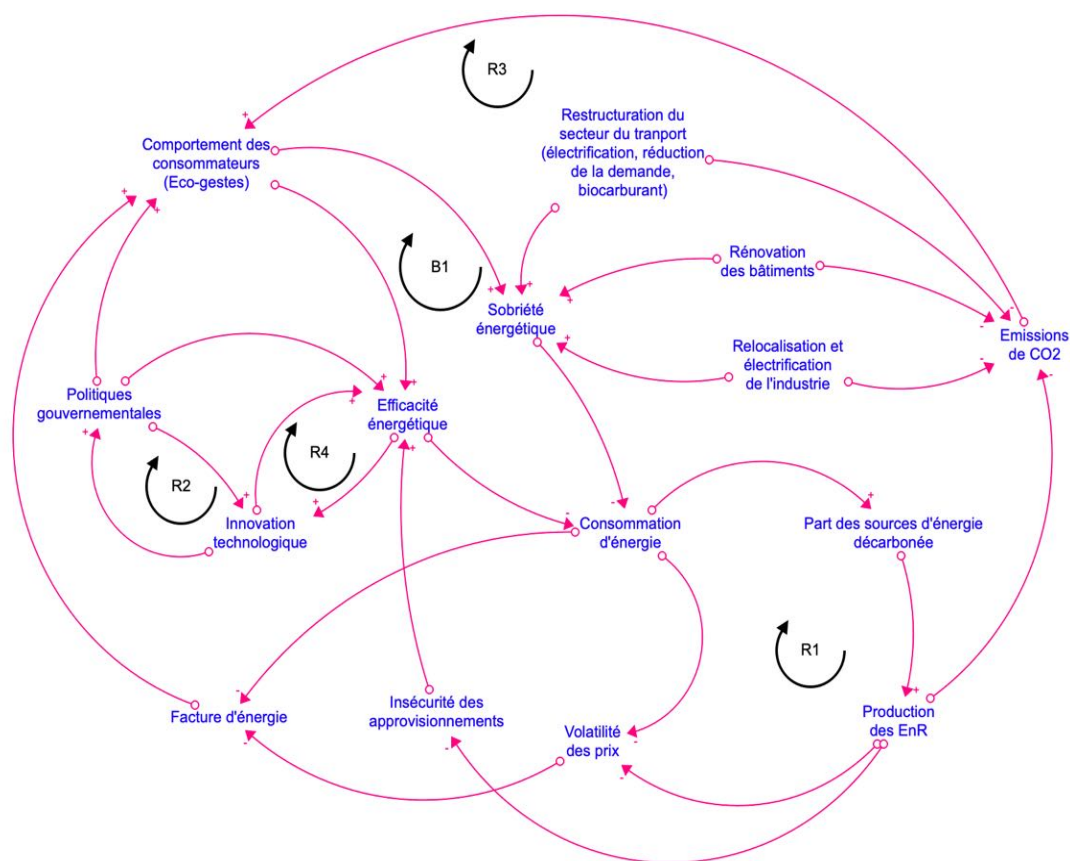


Figure 26 : Le CLD du scénario sobriété



Les scénarios de Négawatt

Négawatt est une association à but non lucratif, créée en 2001 et dirigée par un collectif de membres actifs, la Compagnie des Négawatt (qui rassemble une vingtaine d'experts impliqués dans des activités professionnelles liées à l'énergie). Négawatt a publié le 26 octobre 2021, son 5ème scénario de transition énergétique pour la France. Par rapport au scénario précédent, ce scénario introduit quatre grandes nouveautés :

- (i) Le scénario Négawatt est couplé à un scénario Négamat, qui est destiné aux matériaux et matières premières. Ce qui permet d'identifier assez finement les leviers à disposition pour réduire l'extraction des matières. Le scénario Négawatt couplé au scénario Négamat qui est lui-même couplé au scénario Afterres 2050 (scénario existant déjà depuis plusieurs exercices et destiné à la transition agricole, sylvicole et alimentaire), propose une vision assez exhaustive de l'ensemble de la problématique liée au système énergétique et plus globalement aux modes de consommation pour identifier les leviers à mobiliser et répondre aux différents enjeux environnementaux.
- (ii) La deuxième évolution importante de Négawatt, c'est la comptabilisation des émissions importées associées à la production de biens d'équipements et de biens de consommation à l'étranger mais achetés en France. L'objectif étant de pouvoir identifier les leviers à actionner pour la partie empreinte carbone et de réduire ainsi

les émissions de GES qui sont imputables au citoyen Français. Sur la partie empreinte carbone, un travail a été effectué sur les options de relocalisation envisageables.

(iii) Un travail beaucoup plus fin sur les stratégies industrielles et les évolutions des filières industrielles qu'on peut atteindre dans une perspective de transition énergétique. Il s'agit principalement des filières qui seront en déclin et des filières qui vont être relocalisées après avoir été délaissées pendant plusieurs décennies. C'est un scénario qui vise à intégrer de nouvelles filières d'avenir (qui vont s'inscrire pleinement dans cette transition énergétique). C'est une relance industrielle vertueuse dans laquelle, il y a à la fois de la sobriété et de la relocalisation.

(iv) Dans la version 2022, une feuille de route a été ajoutée à la trajectoire chiffrée pour le quinquennat présidentiel afin de rendre cette trajectoire plus opérationnelle sur le terrain.

La démarche NégaWatt

L'approche de NégaWatt est une approche systémique reposant sur le triptyque (sobriété, efficacité et renouvelable). C'est une démarche bottom up, en allant des usages et en remontant vers les ressources. *La sobriété* consiste à agir collectivement et individuellement sur le niveau d'usage en priorisant et en redimensionnant les services rendus (logique proche de l'économie de la fonctionnalité). *L'efficacité* repose sur une réduction du ratio usage/ressources, il s'agit d'améliorer les performances à toutes les étapes de la supply chain (c'est avant tout une performance technique). Les énergies renouvelables (ENr) traduisent le remplacement de ressources reposant sur des stocks finis et émettant des GES par des ressources identifiées par des flux soutenables et n'émettant pas ou peu de GES. Le point de départ de la démarche NégaWatt est une reconstitution du paysage énergétique français, à partir d'une démarche bottom-up. C'est l'agrégation des données de l'ensemble des usages de l'énergie, qui permet d'obtenir la consommation totale d'énergie finale puis primaire. Sous la forme d'un diagramme SANKEY, cet état des lieux a fait ressortir que la France consommait 88% d'énergie primaire (et donc de ressources énergétiques non renouvelables) avec une efficacité énergétique de 67% entre l'offre d'énergie primaire et la demande d'énergie finale fournie aux différents secteurs.

Alors que les précédentes versions étaient cantonnées à la France métropolitaine et à l'horizon 2050, le scénario NégaWatt (2022) a cherché à aller au-delà des frontières spatiales et temporelles. Ce scénario s'inscrit tout d'abord dans le temps long. Il prend en charge un périmètre temporel allant au-delà de 2050. L'horizon de la trajectoire modélisée - de 2020 à 2050 (soit 30 ans) - est pertinent pour appréhender les transformations structurelles. Certaines évolutions et tendances ont toutefois été évaluées et quantifiées à l'horizon 2070 (certaines à l'horizon 2100) et ce pour les deux raisons suivantes : (i) les fortes incertitudes sur l'évolution des écosystèmes naturels sous la contrainte d'un réchauffement climatique notamment, l'évolution des puits de

Figure 28 : Les Objectifs de développement durable de l'ONU



Source : UN (2015)

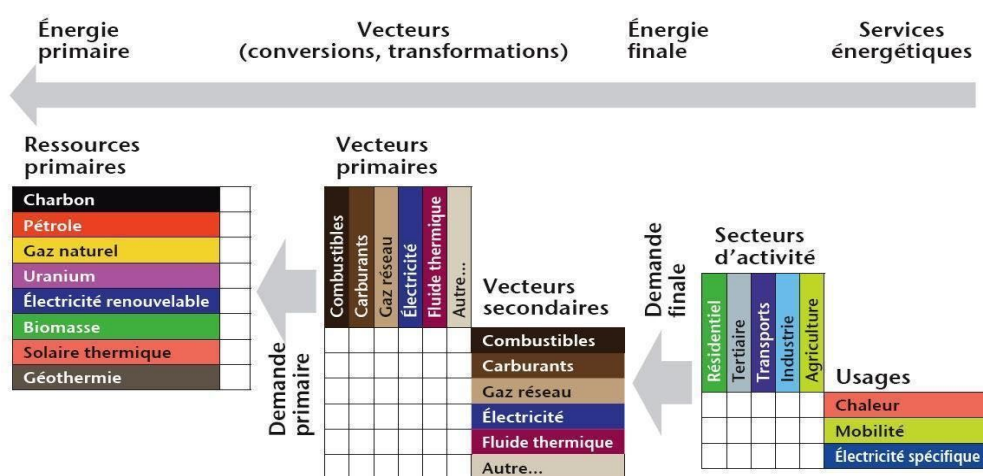
Au-delà de l'urgence climatique, le scénario Négawatt (et sa démarche systémique) s'est attaché à atteindre rapidement les ODD. Cela implique de trouver les solutions qui, tout en allant dans le sens de l'accomplissement d'un objectif particulier, n'en détériorent pas d'autres. Le scénario Négawatt recherche cet équilibre. Par exemple, il est nécessaire que des choix de technologies décarbonées soient aussi synonymes d'emplois et d'activités économiques, qu'une vie plus sobre n'empêche pas le confort et l'accès à tous les services publics minimums, ou encore que le développement de certaines filières renouvelables ne se fassent pas au détriment de l'environnement et de la biodiversité. Il s'agit de travailler sur des solutions qui entrent en synergie avec des enjeux non environnementaux, à savoir la réduction des inégalités, la lutte contre la pauvreté ou la paix. A titre d'exemple, nous citerons un objectif parmi les objectifs ODD qui sont inclus directement dans la modélisation, à savoir l'objectif 13 du réchauffement climatique qui représente l'objectif de neutralité carbone pour le scénario Négawatt qui prévoit que les émissions des GES deviennent nulles en 2050, le système énergétique sera alimenté à 96% par des sources renouvelables. Le principe de la modélisation du scénario Négawatt repose sur un modèle physique et non macroéconomique ; les modèles purement économiques sont, par construction, incapables de prendre en compte les limites physiques non-négociables à l'échelle planétaire en termes de ressources et d'impacts.

La modélisation réalisée pour 2050, se complète d'un module d'équilibre électrique en puissance pour vérifier que la trajectoire est conforme à la sécurité du réseau électrique et que la modélisation physique de la production et de la consommation d'énergie est compatible avec le module de GES. Une fois la trajectoire dessinée, ce modèle permet,

à travers différents modules, de déterminer d'une manière globale ou ciblée, les impacts économiques en termes de coûts, d'investissements, d'emplois ou d'autres externalités tels que la pollution de l'air. Quatre remarques peuvent être mentionnées ici :

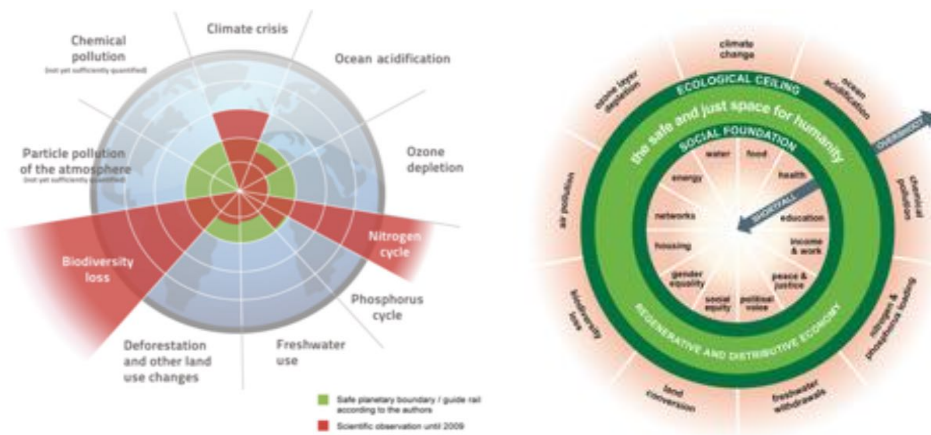
- Dans le cadre de la réduction globale de l'empreinte environnementale, on trouve aussi des objectifs qui ne sont pas directement quantifiés dans le scénario mais sur lesquels la quantification menée peut donner lieu à une réflexion qualitative poussée c'est le cas des objectifs liés à la biodiversité (ODD 14 et ODD 15) ou l'accès à l'eau (ODD 6).
- Au-delà de la question environnementale, il y a la recherche de nouvelles dynamiques économiques. Dans les ODD, il y a des éléments structurants qui ont été exploités dans le scénario comme l'ODD 8 (Promouvoir une croissance économique soutenue).
- Une approche dite "raisonnable" concernant l'innovation, il s'agit de ne pas prendre de paris inconsidérés sur des technologies qui présentent beaucoup d'incertitude sur leurs maturités. Cette approche prudentielle vise à discerner les solutions innovantes afin de faire le tri en fonction de leurs potentiels.

Figure 29 : Modèle physique



- Enfin, des perspectives en matière de progrès social, des principes directeurs pour la réduction des inégalités, la fin de la pauvreté et la réduction de la vulnérabilité liée aux consommations d'énergie, font partie des scénarios de Négawatt (comme la lutte contre la faim et le scénario de sécurité alimentaire). Le spectre des inégalités est alors appréhendé via deux limites : (i) les minimums sociaux au-dessous desquels la vie de la société est dégradée (shortfall), (ii) les « plafonds écologiques » au-delà desquels la survie de la terre est menacée (overshoot). Les travaux sur les *Planet Boundaries* (Rockstrom, 2009) et l'économie du Donut (Raworth, 2017) peuvent être introduits ici à travers l'ODD 3 (Santé et bien-être) et l'amélioration des conditions de vie.

Figure 30: Planetary Boundaries and Doughnuts



Source : Rockstrom (2009), Raworth (2017)

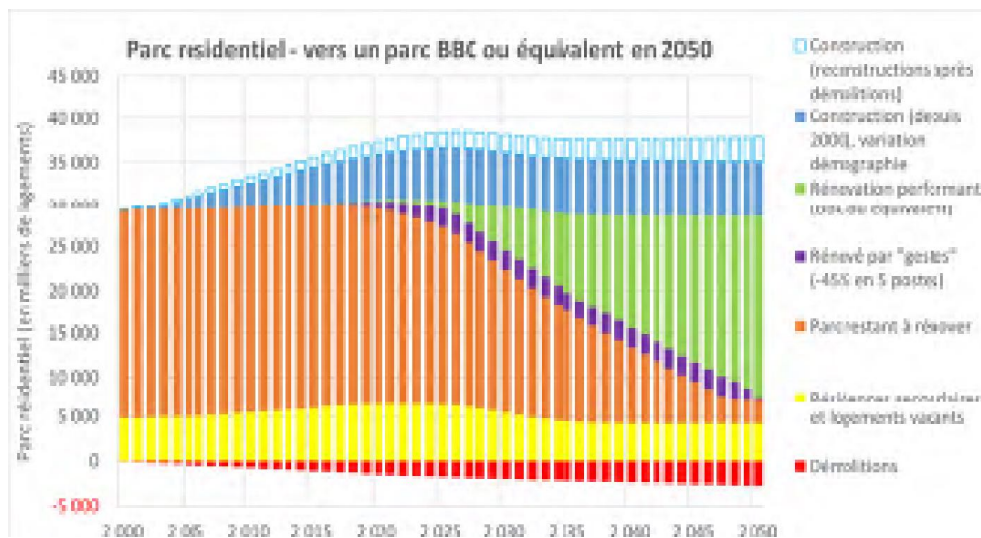
Les résultats du scénario Négawatt

Les résultats vont s'articuler sur les notions de demande et d'offre. Selon Négawatt, la transition énergétique doit commencer par la réduction des besoins, et donc de la demande d'énergie et de matières premières grâce à la sobriété et l'efficacité. Les scénaristes ont décrit les changements concernant la demande en énergie dans quatre domaines d'activités, le bâtiment (un des plus grands consommateurs d'énergie), le transport, l'industrie et l'agriculture.

Le secteur du bâtiment

En France, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le plus gros consommateur d'énergie. Le bâtiment consomme plus de 41% de la consommation d'énergie finale et 15% des 40% des consommations d'énergie primaire.

Figure 31 : Historique de rénovation du parc de logements de 2000 à 2020 et évolution dans le scénario Négawatt jusqu'en 2050

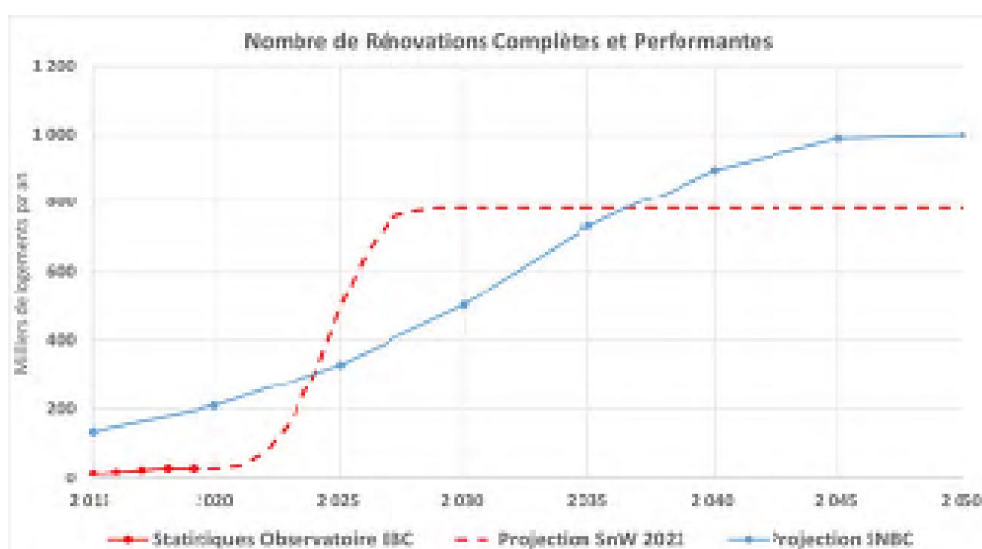


Source : Négawatt, p. 17

Les usages énergétiques les plus significatifs de ce secteur sont le chauffage des locaux, suivi par l'électricité spécifique (appareils ménagers, lumières, ordinateurs, etc.) et l'eau chaude. Les consommations associées à l'informatique (et plus largement au numérique) et à la climatisation vont augmenter significativement, suite aux changements climatiques et à la numérisation croissante de la société. Afin de diminuer la consommation d'énergie de ce secteur, plusieurs mesures sont proposées par Négawatt. La généralisation et la massification des rénovations énergétiques au niveau bâtiment basse consommation (BBC) ou équivalent est nécessaire pour réduire les besoins d'énergie dans le parc bâti existant.

Selon ce scénario (2050), la démolition et la rénovation du parc résidentiel ne peuvent pas suffire à transformer la consommation énergétique du parc bâti. Le rythme actuel de rénovation est insuffisant. D'ici à 2050, le scénario Négawatt retient 10 millions de bâtiments à construire et 25 millions à rénover selon une méthode permettant de garantir une réduction suffisante de leur consommation d'énergie : un tel volume à traiter nécessite une forte accélération du rythme annuel de rénovation, qui doit passer de 33 000 logements à rénover par an au niveau BBC en 2020 pour atteindre près de 800 000 opérations par an avant 2030, puis se maintenir jusqu'à 2050.

Figure 32 : Évolution du nombre de rénovations complètes et performantes par an entre 2015 et 2050



Source : Rapport complet Négawatt (partie 4, p. 17)

Les rénovations ne peuvent conduire à la performance BBC. Les rénovations BBC ou équivalent doivent remplacer complètement les rénovations « par geste », peu efficaces et plus coûteuses in fine, par des rénovations complètes et performantes. Négawatt propose de réorienter l'ensemble des financements dédiés à la rénovation au niveau BBC ou équivalent, et d'instaurer l'obligation progressive et conditionnelle de rénovation performante lors des changements de propriétaires en maisons

individuelles et lors des ravalements de façade dans le collectif, lorsque les offres techniques et commerciales sont adaptées.

Pour les constructions neuves, il est préconisé d'utiliser des matériaux à faible énergie fossile (bois, terre, paille, matériaux biosourcés, chanvre) afin de réduire l'empreinte carbone du secteur et de renforcer la formation de l'ensemble des acteurs du bâtiment à la rénovation globale et performante (Diemer & al., 2024).

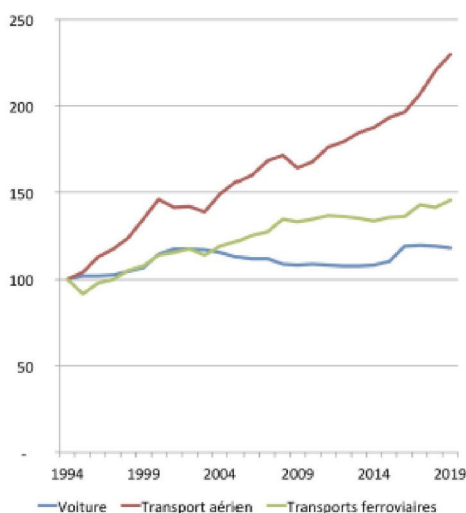
Pour le tertiaire et malgré la complexité de ce secteur, il est proposé de garder la même trajectoire et les mêmes objectifs du parc de logement à l'horizon 2050 et d'assurer la mise à jour du décret du tertiaire, pour favoriser les rénovations BBC et éviter le saupoudrage d'actions non coordonnées.

Un certain nombre d'autres actions et hypothèses de sobriété et d'efficacité du Parc Bâti est aussi évoqué : la stabilisation du nombre de personnes par logement, puisque le passage de 2 à 2,2 personnes par logement induit une diminution de plus de 3 millions de logements nécessaires et cela grâce à la cohabitation, la réduction de la part de constructions neuves, le dimensionnement raisonnable des équipements électroménagers et bureautiques ou encore la généralisation des systèmes de chauffage performants (pompes à chaleur à haut rendement, poêles à bois, etc.)

Le secteur du transport

Le secteur des transports de personnes et de marchandises représente en France le premier secteur d'émissions de gaz à effet de serre. En prenant comme mesure, le kilométrage parcouru par habitant et par an, les déplacements en voitures représentent près de 60% du total des km parcourus, vient ensuite l'aérien (NégaWatt prend en compte l'aérien international, le transport en commun routier, le transport en commun ferroviaire et les modes actifs de vélo et marche à pied). Les grands déplacements sont fortement dépendants du pétrole, d'où l'émission importante de GES.

Figure 33 : Évolution du trafic transport



Source : Rapport RTE

Depuis 4 ans, la France a fortement investi dans l'aménagement du territoire favorisant le trafic routier (selon les chiffres du ministère du développement durable, la circulation sur le réseau routier de France métropolitaine atteint les 623 milliards de véhicules-kilomètres, soit plus de 2000 fois l'aller-retour entre la Terre et le Soleil¹). De plus, le trafic aérien français a connu une réelle explosion depuis 2016 (mise à part l'épisode de la COVID) avec plus de 60 millions de passagers². C'est le moyen de transport le plus émetteur de GES (à mettre en parallèle avec l'effondrement du fret ferroviaire sur le volet de transport de marchandises). Les leviers prioritaires dans ce secteur sont : (1) la baisse du trafic routier motorisé, (2) la réduction du trafic aérien (avec plus de trafic ferroviaire) et (3) le développement de la voiture électrique.

1er levier : Baisse du trafic routier motorisé

Les voitures représentent 60% des kilométrages parcourus, si on s'intéresse juste au déplacement à l'intérieur de la France. Pour la partie marchandise, cela représente près de 88 tonnes par km parcouru. Les enjeux pour la mobilité ne sont pas seulement en termes d'émissions de GES, il est également question de la pollution de l'air aux particules fines (qui tue presque 50 000 personnes chaque année en France) et de la concentration des polluants atmosphériques dans les centres urbains. Pour réduire les impacts du trafic routier, l'électrification est largement préconisée sans pour autant répondre à tous les problèmes. En effet, il y a la pollution à l'abrasion des freins et des pneus. L'électrification doit donc être couplée à la diminution du trafic routier.

Quatre leviers pour réduire le trafic routier : (i) une diminution des distances parcourues (déplacement télétravail, réduction des déplacements de très longue distance); (ii) une réduction des tonnages transportés; (iii) un report modal vers d'autres types de transport (de la voiture vers le transport en commun, le vélo, la marche à pied), coté marchandises il y a aussi le passage de la route vers le rail, voire le fluvial; (iv) une augmentation du taux d'occupation / de remplissage (covoiturage pour les petites distances assez peu développé en France) et remplissage des poids lourds à la hausse.

Ces évolutions et changements doivent être accompagnés par la mise en place de politiques et de mesures adaptées. Il s'agit notamment d'investir massivement dans les alternatives au trafic routier motorisé (développement des infrastructures du transport commun, des pistes cyclables et des espaces stationnement de vélos) et d'instaurer une redevance kilométrique sur le fret routier, pour donner un signal prix au consommateur final d'une part et d'autre part pour générer des recettes fiscales qui vont financer les infrastructures ferroviaires.

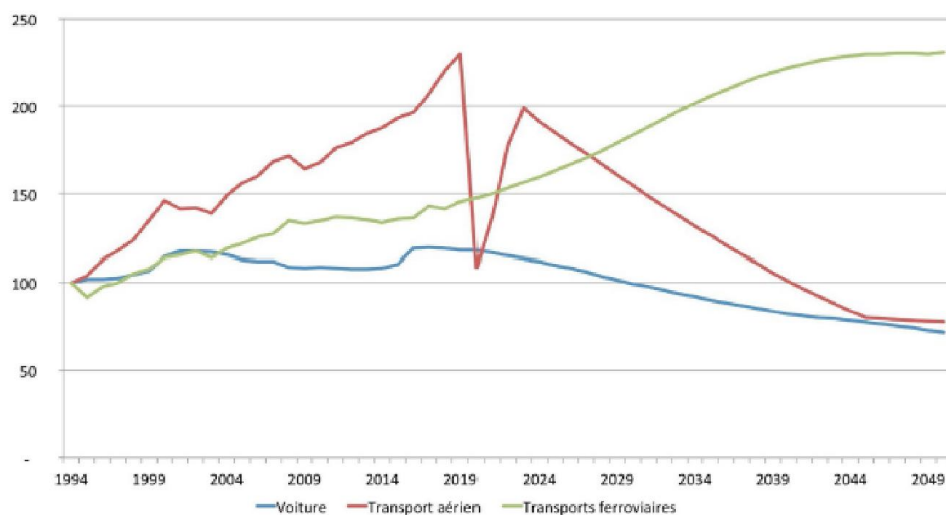
¹[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/stabilite-de-la-circulation-routiere-en-france-en-2019#:~:text=En%202019%2C%20la%20circulation%20sur,%2C4%20%25%20en%202018\).](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/stabilite-de-la-circulation-routiere-en-france-en-2019#:~:text=En%202019%2C%20la%20circulation%20sur,%2C4%20%25%20en%202018).)

²<https://www.ecologie.gouv.fr/analyses-du-transport-aerien#:~:text=Les%20TBC%20continuent%20leur%20conqu%C3%AAtte,millions%20de%20passagers%20depuis%202016.&text=La%20progression%20globale%20de%2Fvers,millions%20de%20si%C3%A8ges%20au%20d%C3%A9part.>

2ème levier : moins de trafic aérien, plus de trains

Sur le graphique précédent faisant état de l'évolution du trafic routier, aérien et ferroviaire depuis plus de 25 ans, on voit que le trafic aérien a presque doublé, que le trafic ferroviaire a augmenté d'à peu près 50% et que le trafic routier a augmenté d'à peu près 20%. L'aérien est le transport le plus émetteur de GES, la mobilité aérienne n'est donc pas soutenable. Par ailleurs, c'est le mode de transport qui est le plus inégalitaire, puisqu'une tranche importante de la société n'emprunte pas ce moyen de transport, et ce, malgré le développement des vols « low cost. » qui ont permis de rendre l'avion plus accessible. Dans le scénario Négawatt, le trafic aérien (représenté dans le graphique n°34 par la rupture du tracé de la courbe trafic aérien lié à la crise de Covid 2019, puis une reprise en 2020 et 2021) entame une décroissance à partir de 2024 sur les vols intérieurs mais aussi sur les vols internationaux grâce au développement du trafic ferroviaire et routier à l'échelle mondiale.

Figure 34 : La baisse du trafic aérien



Quatre leviers sont évoqués pour accompagner cette évolution majeure : (i) Investir dans le ferroviaire ; (ii) Augmenter le prix des vols en avion (fiscalité sur le kérosène, éco-contribution sur les billets d'avion) et interdire progressivement l'ensemble des vols intérieurs lorsqu'une alternative ferroviaire existe; (iii) Mettre progressivement fin aux vols intérieurs, quand une alternative ferroviaire existe (moins de 5 heures), et interdire à l'horizon 2030-2035, ce type de vols; (iv) Bannir la publicité pour l'aérien.

3ème levier : les voitures électrique, outil massif de décarbonation

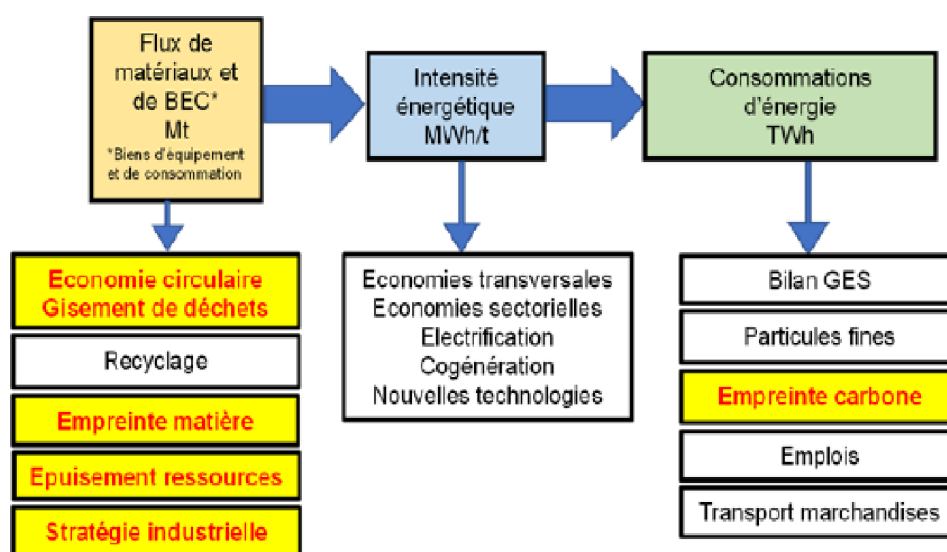
Le véhicule électrique devient incontournable dans la stratégie nationale de neutralité carbone. Le scénario Négawatt prévoit pour la France, le développement massif des véhicules électriques, toutefois la substitution des voitures électriques aux voitures thermiques (qui représentent encore 97% du parc automobile français en 2024) prendra un certain temps (même si la croissance du marché est exponentielle). Par ailleurs, se posera très vite la question de l'accès aux ressources naturelles et notamment le lithium

qui est l'un des matériaux essentiels des batteries. La découverte de la mine de lithium de l'Allier laisse présager la production de 700 000 véhicules dès 2028. Toutefois, tout reste à faire. Dans le scénario Négawatt, l'équivalent de 2/3 de voitures 100% électriques et de 1/3 de voitures hybrides est projeté pour 2050. Côté marchandise, 74 % de véhicules circuleraient au gaz et 14% à l'hydrogène pour les grands trajets. Les deux mesures prioritaires sont la fin des ventes de véhicules thermiques (en 2035 en Europe) et la mise en place de dispositifs nationaux et européens (bonus/malus) pour limiter la consommation de matières premières (Diemer, Buscaglia 2024).

Le secteur Industrie et biens de consommation

Les secteurs industrie et agricole doivent relever le défi de l'accès aux matières premières, qui va de pair avec la reconfiguration de la stratégie industrielle et agricole de la France pour une transition énergétique et écologique réussie. La nouveauté apportée réside dans la création d'un scénario, Négamat, destiné à accompagner le scénario Négawatt. Le scénario Négamat est composé de trois volets. Le premier volet s'intéresse aux flux de matériaux (en tonnes) mais aussi le flux de biens de consommation et d'équipement (en tonnes également), combinés à un module d'économie circulaire, qui permet de mieux diagnostiquer la demande et son évolution, à un module stratégie industrielle pour suivre les importations et les exportations de la France, à un module de déchets pour mieux évaluer la capacité de recyclage et enfin à un dernier module sur l'empreinte matière. Le deuxième volet concerne l'intensité énergétique qui représente l'efficacité énergétique dans le processus industriel. Le troisième et dernier volet est la consommation d'énergie en TWh, dans lequel on peut estimer les externalités comme les émissions des GES, le transport de marchandises, les émissions de particules fines, et plus généralement le bilan carbone.

Figure 35 : Scénario Négamat



Entre la demande et l'offre, plusieurs leviers peuvent être actionnés : (i) la juste mobilisation des surfaces agricoles et des ressources minérales dont les disponibilités ne sont pas infinies ; (ii) la substitution de matériaux par d'autres ayant un meilleur bilan environnemental ; (iii) le recyclage des matières pour minimiser l'extraction de sources premières ; (iv) l'efficacité énergétique des processus industriels ; (v) le commerce international (en réduisant les importations ayant des effets négatifs et en relocalisant certaines productions). Maîtriser la consommation des biens dans le scénario NegaMat repose - comme le scénario NegaWatt - sur la sobriété, l'efficacité et l'utilisation de matériaux renouvelables, mais aussi sur l'économie circulaire qui introduit la réutilisation, la réparabilité et l'augmentation de la durée de vie des biens de consommation et d'équipements.

Au final, les consommations de matériaux diminuent considérablement dans les secteurs du bâtiment, des transports, des emballages et du papier et ne croissent que dans celui des énergies renouvelables avec, au global, une baisse du tonnage consommé annuellement. Le tableau ci-après montre quelques chiffres de décroissance de la consommation de ces biens en tonnes entre 2019 et 2050. Quelques chiffres 2019 et 2015 en Tonnes

BTP	- 36%
Transport	- 44%
Emballage	- 20%
Papier	- 38 %
Énergies renouvelables	+ 500 %

Source : NegaWatt (2021)

La nouvelle stratégie industrielle de la France repose également sur le principe de produire ce que l'on consomme et non l'inverse. Pour ce faire, le scénario NegaWatt envisage de relocaliser en France une partie des activités industrielles qui étaient en perte de vitesse telles que la papèterie, la mécanique et la métallurgie et de développer de nouveaux secteurs industriels comme les batteries électrochimiques et les énergies renouvelables (éolien flottant et panneaux photovoltaïques notamment), qui restent des secteurs d'avenir. Une partie de la sobriété en matériaux s'appuie sur la baisse de la demande de différents secteurs, notamment bâtiment et transport (c'est le cas du béton et de l'acier) ou des produits tels que les engrais ou les emballages. De plus, un

levier d'action tel que l'augmentation des taux de recyclage des métaux (95% en 2050), des plastiques (85%) et du verre (85%), engendre une diminution de la demande en ressources primaires. La durabilité et la réparabilité des produits augmentent dans le scénario, de même que les taux de recyclage (95% pour les métaux, 85% pour les plastiques et le verre).

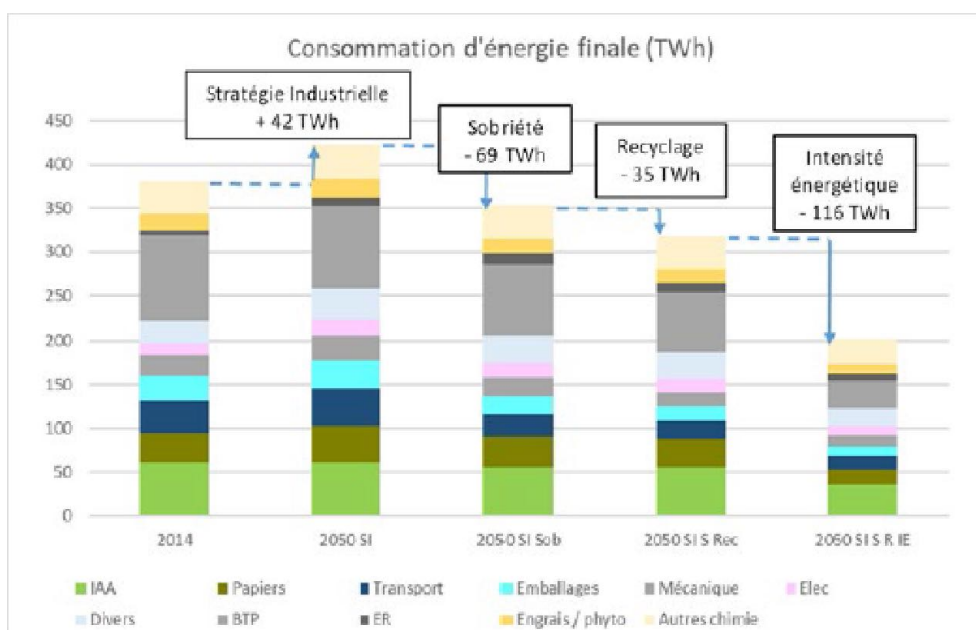
Sur la question de l'empreinte de cette nouvelle stratégie sur les ressources et particulièrement des matériaux que la France est en train d'extraire de l'étranger. Deux constats existent et sont contraignants : (i) la France doit se limiter aux réserves existantes, car elle ne peut pas compter indéfiniment sur une ressource qui n'est pas sûre et qui de plus a un impact significatif sur la biodiversité ; (ii) l'exercice fait le choix d'une contrainte de consommation égalitaire, le quota mondial attribué à chaque pays est proportionnel à sa population actuelle, ainsi, la France représentant environ 1% de la population mondiale, n'a le droit de consommer que 1% des quantités extraites chaque année de chaque matériau. Les ressources mondiales en lithium étant de 17 millions de tonnes, la France n'aurait donc droit qu'à 170 000 tonnes de lithium.

Le lithium et l'acier ont fait l'objet de focus particuliers, eu égard à la place qu'ils occupent dans la transition énergétique :

(i) Un enjeu pointé par l'association Négawatt réside dans la consommation de lithium pour la production de batteries. Le lithium a une empreinte de 674 t /an avec une consommation française comprise entre 6 000 et 7000 tonnes. C'est l'une des ressources pour lesquelles il est le plus difficile de respecter la contrainte de consommation égalitaire par habitant à l'échelle mondiale. Négawatt y parvient en réduisant le poids moyen des véhicules, en partageant la mobilité entre véhicules électriques et roulant à l'hydrogène (réservé à la mobilité lourde - TER, poids lourds sur certains trajets longs, bateaux-bus, etc.) et au bio-GNV, en augmentant le taux de recyclage du lithium (qui exige une très grande pureté et est donc peu pratiqué à l'heure actuelle).

(ii) Pour la France, 9 millions de tonnes d'acier sont fabriqués dans les hauts fourneaux à charbon sur deux sites industriels d'Arcelor Mittal (Dunkerque, Fos sur mer). Cela représente près de 22% des émissions de GES de la sidérurgie. Cette industrie emploie actuellement 25 000 emplois. En 2050, et grâce à la sobriété énergétique, cette production devrait atteindre les 11 millions de tonnes d'acier (80% de recyclage avec l'acier électrique). D'où le besoin de reconvertir cette production d'acier primaire à l'hydrogène sur au moins un des deux sites industriels, avec une perte de 6000 emplois. 15000 emplois peuvent être récupérés dans le cadre de la relocalisation de la métallurgie et de l'industrie mécanique.

Figure 36 : Consommation d'énergie finale



Source : Rapport Négawatt

L'efficacité énergétique provient en grande partie de l'électrification des procédés industriels qui conduit à une amélioration des rendements. Par ailleurs, les technologies développées et sélectionnées sont celles présentant les moindres consommations et les moindres impacts environnementaux, comme les matériaux biosourcés, bois et isolants végétaux dans le secteur du bâtiment (95% des maisons et 50% des immeubles construits avec du bois en 2050) ou le bioéthanol dans la Chimie. L'hydrogène vert, produit à partir d'électricité issue de sources renouvelables, remplace également l'hydrogène produit par vaporeformage d'hydrocarbures et permet de décarboner les secteurs de la sidérurgie et de la chimie minérale. Dans ce scénario, la consommation d'énergie de l'industrie passe de 231 à 200 Twh en 2050. Avec la relocalisation, une demande de 42 Twh supplémentaire sera nécessaire, ce qui représente un taux de 10%.

Le secteur de terres, agriculture, sylviculture et alimentation

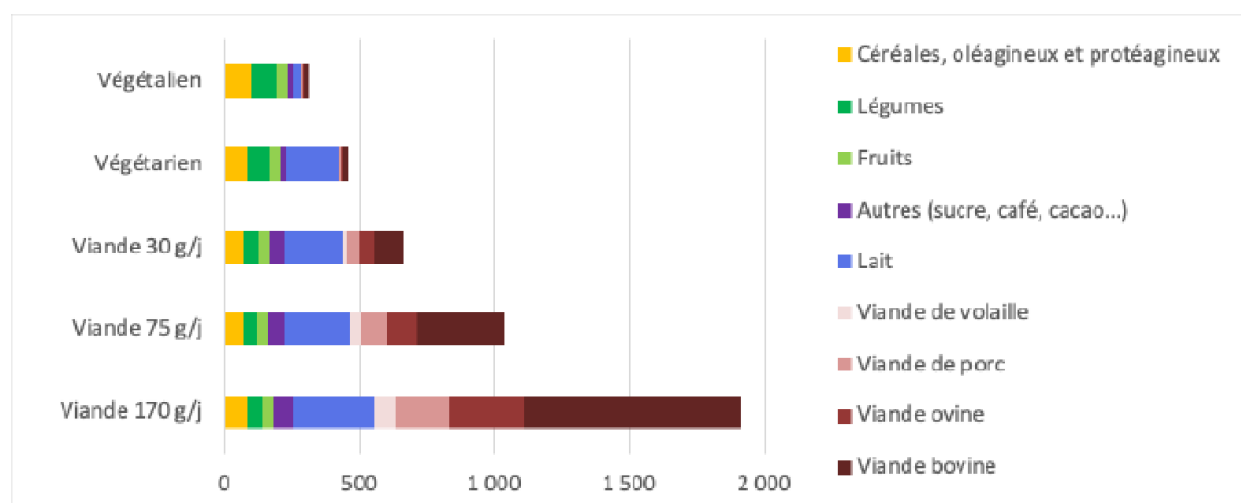
Dans les travaux du GIEC, le secteur de terres désigne l'agriculture, l'alimentation, la forêt, l'usage des terres et l'usage de la biomasse. Ce secteur doit assurer la neutralité carbone à l'horizon 2035. Les puits de carbone doivent compenser les émissions résiduelles du secteur agricole qui sont essentiellement du méthane et du protoxyde d'azote. Dans le scénario Négawatt, la transition énergétique consiste à augmenter le nombre de puits de carbone à hauteur des émissions résiduelles de l'agriculture. La problématique du secteur des terres est celui de la répartition des usages comme la production de la biomasse et sa position entre l'alimentation humaine et l'alimentation

animale, la production de matières, le maintien de la fertilité des sols et les besoins du maintien des écosystèmes

Le scénario NégaWatt s'appuie sur le scénario Afterres 2050 réalisé par l'association Solagro depuis 2011 (mis à jour en 2016 et 2022), qui repose sur une réflexion systémique (révision du système de production et redimensionnement de l'agriculture). Ce scénario propose l'utilisation de la biomasse, des terres ainsi qu'un équilibre entre le changement climatique et la protection de la biodiversité. Les mesures se résument en quatre volets : adaptation, atténuation, séquestration et substitution. Les leviers doivent combiner à la fois des actions sur la production et des actions sur la consommation.

L'empreinte carbone de l'alimentation française est en moyenne de 1,5 teqCO₂/personne/an. L'enjeu est de diviser cette empreinte par 2,5 (production et consommation).

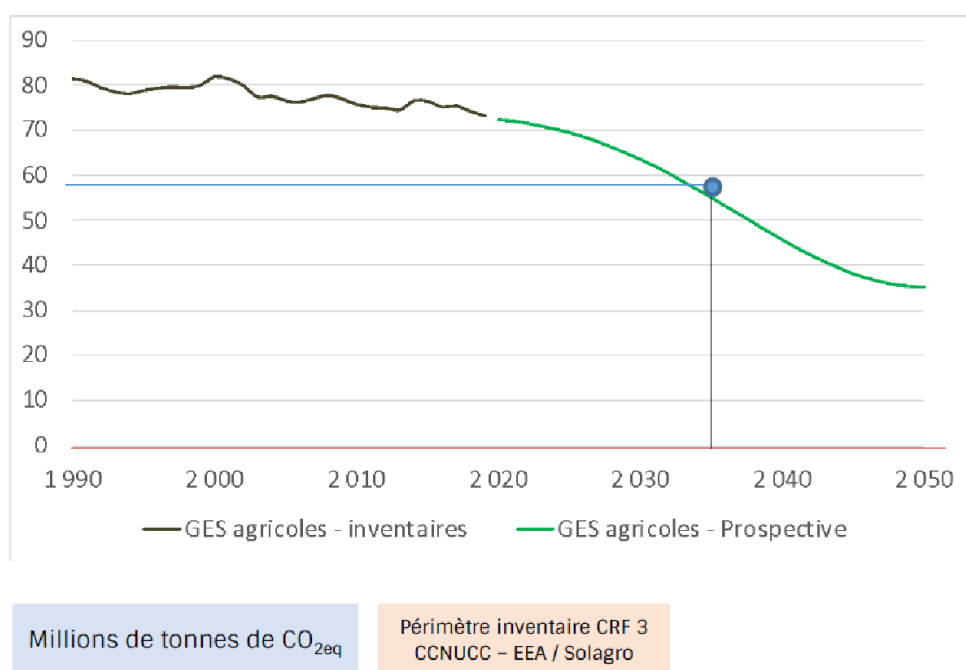
Figure 37 : Empreinte climatique de différents régimes alimentaires



Pour le volet consommation, ce sont les produits animaux qui représentent la plus grande part de l'empreinte carbone. Dans ce scénario, les gaspillages sont divisés par 2 en 2050 et le régime alimentaire est moins carné (division par 2 des protéines animales consommées). Côté production, il est possible de diviser par 2,5 les émissions de GES. La clé des mesures d'adaptation dans ce secteur renvoie à ce que l'on appelle « design agroécologique » de la parcelle jusqu'au territoire agricole.

Les émissions de GES de l'agriculture française passeraient de 73 millions de teqCO₂ en 2019 à 64 teqCO₂ en 2030, ce qui positionne la France directement sur la trajectoire « fit for 55 » (35 millions de teqCO₂ sont attendus pour 2050). Ce scénario est rendu possible grâce : (i) à la réduction de l'élevage (notamment bovin) due à l'évolution des régimes alimentaires, (ii) à la diminution des émissions de protoxyde d'azote suite à une meilleure maîtrise de la fertilisation azotée, (iii) à la méthanisation des déjections d'élevage

Figure 38 : Diviser par deux les émissions de GES de l'agriculture



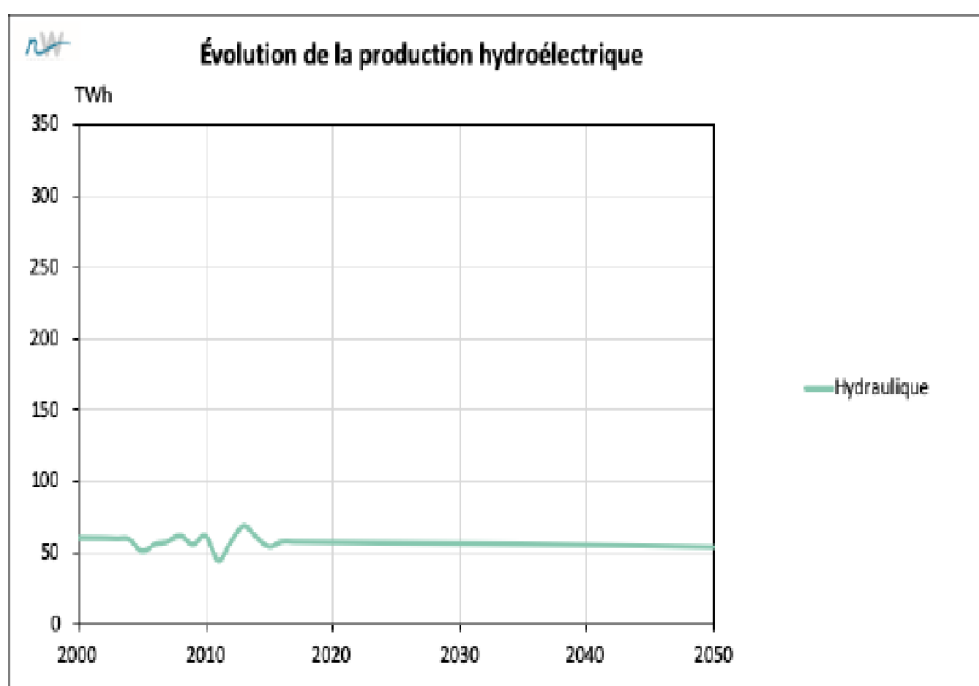
Source : Conférence de la présentation du Scénario NègaWatt

Un gain est attendu dans le changement d'usage des terres, via deux leviers : les changements dans les pratiques agricoles d'une part, et l'application d'un principe de non-débit de carbone dans le changement d'usage des terres. Pour l'usage des terres, le changement d'usage des terres et la forêt (UTCATF), le scénario retient la division par deux de la consommation des terres agricoles et forestières d'ici 2030 avec *Zéro Artificialisation Nette* (ZAN) avant 2050. UTCATF présenterait un puits de carbone biologique qui atteindrait 60 millions de tonnes de CO₂ dans les années 2040. Fondées sur les principes de l'agroécologie, la production végétale bascule vers l'agriculture biologique ou intégrée. Le scénario propose une division par 2 de l'artificialisation des terres agricoles et prévoit une augmentation importante des surfaces forestières et des haies. Par ailleurs, la forêt est mieux gérée pour fournir plus de bois d'œuvre (papier et construction), les résidus forestiers et les produits connexes de la transformation sont valorisés pour produire de l'énergie. La méthanisation à partir de déjections animales, de résidus de culture, de couverts végétaux et d'herbe, se développe et fournit une part conséquente des besoins en gaz renouvelables. Enfin, les importations de soja sont complètement arrêtées. Ces mesures permettent de diviser par 2 les émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole mais également de diviser par 3 les traitements phytosanitaires, par 2,5 l'utilisation d'engrais chimiques, par 2 les consommations d'eau pour l'irrigation des cultures et par 2 les consommations d'énergie.

Le secteur énergétique

Selon le scénario Négawatt, les bioénergies représenteront 390 Twh en 2050 (soit l'équivalent de 37% de l'approvisionnement de la France en énergie primaire, le double de la production actuelle). C'est un facteur multiplicateur de deux par rapport aux scénarios qui visent la neutralité climatique. A l'échelle mondiale, la valeur médiane de ce facteur multiplicateur dans les scénarios GIEC est un facteur 3, il est de 2 pour l'AIE, il est de 1,7 pour le CE. La France devait faire nettement mieux que la moyenne mondiale, voire de la moyenne européenne. La demande de bioénergie mobilisée dans le scénario Négawatt ne nécessite pas de cultures dédiées. Elle utilise des coproduits ou des sous-produits issus d'autres activités (doublement de la consommation d'ici 2050). La biomasse solide passe de 140 à 200 Twh en 2050, le biogaz de 15 à 130 Twh dont 90% sont injectés dans le réseau de gaz naturel existant avec un coût très modéré pour les infrastructures de raccordement. Concernant les biocarburants, seuls ceux de 2ème génération sont utilisés dans le scénario et sont réservés au secteur de l'aviation et aux usages matière (plastiques par exemple) en substitution aux produits pétroliers.

Figure 39 : Evolution de la production hydroélectrique

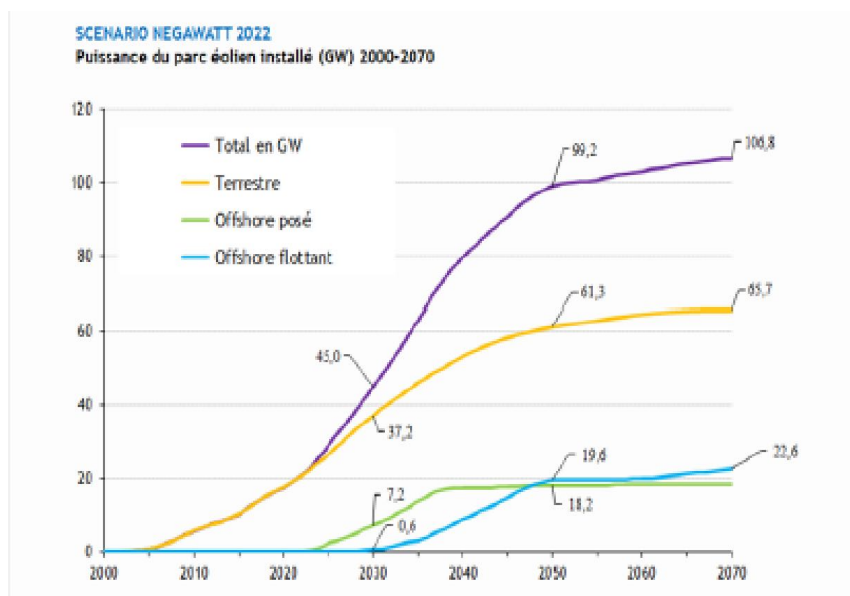


Source : Négawatt

Concernant le développement des énergies renouvelables, le scénario maintient le niveau de production hydraulique en intégrant des possibles baisses de production liée au réchauffement climatique et à la modernisation des ouvrages existants (en 2023, les précipitations ont permis de reconstituer les stocks d'eau et d'augmenter la production hydraulique).

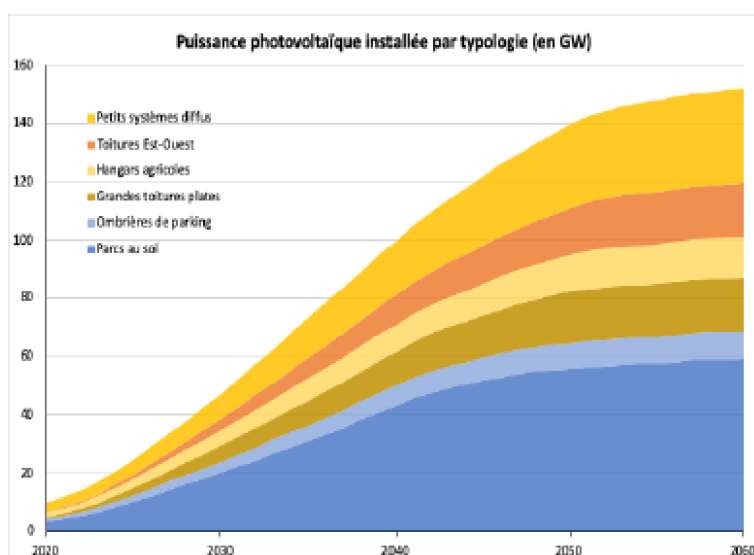
La capacité éolienne installée atteint un développement soutenu et régulier portant la capacité totale installée à 99 GW en 2050 (dont 61,3 GW en terrestre, 18,2 GW en offshore posé et 9,6 GW en offshore flottant). Cette capacité fournit une production totale de 305 Twh en 2050 (soit 60% de la production électrique totale, répartie en 162 Twh terrestre et 143 Twh offshore).

Figure 40 : Puissance éolienne installée



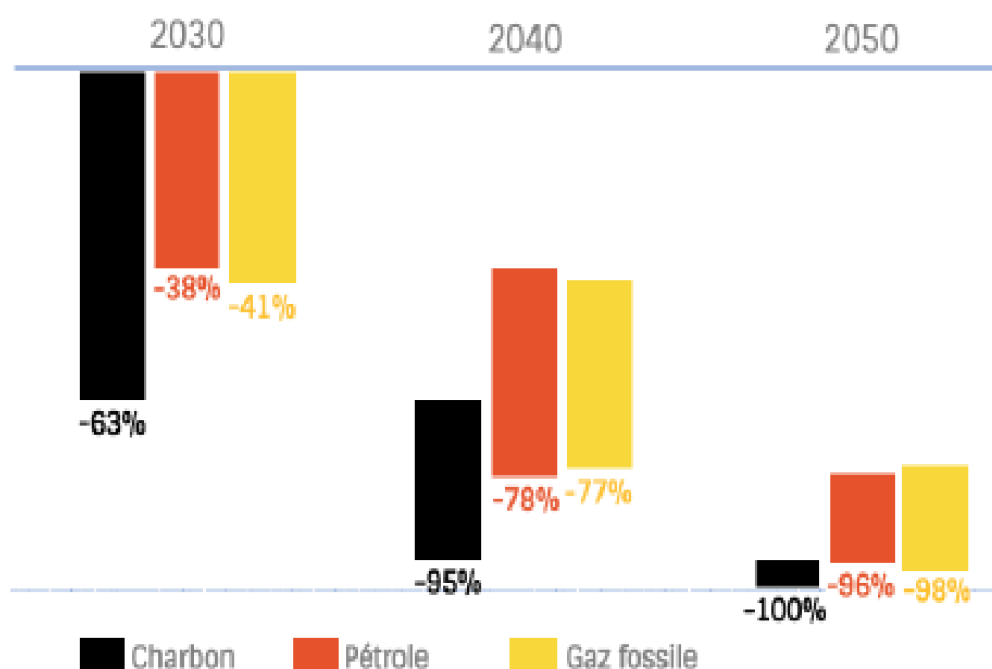
Le photovoltaïque connaît lui aussi un essor important. Le rythme moyen d'installation photovoltaïque est de 4,5 GW/an (2 GW en 2021). Cette capacité photovoltaïque atteint 144 GW en 2050 répartis entre petites toitures (27 GW), grandes toitures (51 GW), ombrières de parking (12 GW) et centrales au sol sur des friches industrielles ou des terrains délaissés (44 GW). Le photovoltaïque représente environ un tiers de la production totale d'électricité en 2050.

Figure 41 : Puissance photovoltaïque installée par typologie (en GW)



Le scénario NégaWatt prévoit la fin du recours aux fossiles, avec une sortie progressive des énergies fossiles jusqu'en 2050. Un effort de substitution du gaz fossile par du gaz vert sera proposé. Dans le scénario NégaWatt, il n'est pas envisagé la prolongation de réacteurs nucléaires déjà existants au-delà d'une durée de fonctionnement de 50 années. On envisage la fermeture de certains déjà à 40 ans et l'abandon de tout projet de construction de nouveaux réacteurs. Un rythme de fermeture progressif des réacteurs nucléaires est proposé entre les 4e et 5e visites décennales, le dernier réacteur étant fermé en 2045. Ce rythme tient en compte des enjeux énergétiques, de sûreté nucléaire et des enjeux économiques et sociaux.

Figure 42 : Réduction de la consommation d'énergies fossiles par rapport à 2020



Bilan et impacts du scénario Négawatt

Il est possible de présenter trois types de bilans du scénario NégaWatt : bilan énergie, bilan matières et bilan GES.

(i) Dans le bilan énergie, la consommation d'énergie est fortement réduite et un mix énergétique à 100% renouvelable est proposé (avec quelques quantités résiduelles de fossiles pour les aspects matières). Ainsi, la baisse de la consommation d'énergie enregistrée depuis 2010 s'inscrit dans un cycle long de sobriété et d'efficacité énergétique.

Figure 43 : Evolution de la consommation d'énergie de 2005 à 2023 corrigée des effets météorologiques

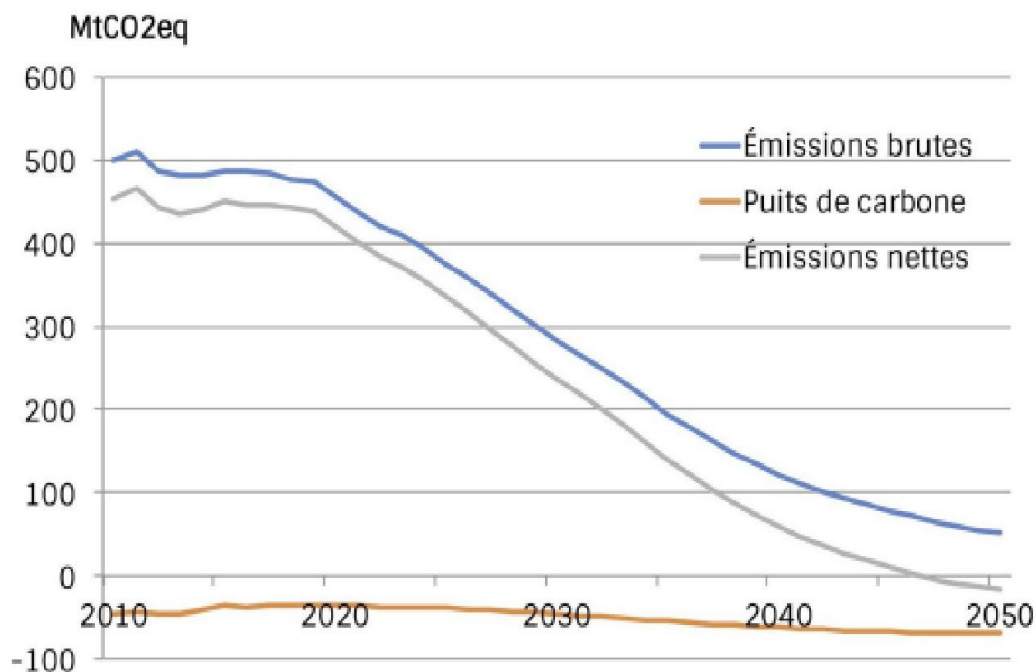


En 2050, pétrole, gaz fossile et charbon, mais également nucléaire, ont quasiment disparu du paysage énergétique français pour céder la place aux ENR (biogaz, éolien, photovoltaïque). Ce scénario s'inscrit dans l'ODD 7 Energie propre. Le mix énergétique sera de 1067 TWh en 2050 et le mix électrique de 55 TWh. Le scénario Négawatt est un scénario d'électrification important du système énergétique.

(ii) *Dans le bilan matière*, il s'agit de cerner les conséquences de nos modes de vie et de consommation sur l'environnement (empreinte environnementale). Les actions de sobriété et d'efficacité menées dans tous les secteurs permettent d'envisager une baisse globale de la consommation de matériaux. En parallèle, la substitution de matériaux non renouvelables par des matériaux biosourcés combinée à l'augmentation des taux de recyclage permet de réduire encore plus fortement la consommation des matières premières extraites de la croûte terrestre (activité des mines). Comme pour les émissions de gaz à effet de serre, les calculs ont été faits en approche territoriale (consommations sur le territoire national) et en empreinte (consommations de matériaux liées à la consommation de biens sur le territoire). Les résultats proviennent des calculs en empreinte, qui reflètent davantage l'impact de nos modes de vie et de consommation. Ils supposent des taux de recyclage équivalents en France et dans le reste du monde.

(iii) *Dans le bilan GES*, les actions de sobriété et d'efficacité menées dans tous les secteurs d'activités conduisent à une forte réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'une des nouveautés du scénario Négawatt 2022, c'est que l'évaluation des émissions GES se fait via une approche en termes d'empreinte environnementale, c'est-à-dire en incluant les émissions liées aux biens importés. Les résultats diffèrent en fonction du scénario retenu pour le reste du monde.

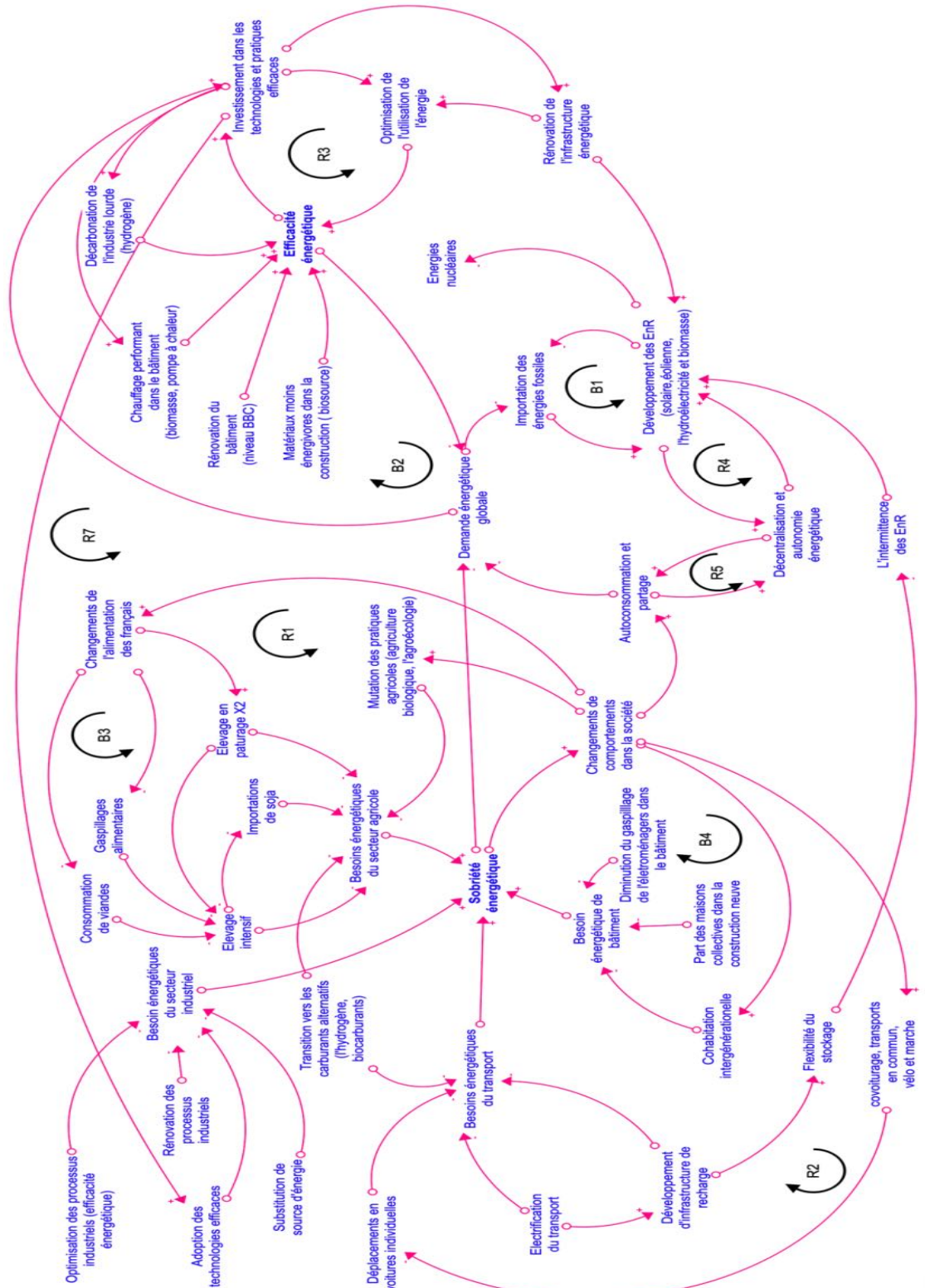
Figure 44 : Evolution des émissions des CO2 scénario Négawatt



Source : Négawatt

En 2015, les GES étaient constitués en majorité par le méthane en provenance du secteur agricole notamment liés à l'élevage. En plus de ces émissions brutes, il y a les puits carbonés. En additionnant les émissions brutes avec les puits carbonés, on obtient les émissions nettes. Ces émissions nettes deviennent nulles en 2047. L'empreinte carbone cumule les émissions nationales et le solde importateur, en tenant compte des produits agricoles et industriels importés et exportés ; de l'énergie carbonée importée ; du transport de marchandises dans les pays d'origine. Le mode de calcul est basé sur des flux physiques qui diffèrent de l'approche économique et du contenu carbone de production des pays qui exportent vers la France. La neutralité carbone est atteinte en 2047 pour les émissions territoriales (+ les sources internationales) ; les puits absorbent davantage que ce qui est émis. Si le monde suit une trajectoire similaire au scénario Négawatt, l'absorption des puits est égale à l'empreinte carbone en 2050. Le cumul des émissions en empreinte est compatible avec le scénario RCP 1.9 du GIEC qui permet de limiter l'élévation de température à 1,5 °C.

Figure 45 : Le CLD du scénario NegaWatt



Les scénarios du Shift Project

Le Shift Project, Think Tank dédié à une économie décarbonée fondée en 2010, produit des analyses rigoureuses et propose des solutions innovantes pour la transition énergétique en Europe. Il influence le débat public et les politiques énergétiques et climatiques par des événements et campagnes d'influence. Le Shift Project a initié un Plan de Transformation de l'Économie Française (PTEF) en 2020, visant à décarboner l'économie secteur par secteur. Ce plan repose sur quatre piliers : une approche globale et systémique, respectant les lois physiques et économiques ; une focalisation sur les ressources peu abondantes, en accordant une attention particulière à l'emploi ; des propositions pragmatiques et réalisables pour une décarbonation cohérente, visant une réduction des émissions de GES de 5 % par an ; ne pas compter sur la croissance économique ni sur les évolutions technologiques non prouvées. Le PTEF est organisé en quatre rubriques : les secteurs usages ; les secteurs serviciels ; les secteurs amont et les secteurs transversaux. En réponse à la précarité énergétique touchant entre 2,6 et 5,1 millions de foyers en France (The Shift Project, 2021), le Shift Project a proposé d'appliquer son plan de transformation de l'économie française (PTEF) au secteur résidentiel afin de faciliter la transition des ménages (The Shift Project, 2022).

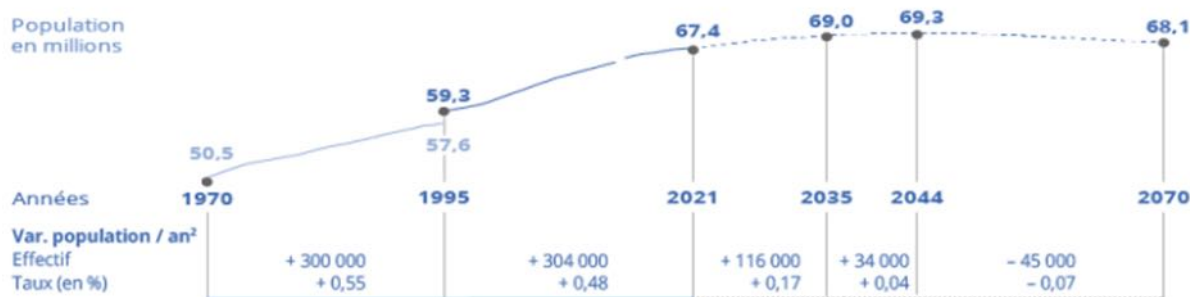
Description des scénarios

Les propositions formulées par The Shift Project, pour faire face à la crise énergétique dans le secteur résidentiel sont structurées autour de quatre axes.

Axe 1: Faire preuve de sobriété dans les constructions neuves

Cet axe propose une décarbonation des logements neufs grâce aux seuils d'émissions de la réglementation RE2020, qui modernise l'industrie du bâtiment vers un avenir bas carbone. Cependant, la quantité de constructions neuves, source majeure d'artificialisation des sols et d'émissions de GES, doit être reconsidérée. Le PTEF recommande une diminution progressive des nouvelles constructions, en accord avec la démographie, et la conversion des logements vacants en résidences principales, nécessitant des mises à niveau et une évolution de la répartition de l'emploi.

Figure 46 : Evolution de la population de 1970 à 2070



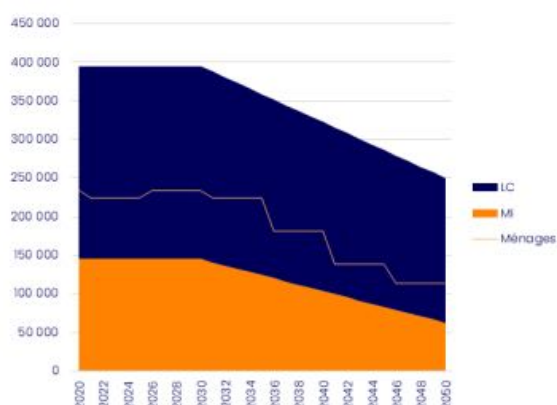
Source : INSEE (2021)

Pour parvenir à son objectif de zéro artificialisation nette (ZAN), le PTEF propose de diminuer la construction de maisons individuelles d'un tiers par rapport à la production actuelle, principalement les maisons secondaires mais en conservant la production actuelle de logements collectifs. Dans cet axe, trois scénarios sont proposés pour analyser l'évolution de la construction neuve :

Le scénario bas est basé sur la version initiale du PTEF, prévoit une réduction volontaire de la construction neuve en changeant les dynamiques géographiques de l'emploi. Le rythme de construction de logements collectifs est maintenu, ensuite, il diminue parallèlement à celui des maisons individuelles, suivant la courbe de croissance des ménages, laquelle devrait ralentir en raison de la baisse démographique.

Le scénario médian envisage une réduction modérée et progressive de la construction neuve, maintenant le rythme actuel jusqu'en 2030. Ensuite, la production de logements commence à diminuer en ligne avec la baisse démographique prévue. En 2050, on construit environ 250 000 nouveaux logements par an, dont seulement un quart sont des maisons individuelles. Cette trajectoire est plus conservatrice que le scénario de la SNBC, qui prévoit 210 000 logements neufs par an en 2050.

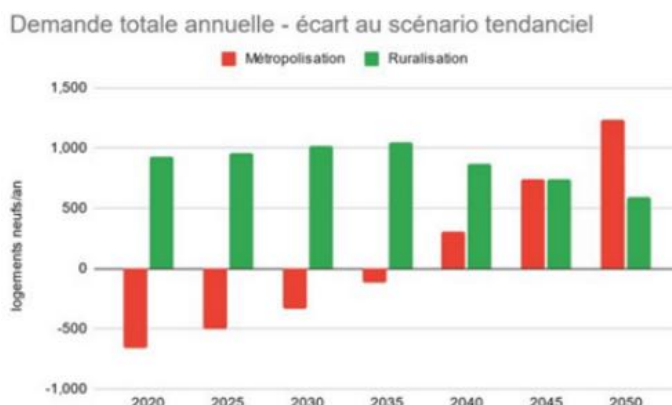
Figure 47 : Scénario Médian utilisé dans le PTEF pour estimer le parc de logements en 2050 basé sur la production actuelle



Source : The Shift Project

Le scénario haut maintient le rythme actuel de construction neuve afin de préserver les emplois liés au secteur résidentiel. Bien qu'il entraîne des impacts environnementaux supplémentaires, Jusqu'en 2030, la production de logements reste supérieure à la création de nouveaux ménages, ce qui facilite la migration vers les zones plus attractives, entraînant des logements vacants. Toutefois, à partir de 2030, le plan prévoit une réindustrialisation et un renforcement du secteur agricole pour revitaliser les zones rurales en déclin démographique. Cette stratégie pourrait potentiellement inverser la tendance, en réduisant à long terme le besoin annuel de nouveaux logements pour les résidences principales par rapport au nombre de nouveaux ménages.

Figure 48 : Besoins en logements neufs supplémentaires par rapport à un scénario tendanciel pour différents scénarii

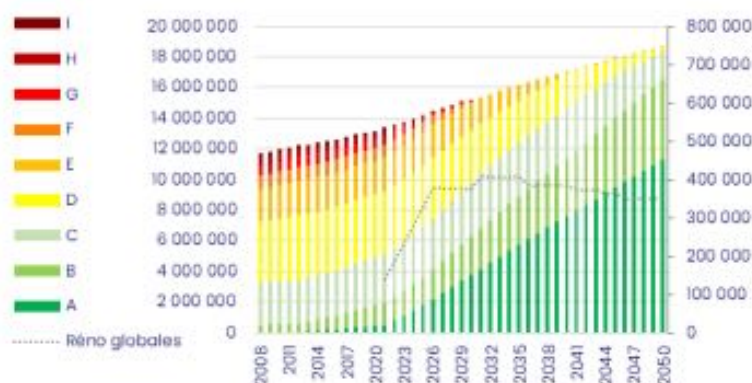


Source : The Shift Project

Axe 2 : Massifier la rénovation énergétique globale et performante

La rénovation des logements est essentielle pour décarboner l'économie. Le PTEF propose de rénover rapidement les habitations en utilisant des enveloppes performantes et des énergies renouvelables. L'objectif est de rénover un million de logements par an en dix ans, ciblant en priorité les plus énergivores. Pour les maisons individuelles, il est nécessaire d'imposer des rénovations obligatoires en cas de mauvais résultats au Diagnostic de Performance Énergétique (DPE), sous condition d'une offre locale satisfaisante. Pour les logements collectifs, le décret "Travaux embarqués" pourrait être durci pour limiter les dérogations et améliorer les contrôles. La réduction de la consommation d'eau chaude domestique peut également être obtenue en redimensionnant les ballons et en utilisant des systèmes locaux d'énergie renouvelable, tels que des chauffe-eaux thermodynamiques. La rénovation doit transformer les étiquettes énergétiques DPE supérieures à C en A, B ou C. Ce processus nécessite des compétences actuellement insuffisantes et demande une action organisée pour être réaliste d'ici 2050.

Figure 49 : Évolution du parc de logements collectifs français par étiquette de performance énergétique

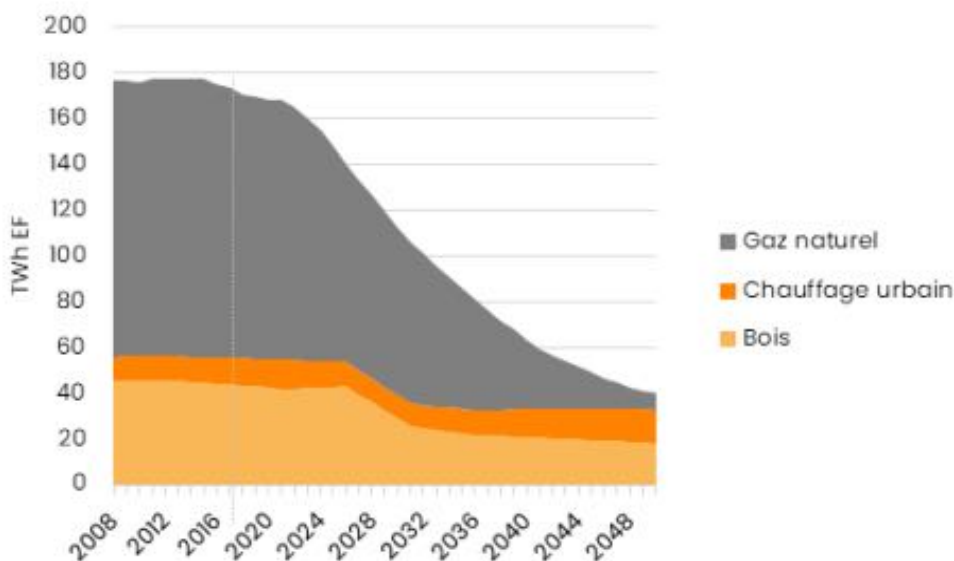


Source : The Shift Project

Axe 3 : Décarboner la chaleur

Cet axe souligne l'urgence de promouvoir la substitution des énergies fossiles dans les logements existants. Afin de faciliter une transition rapide vers les énergies décarbonées pour le chauffage. Le PTEF prévoit de remplacer tous les chauffages fossiles par des sources bas carbone, en raccordant 5 millions de logements collectifs à des réseaux de chaleur et en installant des pompes à chaleur pour plus de 10 millions de logements. La sobriété énergétique reste un levier secondaire mais important.

Figure 50 : Consommation de chauffage par système



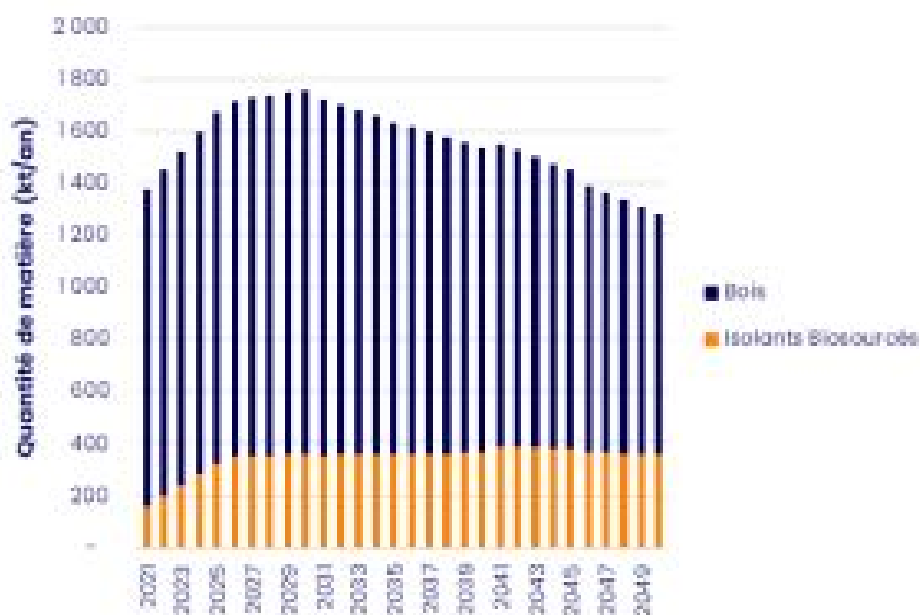
Source : The Shift Project

À l'horizon 2050, on observe une réduction de l'utilisation du bois comme source d'énergie pour le chauffage, ainsi qu'une diminution générale de la consommation énergétique liée au chauffage grâce à des efforts d'isolation substantiels. Les énergies fossiles ne seront plus utilisées pour chauffer les logements, à l'exception de quelques habitations collectives alimentées au gaz et d'une part résiduelle de fossile dans les réseaux de chaleur. Le biogaz pourrait combler cette demande.

Axe 4 : Mobiliser le bâtiment comme puits de carbone

Cet axe propose de suivre une trajectoire de décarbonation de la construction, similaire à la RE 2020, jusqu'en 2050. Il préconise de réduire l'utilisation de matériaux à forte empreinte carbone par unité de surface et d'augmenter l'usage de matériaux à faible empreinte carbone, tels que les matériaux biosourcés. L'intégration des isolants biosourcés dans la construction permettrait aux bâtiments de stocker du carbone de manière durable, en raison de leur longue durée de vie. À moyen terme, il propose de mettre en place des mesures réglementaires pour contrôler les produits mis sur le marché, favorisant ainsi la rénovation des bâtiments pour renforcer les puits de carbone, tout en respectant le rythme nécessaire des rénovations.

Figure 51 : Consommation de matière biosourcée des logements neufs et rénovés



Source : The Shift Project

Les enseignements des scénarios du Shift Project

ENS 1 : Réduction de la construction neuve

A l'horizon 2050, on devrait observer une baisse de 75% d'impacts énergie - climat grâce à une réduction des surfaces neuves, la décarbonation des processus industriels, et le remplacement partiel de matériaux à fortes émissions.

ENS 2 : Sensibilisation et accompagnement - rôles des ménages et de l'État

Rôle des ménages : La décarbonation des logements nécessite une prise de conscience accrue des ménages concernant l'impact énergétique de leurs habitations. Une compréhension approfondie du concept de sobriété énergétique, accompagnée de pratiques économes en énergie, contribuera efficacement à limiter l'effet rebond.

Rôle de l'État : Pour réussir cette transition, l'État doit intensifier ses efforts d'accompagnement et de communication sur la rénovation énergétique. Cela inclut l'augmentation des aides financières, la simplification des processus d'aide, et l'accès à des crédits adaptés, surtout pour les ménages modestes, afin de financer les rénovations nécessaires.

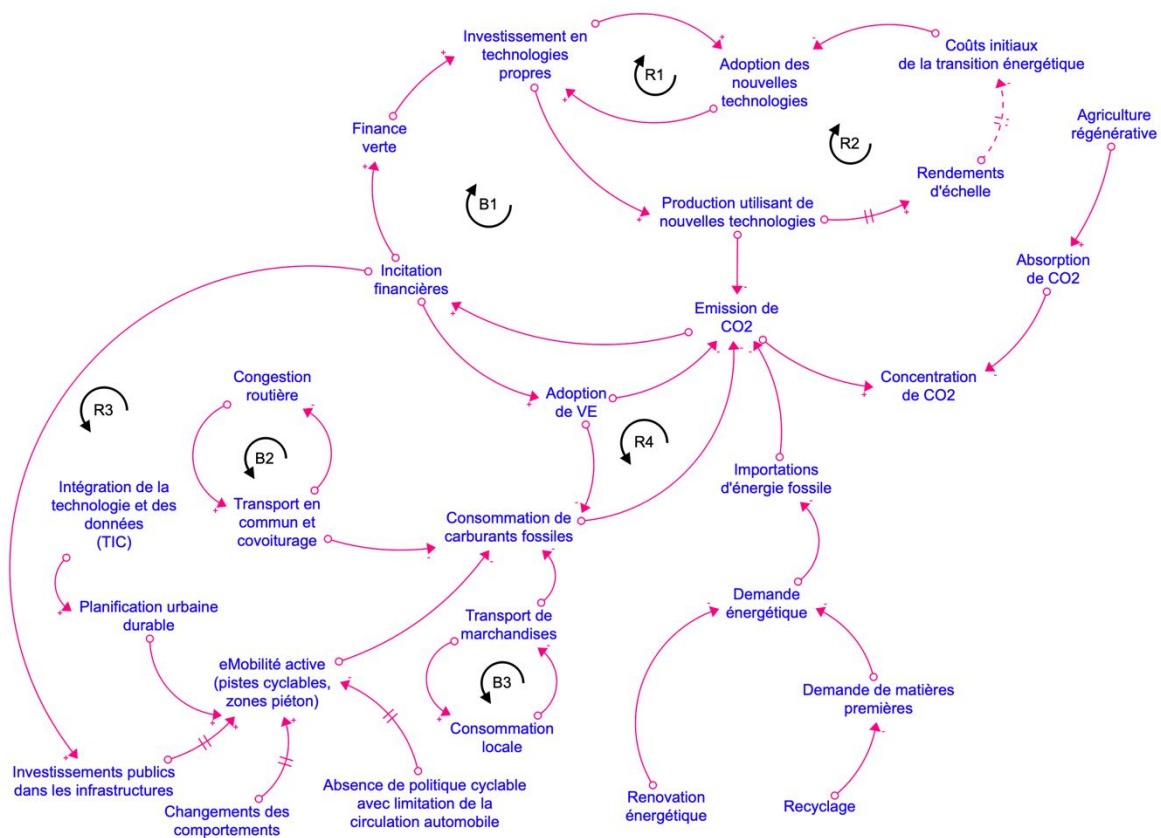
ENS 3 : La complexité de l'encadrement de la construction neuve

La gestion de la construction neuve est particulièrement complexe en raison du caractère essentiel du logement, reconnu comme un droit fondamental. La décohabitation et l'augmentation des surfaces moyennes des logements ont amplifié

la demande en logement, ce qui, bien que bénéfique pour la qualité de vie, augmente les volumes à chauffer, en particulier dans les logements anciens.

La production de logements reste problématique en raison de déficits en logements collectifs en zones tendues. Le gouvernement tente de relancer la production, notamment via des mécanismes comme la loi Pinel et le dispositif Denormandie, mais des difficultés persistent, telles que l'augmentation du nombre de personnes sans domicile et les logements indécents. La réflexion sur l'artificialisation des sols, exacerbée par la construction de maisons individuelles, devient centrale pour atteindre les objectifs de résilience territoriale.

Figure 52 : Le CLD du Shift Project



Analyse comparative des scénarios énergétiques pour la France

Au regard de la description des scénarii énergétiques pour 2050 de l'association NegaWatt, du gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité (RTE), de l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et l'association Shift Project, il est possible d'identifier les différents enjeux et leviers d'action. L'analyse portera principalement sur les aspects de convergence et de divergence entre les scénarios des différentes institutions ainsi qu'une comparaison quantitative de la consommation d'énergie, des émissions des GES, des taux d'énergies renouvelables dans le mix énergétique 2050 et des estimations des investissements de la transition énergétique. Les nombreux scénarios impliquent des disparités entre les approches

méthodologiques, les hypothèses et les éléments d'entrée de ces études prospectives ainsi que les résultats du bilan du mix énergétique.

Les points communs des différents scénarios

Bien que contrastés et portés par des acteurs différents, les scénarios énergétiques proposés par RTE, l'ADEME, Négawatt et The Shift Project ont plusieurs points communs :

(i) L'ensemble des quatre scénarios énergétiques sont des études prospectives qui cadrent avec les objectifs nationaux de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). Cette stratégie définit la trajectoire française pour l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050 et la diminution de l'empreinte carbone de la consommation des Français, en respectant à moyen terme les budgets carbonés. Dans sa version révisée 2020, cet objectif de réduction a été rehaussé par rapport à la version 2014, soit une réduction de presque 80% de ces émissions GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990.

(ii) Au regard des dates de publication des rapports des scénarios des quatre entités, nous retenons que ces études ont coïncidé, en totalité, avec le contexte d'élection présidentielle de 2022, pour nourrir le débat et éclairer les décideurs politiques sur les éléments de réflexion nécessaires à la mise en œuvre d'une stratégie de transition compatible avec les objectifs de décarbonation.

(iii) Les périmètres temporels de la projection des modèles énergétiques, concernent des trajectoires à long terme, au-delà de 30 ans, allant à l'horizon 2050 et plus (le scénario Négawatt est allé pour certains sujets critiques comme la rareté des ressources métaux jusqu'à l'horizon 2100). Les périmètres spatiaux s'appuient sur l'échelle nationale et non régionale, à l'exception du scénario RTE qui a simulé le système électrique à l'échelle européenne.

(iv) Les quatre rapports des études prospectives de la transition énergétique ont fait l'objet de communication et de vulgarisation, par des conférences en plénières, en vue d'apporter des éclaircissements sur les études réalisées (il s'agit de systèmes énergétiques très complexes).

(v) Tous ont une approche globale basée sur le triptyque (sobriété, efficacité et renouvelables). Aussi les bilans à l'horizon 2050 ont abordé les retombées économiques en termes de coûts, d'investissements, d'emploi ou d'autres externalités.

(vi) Les différentes études ont cherché à rendre compte des impacts environnementaux dans le cadre de la réduction globale de l'empreinte carbone et des impacts sociétaux en termes de réduction des inégalités, de la fin de la pauvreté et de la réduction de la vulnérabilité liée aux consommations d'énergie.

(vii) Toutes les études ont inscrit leur démarche prospective en s'appuyant sur le suivi de la consommation d'énergie globale et en détail selon les différents secteurs (bâtiment, industrie, agriculture, transport...).

(viii) Le mix énergétique retenu dans le bilan des études prospectives s'appuie sur combinaison entre les filières EnR, nucléaire, électrification des usages, vecteur hydrogène, capture et stockage de carbone (CCS), etc.

(ix) La construction de logements (résidentiel ou tertiaire) et la rénovation des bâtiments sont omniprésentes dans tous les scénarios. Il est mis l'accent sur la nécessité d'une rénovation thermique de la quasi-totalité du parc de logements existant en 2020. Cette rénovation doit se faire à un rythme accéléré et soutenue, portée à un niveau BBC (la consommation annuelle d'énergie primaire du logement ne doit pas dépasser 80 kWhEP/m²/an) ou plus performant. Le parc de 2050 doit être complètement rénové est différent de celui de 2020. Il est prévu d'atteindre entre 600 000 et 1 million de rénovations performantes par an d'ici à 2030.

(x) Dans tous les scénarios, c'est au secteur des transports qu'est demandé de faire les plus gros efforts en matière de sobriété et d'efficacité ; viennent ensuite, et à parts égales, la réindustrialisation et le bâtiment.

(xi) Enfin, tous les scénarios sont d'accord sur le fait de sortir rapidement des énergies fossiles et d'agir concrètement en proposant de véritables transformations du système énergétique.

Les points de divergence des différents scénarios

Si les quatre études prospectives ont bien pour objectif d'enrichir le débat politique et d'aider les décideurs politiques à s'engager sur la voie du mix énergétique, les ambitions et les enjeux diffèrent d'une institution à l'autre :

(i) RTE s'est intéressé à mesurer l'impact de la transition énergétique sur le réseau électrique, l'ADEME avait pour tâche de définir la stratégie nationale de la transition énergétique, NégaWatt aspirait à sensibiliser l'opinion publique (sobriété énergétique) et les décideurs dans un contexte d'élection présidentielle, The Shift Project souhaitait proposer un guide ou un référentiel méthodologique pour toute partie intéressée souhaitant connaître la trajectoire à suivre pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et contenir le réchauffement climatique à moins de 2°C.

(ii) Les scénarios se sont focalisés sur l'étude de la demande en énergie et non sur l'offre, intégrant tous les secteurs et l'ensemble du mix énergétique, seule RTE s'est concentré sur le système électrique.

(iii) Un contraste existe en ce qui concerne la part du nucléaire dans le mix énergétique : pour NégaWatt, les recommandations restent favorables pour l'abandon du nucléaire. La fermeture des centrales est envisagée pour 2045, que ce soient de petites ou de grosses centrales. Les SMR et EPR sont catégoriquement repoussées.

(iv) Contrairement aux scénarios ADEME, les scénarios NégaWatt, The Shift Project et de RTE retiennent des niveaux de consommations d'électricité très supérieurs à ceux de l'année 2015 (année de référence) : 630 TWh en 2050 contre 470 TWh en 2015.

(v) La comptabilisation des émissions importées associées à la production de biens d'équipements et de biens de consommation à l'étranger, est l'une des contributions majeures des scénarios Négawatt, notamment en ce qui concerne la partie empreinte carbone et les leviers des options de relocalisation de l'industrie. L'objectif final est de réduire les émissions de GES, imputables au citoyen Français.

(vi) Excepté Négawatt, les scénarios ADEME, RTE et du Shift Project n'ont pas ou peu abordé la question critique liée à la rareté des ressources en matières premières dans les programmes de transition énergétique. Nous citerons à titre d'exemple celui du lithium utilisé pour les batteries des voitures électriques. Un scénario Négamat a été associé au scénario Négawatt. Destiné aux matériaux et matières premières, il permet d'identifier assez finement les leviers d'action pour réduire l'extraction de ces matières (notamment l'économie circulaire).

(vii) Le scénario Négawatt a évalué et quantifié à long terme certaines évolutions et tendances allant au-delà de 2050, soit à l'horizon 2070 (certaines à l'horizon 2100) et ce, pour élucider les fortes incertitudes sur l'évolution des écosystèmes naturels sous la contrainte d'un réchauffement climatique et de raréfaction des ressources naturelles (exemple du lithium).

(viii) Seul The Shift Project aborde dans son étude prospective les deux éléments critiques qui influencent significativement la transition énergétique, nous citerons la demande de pointe en matière d'énergie (équilibre instantané entre l'offre et la demande d'électricité sur le réseau) et l'impact de l'ensemble des transformations sur l'emploi pour les différents secteurs (industrie, bâtiment, agriculture...)

(ix) L'ensemble des institutions ont parié sur les nouvelles technologies pour forger leurs scénarios prospectifs, or ces dernières présentent beaucoup d'incertitude sur leurs maturités, seul The Shift Project a opté pour une approche prudente, cherchant à faire le tri entre les différentes solutions innovantes et leurs potentiels (notamment l'enjeu du numérique).

(x) Enfin, un focus a été effectué par Négawatt sur les stratégies industrielles et les évolutions des filières qui étaient en décroissance en France telles que la papèterie, la mécanique et la métallurgie pour les redéployer dans une perspective de transition énergétique.





(xi) Les trajectoires de réduction de la consommation (- 40%) à l'horizon 2050 ont été retenues par les quatre institutions (à l'exception du scénario Pari réparateur de l'ADEME). La consommation d'énergie passe de 1600 TWh à 930 TWh en 2050. En termes de capacité de production du mix énergétique installé à l'horizon 2050, cette dernière sera à dominante énergies renouvelables avec au moins 40% d'ENR en 2050 pour le Shift Project, 50 % pour RTE, 70 % pour l'ADEME et 100 % pour Négawatt.

(xii) L'hypothèse de l'augmentation de la consommation électrique a été retenue par l'ensemble des institutions. Cette consommation va compenser la sortie de la

consommation de l'énergie primaire fossile. Néanmoins, les scénarios ne prennent pas en compte les mesures d'accompagnement visant à redimensionner les réseaux électriques et à augmenter la capacité de stockage de ladite énergie.

(xiii) Pour la mobilité, la substitution des véhicules thermiques fonctionnant avec l'énergie fossile, par les véhicules 100 % électriques, occupe une place de choix, avec 67 % des voitures en 2050, ce qui représente une réduction de 60 % de la consommation moyenne des voitures d'ici 2050, avec un peu moins de véhicules utilisant le biogaz et l'hydrogène. Cependant et à l'exception du scénario NégaWatt, les autres institutions ne reviennent pas sur les leviers à engager pour faire face à la pression sur les ressources, notamment les métaux rares nécessaires à l'électrification du parc automobile français à l'horizon 2050. Le tableau ci-dessous reprend la réduction des émissions de GES et les conséquences du mix énergétique à l'horizon 2050 pour les quatre institutions.

Tableau 1 : Comparaison des scénarios ADEME, RTE, NégaWatt et Shift Project

<u>Scénarios de transitions</u>	<u>ADEME</u>	<u>RTE</u>	<u>NégaWatt</u>	<u>shift Project</u>
				
<u>Présentation</u>	L'Agence De la maîtrise de l'énergie est un EPIC	Gestionnaire du réseau public de transport d'électricité haute tension, entreprise de EDF	Association des professionnels de l'énergie et des citoyens	Association avec le soutien des entités économiques et des partenaires publiques
<u>Date de 21 publications</u>	<u>30 novembre 2021</u>	<u>25 octobre 2021</u>	<u>26 octobre 2021</u>	<u>26 janvier 2021</u>
<u>Intitulé du rapport</u>	« Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat »	« Futurs énergétiques 2050 »	« La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale . »	Le Plan de Transformation Économique de la France (PTEF)
<u>Objectifs</u>	Dessiner la trajectoire pour conduire la France vers la neutralité carbone en 2050			
<u>Documents de référence</u>	Basé sur le <u>rapport du GIEC de 2018 + SNBC</u>	SNBC	Basé sur le rapport du GIEC de 2018 + SNBC	SNBC
<u>Nombre de collaborateurs</u>	<u>100</u>	40	12	60

<u>mobilisés pour l'étude</u>				
<u>Temps alloués pour l'étude prospective</u>	Deux (02) ans	02 ans	18 mois	18 mois
<u>Nombres de scénarios prospectifs</u>	<p>Quatre (04) Scénarios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Scénario tendanciel • Scénario S1 « Génération frugale" • Scénario S2 « Coopération territoriale » • Scénario S3 « Technologies vertes » • Scénario S4 « Pari réparateur » 	<p>Six (06) scénarios 06</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>3 scénarios avec mix 100 % ENR</u> <p>Scénario M0 : 100 %ENR</p> <p>scénario M1 : « répartition diffuse »</p> <p>Scénario M23 : « ENR grands parcs »</p> <p><u>3 scénarios ave mix « EnR + nucléaire »</u></p> <p>Scénario N 1 : 26 % d'électricité dans le mix électrique de 2050 avec 8 EPR (1 EPR chaque 05 ans)</p> <p>Scénario N2 : Nucléaire atteint 36 % du mix en 2050 avec 14 EPR (1 EPR chaque 03 ans)</p> <p>Scénario N03 : 50 % de nucléaire dans le mix en 2050, avec maintien des réacteurs après 60 ans d'exploitation avec 14 EPR2 et de quelques petits réacteurs modulaires (SMR).</p>	<p>Un (01) seul scénario avec vision systémique.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Le scénario Négawatt a été accouplé au scénario Négamat (épuisement des ressources naturelles, et notamment des matériaux) ✓ ainsi que le scénario Afterres <p>2050 (transition agricole, sylvicole et alimentaire)</p>	<p>Un (01) seul scénario avec vision systémique.</p>

<p><u>Méthodologie de l'étude prospective</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Etude multicritère • Évaluation de l'empreinte carbone n'est pas prise en compte dans ces scénarii, mais planifiée dans la deuxième phase de l'étude • Traite la triptyque sobriété, efficacité énergétique et ENR • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur et électricité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Etude multicritère • Evaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; • Modélise en détail que la partie concernée par les changements liés à l'électricité de notre système économique, • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité l'agriculture, des forêts, de l'industrie, ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Etude multicritère • Evaluation de l'empreinte carbone et une appréciation de l'impact sur les ressources (matières, biomasse, sols notamment) ; • Traite la triptyque sobriété, efficacité énergétique et ENR • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur et électricité). 	<ul style="list-style-type: none"> • C'est une démarche qui prend en compte les interactions des individus avec les flux physiques en tant qu'utilisateurs final de biens et de services en détaillant les modes de vie d'une part et comme producteurs de biens de services et donc de l'emploi d'autre part. • La description des scénarios a couvert les secteurs du bâtiment, de la mobilité, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, ...
<p><u>L'étendue de l'étude</u></p>	<p>La France métropolitaine</p>			
<p><u>Émissions de GES</u></p>	<p>Réduction d'un facteur six ou</p>	<p>Horizon 2030 : 25 Mt CO₂eq /an</p>	<p>Réduire suffisamment les</p>	<p>Réduction d'un facteur de six</p>

	<p>sept, par rapport à aujourd'hui, dans les trois premiers scénarios, d'un facteur quatre, dans le quatrième</p> <p>Emission nette négative allant de -9 à -42 millions de tonnes de CO₂.</p>	<p>d'empreinte carbone évitées grâce à la réindustrialisation</p> <p>900 Mt CO₂eq évitées sur la trajectoire 2020-2050</p> <p>Division par 6 des émissions de CO₂ produites sur le sol français</p>	<p>émissions de gaz à effet de serre, de 450 Mt CO₂eq</p> <p>Actuellement à environ 50 Mt CO₂eq</p> <p>à partir de 2047 Les émissions (CO₂) liées à la consommation d'énergie sont divisées par 28.</p> <p>Les émissions de (CH₄), provenant essentiellement du secteur Agricole, sont divisées par 3.</p> <p>L'ensemble de nos émissions de gaz à effet de serre est divisé par près de 9.</p>	<p>rapports à aujourd'hui,</p> <p>Impose un rythme de réduction des émissions de gaz à effet de serre d'environ 5 % par an en moyenne</p>
<u>Consommation d'énergies</u>	<p>- 60 % de consommation d'énergie finale par rapport à 2015 dans le scénario le plus sobre, - 25 % dans le scénario le moins contraignant.</p>	<p>La consommation d'énergie doit baisser de 40 % en 2050 pour atteindre 930 TWh</p>	<p>La consommation d'énergie primaire est divisée par trois d'ici 2050 et la production d'énergies renouvelables est multipliée par 3.</p>	<p>- 60 % de consommation d'énergie finale par rapport à 2019</p>
<u>Production d'électricité à l'horizon 2050</u>	<p>?</p>	<p><i>La production d'électricité décarbonée doit croître de 35 % à l'horizon 2050</i></p>	<p>IL y aura un équilibre entre La production et la consommation d'électricité.</p>	<p>x5 production d'électricité d'ici 2050 soit 610 TWh</p>
<u>Taux % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique 2050</u>	<p>70 à 88 % 5,5 à 8,9 GW</p> <p>De plus par an en moyenne. C'est l'augmentation des capacités renouvelables électriques pour la période 2020-2050.</p>	<p>100%</p>	<p>96% le parc terrestre est multiplié par 2,1 par rapport à 2020, pour atteindre un total d'environ 19 000 éoliennes En mer, un peu plus de 3 000 éoliennes</p>	<p>Hydraulique 22 GW pour 63 twh. 180 TWh EN 1/3 d'éolien en mer, 1/3 d'éolien terrestre et 1/3 de PVR avec</p>
<u>Estimation des investissements</u>	<p>Pour l'atteinte des objectifs</p>	<p>RTE a chiffré à 10 milliards d'euros</p>	<p>En se référant aux travaux du HLEG</p>	<p>ND</p>

<p><u>de la transition énergétique</u></p>	<p>nationaux de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) un investissement annuel supplémentaire devrait se situer entre 43 et 62 milliards € (soit un coût total compris entre 63 et 82 milliards €/an) –ADEME 2015</p>	<p>par an la différence de coût entre les scénarios M23 et N2.</p> <p>Les scénarios 100 % renouvelables impliquent aussi des « paris technologiques lourds » – mais ce qui serait aussi le cas pour la prolongation du fonctionnement des centrales nucléaires existantes au-delà de soixante ans et la construction de SMR.</p>	<p>(High Level European Group) qui a estimé coût de la transition énergétique à l'échelle de l'Europe entre 2021 et 2030 à 200 milliard d'euros soit 11 200 milliards €/an, Les investissements (publics et privés) actuellement tournés vers la transition énergétique étant évalués à 20 milliards € par an à l'horizon 2030 en se basant sur son PIB.</p>	
--	---	--	--	--

Conclusion

Face au réchauffement climatique, la transition énergétique est devenue le fer de lance des grandes institutions telles que l'ADEME, RTE, NégaWatt ou encore the Shift Project. Leurs scénarios entendent bien insister sur les deux points suivants : 1° l'urgence à agir pour contenir le réchauffement climatique entre 1,5 et 2°C (accord de Paris), 2° la nécessité de sortir des énergies fossiles³ (en France, environ 60 % de l'énergie utilisée est d'origine fossile, il s'agit principalement des produits pétroliers (de l'ordre de 40 %), du gaz naturel (de l'ordre de 20 %) et du charbon (moins de 1 %)). La France n'a pas positionné sa stratégie bas carbone sur le captage et la séquestration du carbone CCS (dont la maturité technologique n'est pas encore prouvée) ainsi que sur les importations massives de combustible dit vert (Gaz naturels ou GNL). Pour les quatre institutions, il est question de changements plus ou moins drastiques des modes de vies et de choix de société en misant *sur la sobriété des usages et des consommations énergétiques* dans des domaines très variés (de l'alimentation à la mobilité douce, de l'économie du partage en passant par la rénovation des habitats) ; *l'efficacité énergétique* (scénarios ADEME) *et la réindustrialisation ; un investissement dans des secteurs technologiques de pointe et stratégiques, ainsi que la relocalisations de productions émettrices de GES à l'étranger* (Scénario NégaWatt). La mobilisation des puits de carbone naturels et /ou artificiels est également évoquée pour compenser les émissions des GES. Certaines voies proposées méritent que l'on s'y attarde :

³ Le conflit entre la Russie et l'Ukraine a renforcé cette volonté et amené les autorités françaises à accélérer leur sortie des énergies fossiles.

(i) Ouverture du débat sur les scénarios à l'horizon 2050 à forte participation des énergies renouvelables (de 70 à 100 %) dans le mix énergétique. Ces scénarios s'accompagnent de paris technologiques importants concernant la maîtrise de la technologie de l'intégration de l'hydrogène pour les besoins de stockage et palier ainsi au problème de l'intermittence de ce type d'énergie.

(ii) Un scénario conservant une capacité de production nucléaire associée au développement conséquent des renouvelables à 2050, est proposé au débat comme trajectoire de neutralité par RTE. Pour la production de l'électricité bas carbone en France, ce type de scénario ne soutient pas la prolongation de l'exploitation des réacteurs au-delà de 60 ans et sa trajectoire est compatible avec une fermeture progressive des réacteurs actuels et de la relance de la construction de 14 réacteurs EPR 2 en 30 ans.

(iii) La mobilisation de l'ensemble des acteurs concernés par le sujet est indispensable. En effet, la transition énergétique doit sortir du simple débat entre experts scientifiques pour devenir un débat politique, car les choix technologiques, industriels, de gouvernance ou encore financiers arrêtés par les scénarios relèvent de la sphère politique et de la société civile.

(iv) La nécessité de mener une transition énergétique juste et solidaire. Pour cela, des outils sont proposés pour une inclusion juste et solidaire afin combattre la précarité énergétique et défendre le droit à l'accès à l'énergie aux ménages les plus défavorisés en France,

(v) La transition du secteur agricole, sylvicole et alimentaire est indispensable pour mener à bien toute transition énergétique par : (1) l'utilisation des terres et de la biomasse visant un nouvel équilibre entre alimentation humaine, alimentation animale, production de matériaux et d'énergie, et préservation des écosystèmes, de la biodiversité et du sylvicole et alimentaire couplés ; (2) la mutation des pratiques agricoles, avec un basculement de l'agriculture dite conventionnelle vers l'agriculture biologique, l'agroécologie et la production intégrée ; (3) l'utilisation de la biomasse issue de l'agriculture, constitue un des principaux foyers à partir de laquelle des énergies dites renouvelables pour la production de chaleur et d'électricité peuvent émerger.

Pour conclure, nous retiendrons trois écueils présents dans les quatre études et sur lesquels il conviendrait d'apporter à la fois de la transparence et de la concertation. Le premier concerne les modèles utilisés. Proposer des scénarios pour mieux visualiser le futur reste avant tout un exercice de communication qui tourne autour de mots clés (énergie renouvelable, sobriété, efficacité...). Il est cependant très difficile de faire la part des choses sur les hypothèses et les relations fonctionnelles introduites dans les scénarios. Les quatre institutions ne communiquent pas sur les modèles utilisés. Or, ce

sont ces modèles qui permettent de faire des simulations et de la prospective⁴. Le recours aux diagrammes de boucles causales (CLD) et plus précisément à la dynamique des systèmes permet de visualiser les drivers et les interactions entre variables présents dans les différents scénarios. Cependant, il s'agit d'une représentation ex-post, et non du modèle structurel utilisé dans les travaux de l'ADEME, de RTE, de Négawatt ou du Shift Project. Le deuxième écueil concerne la notion même de scénarios. Il est curieux que ces quatre institutions ne se soient pas appuyées sur la littérature des *Narratives for Shared Socioeconomics Pathways* (O'Neill & al., 2017) et des expériences des conventions citoyennes afin de proposer des visions partagées des transitions énergétiques. D'un côté, les narratives permettent de comprendre la nécessité d'agir (sorte de carte mentale pour analyser les causes et les conséquences d'un problème, mais également anticiper les conséquences des réponses que l'on va apporter au problème) tout en formalisant clairement la voie à suivre. Le rôle des citoyens mais également celui des entreprises (notamment les compagnies pétrolières et énergétiques) est ici crucial (ces dernières inscrivent leurs stratégies dans une logique de Scenario Planning). De l'autre, les scénarios doivent intégrer quatre formes de déterminisme : 1° Le cheminement du Green tech et de la possibilité du découplage (techno-centrisme), 2° La pression des contraintes et des limites planétaires qui induisent la fin d'une croissance illimitée, 3° La possibilité d'un Crunch énergétique et d'un basculement vers une sorte d'effondrement (relatif ou absolu), 4° l'héritage (en termes d'infrastructures, d'industries, de services...) que nos sociétés vont devoir apprendre à gérer dans un monde de plus en plus complexe. Le troisième écueil est plutôt une critique de l'analyse en silos proposée par les quatre institutions. Si ces dernières font de l'énergie et de la neutralité carbone, le cheval de bataille des trente prochaines années, rien n'est dit sur l'empreinte matières (l'emblématique passage des 10 à 5 tonnes) et la nécessité d'introduire la circularité dans les scénarios (à l'exception du scénario NegaMat). Si la durabilité était bien le principal driver des modèles dans les années 80 et 90, si la résilience a fait son entrée dans les années 90 - 2000, nous sommes désormais dans l'ère de la circularité et la nécessité de fermer les boucles (importance des cycles de vie). Ce chantier doit désormais occuper une place centrale dans les scénarios 2050. Une manière de rappeler que l'économie circulaire ne se réduit pas au recyclage ou à la valorisation des déchets. Elle se pose désormais comme un nouveau paradigme qui appelle à la conception d'indicateurs économiques, sociaux et environnementaux plus réalistes.

⁴ Nous ajouterons ici que la dimension prospective n'est pas présente, un scénario ne saurait justifier à lui seul, une véritable démarche prospective. Les outils et les méthodes de la prospective devraient être mobilisés.

Bibliographie

ADEME (2021), *transitions 2050-rapport-compresse*.

ADEME (2021), *transitions 2050-rapport-synthèse*.

ADEME (2021), *Futurs Énergétiques-2050-principaux-resultats*, résumé exécutif, octobre.

BESSALEM C., DIEMER A., BATISSE C., BENAMARA M. (2022), Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°19, Mars, p. 1 - 67.

BRAULT P., DOLLET A. (2013), *Introduction aux Mix Énergétique*, CNRS Edition.

DIEMER A., BUSCAGLIA A. (2024), Le dilemme des découvertes de mines de lithium à l'échelle de l'écosystème territorial, le cas de la mine de Beauvoir dans l'Allier, *Revue Francophone du Développement Durable* (en cours de révision).

DIEMER A., LEGRAND A., SANTOS J., MORTADA R., BOUAKKAZ S., GIRIN M. (2023), Matériaux biosourcés et rénovation énergétique, le rôle du chanvre dans les PCAET des intercommunalités, le cas de Riom Limagne et Volcans, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°23, Mars, p. 1 - 21.

DIEMER A. (2022), Immersion dans la dynamique des systèmes, les 16 étapes de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (Systems Dynamics), *Revue Francophone du Développement Durable*, vol 20, p. 11 - 30.

DIEMER A. (2015a), La loi sur la transition énergétique, croissance verte et développement durable, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, p. 23 - 46.

DIEMER A. (2015b), une théorie décroissance de l'énergie, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, p. 192 - 226.

FONTECAVE M., GRAND D. (2021), Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage, *Compte rendus. Chimie*, vol 24, n°2, p. 331 -350

FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT (2021), *France Nature Environnement, Des scénarios énergétiques pour éclairer les choix à venir*, 30 novembre.

KALLIS G. & al. (2018), Research on Degrowth, *Annual Review of Environment and Resources*, vol 43, 291 - 316. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025941>

LANNON C.P (2012), Causal Loop Construction : The Basics, *The Systems Thinkers*, vol 23, n°8, p. 7-8.

LATOUCHE S. (2014), *Survivre au Développement*, Mille et Une Nuits.

MEADOWS D. (1999), *Leverage Points, places to intervene in a System*. The System Institute.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2021), Rapport environnemental de la stratégie nationale bas carbone, 227 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-01-20_MTES_EES-SNBC2_rapport.pdf

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHESION DES TERRITOIRES (2023), Travaux de préparation de la stratégie française énergie - climat, restitution des groupes de travail, 12 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/dossier-presse-travaux-preparation-strategie-francaise-energie-climat-restitution-des-groupes>

NEGAWATT (2022), *scénario-négawatt-2022-rapport-complet-partie 4*

NEGAWATT (2022), *scénario-négawatt-2022-rapport-synthèse*

NEGAWATT (2022), *Présentation powerpoint diaporama*-Conférence de présentation du scénario NegaWatt

OFATE-DFBEW (2022), *Baromètre de la transition électrique allemande - Edition Printemps.*

POUGET CONSULTANTS (2022), *Pouget Consultants, Communiqué-commun-scénarios-bâtiment-FINAL* « Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios, ADEME, NegaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone 4, 25 mars.

O'NEILL B.C & Al. (2017), *The Roads Ahead : Narratives for Shared Socioeconomics Pathways describing world Futures in the 21st Century, Global Environmental Change, Vol 42, January, 169 - 180.* <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>

RAILLARDS N. (2022), *The Shift Project, Elaboration d'une méthodologie de scénarisation des systèmes énergétiques.*

RAWORTH K. (2017), *Meet the doughnut : the new economic model that could help end inequalities*, World Economic Forum, Avril 28th.

RICHARDSON G. (1997), "Problems in Causal Loop Diagrams Revisited," *System Dynamics Review* 13(3), 247-252.

RICHARDSON G., LANNON C. (1997), Problems with Causal-Loop Diagrams, *The Systems Thinker*, vol 7 (10),

ROCKSTRÖM J. & al. (2009), A Safe Operating Space for Humanity, *Nature*, vol 461, 472 - 475. <https://doi.org/10.1038/461472a>

ROJEY A. (2021), *Techniques de l'ingénieur, les contraintes de la transition énergétique, Transition énergétique-Enjeux et perspectives*, 10 septembre.

RTE (2022), https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale, le 18/05/2022

RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050 _ rapport complet*, février.

RTE (2022), *Futurs-Énergétiques-2050-principaux-résultats.*

RTE (2021), *Futurs-Énergétiques-2050-principaux-résultats - Résumé Exécutif*, octobre.

RTE (2021), *2050 Rapport-complet-Détails des compléments apportés à la version de l'étude futurs énergétiques 2050*, 25 octobre.

RTE (2022), *BP 2050 rapport-complet chapitre production-électricité réacteur.*

RTE (2022), *Compte-rendu atelier-Scénario-Bas-Carbone 2022-04-08*, analyse critique des scénarios, 05 mai.

SIGNORET S. (2022), *Technique de l'ingénieur, « La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale »*, Rapport de synthèse, <https://négawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-négawatt-2022.pdf>

SNBC (2020), *Stratégie nationale bas carbone, la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, mars 2020, 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf

SNBC (2020), *Décret n°2020-457 du 21 avril 2020 relatifs aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone*, <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=y6caEB3Z2Xl2VgQFFEhik8z07XbCaxyWqP6yb6mJnWc=>

SNBC (2020), *Stratégie nationale bas carbone, la transition écologique et solitaire vers la neutralité carbone, synthèse*, mars, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>

STEINERT-BERLIN T. (2022), *Long term Price Scénarios in European power and flexibility markets*, OFATE, May.

STERMAN J. (2001), *System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. California Management Review*, 43(4), 8-25. <https://doi.org/10.2307/41166098>

THE SHIFT PROJECT (2020), *Rapport de synthèse-Vision-globale v1-PTEF*, octobre.

THE SHIFT PROJECT (2020), *PTEF-Décarboner-la-chimie*, Rapport Final, janvier.

THE SHIFT PROJECT (2021), *TSP RF-Emploi Synthèse*, Décembre.

THE SHIFT PROJECT (2021), *Habiter dans une société bas carbone*.

THE SHIFT PROJECT (2022), *PTEF-Decarboner-l'industrie_-Ciment_-Rapport-final*, janvier.

THE SHIFT PROJECT (2022), *PTEF-Décarboner-l'industrie-SYNTHÈSE*, janvier.

THE SHIFT PROJECT (2022), *Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios ADEME, NégaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone*.

THE SHIFT PROJECT (2022), *Climat, crises : Le plan de transformation de l'économie française*, Odile Jacob.

Les stratégies et les scénarios des compagnies pétrolières à l'horizon 2050, freins ou catalyseurs des feuilles de route nationales de la transition énergétique ?

Chafia BESSALEM, Arnaud DIEMER, Rania KARBOUT

Université Clermont Auvergne, CERDI, ERASME, Post Growth Institute

French Chapter of System Dynamics Society

Université de Tunis, Tunisie

Résumé : Dans le cadre des accords de Paris, des travaux du GIEC et des recommandations de l'AIE, les Etats se sont engagés dans une stratégie de réduction des émissions de GES. L'objectif déclaré est la neutralité carbone à l'horizon 2050. Pour ce faire, des feuilles de route nationales ont pour fonction de présenter les différentes actions mises en place (investissements dans les énergies renouvelables, baisse des consommations de pétrole et de gaz, développement des techniques de capture et de séquestration du CO₂, essor des biocarburants, développement de l'hydrogène...) et les objectifs intermédiaires (2030, 2040) permettant d'appréhender les résultats accomplis. Si la transition énergétique s'inscrit bien dans une démarche de prospective et renvoie à des scénarios du futur, la question des parties prenantes est rarement abordée dans les feuilles de route. Les Etats se contentent généralement d'aborder les enjeux sectoriels et de projeter des baisses d'émissions de GES. L'article que nous présentons, pose la question de la place de certains acteurs, ici les compagnies pétrolières et gazières, dans les scénarios de neutralité carbone. Par leurs stratégies d'investissement et leur choix de portefeuille, les compagnies pétrolières peuvent être à la fois des catalyseurs ou des freins à la transition énergétique. Elles peuvent accompagner les Etats vers la neutralité carbone ou simplement redéfinir un mix énergétique qui laisse encore une place importante aux énergies fossiles. La transition énergétique ressemblerait alors à un mirage, qui disparaît au fur et à mesure que nous nous rapprochons de 2050.

Mots clés : Compagnies pétrolières, Feuille de route, Gaz, Pétrole, Scénarios, Transition énergétique

Introduction

Depuis plusieurs années, les grandes institutions internationales de l'Énergie (Agence internationale de l'énergie, Agence internationale de l'énergie atomique, Conseil mondial de l'énergie, Forum des pays exportateurs de gaz¹, Organisation des pays arabes exportateurs de pétrole, Organisation latino-américaine de l'énergie...) se livrent au jeu des scénarios à l'horizon 2050 (NESO, 2024; Ansari & al., 2019; Aoun, 2018; Appert, 2018). Cette démarche prospectiviste les conduit à poser un regard lucide sur le chemin à parcourir pour atteindre la neutralité carbone (Accords de Paris, 2015²)

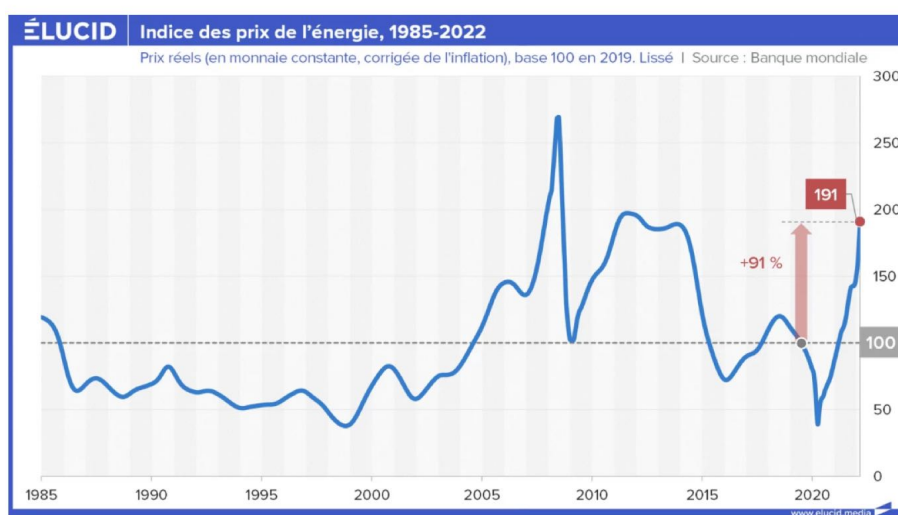
¹ Du 29 février au 2 mars 2024, l'Algérie a accueilli le 7ème Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement au Forum des pays exportateurs de gaz (GECF). Cette rencontre a vu la participation des Chefs d'Etat, de ministres et de hauts responsables des pays membres du GECF (Algérie, Bolivie, Égypte, Guinée équatoriale, Iran, Libye, Nigeria, Qatar, Russie, Trinité-et-Tobago, Émirats arabes unis et Venezuela), ainsi que les pays observateurs du Forum (Angola, Azerbaïdjan, Irak, Malaisie, Mauritanie, Mozambique et Pérou).

² L'Accord de Paris est un traité international juridiquement contraignant sur les changements climatiques. Il a été adopté par 196 Parties lors de la COP 21, le 12 décembre 2015. Il est entré en vigueur le 4 novembre 2016. Son objectif primordial est de maintenir « l'augmentation de la température

mais également à imaginer les fameux sentiers de croissance qu'il convient d'emprunter dans un monde de plus en plus complexe (Bessalem, Diemer, Batisse, 2022; Ancel, 2018; Bellevrat, 2013). Bien entendu, toutes ces institutions n'ont pas les mêmes objectifs et les membres qu'elles représentent³, ne font pas toujours de la transition énergétique leur cheval de bataille (The Economist⁴, 2024). Il faut dire que la période que nous traversons est particulièrement instable. Les Etats et les compagnies pétrolières font face à un contexte énergétique mondial soulevant plusieurs enjeux (CDE, 2018).

Il s'agit tout d'abord de la volatilité du prix des énergies fossiles généré par des tensions géopolitiques, notamment la guerre entre l'Ukraine et la Russie. Entre fin 2019 et février 2022, la Banque mondiale évalue la hausse du prix de l'énergie à près de 91 %.

Figure 1 : Indice des prix de l'énergie



Source : Banque Mondiale (2022)

Il existe un lien étroit entre les sanctions prises par l'Europe, le Royaume-Uni ou les Etats-Unis envers la Russie et le cours du pétrole. Le 10 janvier 2024, le département du Trésor américain a annoncé des sanctions contre plus de 180 navires ainsi que les grandes compagnies pétrolières russes Gazprom Neft et Surgutneftegas, respectant ainsi "l'engagement du G7 de diminuer les revenus russes issus de l'énergie". Londres a aussi sanctionné ces deux entreprises. Deux jours plus tard, le prix du baril de Brent de la mer du Nord, pour livraison en mars, prenait 1,55% à 81,00 dollars (AFP, 13 janvier 2024).

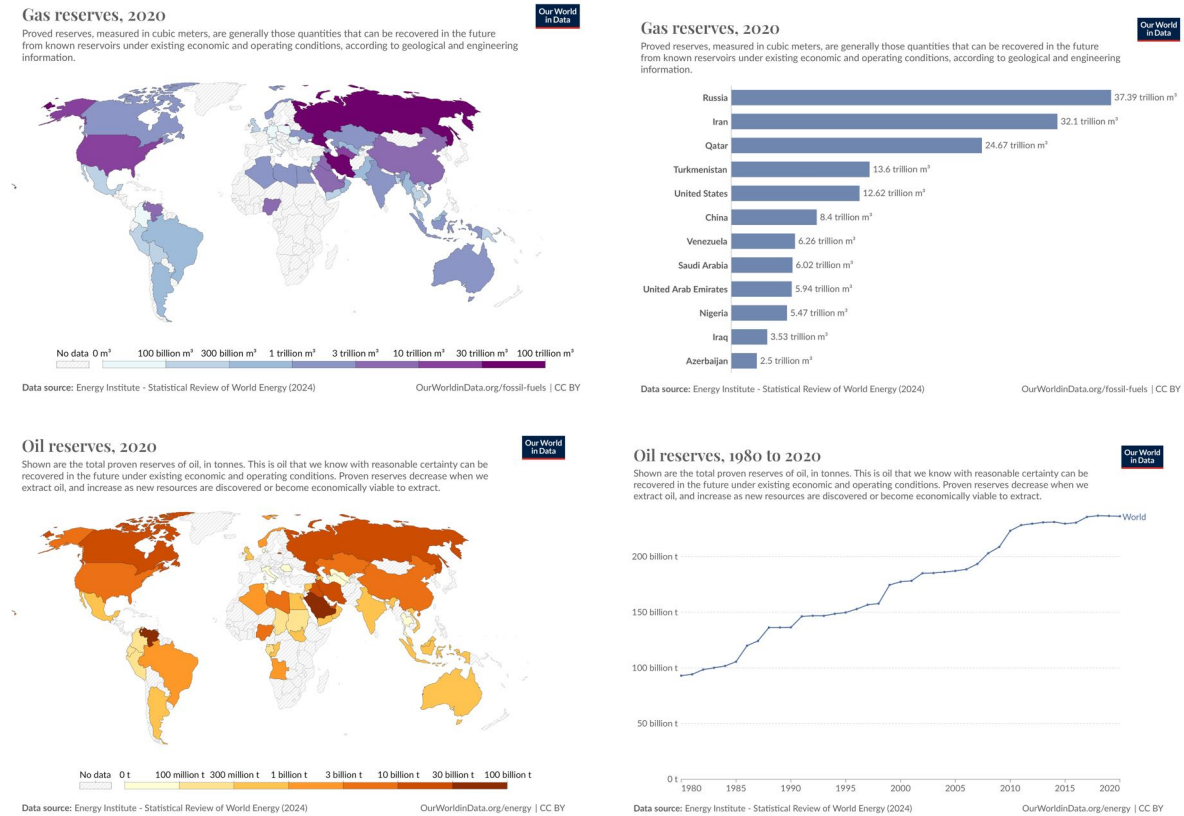
moyenne mondiale bien en dessous de 2°C au-dessus des niveaux préindustriels » et de poursuivre les efforts « pour limiter l'augmentation de la température à 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels ». Pour mieux encadrer les efforts en vue de l'objectif à long terme, l'accord de Paris a invité les pays à formuler et à soumettre d'ici 2020 des stratégies de développement à long terme à faibles émissions de gaz à effet de serre (LT-LEDS).

³ Le Global Gaz Outlook 2050 du GECF fournit une analyse complète des marchés gaziers mondiaux et régionaux, ainsi que du rôle du gaz naturel dans la transition énergétique.

⁴ Dans son éditorial du 10 novembre, The Economist commentait l'actualité de la COP19 sous le titre suivant : "Energy Transition has been profoundly misunderstood".

C'est ensuite l'épuisement des réserves de pétrole et de gaz dans certains pays et le ralentissement des découvertes de nouveaux gisements mondiaux qui accentuent la pression sur le système énergétique global. Selon le rapport *Statistical Review of World Energy (2024)*, les réserves mondiales de gaz naturel seraient en baisse et estimées à environ 188 000 milliards de m³ en 2022.

Figure 2 : Réserves mondiales de gaz et de pétrole



Source : Energy Institute, Statistical Review of World Energy (2024)

C'est enfin le réchauffement climatique dû aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) qui doit amener les parties intéressées à respecter les engagements pris dans l'Accord de Paris & la Charte de décarbonation du pétrole et du gaz (*Oil and Gas Decarbonisation Charter* ou OGDC de la COP 28 de Dubaï tenu en décembre 2023). Le secteur pétrolier est responsable de 15 à 20 % des émissions mondiales totales de gaz à effet de serre⁵ (incluant dioxyde de carbone et méthane). Ces émissions proviennent principalement des opérations d'extraction, de transport et de combustion des produits fossiles. Les émissions de GES provenant de l'extraction du pétrole et du gaz, et du raffinage du pétrole avoisinent les 83 millions de tonnes (soit respectivement 63 millions pour l'extraction et 20 millions pour le raffinage) en 2023. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2024), le secteur de l'énergie serait même le deuxième⁶ responsable des émissions mondiales de CH₄, soit 118 millions de tonnes émises en

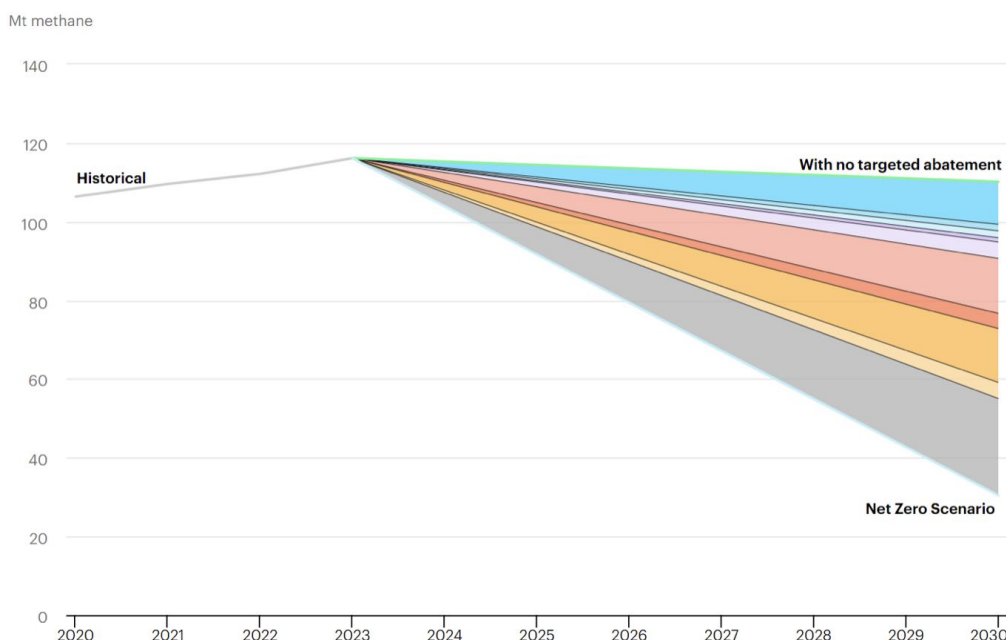
⁵ Dans un rapport publié le 08 septembre 2023, l'ONU évoque l'élimination progressive de tous les combustibles fossiles comme étape indispensable.

⁶ Le premier secteur est toujours l'agriculture avec 142 Mt de CH₄ émis en 2023.

2023 provenant de l'usage du pétrole (49 Mt), du charbon (40 Mt) et du gaz naturel (29 Mt). Par rapport à 2022, ces émissions sont en hausse pour le pétrole et le charbon, mais en baisse pour le gaz naturel (elles étaient respectivement de 48 Mt, 39 Mt et 28 Mt [CIEPA 2024]).

Selon l'AIE (2024), si toutes les politiques et tous les engagements en matière de CH₄ pris par les pays et les entreprises étaient respectés conformément aux échéances fixées, les émissions de CH₄ provenant des combustibles fossiles diminueraient d'environ 50% d'ici à 2030. Néanmoins, il semblerait que ces engagements n'aient pas encore donné naissance à des plans et des réglementations. Les projections réalisées pour 2030 risquent ainsi de générer de fortes désillusions.

Figure 3 : Réductions des émissions de CH₄ liées à la production/consommation de combustibles fossiles : projections sur la base des engagements et politiques existants (2020-2030)



Source : AIE, 13 mars 2024

En s'invitant au banquet annuel des grands énergéticiens et des organisations nationales, le réchauffement climatique soulève la question des scénarios (Alvares, 2021) qui permettront aux Etats d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris (2015). En France, l'ADEME (2021, 2013, 2009), RTE (2021), l'Association Négawatt (2021) et The Shift Project (2022) ont décrit des scénarios intégrant à la fois le mix énergétique, l'essor des énergies renouvelables, les programmes de sobriété et d'efficacité énergétique (Aymoz 2018; Chateau, 2016; Boulanger, 2007), la rénovation thermique des bâtiments (Charlier, 2014), la construction de nouvelles centrales nucléaires, la place de la voiture électrique et les besoins de matière de production électrique... (Diemer, Bessalem, Musafili, 2024). Si ces leviers d'action ou points de basculement (tout dépend s'ils entraînent de véritables changements de comportements) ont le mérite de nous

permettre de mieux visualiser le système énergétique (Diemer, 2015) et ses nombreuses interactions avec le logement, l'agriculture, l'industrie, l'alimentation, la mobilité... ils ont également l'inconvénient de minimiser le rôle des acteurs privés dans la mise en place de la transition énergétique, en l'occurrence ici, les compagnies pétrolières et gazières qui pour la plupart, ont les cartes en main pour redessiner (ou pas) le nouveau paysage énergétique à l'horizon 2050.

En effet, comment parler de transitions énergétiques sans mettre au cœur de la réflexion, les scénarios et les business models des compagnies pétrolières et le pouvoir qu'elles exercent sur l'usage et le choix des énergies. Elles savent aussi forger des modèles et des scénarios. Aurait-on oublié le fameux *Scénario Planning* de Shell dans les années 70 (et les travaux de Pierre Wack), qui lui a permis d'enregistrer des milliards de dollars en pleine crise pétrolière. Et que dire de la relation entre les banques et les compagnies pétrolières qui constitue la pierre angulaire des flux financiers entre les pays du Nord et du Sud (les fameux pétrodollars sont aujourd'hui de vastes capitaux et des participations croisées entre les grandes banques d'affaires et les nombreuses compagnies pétrolières) ou encore des énormes subventions et aides publiques reçues par les compagnies pétrolières depuis de nombreuses années. Dans le rapport de l'IAE (2024), une seule ligne parle des compagnies pétrolières, et elle en dit long sur le chemin qu'il nous reste à parcourir : "*Public finance is more prominent in some parts of the energy system than others. Almost a quarter of financing for fossil fuel projects comes from public sources, primarily due to the large size of government shareholdings in national oil companies*" (2024, p. 63). A la lumière de ces éléments, il nous paraît crucial de regarder et de décrypter les scénarios et les business modèles des compagnies pétrolières et gazières à l'horizon 2050 afin de savoir si ces firmes multinationales sont un frein ou un levier d'action de la transition énergétique. Les fameuses feuilles de route (roadmap) destinées à soutenir la planification stratégique à long terme (Müller, 2021, Phaal, Farrukh, Probert, 2004), pourraient ainsi se révéler irréalistes au regard des stratégies des multinationales du secteur énergétique⁷.

Pour répondre à cette question, nous analyserons les feuilles de route de la transition énergétique de cinq pays (Etats-Unis, France, Royaume-Uni, Algérie). Ce choix a été orienté par la nationalité des cinq plus grandes compagnies pétrolières (BP, Exxon, Chevron, Shell, Total Energies), liste à laquelle nous ajouterons Sonatrach qui occupe une position stratégique en Afrique (première compagnie du continent Africain). Nous étudierons les stratégies de ces compagnies au regard des engagements et des actions pris par les différents Etats concernés (Royaume-Uni, Etats-Unis, France et Algérie) pour atteindre la neutralité carbone. Les compagnies pétrolières et gazières entretenant des relations privilégiées avec les Etats et le système financier international

⁷ Dans sa feuille de route du secteur de l'énergie, l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2023) préconisait de doubler les investissements dans les renouvelables pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (selon les projections de l'AIE, le rythme actuel d'investissement de 2000 milliards par an, devrait passer à 5000 milliards d'ici 2030).

(principalement les grandes banques d'affaire), le choix de leurs investissements, les flux financiers croisés (subventions, aides, participations) et la valorisation de leurs ressources (prix du pétrole, retour sur investissement, EROI...) jouent un rôle clé dans leur positionnement à l'horizon 2050.

Des scénarios aux feuilles de route nationales

Si les scénarios s'appuient sur une vaste littérature (Bessalem, Diemer, Batisse, 2022) et des apports méthodologiques (O'Neil & al., 2017, 2014; Kleger & al., 2013; Curry Hodgson, 2008; Godet, 1994, 1990; Wack, 1985), ils sont également au cœur des stratégies nationales. Il s'agit à la fois de décrire les trajectoires de transformation du système énergétique vers la neutralité carbone, d'étudier les différentes configurations permettant d'atteindre les objectifs de décarbonation et de réindustrialisation, et d'éclairer le débat sur les enjeux associés aux scénarios de politique énergétique ou climatique. Les organisations nationales se livrent ainsi à des études détaillées de plusieurs scénarios, décrivant les évolutions souhaitables du système énergétique compatibles avec les objectifs fixés (ADEME, 2021). Ces scénarios sont généralement articulés autour de trois grandes familles⁸ : (1) des trajectoires prospectives qui mobilisent différents leviers associés à une stratégie ou une politique de l'énergie, (2) une analyse des risques et de l'incertitude autour de l'exercice de scénarisation, (3) l'intégration de crises observées sur le plans géopolitique et économique, ainsi que les tensions sur les relations commerciales et les chaînes d'approvisionnement. Des feuilles de route sont réalisées afin de souligner les engagements des Etats Nations, les moyens mis à disposition, les objectifs à atteindre et la nécessité d'impliquer les parties prenantes. Dans ce qui suit, nous présenterons les feuilles de route de 4 pays, engagés à leur manière dans la transition énergétique : les Etats-Unis, le Royaume-Uni, La France et l'Algérie. Ce choix a été motivé par deux raisons : (1) le positionnement de ces différentes nations en matière de neutralité carbone et de choix énergétiques, (2) la présence de compagnies pétrolières et gazières de premier plan (Exxon Mobil, BP, Total, Shell, Chevron et Sonatrach) susceptibles d'interférer dans les stratégies de ces pays et de ralentir la transition énergétique.

La feuille de route des Etats-Unis

La transition énergétique américaine s'est concentrée principalement sur la réduction des émissions de carbone, la diversification des sources d'énergie, la promotion des technologies propres et la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles.

Le document de référence officiel - considéré comme la feuille de route nationale de la transition énergétique aux Etats-Unis - est *The America's Strategy to Secure the Supply Chain for a Robust Clean Energy Transition* publié par le Département de l'Energie (DOE) en février 2022. Ce rapport s'apparente à un plan gouvernemental visant à sécuriser la chaîne d'approvisionnement pour accompagner la transition énergétique américaine.

⁸ <https://assets.rte-france.com/prod/public/2023-11/Bilan-previsionnel-2023-chapitre4-scenarios.pdf>

Restructurer une base industrielle dans le secteur de l'énergie propre. Il s'appuie sur le décret présidentiel Executive Order 14017 – America's Supply Chains. Le Rapport présente *“the myriad challenges and opportunities facing the energy supply chain along with key strategies to secure America's position as a clean energy superpower in the years and decades to come. The challenges are immense for the United States related to : raw material availability; manufacturing capacity; dependence on foreign supplies; worker training; global trade practices; cybersecurity; and research and data analysis needed to create the clean energy economy we need”* (2022, p. IX). Sept axes stratégiques d'actions⁹ sont présentés pour renforcer la chaîne d'approvisionnement énergétique, à savoir (1) augmenter la disponibilité des matières premières nationales (les cibles sont principalement les métaux rares tels que le Cobalt, le Lithium, le Néodyme.); (2) étendre les capacités de production domestique (soutien aux clusters nationaux, financement des innovations); (3) investir dans les chaînes de production et de distribution étrangères (il s'agit de compléter l'offre national via des partenariats ciblés); (4) stimuler l'adoption des énergies propres (utilisation notamment des achats publics fédéraux comme leviers); (5) améliorer la gestion des déchets en fin de vie (il s'agit de renforcer les pratiques d'économie circulaire au niveau des batteries de lithium, des métaux rares, de l'acier, de l'aluminium...); (6) attirer et former une main d'œuvre qualifiée; (7) renforcer les connaissances et la prise de décisions stratégiques (création du Manufacturing and Energy Supply Chain Office destiné à centraliser les bases de données, à réaliser des études d'impacts économiques, sociaux et environnementaux). La force de ce rapport, c'est surtout de proposer 13 études détaillées couvrant plusieurs secteurs, allant du solaire aux réseaux électriques, en incluant les semi-conducteurs et la cybersécurité (solaire PV, terres rares, semi-conducteurs, réseaux électriques, stockage d'énergie, hydrogène, hydroélectricité, matériaux catalyseurs, cybersécurité). Chaque étude identifie les vulnérabilités du secteur (défaillance manufacturière, dépendance à l'exportation, coûts logistiques, etc...) et oriente vers des solutions possibles. Ce sont ainsi près de 62 recommandations¹⁰ ainsi qu'un agenda détaillé de 22 actions législatives qui ont vu le jour. On peut citer ici l'allocation de 6 milliards de dollars pour le traitement des matériaux de batteries, le plan de 140 millions de dollars pour une installation de raffinage des terres rares ou encore l'adoption de mesures protectionnistes, d'incitations fiscales et de programmes pour encourager les clusters et le recyclage.

⁹ *“This report lays out the myriad challenges and opportunities facing the energy supply chain along with key strategies to secure America's position as a clean energy superpower in the years and decades to come. The challenges are immense for the United States related to: raw material availability; manufacturing capacity; dependence on foreign supplies; worker training; global trade practices; cybersecurity; and research and data analysis needed to create the clean energy economy we need”* (2022, p. IX).

¹⁰ <https://www.tdworld.com/renewables/article/21234838/doe-releases-first-ever-comprehensive-strategy-to-secure-americas-clean-energy-supply-chain>

Cinq autres documents viennent compléter cette feuille de route :

- *L'U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap*¹¹ publié par le *Department of Energy* (DOE, 2023), ce rapport stratégique présente la vision américaine pour développer une économie basée sur l'hydrogène propre, avec des objectifs concrets : 10 millions de tonnes d'hydrogène par an d'ici 2030, puis 20 millions en 2040 et 50 millions en 2050. Le document présente également des mesures concrètes (politiques publiques, incitations fiscales, dépenses en Recherche et Développement...) à toutes les échelles gouvernementales : *"This roadmap is based on prioritizing three key strategies to ensure that clean hydrogen is developed and adopted as an effective decarbonization tool for maximum benefit to the United States: (1) Target strategic, high-impact uses for clean hydrogen; (2) Reduce the cost of clean hydrogen; (3) Focus on regional networks"* (2023, p. 2).
- *The Industrial Decarbonization Roadmap*¹² – élaborée par The Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Cette feuille de route, publiée en 2022, détaille les stratégies (efficacité énergétique, électrification, carburants bas carbone, capture et stockage du CO₂) destinées à décarboniser le secteur industriel (acier, ciment, chimie, raffinage...) : *"This roadmap identifies four key pathways to reduce industrial emissions through innovation in American manufacturing. The roadmap emphasizes the urgency of deep decarbonization across the industrial sector, and presents a staged research, development, and demonstration (RD&D) agenda for industry and government that will deliver the technologies needed to dramatically reduce emissions"* (2022, p. 1).
- *The Distributed Energy Resource Interconnection Roadmap (2025)*¹³ – élaboré par le département de l'énergie, établit des recommandations pour améliorer la connexion des projets d'énergie propre (solaire, éolien...) au réseau électrique national, facilitant ainsi la transition énergétique : *"Distributed energy resources (DERs) are poised to provide numerous benefits to customers and the grid, including lower cost, improved resilience and reliability, more rapid decarbonization, and increased consumer choice. To realize these benefits, however, processes for interconnecting DERs with the U.S. electric grid must evolve significantly. DERs include a diverse and evolving set of technologies. The scope of this roadmap encompasses DERs such as distributed solar photovoltaics (PV), distributed wind, distributed energy storage, and hybrid systems, which require interconnection and primarily provide electricity to local consumers"* (2025, p. 9).
- *The DOE Strategic Frameworks (2022 - 2026)*¹⁴ est un document stratégique interne du Département de l'Énergie qui formalise les 7 objectifs de transition énergétique vers zéro émission nette d'ici 2050, avec des étapes intermédiaires : *"DOE strategic framework: these are the strategic goals that informed departmental activities over the last 4 years"* (2022, p. 1).

¹¹ <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>

¹² <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-09/Industrial%20Decarbonization%20Roadmap%20Fact%20Sheet.pdf>

¹³ <https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/i2X%20DER%20Interconnection%20Roadmap.pdf>

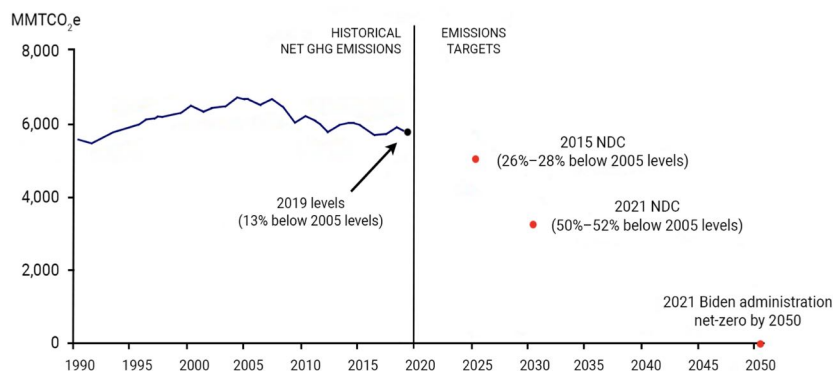
¹⁴ <https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/doe-fy-2022-2026-strategic-framework.pdf>

- *Pathways to Net Zero for the US Energy Transition* (2022) est une feuille de route générique¹⁵ vers la neutralité carbone pour 2050, soulignant le rôle des lois fédérales (BIL, 2021; IRA, 2022).

Tous les objectifs figurant dans ces documents officiels ont été définis par des engagements législatifs et exécutifs, la feuille de route des Etats-Unis évolue constamment en fonction des changements politiques et économiques. Toutefois, les cibles restent identiques :

→ *Réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES)*. Si l'administration Biden s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 avec une réduction des émissions de GES par rapport aux niveaux de 2005, l'administration Trump s'est lancée depuis quelques mois dans le démantèlement des politiques climatiques (le 12 septembre 2025, le gouvernement Trump a annoncé vouloir exempter 8000 industriels de l'obligation de déclarer leurs émissions annuelles de GES).

Figure 4 : Emissions de GES des États-Unis



Source : EPA (2022)

→ *Développement des énergies renouvelables*. La priorité est donnée à l'accélération de la production d'électricité à partir des énergies solaire et éolienne. Cela inclut la mise en place d'un plan pour atteindre 100% d'électricité propre d'ici 2035. Le gouvernement soutient également le développement de l'hydrogène vert comme solution de stockage et de décarbonation des secteurs industriels et des transports. Des objectifs concrets sont avancés : 10 millions de tonnes de Clean Hydrogen d'ici 2030, 20 millions en 2040 et 50 millions en 2050.

→ *Décarbonation des secteurs économiques clés*. Le secteur des transports, responsable d'une grande partie des émissions américaines, doit se tourner vers l'électrification. L'administration américaine a annoncé des mesures pour encourager la transition vers les véhicules électriques (VE) avec l'objectif d'atteindre 50% de véhicules électriques parmi les ventes de voitures neuves d'ici 2030. La décarbonation des bâtiments et de l'industrie lourde est également un objectif clé, avec des investissements pour

¹⁵<https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2022/11/pathways-net-zero-US-energy-transition.pdf>

améliorer l'efficacité énergétique, réduire la consommation d'énergie et introduire des technologies plus propres.

→ *Electrification du réseau énergétique et stockage*. La modernisation du réseau électrique avec des Smart Grids pour intégrer une production d'énergie plus décentralisée et variable, est essentielle pour la transition énergétique. Cela inclut également des investissements dans les technologies de stockage telles que les batteries.

→ *Infrastructures et investissements* : Le gouvernement américain a alloué une partie substantielle des fonds du plan de relance (American Rescue Plan) et du Plan d'Infrastructure Bipartite à la transition énergétique, visant des investissements dans les infrastructures vertes, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables.

Tableau 1 : Synthèse des documents et des objectifs de la transition énergétique américaine

Document	Type	Objectif
<i>U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (DOE, 2023)</i>	Stratégie nationale de l'hydrogène	Mise en place d'une filière de l'hydrogène avec des objectifs précis pour 2030, 2040 et 2050
<i>The Industrial Decarbonization Roadmap (2022)</i>	Analyse des stratégies en détail (électrification, efficacité énergétique, carburants bas carbone, capture et stockage du CO ₂)	Décarbonisation du secteur industriel
<i>The Distributed Energy Resource Interconnection Roadmap (2025)</i>	Document de recommandations	Connexion des projets d'énergie propre au réseau électrique national
<i>Pathways to Net Zero for the US Energy Transition (2022)</i>	Approche sectorielle	Analyse des différentes pistes pour atteindre la neutralité carbone
<i>The DOE Strategic Frameworks (2022 - 2026)</i>	Présentation des objectifs internes du département de l'énergie	Analyse détaillée de 7 objectifs du DOE

Précisons ici que les documents officiels américains parlent des acteurs économiques qu'il convient de mobiliser pour atteindre les objectifs de la transition énergétique, sans pour autant nommer les compagnies pétrolières. L'approche est avant tout sectorielle en insistant sur la réglementation, les appels d'offres et les obligations.

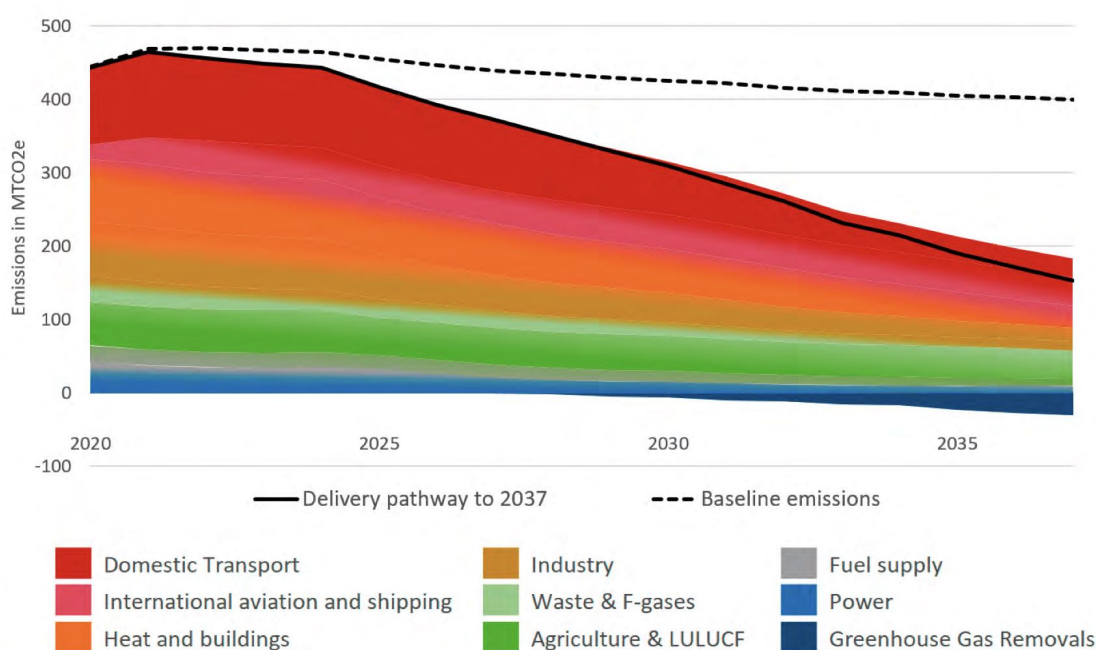
La feuille de route du Royaume-Uni

La feuille de route du Royaume-Uni (RU) est associée à deux documents officiels :

- La stratégie de décarbonation du Royaume-Uni à l'horizon 2050 (Net Zero Strategy, Build Back Greener, 2021¹⁶, mise en jour en 2022) : " *This document sets out clear policies and proposals for keeping us on track for our carbon budgets, our ambitious Nationally Determined Contribution (NDC), and then sets out our vision for a decarbonised economy in 2050*" (2021, p. 17).

¹⁶<https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6194dfa4d3bf7f0555071b1b/net-zero-strategy-beis.pdf>

Figure 5 : Voie indicative de réalisation des objectifs par secteur d'ici 2037



Source : BEIS Analysis (2021)

- La stratégie sur la sécurité d'approvisionnement et le déploiement des capacités nationales (*British Energy Security Strategy*, avril 2022) introduit un plan d'urgence en 10 points ainsi que des investissements importants dans des secteurs stratégiques.

Tableau 2 : Le plan en 10 points de la stratégie énergétique britannique

10 point plan	Delivery highlights so far	Jet zero and green ships	Greener buildings	Investing in CCUS	Protecting our natural environment	Green finance and innovation
Advancing offshore wind	<ul style="list-style-type: none"> Over £1.6 billion invested, securing 3,600 jobs 11GW already generated, and another 12GW in the pipeline Up to £320 million in government support for fixed bottom and floating wind ports and infrastructure Additional government support for other low-cost renewables technologies 	<ul style="list-style-type: none"> Consulted on introduction of a UK Sustainable Aviation Fuel (SAF) mandate, requiring jet fuel suppliers to blend an increasing proportion of SAF into aviation fuel from 2025 Allocated £23 million as part of the Clean Maritime Demonstration Competition 	<ul style="list-style-type: none"> Cut VAT for insulation and heat pumps 46% of homes in England at EPC C or above, up from 9% in 2008, and 2,300 social housing homes in the process of being improved Over 60,000 heat pumps installations estimated by industry, now offering households grants of £5,000 towards an air source heat pump so they are cost competitive compared to a gas boiler 	<ul style="list-style-type: none"> Committed £1 billion in public investment to decarbonise our industrial clusters Announced the first 2 clusters in Teeside, the Humber and Merseyside Launched phase 2 of the Industrial Energy Transformation Fund, allocating £60 million to decarbonisation technologies, with a further £100 million delivered in May and October this year 	<ul style="list-style-type: none"> Additional £124 million provided at Spending Review 2021 to the Nature for Climate Fund to support tree planting and peat restoration, going beyond 2019 manifesto commitment of £640 million 13,290 hectares of trees planted across the UK in 2020 to 2021 Launched 3 new Community Forests in Cumbria, Devon and the North-East £5.2 billion invested in a 6 year programme of flood defences 	<ul style="list-style-type: none"> £615 million allocated from the Net Zero Innovation Portfolio Set the JET world record, with 59 megajoules of heat energy in a single fusion 'shot' that lasted 5 seconds
Driving the growth of low carbon hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> £7.5 million awarded to ITMs Gigastack Project, an early mover in the market, with potential to support up to 2,000 jobs over time Preparing to allocate up to £100 million of revenue support to initial electrolytic projects Launching £240 million to Net Zero Hydrogen Fund later in April Developed indicative Heads of Terms for hydrogen business model contract 					
Delivering new and advanced nuclear power	<ul style="list-style-type: none"> Committed to provide up to £1.7 billion of direct government funding to enable one nuclear project to FID this Parliament Investing £100 million into Sizewell C to help develop this project Investing £210 million to develop Small Modular Reactors with Rolls Royce Announced a £120 million Future Nuclear Enabling Fund to progress new nuclear 					
Accelerating the shift to zero emission vehicles	<ul style="list-style-type: none"> £4 billion of investment has flowed into the UK zero emission vehicle sector Building 2 new gigafactories, in Sunderland and Blyth 30,425 public charge-points in the UK with 100 new rapid chargers added to the UK network every month during 2021 					
Green public transport, cycling and walking	<ul style="list-style-type: none"> 1,678 zero emission buses funded Launched Active Travel England, increasing cycling by 75% 					

Source : British Energy Strategy (2022, p. 3)

Ces deux documents présentent des politiques sectorielles (électricité, industrie, transports), des mesures pour accélérer les investissements dans les énergies renouvelables et plus explicitement, une orientation sur la gestion et la transformation du secteur pétrolier/gazier (North Sea): définition du rôle du régulateur (Oil & Gas

Authority), révision des licences d'exploitation, soutien à la conversion des chaînes d'approvisionnement (offshore et éolien flottant, hydrogène).

Le Royaume-Uni a pris des engagements ambitieux en matière de transition énergétique et a mis en place des politiques et des stratégies visant à réduire son empreinte carbone, à augmenter la part des énergies renouvelables et à décarboner son économie. Le pays a été un leader mondial en matière de décarbonisation, ayant initié des réformes dès le début des années 2000. On retrouve :

→ *Les objectifs de réduction des émissions et l'objectif de neutralité carbone.* Le Royaume-Uni s'est engagé à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, conformément à la Climate Change Act (Loi sur le Changement Climatique), adoptée en 2008. Ce cadre légal historique a été renforcé par l'objectif de réduction des émissions de 100 % d'ici 2050, visant à aligner le pays sur les objectifs mondiaux de l'Accord de Paris. Le RU a fixé un objectif ambitieux de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 68 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990. Cet objectif a été confirmé par le gouvernement britannique dans sa *Stratégie de décarbonation 2035* et est essentiel pour atteindre la neutralité carbone.

→ *Transition énergétique et développement des énergies renouvelables.* La transition énergétique du RU repose sur une forte augmentation de la production d'énergies renouvelables et la décarbonation des secteurs clés de l'économie. Le Royaume-Uni est devenu l'un des leaders mondiaux de la production d'énergie éolienne et solaire, notamment avec son éolien offshore, dont le pays est le plus grand producteur au monde. En 2020, environ 40 % de l'électricité produite au Royaume-Uni provenait de sources renouvelables (principalement l'éolien et le solaire). Le gouvernement britannique vise à atteindre 70 % d'électricité renouvelable d'ici 2030, avec un accent particulier sur l'éolien offshore, pour lequel il prévoit de développer 40 GW d'ici 2030. Le Royaume-Uni a également mis en place une stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène. Le pays prévoit de déployer 5 GW de capacité de production d'hydrogène décarboné d'ici 2030, dans le cadre de la transition vers des systèmes énergétiques plus propres et la décarbonation de l'industrie et des transports. Enfin, le RU a mis en place un Plan de rénovation des bâtiments, avec des objectifs pour améliorer l'efficacité énergétique dans les logements et les bâtiments publics, avec l'objectif de rendre tous les bâtiments publics neutres en carbone d'ici 2050.

→ *La décarbonation du secteur des transports :* Le Royaume-Uni est en passe d'interdire la vente de voitures à moteur thermique (essence et diesel) d'ici 2030, afin de favoriser les véhicules électriques (VE). Cette interdiction s'accompagne de la construction d'une infrastructure de recharge étendue. Le gouvernement anglais met également l'accent sur le développement du transport public décarboné et la promotion de modes de transport alternatifs, comme les vélos et les transports en commun, pour réduire la dépendance à la voiture individuelle.

→ *Le captage et le stockage du carbone (CCS)* est un élément clé de la stratégie britannique pour décarboner les secteurs difficiles tels que l'industrie lourde et l'énergie. Le gouvernement a investi dans des projets pilotes de CCS et prévoit de mettre en place un marché du carbone pour stimuler ces technologies.

→ *Stratégies de financement et de soutien* : Le Royaume-Uni a mis en place des mécanismes financiers verts pour financer la transition énergétique, tels que les Green Bonds et des subventions pour les énergies renouvelables. La City of London est également devenue un centre clé pour les investissements dans la transition énergétique. Le gouvernement britannique a inclus des mesures de transition énergétique dans son plan de relance économique après la pandémie de COVID-19, en mettant l'accent sur la rénovation des bâtiments et le soutien aux industries écologiques.

Notons ici que contrairement à la feuille de route américaine, la stratégie britannique s'adresse explicitement au secteur du pétrole et du gaz (mécanismes de régulation, obligations climatiques, mesures pour réduire les émissions amont, transition des compétences de la filière North Sea vers les énergies propres). Les documents appellent à travailler *avec* les opérateurs du pétrole/gaz pour réduire les émissions de GES, appliquer des tests de compatibilité climat pour de nouveaux projets et réorienter capacités et emplois vers les filières propres.

La Feuille de route de la France pour la transition énergétique

La transition énergétique en France repose sur des politiques ambitieuses visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), développer les énergies renouvelables et moderniser les infrastructures énergétiques. Elle fait partie de la stratégie nationale pour répondre aux défis du changement climatique et de la durabilité. Deux documents officiels précisent la feuille de route française :

- *Le Plan National Intégré Énergie-Climat*¹⁷ (PNIEC, 2020), mis à jour en 2024. Ce plan national repose sur trois documents nationaux de programmation et de gouvernance de l'énergie (PNIEC, 2024, p. 6):

- *La programmation pluriannuelle de l'énergie*¹⁸ (PPE), qui fixe les priorités d'actions des pouvoirs publics dans le domaine de l'énergie pour les 10 années à venir, partagées en deux périodes de 5 ans. Elle traite de l'ensemble des énergies et de l'ensemble des piliers de la politique énergétique : maîtrise de la demande en énergie, promotion des énergies renouvelables, garantie de sécurité d'approvisionnement, maîtrise des coûts de l'énergie, développement équilibré des réseaux, etc. Elle permet de construire une

¹⁷https://commission.europa.eu/document/download/ab4e488b-2ae9-477f-b509-bbc194154a30_fr?filename=FRANCE%20%E2%80%93%20FINAL%20UPDATED%20NECP%202021-2030%20%28French%29.pdf

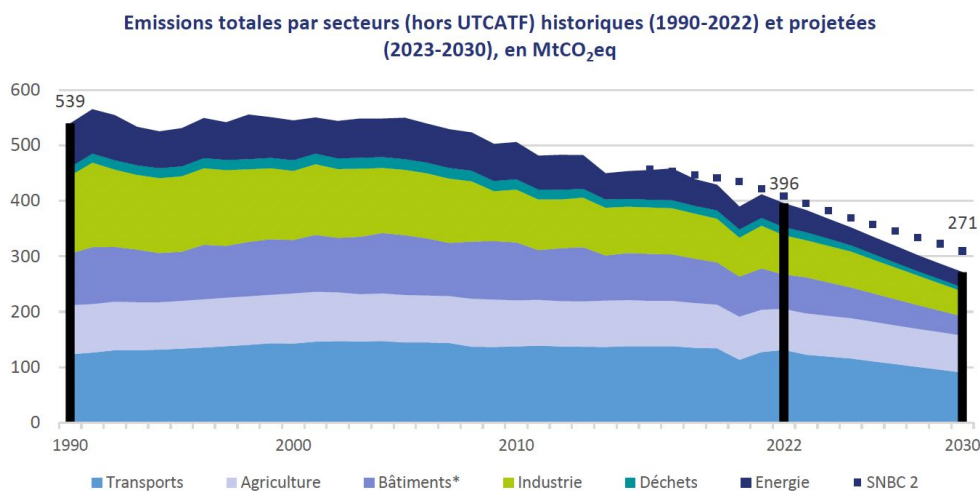
¹⁸ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe>

stratégie cohérente et crédible pour décarboner le bouquet énergétique français et pour renforcer la souveraineté énergétique du pays grâce à la sortie des énergies fossiles ;

- *La stratégie nationale bas-carbone*¹⁹ (SNBC), qui est la feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique. Elle donne des orientations pour mettre en œuvre la transition vers une économie bas-carbone dans tous les secteurs d'activités. Elle définit des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la France à court/moyen terme – les budgets carbone – et vise l'atteinte de la neutralité carbone, c'est-à-dire zéro émission nette, à l'horizon 2050 ;

- *Le plan national d'adaptation au changement climatique*²⁰ (PNACC), vise à protéger les citoyens et préparer les territoires, l'économie et l'environnement aux conséquences du changement climatique. Il se fonde pour la première fois sur une trajectoire de réchauffement de référence de 2 °C en 2030, 2,7 °C en 2050 et 4 °C en 2100 en France hexagonale par rapport à l'ère pré-industrielle. Cette trajectoire, qui correspond au scénario tendanciel d'après le GIEC, est destinée à servir de référence à toutes les politiques et aux actions d'adaptation au changement climatique menées en France.

Figure 6 : Evolutions des émissions territoriales françaises de gaz à effet de serre



Source : PNIEC (2024, p. 17)

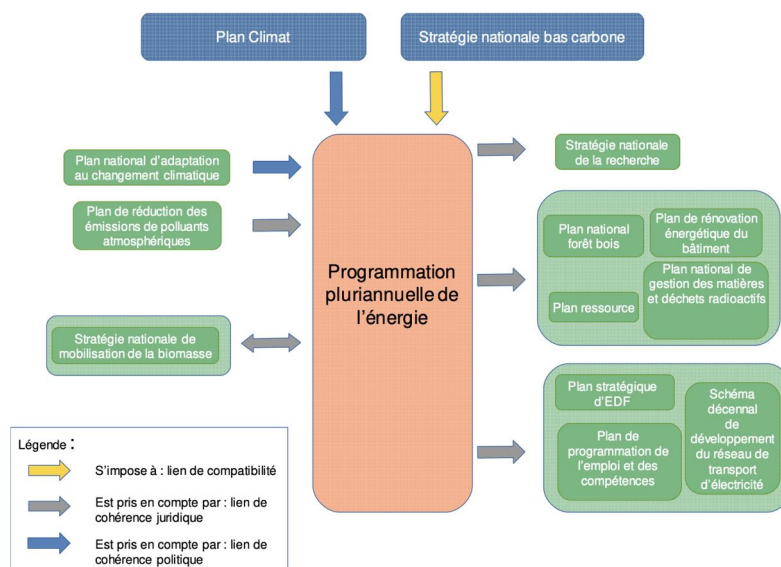
- *La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie*²¹ (PPE) est un document ministériel établissant "les priorités d'action du gouvernement en matière d'énergie pour la métropole continentale, dans les 10 années à venir, partagées en deux périodes de 5 ans" (PPE, 2024, p. 10). La programmation pluriannuelle de l'énergie couvre deux périodes successives de cinq ans (2019-2023 et 2024-2028) et s'articule avec tous les autres documents de la transition énergétique française.

¹⁹ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

²⁰ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/PNACC3.pdf>

²¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>

Figure 7 : Articulation de la PPE avec les autres documents de planification énergétique



Source : PPE (2024, p. 11)

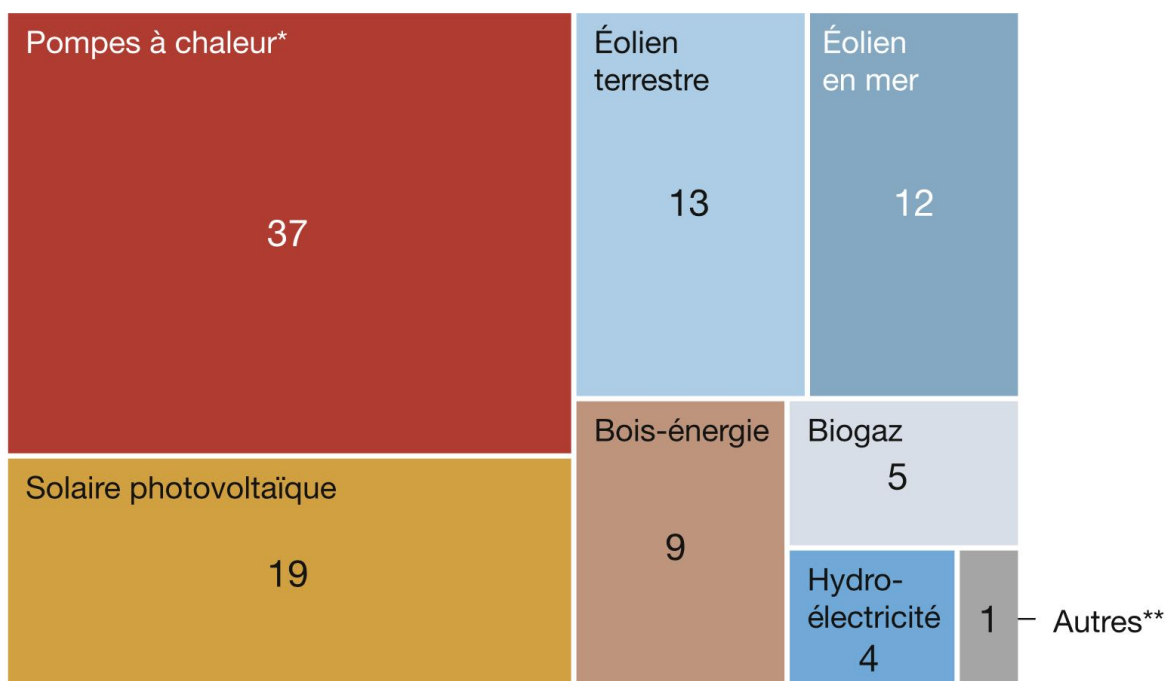
La feuille de route de la France pour la transition énergétique suit plusieurs objectifs :

→ *Objectifs de Réduction des Émissions de GES*: La France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, conformément à ses engagements dans le cadre de l'Accord de Paris. Cela implique une réduction progressive des émissions de gaz à effet de serre et une décarbonation des secteurs de l'industrie, du transport, du bâtiment et de l'agriculture. Le Plan Climat de la France fixe un objectif de réduction de 40 % des émissions de GES d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990.

→ *Développement des Énergies Renouvelables*²² : La France vise à augmenter la part des énergies renouvelables dans son mix énergétique à 40 % d'ici 2030 (actuellement, environ 19 % de l'électricité française provient de sources renouvelables). Le pays se concentre sur le développement de l'éolien offshore et terrestre et de l'énergie solaire. Des projets massifs d'éolien en mer sont en cours, avec l'objectif de 12 GW de capacité éolienne offshore d'ici 2030. Le gouvernement français veut également augmenter la capacité solaire à 20 GW en 2023, avec une ambition d'atteindre 40 GW d'ici 2028. La France a également lancé une stratégie nationale pour l'hydrogène vert avec l'objectif de développer 6,5 GW de capacité de production d'hydrogène décarboné d'ici 2030. L'hydrogène est vu comme un moyen important de décarboner l'industrie lourde et les transports.

²²https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/CGDD_A6_CHIFFRES_CLES_EnR_2022_v3_010922_GB_signets.pdf

Figure 8 : Les dépenses d'investissements dans les énergies renouvelables en %



Source : Les chiffres clés des énergies renouvelables (2025)

→ *Réduction de la Consommation d'Énergie et Efficacité Énergétique* : Le plan de rénovation énergétique des bâtiments est l'une des priorités, avec des objectifs d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels et publics. Cela comprend la rénovation de 500 000 logements par an afin de réduire leur consommation d'énergie et leur empreinte carbone. Des efforts sont en cours pour rendre les processus industriels plus efficaces et moins polluants, notamment dans les secteurs de l'acier, du ciment et de la chimie. Le gouvernement encourage également le recours à des technologies de captage et stockage du carbone (CCS).

→ *Électrification et Décarbonation du Secteur des Transports* : Le gouvernement français a fixé un objectif d'avoir une flotte de 7 millions de véhicules électriques en circulation d'ici 2030 (les voitures électriques représentent 2,9% en 2025 de la flotte des véhicules en circulation). Cela inclut des incitations pour les particuliers et les entreprises, ainsi que le déploiement d'une infrastructure de bornes de recharge sur tout le territoire. La France veut également accélérer la décarbonation des transports publics (bus électriques, trains à hydrogène, etc.) et la promotion de la mobilité durable.

→ *Sortie du Nucléaire et Diversification du Mix Énergétique* : Le gouvernement français a décidé de réduire la part du nucléaire dans la production d'électricité à 50 % d'ici 2035, contre environ 70 % actuellement. Ce processus de diversification inclut un développement massif des énergies renouvelables et des investissements dans des solutions de stockage de l'énergie et des réseaux intelligents pour gérer la variabilité des sources renouvelables. Malgré la transition vers les énergies renouvelables, la France conserve une capacité importante en énergie nucléaire, et le gouvernement

prévoit de rénover et moderniser les réacteurs existants pour garantir la sécurité énergétique tout en réduisant les émissions de GES.

→ *Le Plan de Financement et Innovation* : La France a mis en place plusieurs instruments financiers pour soutenir la transition énergétique : (i) la France est un leader dans l'émission d'obligations vertes²³ (Green Bonds) pour financer les projets verts, y compris ceux liés à l'énergie; fin 2024, l'encours total des OAT vertes était de 76 milliards d'euros (contre 42 milliards en 2021); (ii) le pays soutient également l'innovation technologique en matière de stockage de l'énergie, hydrogène vert, smart grids, et captage du carbone.

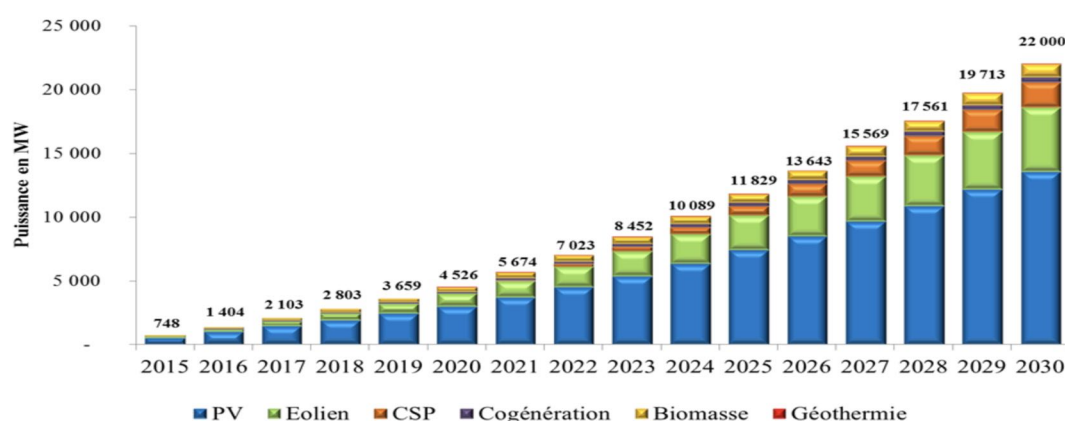
A l'instar des Etats-Unis et du Royaume-Uni, les documents de la feuille de route française impliquent une concertation avec les entreprises (acteurs économiques) et la nécessité d'une transition pour les secteurs les plus émetteurs, cependant les compagnies pétrolières ne sont pas spécifiquement sollicitées. L'approche est avant tout sectorielle.

La Feuille de route de l'Algérie pour la transition énergétique

L'Algérie est un pays riche en ressources énergétiques fossiles. Elle a commencé à mettre en place une transition énergétique pour diversifier son mix énergétique, réduire sa dépendance aux hydrocarbures, et répondre aux défis du changement climatique tout en répondant aux besoins croissants en énergie domestique. Deux documents officiels définissent ces objectifs et ses engagements.

- *Le programme national de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique*²⁴ (PNEREE, 2011 - 2030). Ce programme a fixé un objectif très ambitieux, la production de 22 GWh d'énergies renouvelables (principalement le solaire) en 2030.

Figure 9 : Programme algérien de déploiement des énergies renouvelables d'ici 2030



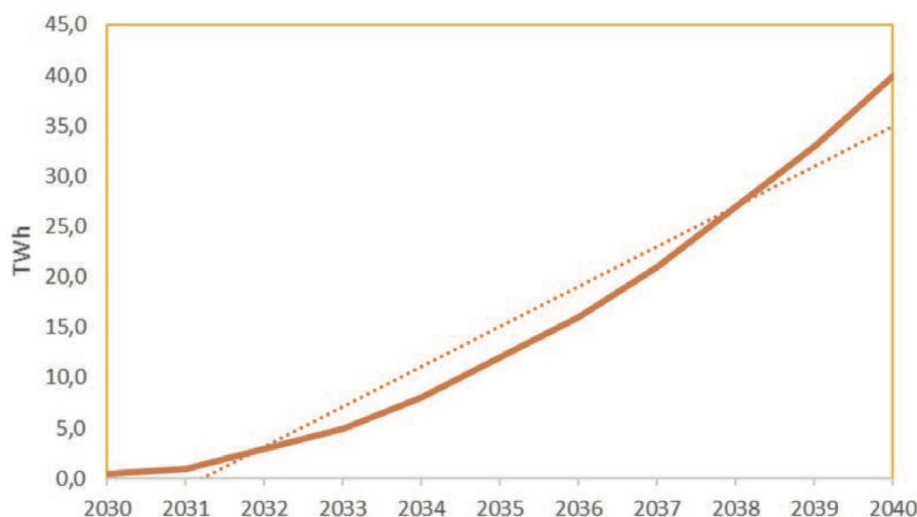
Source : Ministère des hydrocarbures et des Mines (2025)

²³<https://www.banque-france.fr/fr/publications-et-statistiques/publications/obligation-verte#:~:text=L'encours%20total%20des%20OAT,d'euros%20C3%A9mis%20depuis%202021.>

²⁴ <https://www.energy.gov.dz/?article=programme-de-developpement-des-energies-renouvelables>

- La Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène (SNDH)²⁵ (2023), qui est le document ministériel précisant les ambitions du pays en matière de production d'hydrogène et les différentes phases de déploiement des infrastructures. Pour les autorités algérienne, "La mise en place d'une filière d'hydrogène renouvelable et propre contribuera, à moyen et long termes, à l'accélération de la transition énergétique, au renforcement de la sécurité énergétique du pays, et permettra à l'Algérie de participer à l'effort global de lutte contre les changements climatiques" (SNDH, 2023, p. 2).

Figure 10 : Evolution de la production d'hydrogène algérienne d'ici 2040



Source : SDNH (2023, p. 10)

La transition énergétique de l'Algérie repose sur plusieurs axes stratégiques définis par le gouvernement.

→ *Objectifs de Réduction des Émissions et Diversification de l'Énergie* : Le gouvernement algérien a mis en place un plan stratégique pour diversifier son mix énergétique. L'objectif est de réduire la part des énergies fossiles dans la production d'électricité et d'augmenter la part des énergies renouvelables (solaire, éolien, etc.). L'Algérie veut devenir un leader régional dans la production d'énergie solaire et éolienne. L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables à 27 % d'ici 2030 dans la production d'électricité, avec une prévision d'atteindre 22 GW de capacité installée en énergies renouvelables d'ici 2030. La solaire photovoltaïque est la priorité du pays en raison de son potentiel énorme, avec un ensoleillement annuel moyen de 2 500 heures. Bien que l'Algérie n'ait pas encore officiellement adopté un objectif précis de neutralité carbone pour 2050, le pays s'engage progressivement dans une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre et dans des mesures de transition énergétique en lien avec ses engagements climatiques internationaux (comme l'Accord de Paris).

²⁵[https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/doc_strategie_nationale_hydrogene_v.fr_\(sept.2023\)_65b65e6f0b8eb.pdf](https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/doc_strategie_nationale_hydrogene_v.fr_(sept.2023)_65b65e6f0b8eb.pdf)

→ *Développement des Énergies Renouvelables* : L'Algérie dispose d'un des plus grands potentiels mondiaux pour les énergies solaires et a lancé plusieurs projets de parcs solaires à grande échelle. Le projet « Noor » dans le sud du pays a pour objectif de développer plusieurs centrales solaires (13 GW de capacité solaire d'ici 2030). Bien que le développement de l'hydrogène en Algérie soit encore à ses débuts, des discussions ont eu lieu autour de l'hydrogène vert, notamment en relation avec les projets d'énergies renouvelables. Le pays envisage des investissements dans la production d'hydrogène vert, notamment pour l'exportation vers l'Europe, afin de diversifier ses exportations énergétiques. Enfin, l'Algérie a cherché à renforcer sa coopération avec les pays européens et internationaux dans le développement des énergies renouvelables. Elle a signé plusieurs accords de partenariat avec des entreprises étrangères pour développer des projets en énergies renouvelables.

→ *Réduction de la Consommation d'Énergie et Efficacité Énergétique* : L'Algérie a mis en place des programmes d'amélioration de l'efficacité énergétique dans plusieurs secteurs, y compris l'industrie, le bâtiment, et les transports. Le pays cherche à réduire la consommation d'énergie par des actions concrètes, comme la réhabilitation des bâtiments (notamment en matière d'isolation thermique) et la mise en œuvre de technologies plus économes en énergie dans les industries lourdes. Le pays s'est également engagé à rénover et moderniser ses installations énergétiques vieillissantes pour améliorer leur performance et réduire leurs émissions de gaz à effet de serre.

→ *Modernisation du Secteur de l'Électricité et des Infrastructures* : L'Algérie travaille sur la modernisation de ses réseaux électriques en introduisant des réseaux intelligents (smart grids) pour mieux gérer la consommation et l'intégration des énergies renouvelables. Des projets sont également en développement pour améliorer le stockage de l'énergie, essentiel pour stabiliser la production d'électricité à partir de sources renouvelables intermittentes.

→ *Réformes et Politiques de Soutien* : Le gouvernement algérien a introduit des réformes législatives pour encourager l'investissement dans les énergies renouvelables. En 2019, l'Algérie a adopté une loi sur les énergies renouvelables qui offre des incitations fiscales et une réglementation favorable aux investisseurs dans ce secteur. Des mécanismes de financement vert et des partenariats public-privé sont explorés pour soutenir la transition énergétique.

Contrairement aux États-Unis, au Royaume-Uni et à la France, la feuille de route algérienne associe très clairement les grandes entreprises nationales (notamment Sonatrach et Sonelgaz) aux comités et à la mise en œuvre des feuilles de route (l'installation du comité national de la stratégie hydrogène incluant Sonatrach est documentée par le ministère). Les documents algériens citent le rôle du groupe national (Sonatrach) dans la transition – mobilisation de savoir-faire en raffinage/pétrochimie, participation à projets H₂, partenariats et réorientation partielle des activités. La compagnie nationale est explicitement désignée comme acteur de la feuille de route.

La stratégie des compagnies pétrolières et gazières face aux feuilles de route nationales de la transition énergétique

Le secteur de l'industrie pétrolière et gazière occupe une place prépondérante dans les schémas de transition énergétique et les différentes trajectoires nationales du mix énergétique. En 2023, les émissions mondiales de GES dues aux énergies fossiles avoisinaient les 37 Gt équivalent CO₂, soit les $\frac{3}{4}$ des émissions mondiales (IPPC, 2023)²⁶. Par leurs investissements dans le développement et l'exploitation des ressources minières mondiales, mais aussi par leur pouvoir d'influence (lobbies) auprès des Etats et des grandes institutions internationales, les compagnies pétrolières et gazières sont des parties prenantes dans les objectifs de neutralité carbone. Or, malgré leur positionnement dans les énergies renouvelables, elles continuent à investir massivement dans les énergies fossiles (Le Monde, 2023). Selon le rapport de l'ONG allemande URGEWALD (2023), près de 96% des 700 compagnies productrices de pétrole et de gaz poursuivent l'exploration et le développement de nouvelles réserves d'hydrocarbures, et ce malgré les préconisations de l'AIE (2023). Pire, les dépenses pour l'exploration de nouvelles réserves de pétrole et de gaz (soit 170 milliards de dollars) auraient même augmenté de plus de 30% depuis 2021. Les principales multinationales concernées sont les chinoises China National Petroleum Corporation (CNPC), CNOCC et Sinopec, la compagnie nationale saoudienne Saudi Aramco, Shell ou encore Total. Selon ce même rapport, 1023 entreprises prévoient des projets d'infrastructures de transport des hydrocarbures (nouveaux terminaux de gaz liquéfiés, oléoducs, gazoducs)... Ce sont ainsi près de 230 milliards de barils de pétrole qui seraient susceptibles d'arriver sur le marché dans les 25 prochaines années (Le Monde, 2023). Les activités du groupe Total sont les plus étendues géographiquement, elles concernent près de 53 pays dont certains n'ont actuellement pas ou peu de production de pétrole et de gaz (il s'agit notamment du très controversé gazoduc qui traverse la Tanzanie et l'Ouganda).

Ces quelques chiffres nous rappellent que la transition énergétique vers les énergies renouvelables est un sujet sensible et que les principaux protagonistes du secteur pétrolier et gazier soufflent à la fois le chaud et le froid sur les perspectives d'atteindre la neutralité carbone en 2050 et de rester sous la barre des 1.5°. Les compagnies pétrolières et gazières sont également amenées à donner leurs visions de la transition énergétique, et ces dernières ne coïncident pas forcément avec celle de l'AIE (2023, 2024).

Dans ce qui suit, nous présenterons les stratégies énergétiques des 6 compagnies suivantes : BP, Chevron, Exxon, Shell, Total, Sonatrach. Ce choix est motivé par les quatre raisons suivantes : 1° les quatre premières compagnies font partie des 10 plus grandes multinationales de l'énergie, 2° Sonatrach est étroitement liée aux choix de

²⁶ Selon les données de l'IPPC (<https://climatechangetracker.org/igcc>).

l'Etat Algérien, 3° les cinq compagnies investissent des sommes importantes dans l'exploration de nouveaux gisements et le transport des énergies fossiles tout en s'inscrivant dans une stratégie de mix énergétique (investissement dans les énergies renouvelables), 4° les feuilles de route des Etats nations et celles des compagnies choisies n'ont pas les mêmes objectifs et finalités en matière de neutralité carbone. Les Etats ont des préoccupations concernant la sécurité énergétique, la croissance économique, le mix énergétique, l'autosuffisance et les exportations, la géopolitique, alors que les compagnies pétrolières et gazières sont très soucieuses de leurs résultats financiers, des dividendes promis à leurs actionnaires et des participations croisées qu'elles ont dans d'autres secteurs de l'économie. La vision stratégique de ces dernières introduit une sorte de compromis ou de statu-quo entre le maintien des investissements dans les énergies fossiles et la nécessité de diversifier leurs activités notamment dans le secteur des énergies renouvelables. Si la valorisation des actifs pétroliers et gaziers laisse planer des doutes sur le plan comptable (débat autour des junk assets), les multinationales maintiennent à privilégier la rentabilité financière des projets d'énergie fossile basée sur l'EROI et la volatilité du prix des hydrocarbures.

Des stratégies communes pour s'engager dans la transition énergétique

Si les compagnies pétrolières ont une histoire et des relations avec les Etats très différentes (certaines peuvent subir des pressions importantes de la part des gouvernements, des investisseurs et des groupes environnementaux pour s'adapter à la transition énergétique), elles s'inscrivent de plus en plus dans une logique d'actions communes que l'on peut regrouper autour de 6 axes : (i) la diversification vers les énergies renouvelables, (ii) la capture et le stockage du carbone, (iii) la stratégie de neutralité carbone, (iv) les investissements en technologie d'avenir, (v) la prise en compte de la pression des actionnaires et des parties prenantes. Dans ce qui suit, nous tiendrons compte des stratégies des compagnies pétrolières dans leur pays mais également dans les autres pays de l'étude.

La stratégie de neutralité carbone

Afin de s'aligner avec les objectifs climatiques et les accords de Paris, la plupart des compagnies concernées ont annoncé des mesures et des cibles destinées à atteindre la neutralité carbone. En 2020, British Petroleum (BP) a annoncé une stratégie de transformation majeure, avec l'objectif de réduire ses émissions de CO₂ de 40% en 2030 et d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Cet objectif est directement corrélé au souhait de réduire sa production de pétrole et de gaz de 40% d'ici 2030 et d'investir massivement dans les énergies renouvelables et les technologies de décarbonation. Shell, Total Energies, Exxon Mobil et Chevron ont également pris un engagement similaire avec l'objectif d'une neutralité carbone en 2050. Ces engagements bienveillants sont largement critiqués pour leur manque de clarté et pour la dépendance de ces compagnies aux technologies.

La diversification vers les énergies renouvelables

Les investissements en énergies renouvelables constituent l'un des leviers principaux du changement de paradigme du système énergétique mondial. En 2020, Shell a annoncé qu'elle consacrerait 25% de son budget d'investissement aux énergies renouvelables et à l'hydrogène, tout en développant ses activités dans l'électricité verte et la capture du carbone. ExxonMobil et Chevron ont commencé à investir dans l'énergie solaire, l'éolien offshore et les projets d'hydrogène. Chevron, par exemple, a acquis des projets d'éolien offshore et des investissements dans les technologies de capture et stockage du carbone (CCS). Shell a investi massivement dans le secteur de la mobilité avec des bornes de recharge pour les voitures électriques. et plus généralement dans le stockage de l'énergie (plan de réduction de 45% des émissions directes de GES d'ici 2035). Total Energies a renforcé ses projets de stockage d'énergie, notamment via des partenariats pour développer des solutions de batteries à grande échelle afin de soutenir l'intermittence des énergies renouvelables. Sonatrach, en tant qu'acteur majeur du secteur énergétique algérien, a initié de nombreux projets dans le domaine des énergies renouvelables afin d'anticiper la baisse de la demande de pétrole et de gaz à l'échelle mondiale. En partenariat avec Engie, Sonatrach a développé des projets mettant l'accent sur l'éolien et le solaire (Engie a notamment pris des mesures pour réduire l'intensité carbone de ses activités).

Les projets de capture et stockage du carbone (CCS)

Les compagnies pétrolières investissent également dans les technologies de capture et de stockage du carbone (CCS) pour décarboner leurs opérations et répondre à la demande croissante de solutions permettant de compenser leurs émissions. Shell a investi dans plusieurs projets de captage et de stockage du carbone au Royaume-Uni, y compris des projets liés à l'industrie et à la production d'électricité. Sonatrach explore des technologies de captage et de stockage du carbone pour réduire les émissions de ces installations pétrolières et gazières. Ces technologies sont présentées comme essentielles pour la décarbonation de secteurs tels que l'industrie (optimisation des process) ou la chimie.

Des investissements dans les technologies d'avenir : l'hydrogène et les bioénergies

En l'espace de quelques années, l'hydrogène vert s'est immiscé au rang d'énergie du futur, provoquant une véritable course à la transition énergétique. Tous les Etats se sont dotés d'une stratégie nationale de l'hydrogène, largement dépendante des innovations menées par les firmes multinationales. BP a récemment lancé un projet d'hydrogène vert au Royaume-Uni et envisage de renforcer sa production d'hydrogène à faible émission. Total Energies soutient des projets d'hydrogène en France, notamment dans la région de Dunkerque. Sonatrach, en partenariat avec TOTAL Energies, a exprimé son intérêt pour le développement de la production d'hydrogène vert, notamment en lien avec le développement de projets solaires dans le sud du pays.

La bioénergie et les biocarburants sont également des alternatives plus propres aux combustibles fossiles dans les transports et l'industrie. BP a acquis 50% de Bunge (brésil) puis acheté le capital restant pour 1.4 milliards de \$ en 2024 afin de mettre la main sur une production de bioéthanol à base de sucre de canne. BP a également racheté Archaea Energy (Etats-Unis), producteur de biogaz, pour un montant de 3,3 milliards de \$. Enfin, BP a investi dans WasteFuel, une société qui convertit les déchets municipaux et agricoles en bio-méthanol, un montant de 10 millions de \$. De son côté, Shell a acquis EcoOils (Malaisie, Indonésie) et Nature Energy (Europe) pour du biogaz. Shell a également créé un joint-venture avec Raizen (Brésil) pour produire de l'éthanol à partir de cannes à sucre. Chevron a acquis Renewable Energy Group (REG, producteur important de Biodiesel aux Etats-Unis) pour un montant de 3,15 milliards de \$.

Renouvellement du portefeuille d'activités et engagement dans la durabilité

En réponse aux pressions croissantes des gouvernements et des actionnaires (et plus largement des parties prenantes), les compagnies pétrolières ont procédé à des réorientations de leur portefeuille d'activités, notamment via :

- *Un désinvestissement dans les énergies fossiles* : BP et Shell ont commencé en 2020 à vendre des actifs liés au pétrole et au gaz pour concentrer leurs investissements sur les énergies renouvelables et les technologies de la décarbonation.
- *Des acquisitions dans les énergies renouvelables* : BP a acquis des entreprises comme LightSource, un producteur d'énergie solaire. Shell a investi dans des projets d'éolien offshore.
- *Des politiques plus strictes en matière de durabilité* : Les rapports détaillés sur les émissions de carbone et la mise en place de plans de réduction des émissions en accord avec les objectifs climatiques nationaux et mondiaux engendrent plus de transparence sur les actions menées. Total Energies s'est ainsi engagé à réduire de 40% l'intensité carbone de ses produits d'ici 2030. Des groupes d'investisseurs, comme Engine No. 1, ont même remporté des sièges au conseil d'administration d'ExxonMobil pour pousser l'entreprise à accélérer ses efforts en matière de durabilité. Bien que Engine n°1 ne possède que 0.02% du capital d'ExxonMobil, elle est parvenue à obtenir trois sièges au conseil d'administration du groupe²⁷. Par ailleurs, de nombreuses compagnies pétrolières ont été amenées à adopter des initiatives sociales et environnementales pour améliorer leur image et répondre aux attentes des consommateurs.

Malgré tous ces efforts, la transition énergétique des compagnies pétrolières vers une neutralité carbone reste un processus difficile à évaluer. D'une part, les investissements massifs dans les combustibles fossiles demeurent une réalité (les

²⁷<https://www.tradingsat.com/actualites/informations-societes/engine-no-1-le-petit-fonds-qui-a-bouscule-le-geant-petrolier-exxonmobil-971853.html>

compagnies continuent d'investir massivement dans l'exploration de nouveaux gisements et la production de pétrole et de gaz naturel, ce qui complique leur passage complet aux énergies renouvelables). D'autre part, il existe une tension croissante entre investissements dans les énergies renouvelables et dépendance aux hydrocarbures (bien que les compagnies pétrolières se diversifient, les hydrocarbures demeurent une part essentielle de leurs revenus, créant une tension entre leur rôle actuel dans l'économie énergétique mondiale, la distribution de dividendes attendue par les actionnaires et les objectifs de transition énergétique). Dans ce qui suit, nous avons cherché à évaluer les stratégies des compagnies pétrolières à partir d'indicateurs clés, susceptibles de nous éclairer sur leurs engagements vers la neutralité carbone.

Comment évaluer les promesses de neutralité carbone des compagnies pétrolières ?

Afin d'évaluer si les compagnies pétrolières (BP, Chevron, ExxonMobil, Total Energies, Sonatrach et Shell) sont réellement engagées dans une neutralité carbone en 2050 et si leurs engagements s'inscrivent bien dans les feuilles de route nationales, nous avons combiné une approche quantitative (grille de 6 indicateurs) et une démarche plus qualitative (démarche des scénarios).

Détermination d'une grille d'indicateurs quantitatifs

Parmi un ensemble d'indicateurs possibles, nous avons retenu pour notre analyse 6 indicateurs plus ou moins robustes et comparables.

Indicateur 1 : Part des CAPEX (investissements) consacrés aux énergies bas-carbone

C'est le pourcentage des investissements annuels alloués aux énergies renouvelables, aux bioénergies, à l'hydrogène, au stockage de l'énergie, à l'électrification par rapport au CAPEX total. Cet indicateur montre si la compagnie pétrolière modifie réellement son business model ou reste autocentrée sur le pétrole et le gaz.

Indicateur 2 : Part des CAPEX consacrés aux énergies fossiles par rapport aux ER.

C'est le montant des investissements réalisés dans la recherche et l'exploitation de gisements d'énergies fossiles par rapport au total des investissements de la société et comparé à ceux effectués dans les énergies renouvelables. Cet indicateur traduit une certaine inertie des choix des compagnies pétrolières en matière de mix énergétique. En matière de transition énergétique, il marque un décalage temporel entre les annonces et les résultats, voire l'absence d'un véritable changement de paradigme. Toutes les compagnies pétrolières, sans exception, ont annoncé avoir lancé leur programme de recherche de nouveaux gisements.

Indicateur 3 : Capacité installée²⁸ et projets confirmés en énergies renouvelables et bas carbone

²⁸ Selon l'AIE, tripler la capacité mondiale en énergies renouvelables pour atteindre 11 000 gigawatts d'ici 2030 est le levier le plus puissant pour réduire la demande en énergies fossiles et diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Il s'agit de mesurer les GW installés pour l'éolien et le solaire, les millions de tonnes produites pour les bioénergies, les milliers de tonnes capturées de CO2 pour les projets CCS. Cet indicateur permet d'évaluer les actifs (et non les flux d'énergies) du bilan associés à la transition énergétique.

Indicateur 4 : *Évolution de l'intensité carbone des produits énergétiques vendus*

Cette intensité carbone retient comme unité, les grammes de CO2 par MégaJoule (gCO2/MJ) ou les grammes de CO2 par kilowattheure (gCO2/kwh), associés à l'énergie produite et vendue. Cet indicateur a le mérite d'intégrer les scope 1, 2 et 3 - émissions liées à l'utilisation finale des produits par les clients). Ce scope 3 est important pour les émissions des compagnies pétrolières, il peut représenter près de 85% de leurs émissions. Une évolution de cet indicateur à la baisse peut donner une certaine crédibilité à la politique de neutralité carbone suivie par une entreprise.

Indicateur 5 : *Part des revenus futurs provenant des activités bas carbone*

Il s'agit du chiffre d'affaires provenant d'activités hors pétrole/gaz (renouvelables, électricité, bioénergies, hydrogène, stockage du carbone...). C'est une mesure structurelle (changement de base) du business model.

Indicateur 6 : *Présence d'objectifs intermédiaires de réduction d'émissions (2030 - 2040) en accord avec les accords de Paris (neutralité carbone d'ici 2050) ou validés par des outils et des méthodes scientifiques.*

On peut citer ici les démarches initiées par SBTi (*Science Based Targets initiative*²⁹). L'initiative Science Based Targets élabore des normes, des outils et des lignes directrices qui permettent aux entreprises de fixer des objectifs de réduction des émissions de GES conformes à ce qui est nécessaire pour maintenir le réchauffement climatique mondial en dessous de niveaux catastrophiques et atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

Nous avons puisé dans les rapports "RSE", "Sustainability", "Climate", "Energy Scenarios" et "Energy transition" des compagnies pétrolières afin d'extraire les éléments d'informations nécessaires pour évaluer les engagements en matière de neutralité carbone.

Tableau 3 : *Evaluation des engagements des compagnies pétrolières à l'horizon 2050*

Compagnie	Indicateur 1	Indicateur 2	indicateur 3	Indicateur 4	Indicateur 5	Indicateur 6	Sources
BP	Modéré	Fort	Fort	Modéré	Modéré	Partielle	Sustainability Report (2023)
Chevron	Fort	Fort	Fort	Faible	Modéré	Faible	Carbon Plans (2023), Chevron Press

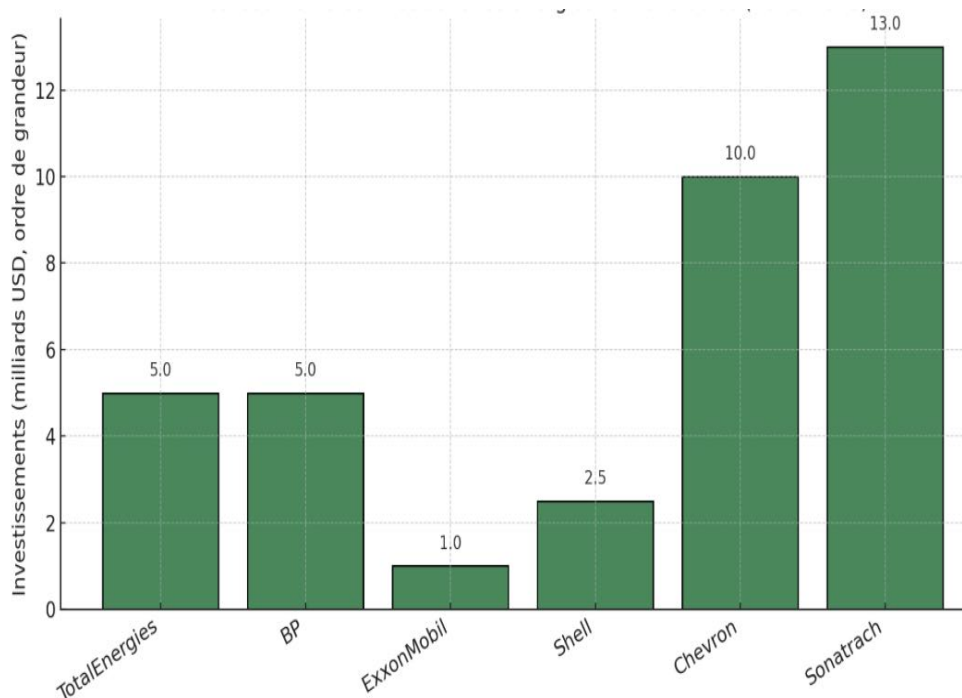
²⁹ <https://sciencebasedtargets.org/standards-and-guidance>

Exxon Mobil	Faible	Fort	Fort	Faible	Faible	Faible	Growing Low Carbon Solutions (2023)
Shell	Faible	Fort	Fort	Modéré	Modéré	Partielle	Shell Energy transition (2023), Climate & energy transition (2023)
Sonatrach	Fort	Fort	Faible	Faible	Faible	Faible	Algerian Ministry (2024)
Total Energies	Modéré	Fort	Fort	Fort	Fort	Partielle	Sustainability and Climate report (2024)

Source : Les auteurs

(i) Sur la période 2015 - 2025, Chevron et Sonatrach sont les deux compagnies pétrolières qui ont réalisé des investissements importants dans les énergies renouvelables (13 milliards de \$ pour Sonatrach et 10 milliards de \$ pour Chevron). Total Energies et BP ont réalisé des investissements modérés de 5 milliards de \$ chacune, Shell et Exxonmobil ont des investissements faibles (2,5 et 1 milliard de \$). Selon les informations recueillies sur les sites des compagnies pétrolières, Chevron et ExxonMobil déclarent viser 10% de leurs investissements dans l'électricité bas carbone d'ici 2030 alors que Total Energies annonce 30 à 40%.

Figure 9 : Les investissements des compagnies pétrolières dans les ER



Source : Les auteurs

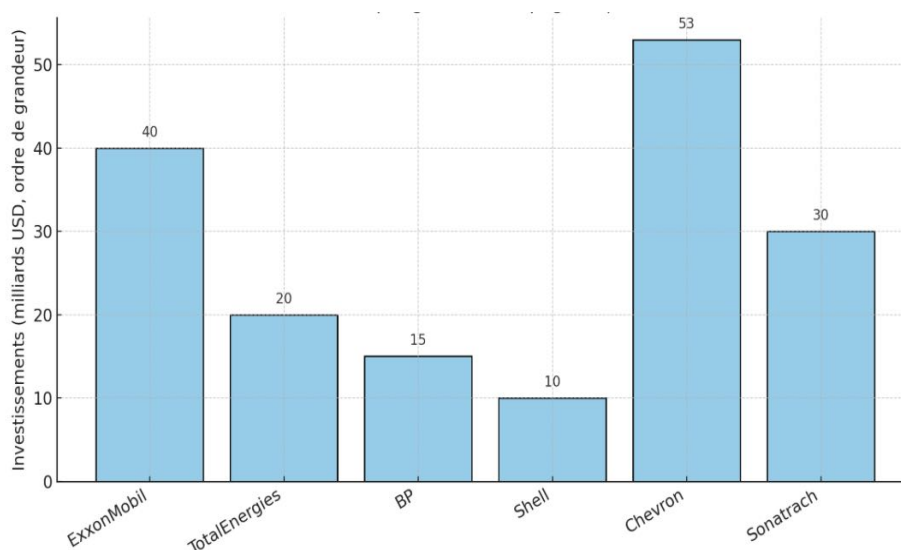
Tableau 4 : investissements dans les énergies renouvelables entre 2015 et 2025

Compagnie	Investissements	Montant estimé	Sources
BP	Promesse d'investir 5 milliards \$/an dans les renouvelables (2020) jusqu'en 2030. Réorientation stratégique depuis	1,5 milliards de \$ entre 2018 et 2019, 5 milliards de \$ en 2020, quelques acquisitions	https://www.bp.com/Reglobal.org Wikipedia.org
Chevron	Future Energy Funds (500 millions de \$) en 2024, 400 millions de \$ (2018, 2021), Plan de 10 milliards de \$ dans les énergies bas carbone (hydrogène, biocarburants, capture de CO2) d'ici 2028	Fonds Venture - 500 millions de \$ Investissements dans le secteur bas carbone (10 milliards de \$ d'ici 2028)	https://www.wsj.com/ https://www.morningstar.com/stocks/chevron-increases-low-carbon-spending https://www.chevron.com/
Exxon Mobil	REcherche dans les technologies bas carbone (1 milliard de dollars par an) acquisition dans le biofuel (biojet, 2022), pour la capture du carbone (Denbury, 2023)	1 milliard de dollars par an en R & D bas carbone, quelques acquisitions	https://en.wikipedia.org/wiki/ExxonMobil https://reclaimfinance.org/site/ https://corporate.exxonmobil.com/sustainability-and-reports/global-outlook
Shell	Capacité des énergies renouvelables doublée en 2022 (6,4 GW), acquisition de Spring Energy pour 1.6 milliard de \$, projets offshore de plusieurs GW	Acquisitions de Spring Energy, CAPEX de l'ordre de un à deux milliards de \$	https://www.shell.com/ https://shell.gcs-web.com/news-releases/news-release-details/shell-publishes-energy-transition-strategy-2024
Sonatrach	Plan 2022 - 2026, 40 milliards de \$ de capex total, incluant les énergies renouvelables, projets d'énergie sociale (10 millions de \$ à Ouargla, 10 millions de \$ BRN) accords en R&D.	13 milliards de \$ concernent les énergies renouvelables	https://energyinafrica.com/insight/why-africas-largest-oil-firm-algerias-sonatrach-is-eyeing-solar-as-its-next-big-bet/ https://sonatrach.com/
Total Energies	Investissements de 1.5 milliard de \$ depuis 2018, 5 milliards en 2020, acquisitions de Batterie Saft en 2016, Adani Green en 2021, Clearway en 2022, VSB en 2024.	1,5 milliards de \$ 2018 - 2019, 5 milliards de \$ en 2020, plusieurs acquisitions	https://totalenergies.com/fr https://reglobal.org/ https://fr.wikipedia.org/wiki/TotalEnergies

Source : Les auteurs

(ii) Les investissements dans les gisements ou la production d'énergies fossiles représentent 5 à 20 fois les investissements des compagnies pétrolières dans les énergies renouvelables. Alors que Sonatrach et Chevron étaient de gros investisseurs dans les énergies renouvelables, leurs investissements dans les fossiles sont multipliés par 3 et 5, soit 53 milliards de \$ pour Chevron et 30 milliards de \$ pour Sonatrach. Exxon Mobil multiplie par 40 ses investissements dans le fossile par rapport au renouvelable et les chiffres de Total Energies, BP et Shell ne sont pas en reste avec respectivement 20, 15 et 10 milliards de \$. Ces montants tendent à montrer que la transition sera longue et pourrait se figer autour d'un mix (énergie renouvelable/fossile) qu'il reste à définir (on est loin de la neutralité carbone pour 2050, mais peut être plus proche de la règle des 20/80). Ce dernier point insiste également sur le poids des banques dans le financement des projets d'énergies fossiles des compagnies pétrolières. Selon le rapport *Banking on Business as Usual* (2025), commandité par Reclaim Finance et d'autres ONG, les grandes banques mondiales ont accordé seulement 1368 milliards de dollars aux énergies soutenables telles que l'éolien, le solaire, et les infrastructures contre 3285 milliards aux énergies fossiles sur la période allant de 2021 et 2024 : "Le ratio entre les énergies soutenables et les énergies fossiles est de 0,42/1 : pour chaque euro accordé aux énergies fossiles, seulement 42 centimes ont été alloués aux alternatives soutenables" (Reclaim Finance, 2025). Les banques états-uniennes et canadiennes ont accordé quatre fois plus de financements aux énergies fossiles qu'aux énergies soutenables (avec des ratios respectifs de 0,25/1 et 0,22/1), devancées de peu par les banques japonaises (0,35/1) et chinoises (0,52/1). Les banques européennes ont des ratios bien meilleurs (0,70/1), toutefois, ils restent bien en deçà de ce qui est nécessaire pour réussir la transition énergétique. L'Agence internationale de l'Energie (AIE, 2024) rappelle que d'ici 2030, les investissements annuels dans les énergies fossiles devront diminuer de 60 %, tandis que ceux dans les énergies alternatives devront plus que doubler.

Figure 11: Investissements des compagnies pétrolières dans les énergies fossiles



Source : Les auteurs

Tableau 5 : Investissements dans les gisements de pétrole et de gaz

Compagnie	Projet	Année	Potentiel	Investissement	Sources
BP	Présence Azerbaïdjan, Angola, Guyane, Gulf du Mexique	2015 - 2024	500 MBOE à 2 G MBOE 40 puits dans le Gulf du Mexique	Dizaines de milliards de \$ depuis 2015 Capex upstream	https://www.bp.com/en/global/corporate/investors/upstream-major-projects.html#tab_1 https://www.lemond.fr/planete/article/2025/04/14/bp-annonce-la-decouverte-d-un-nouveau-gisement-de-petrole-dans-le-golfe-du-mexique_6595878_3244.html
Chevron	Acquisition de Hess, entrée dans Stabroek (Guyane), Kazakhstan, Gulf et USA	Hess (2024-2025)	Par acquisition, participation au projet Stabroek (plusieurs milliards de barils)	Achat de Hess (53 milliards de \$)	https://www.chevron.com/newsroom/2024/q4/chevron-announces-2025-capex-budget https://apnews.com/article/chevron-exxon-mobil-hess-guyana-a578562fd3ca7312348f8f9503ad01ef
Exxon Mobil	Stabroek Block (Guyane), Liza, Yellowtail, Uaru, Whiptail	Découverte de Liza (2015), multiples forges entre 2017 et 2024	8 à 11 milliards de dollars (Constitution de réserves)	Liza, phase 1 : 3,6 à 4,4 milliards de \$, phase 2 : 6 milliards de \$ Yellowtail, 8 à 13 milliards de \$	https://corporate.exxonmobil.com/sustainability-and-reports/global-outlook
Shell	Découverte en Namibie, prise de parts dans Bonga, capitaux au Nigeria	Découverte en Namibie, 2022, 2024 Acquisitions entre 2019 et 2025	Potentiel de centaines de millions de barils, Production significative Nigeria et Bonga	Investissement local, acquisitions, CAPEX upstream	https://www.shell.com/investors/results-and-reporting/portfolio-and-major-projects.html
Sonatrach	Découvertes de gisements en Algérie : Hassi series, Tinrhert, Touggourt, Isarene...)	Plusieurs annonces depuis 2015 et de nombreux en 2024 (8 découvertes majeures)	Réserves nationales très élevées 15 découvertes en 2022	Plan 2020 et 2024-2025 30 à 40 milliards d'investissements	https://sonatrach.com/wp-content/uploads/2025/06/RA_2022_EN_Web.pdf https://www.middleeastmonitor.com/20240530-algeria-makes-8-major-oil-gas-discoveries-in-2024/
Total Energies	Mozambique LNG, Rovuma, multiples	Découverte 2010, relance des	Ressources importantes de Rovuma	Projet LNG de 20 à 25 milliards de dollars,	https://totalenergies.com/system/files/documents/totalenergies_

	partenariats	explorations en 2029 - 2024	Projet Kaombo (Angola)	Angola et Capex Upstream	pr-results-q4-2024_2025_en.pdf
--	--------------	-----------------------------	------------------------	--------------------------	--

Source : Les auteurs

(iii) Concernant la capacité installée et le poids des actifs, les stratégies vont toutes dans le bon sens, avec soit une hausse des GW produits ou une place plus importante consacrée aux actifs Énergies renouvelables du bilan. En 2024, Total Energies a annoncé près de 20 GW de capacités renouvelables (et un objectif de 100 GW pour 2030). En septembre 2025, Total Energies et RWE ont remporté l'appel d'offres éolien en mer "Centre Manche 2". Le projet représente un investissement de 4,5 milliards d'€. Le parc éolien devrait avoir une capacité de 1.5 GW et alimenter en électricité verte, près d'un million de foyers. Toutefois, cet optimisme doit être tempéré par deux faits importants. Premièrement, il s'agit davantage d'une diversification du portefeuille d'actifs via des rachats d'entreprises, plutôt qu'un changement de business model. Les majors ont multiplié les projets et les acquisitions dans les biocarburants et biogaz: BP a racheté Bunge Bioenergia, acquis Archaea Energy, Shell a acheté Raizen et Feedstock & Biogaz, Chevron a acquis Renewable Energy Group (REG), Exxon Mobil a pris une participation dans Biojet AS...Deuxièmement, l'idée qu'une action d'une compagnie pétrolière pourrait valoir 0 dans un monde de neutralité carbone renforce l'idée de la diversification du portefeuille et de la distribution du dividende action. En février 2025, BP a présenté sa nouvelle stratégie intitulée "remise à zéro" qui vise à accroître la valeur actionnariale du capital vers les énergies fossiles (via une augmentation des investissements dans le pétrole et le gaz).

(iv) Les indicateurs *Carbon Intensity* associés à des horizons temporels intermédiaires (2030, 2040) font partie des publications de Shell, BP et Total Energies. Dans son *Climate Target*³⁰, Shell s'est fixé comme objectif de réduire son intensité carbone nette des produits énergétiques de 9 à 13% d'ici 2025, 15 à 20% d'ici 2030 et de 100% d'ici 2050 (par rapport à 2016). Dans son rapport *ESG Datasheets 2024*, BP s'est engagé à réduire son intensité carbone de 5% d'ici la fin de l'année 2025. Exxon Mobil et Chevron proposent des objectifs en matière d'intensité carbone relativement faibles, si les scopes 1 et 2 sont bien présents, le scope 3 est quasi-absent, voire traité superficiellement³¹.

(v) Si la part des revenus futurs provenant des activités bas carbone est relativement importante chez Total Energies, elle reste modérée chez BP, Chevron et Shell, et très faible chez ExxonMobil et Sonatrach. En 2024, Total Energies a publié la répartition attendue de son chiffre d'affaires pour 2050 : 40% d'électricité, 40% d'énergies bas carbone, 20% de pétrole et de gaz. De son côté, Chevron a acquis en 2025 près de 125 000 acres dans une formation riche en lithium aux Etats, l'objectif étant de miser sur

³⁰ <https://www.shell.com/sustainability/climate/our-climate-target-faqs.html>

³¹ <https://green-finance.fr/la-transition-des-petrolieres-dans-limpasse/>

une production locale de lithium et une diversification des revenus via une technologie avancée pour renforcer l'approvisionnement national en métaux critiques.

(vi) Les cibles (2030, 2040) sont déterminantes pour crédibiliser les engagements pour 2050. Les rapports de BP, Shell et Total Energies font état d'objectifs intermédiaires alors que ExxonMobil, Chevron et Sonatrach n'en ont pas.

Des indicateurs aux scénarios du futur

Si les indicateurs permettent d'évaluer quantitativement les efforts déployés par les compagnies pétrolières pour atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, ils ne précisent ni leur vision du futur, ni leur capacité à scénariser l'avenir. Dans un papier intitulé *Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective*, Bessalem, Diemer et Batische (2022) ont proposé une typologie des scénarios renvoyant au *scenario planning* de Wack (1985), à la *Prospective* de Godet (1977, 1983, 1990), aux *Trois Horizons* (Sharpe, Hodgson, Page, 2006; Curry, Hodgson, 2008) et aux *Narrative Shared Socioeconomic Pathways* (O'Neill, 2014, 2017). Une approche qualitative consiste ici à analyser les démarches méthodologiques présentes dans les rapports des compagnies pétrolières et à les confronter aux approches dites des scénarios.

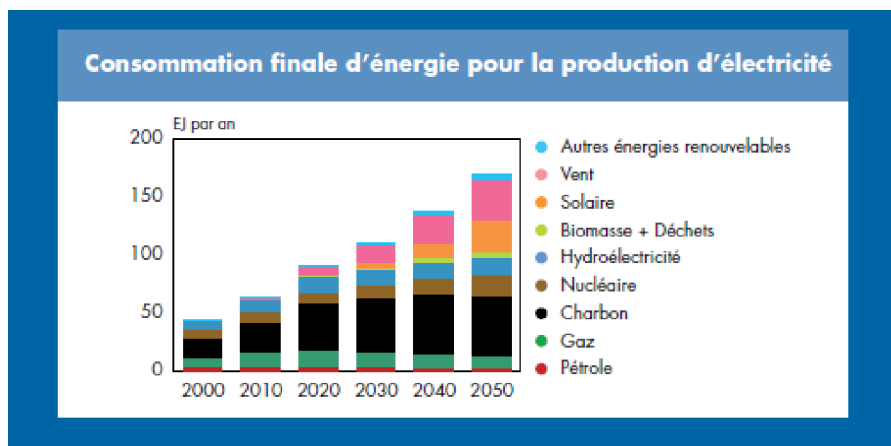
Le scénario planning de Shell

Royal Dutch Shell a expérimenté la méthode de Pierre Wack durant le premier choc pétrolier (Schoemaker, Van der Heijden 1993). Par la suite, elle a continué à pratiquer cet exercice en réalisant ses propres modèles (Jefferson, 2012, Jefferson & Voudouris, 2011). Dans son *Outlook 2020*, Shell a introduit deux modèles de scénarios énergétiques : *Scramble* (bousculades) et *Blueprints* (plans directeurs). Le *scénario scramble* est basé sur l'hypothèse de l'existence d'un manque de coopération économique, les différents pays refusant d'agir unilatéralement d'une façon qui nuirait à leur propre croissance économique. Ceci engendre une utilisation inefficace de l'énergie jusqu'à ce que les approvisionnements se tendent. Les émissions des gaz à effet de serre ne sont pas prises en compte. La concentration d'émissions CO₂ s'achemine vers un niveau à long terme bien supérieur à 550 ppm. Dans ce scénario, la biomasse représente 15 % de l'énergie primaire à l'horizon 2050. Les biocarburants jouent un rôle important, en permettant notamment de diversifier l'offre de carburants. Mais avec la demande qui augmente, les énergies fossiles continuent à représenter une part importante de l'ensemble des énergies à l'horizon 2050. En 2050, plus de 60 % de l'électricité est produite à partir d'énergies autres que les combustibles fossiles. Le CCS (captage du carbone et stockage) contribue de façon importante à la réduction des stocks de carbone dans l'atmosphère sans pour autant être la solution définitive.

Les scénarios Blueprints offrent de meilleures perspectives. Ces scénarios supposent l'existence de nouvelles coalitions d'intérêts avec des perspectives économiques qui forgent de nouvelles alliances qui favorisent l'action. Ceci se traduit par des objectifs communs avec des intérêts environnementaux et des opportunités d'entreprise

connexes. Les initiatives prennent d'abord forme localement, sous l'égide de villes ou de régions. Celles-ci se rejoignent progressivement pour devenir des initiatives imposées par les politiques du gouvernement. Dans le scénario Blueprints, la rupture ou le changement vient du fait que la croissance économique n'est plus basée sur l'utilisation des énergies fossiles. La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables est la source d'énergie principale du secteur économique.

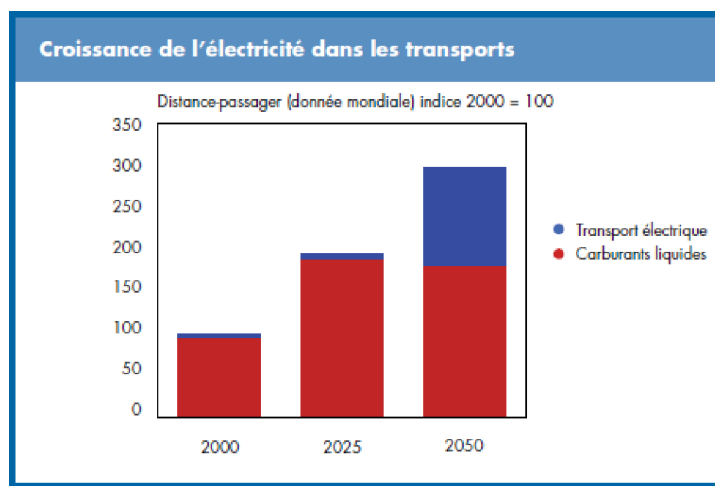
Figure 12 : Production d'électricité dans le scénario Blueprints



Source : Outlook 2020, Shell

Les véhicules électriques deviennent la référence dans le secteur des transports, du fait de leur attrait par les consommateurs et de leur prix raisonnable (lorsque les gouvernements encouragent la production de masse).

Figure 13 : Consommation d'électricité dans les transports



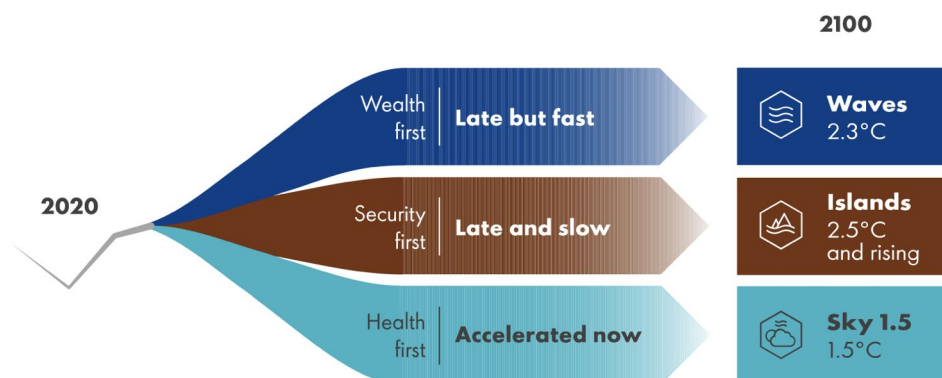
Source : Outlook 2020, Shell

Dans les pays développés, près de 90 % des centrales au charbon et au gaz dans les pays membres de l'OCDE et 50 % dans les pays non-membres de l'OCDE sont dotées des technologies CCS d'ici à 2050. La mise en place d'encouragements pour contrôler les émissions de gaz à effet de serre (comme la fixation du prix du CO2 ou des objectifs d'émission) ainsi que des réglementations pour faire face à ces problèmes, sont

réalisables via des technologies adéquates (CCS sur une grande échelle). Capter et stocker le CO₂ est un processus à forte intensité énergétique et coûteux.

Si les scénarios Scramble et Blueprints sont des illustrations du scénario planning lancé par Shell en 2020, cette dernière a également publié en 2021 des scénarios énergétiques sous les noms de Sky, Waves et Islands en lien avec la crise de la COVID et le défi climatique.

Figure 14 : Scenarios Sky, Waves and Islands



Source : The Energy Security Scenarios, Shell

Sky 1.5 part du principe que la santé et le bien-être public deviennent les objectifs de la société. Dans Sky 1.5, les leçons tirées de la pandémie de COVID-19 se traduisent par un niveau élevé de coopération en vue d'objectifs mutuellement bénéfiques. Cela contribue à ouvrir la voie à une meilleure santé tant pour les habitants de la planète que pour la planète elle-même. Cette approche éclairée permet d'atteindre l'objectif ambitieux de 1,5 °C fixé par l'accord de Paris. Il s'agit d'une décarbonisation accélérée. Waves part du principe que la société donne la priorité à la réparation de l'économie. Cette focalisation sur la richesse relègue au second plan les autres pressions sociétales et environnementales, jusqu'à ce que leur relative négligence provoque des réactions de rejet. Cela incite à prendre des mesures rapides pour lutter contre les émissions mondiales, mais, même si le monde parvient à atteindre la neutralité carbone, il est trop tard pour atteindre l'objectif ambitieux de l'Accord de Paris, qui consiste à limiter le réchauffement climatique moyen à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle. Ce scénario montre une décarbonisation tardive, mais rapide. Islands part du principe que la sécurité devient la priorité. Un regain de nationalisme menace de démanteler l'ordre géopolitique d'après-guerre et la coopération est limitée. Cependant, la concurrence entre les nations entraîne des progrès technologiques. Des innovations sont adoptées, les infrastructures sont renouvelées et, finalement, le monde atteint l'objectif de zéro émission nette. L'objectif de l'accord de Paris n'est pas atteint. La décarbonisation est tardive et lente.

Plus récemment, les scénarios Archipelagos, Surge et Horizon ont été utilisés pour explorer différents futurs du système énergétique, du climat et de la demande en énergie. Ces scénarios ne sont de simples outils de prévision mais bien des démarches

de management stratégique visant à comprendre l'évolution du prix du pétrole, à planifier les investissements ou à s'engager dans la neutralité carbone. En 2025, Shell a même ré-examiné ses scénarios Archipelagos et Horizon en utilisant l'intelligence artificielle.

La prospective selon Total Energies

Dans son *Outlook 2021*, Total Energies a introduit deux principaux scénarios de la transition énergétique, dénommés *Momentum* et *Rupture*. Ces scénarios ont été mis à jour en prenant en compte les tendances mondiales actuelles en matière de neutralité carbone, les considérations sociétales et celles du marché énergétique. Il intègre notamment les ambitions du Scénario *Net Zero Emissions* du WEO (2021) et de l'AIE.

Le scénario *Momentum* suit une approche prospective dont les objectifs ont été définis au niveau national (NDCs) par des puissances économiques majeures comme la Chine, les États-Unis, le Japon et la Corée du Sud et sur la base des stratégies des pays engagés vers la neutralité carbone à horizon 2060. *Momentum* prend également en compte les nouveaux engagements de neutralité carbone à horizon 2050. Dans ce scénario, les limitations de températures se stabilisent aux alentours de 2,2 – 2,4° C par rapport à l'ère préindustrielle. La demande en énergie primaire augmente de + 0,5 % par an. Le gaz naturel et les énergies renouvelables représentent respectivement 28 % et 26 % de la demande mondiale d'énergie primaire.

Le scénario *Rupture* est un scénario construit pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris d'ici 2050, avec une élévation des températures bien inférieure à 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. *Rupture* suppose des avancées technologiques majeures à très grande échelle, une pénétration plus importante des nouveaux vecteurs énergétiques ainsi qu'un engagement et des actions de la part de l'ensemble des pays vers la neutralité carbone à horizon du milieu du siècle. La demande en énergie, concomitante de la croissance de la population mondiale et du développement économique mondial, est en progression dans *Momentum* et *Rupture*. Parallèlement, les émissions baissent dans les deux scénarios par rapport à 2020, particulièrement dans *Momentum*, les vecteurs énergétiques comme l'électricité dans le transport et l'hydrogène contribuant à une décarbonation plus conséquente de l'ensemble des secteurs.

Les deux scénarios s'appuient sur les 7 leviers de transformation du système énergétique mondial, à savoir : l'électrification de la demande finale d'énergie, la décarbonation du système électrique, la production de gaz vert, la mobilité durable (carburants de synthèse et véhicules électriques notamment), une pénétration croissante de l'hydrogène, l'optimisation de la demande de plastiques, la capture et le stockage de CO₂, et enfin l'efficacité énergétique. Dans les deux scénarios, l'interdiction de l'utilisation des véhicules thermiques neufs à l'horizon 2035 et l'interdiction des plastiques à usage à compter de l'horizon 2040, sont prises en compte (dans le scénario *Momentum*, cette interdiction couvre l'ensemble des pays engagés dans la neutralité carbone alors que dans le scénario *Rupture*, elle est généralisée à

l'ensemble des pays du monde en vue de contenir l'évolution de la température à 1, 5°C).

Le scénario énergétique d'Exxon Mobil

L'étude prospective de la compagnie n°1 des Etats-Unis propose une vision d'un *avenir à faible émission en carbone* qui affiche une augmentation de la demande d'énergie fossile à l'horizon 2040. Le pétrole et le gaz naturel restent des sources d'énergie importantes et représentent environ 55% de la consommation mondiale d'énergie actuelle. En 2040, 10 des 13 scénarios évalués confirment que le pétrole et le gaz naturel continueront de représenter plus de 50% de l'énergie mondiale. Dès lors, des investissements dans la production du gaz naturel et de pétrole sont nécessaires pour faire face au déclin de la production et à la hausse de la demande future. Exxon Mobil table sur 20 à 25 milliards de dollars de dépenses par an entre 2022 et 2025 pour alimenter sa croissance, principalement via de nouveaux projets d'exploration de pétrole et de gaz.

En nous basant sur les données de Exxon Mobil présentes dans son *Outlook for Energy* (2021, 2025), nous pouvons présenter les caractéristiques et la démarche prospectiviste de la compagnie pétrolière.

Tout d'abord, son plan stratégique repose sur une évaluation à long terme des tendances économiques (croissance économique, population...), des avancées en matière d'innovation et de technologies, le comportement des consommateurs et des politiques climatiques publiques. L'approche est fondée sur les données disponibles : celles du service World Energy Statistics de l'AIE pour l'énergie, celles de la Banque mondiale et du FMI pour les données économiques, celles des Nations-Unis pour la population). La veille technologique prend plusieurs formes, il s'agit de suivre le prix des panneaux solaires, l'amélioration de batteries, l'évolution des lois et des réglementations... A partir de ces données, Exxon Mobil prévoit la demande de services énergétiques dans 15 secteurs couvrant les besoins en matière de mobilité personnelle, d'énergie résidentielle, de production d'acier, de ciment et de produits chimiques, ainsi que dans de nombreux autres domaines. Elle met ensuite en adéquation cette demande avec plusieurs sources d'énergie, en tenant compte de l'utilisation actuelle et de l'évolution potentielle. Elle prévoit également l'approvisionnement en liquides et en gaz naturel ainsi que les flux commerciaux.

L'évolution de la demande énergétique mondiale suivrait ainsi une tendance haussière linéaire entre 2020-2040 avec une augmentation annuelle moyenne de 4,7 quadrillion BTU³². Dans cette évolution, la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique atteint les 41 quadrillions BTU (à comparer aux 675 quadrillions BTU de

³² Le British Thermal Unit (BTU) est une unité énergétique définie en 1956 qui sert de référence aux États-Unis pour quantifier l'énergie consommée et produite à l'échelle du pays. Cette unité de mesure thermique est également employée en France pour désigner la puissance des petits appareils de climatisation. Un BTU est initialement défini comme la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré Fahrenheit (°F) la température d'une livre anglaise d'eau (près de 454 g), à la pression constante d'une atmosphère. Un BTU est équivalent à près de 1 055 Joules ou 252 calories.

la demande mondiale de l'énergie). Les perspectives de la demande énergétique mondiale progressent allant de 598 quadrillions BTU en 2020 à 716 quadrillions BTU en 2040.

Figure 15 : Evolution de la demande mondiale en Q BTU à l'horizon 2040



Source : Outlook Energy Exxon Mobil (2021)

En revanche, l'offre de l'énergie mondiale suit la même tendance haussière mais pas à la même cadence, passant de 234 quadrillions BTU en 2020 à 303 quadrillions BTU en 2040. Il existerait un déphasage de près de 60% entre l'offre et la demande d'énergie mondiale.

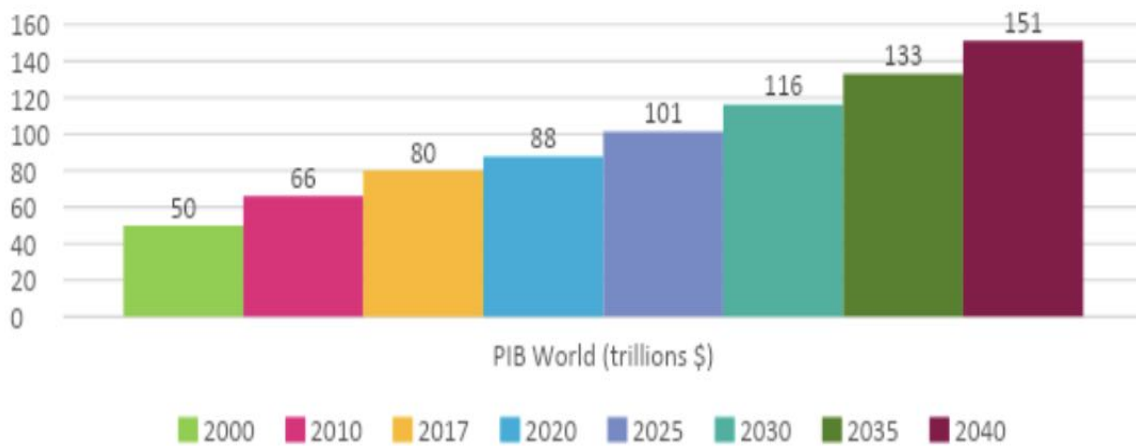
Figure 16 : La production d'énergie dans le monde à l'horizon 2040



Source : Outlook Energy Exxon Mobil (2021)

Cette offre et demande d'énergie évolue dans un contexte où les perspectives du PIB sont en hausse, passant de 101 000 milliards de dollars en 2020 à 151 milliards de dollars en 2040, soit une progression de 50%.

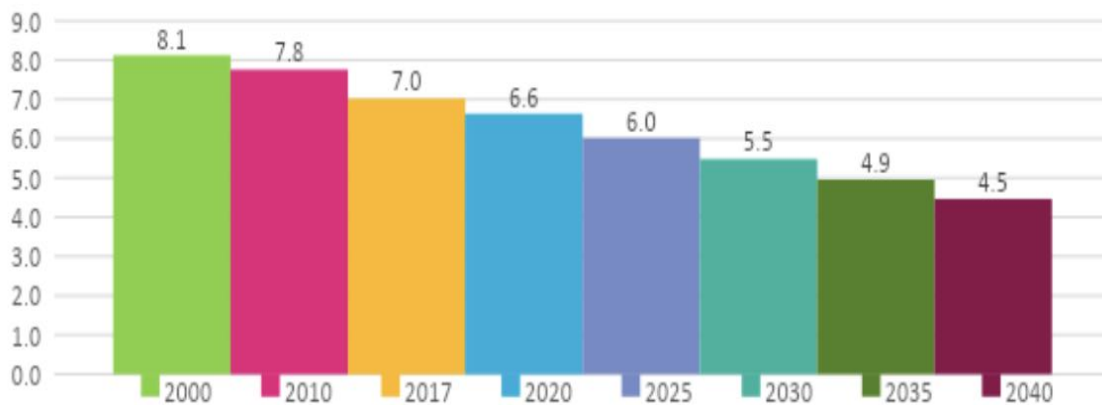
Figure 17 : Evolution du PIB mondial à l'horizon 2040



Source : Outlook Energy Exxon Mobil (2021)

L'intensité énergétique, qui mesure la quantité d'énergie utilisée pour produire une unité de PIB, varie quant à elle de 6,6 (103 BTU/\$) en 2020 à 4,5 (103 BTU/\$) en 2040 soit une baisse de 46% de la consommation d'énergie par PIB/Habitant.

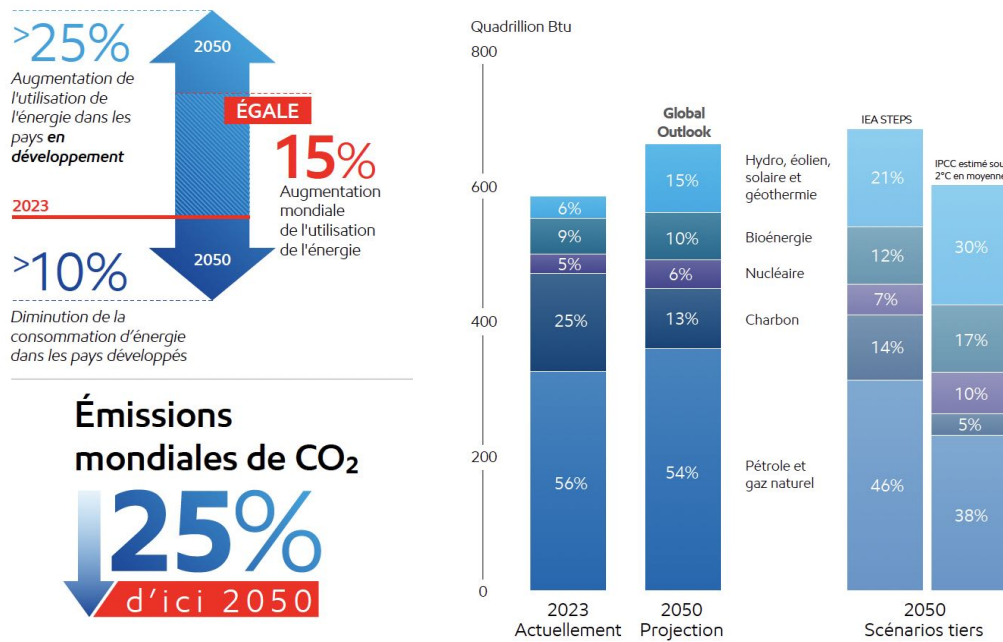
Figure 18 : Intensité énergétique mondiale à l'horizon 2040



Source : Outlook Energy Exxon Mobil (2021)

La combinaison d'une meilleure efficacité énergétique, de plus d'énergie renouvelable et de technologies à faibles émissions (captage et stockage de CO₂, hydrogène et biocarburants) permet une baisse des émissions de CO₂ de 25%. Et ce malgré une augmentation de la consommation d'énergie de 15% (la majeure partie de cette augmentation doit favoriser la croissance économique des pays en développement tout en permettant une diminution de la consommation d'énergie des pays développés). Selon Exxonmobil, le monde serait donc "à un moment charnière de son histoire" (Outlook Energy, 2025, p. 2). Les émissions de CO₂ vont bien diminuer, le mix énergétique mondial verra sa consommation d'électricité décarbonée augmenter, mais le pétrole et le gaz continuent de rester des sources énergétiques vitales (ils représentent encore 50% du mix énergétique mondial en 2050).

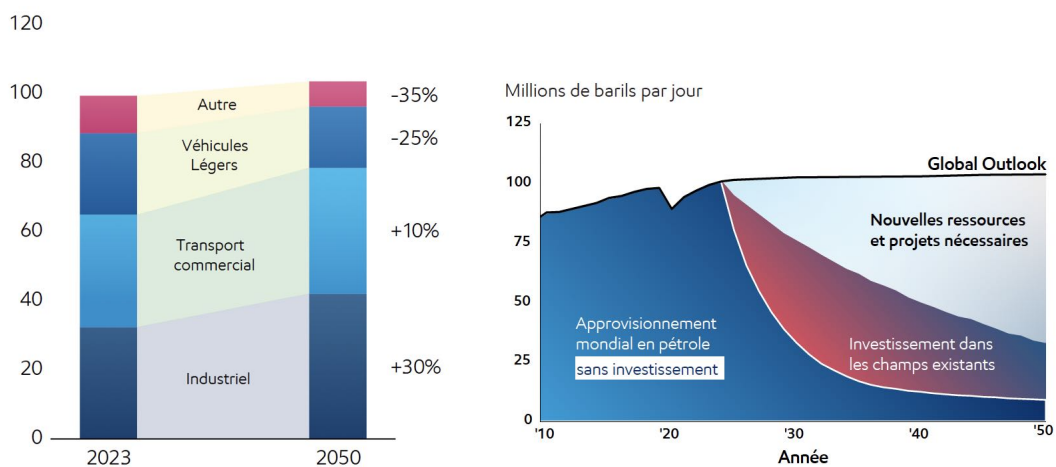
Figure 19 : Hausse de la consommation d'énergie et mix énergétique mondial



Source : Outlook Energy Exxon Mobil (2025, p. 2)

La mobilisation par ExxonMobil des analyses de sensibilité pour mieux comprendre comment les variations de ses hypothèses prévisionnelles pourraient affecter l'offre et la demande énergétiques prévues, lui permet de donner plus de robustesse au mix énergétique reposant sur un couple pétrole - gaz fort. En effet, la compagnie pétrolière rappelle que si toutes les voitures vendues dans le monde en 2035 étaient électriques, la demande de pétrole en 2050 atteindrait encore 85 millions de barils par jour, soit le même niveau qu'en 2010. La demande de pétrole devrait donc se stabiliser à partir de 2030 autour des 100 millions de barils par jour jusqu'en 2050. Pour ce faire, les scénarios sont sans appel, il faut continuer à investir dans l'exploration et la découverte de nouveaux gisements d'énergie fossile.

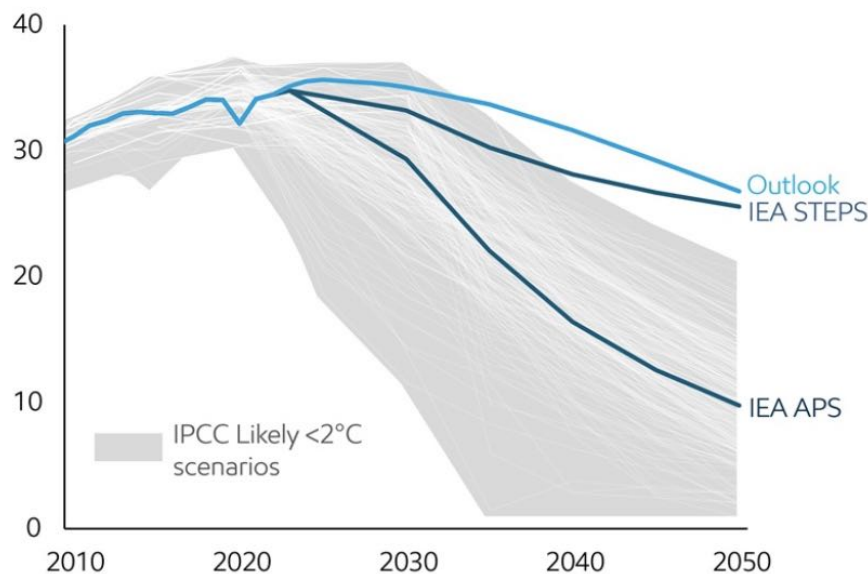
Figure 20 : Demande de pétrole et nouveaux gisements



Source : Outlook Energy Exxon Mobil (2025, p. 3)

Par cette analyse, Exxonmobil trace une politique stratégique d'investissement orientée vers le fossile à l'horizon 2040 selon la conjoncture économique caractérisée par une augmentation proportionnelle de la population, de la demande et de l'offre mondiale de l'énergie³³. Le scénario des émissions de CO2 est proche du scénario STEPS (Stated Energy Policies Scenario) et très éloigné du scénario APS (Announced Pledges Scenario) de l'AIE.

Figure 21 : Chemin temporel des émissions globales de CO2



Source : Outlook Energy ExxonMobil (2024), IEA (2024), IPPC (AR6)

Les scénarios de prise en compte de l'incertitude de BP

Dans son rapport *Energy Outlook 2025*, BP utilise deux scénarios – Trajectoire actuelle et Moins de 2 °C – pour examiner une série de résultats possibles pour le système énergétique mondial à l'horizon 2050³⁴. Ces scénarios explorent les principales incertitudes qui sous-tendent la transition énergétique mondiale. Ils permettent de comprendre quelles tendances sont les plus susceptibles de se produire dans le cadre d'une série d'hypothèses différentes, et lesquelles sont les plus sensibles à la vitesse et à la forme de la transition énergétique. Les scénarios prennent en compte les émissions de carbone liées à la production et à l'utilisation d'énergie, à la plupart des processus industriels non liés à l'énergie, au torchage du gaz naturel et aux émissions de méthane provenant de la production, du transport et de la distribution de combustibles fossiles, ainsi qu'à la combustion incomplète de la bioénergie traditionnelle.

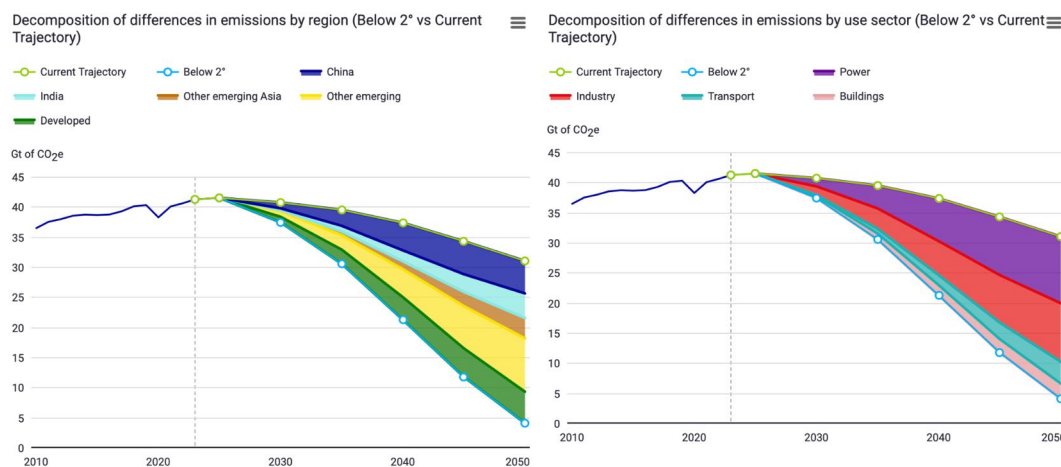
³³ Au vu des différents scénarios, l'analyse de ExxonMobil nous semble la plus réaliste. D'une part, elle confirme l'idée que la baisse des émissions de CO2 sera conséquente mais pas suffisante pour atteindre la neutralité carbone. D'autre part, elle table sur une présence forte du pétrole et du gaz dans le mix énergétique (près de 50%).

³⁴ <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/scenarios.html>

Le scénario « trajectoire actuelle » a été conçu pour refléter la voie générale suivie par le système énergétique mondial. Il accorde une grande importance aux politiques climatiques et énergétiques actuellement en vigueur, ainsi qu'aux tendances et évolutions récentes de ces politiques. Il accorde également une certaine place aux objectifs et engagements mondiaux en matière de décarbonisation future, tout en reconnaissant les défis liés à la réalisation de certains de ces objectifs et engagements. Dans le scénario « trajectoire actuelle », les émissions d'équivalent CO₂ (CO₂e) restent globalement stables autour de leurs niveaux actuels pendant le reste de la décennie, avant de diminuer progressivement au cours des années 2030 et 2040. Les émissions baissent d'environ un quart par rapport à leur niveau de 2023 d'ici 2050.

Le scénario "moins de 2°C" explore comment différents éléments du système énergétique pourraient évoluer dans un scénario où le monde parviendrait à réduire beaucoup plus considérablement ses émissions. Dans ce scénario, les émissions nettes diminuent d'environ 90 % par rapport à leur niveau de 2023 d'ici 2050. Below 2° suppose un durcissement significatif des politiques climatiques ainsi que des changements dans les comportements et les préférences de la société, qui, ensemble, favorisent une adoption plus rapide des énergies à faible teneur en carbone et des gains plus rapides en matière d'efficacité énergétique.

Figure 22 : Emissions of GhG by region and by use sector



Source : Energy Outlook 2025, BP

Il n'est pas possible de déduire directement l'augmentation des températures moyennes mondiales en 2100 impliquée par ces scénarios, étant donné qu'ils ne s'étendent que jusqu'en 2050 et ne modélisent pas toutes les formes d'émissions de gaz à effet de serre. Il est toutefois possible de faire des déductions indirectes en comparant les émissions cumulées de carbone pour la période 2015-2050 avec les fourchettes d'émissions correspondantes dans les scénarios inclus dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC. La transition plus rapide dans le scénario Moins 2° par rapport à la trajectoire actuelle est largement due à une décarbonisation plus rapide dans les économies émergentes et, du point de vue de la consommation d'énergie, à une

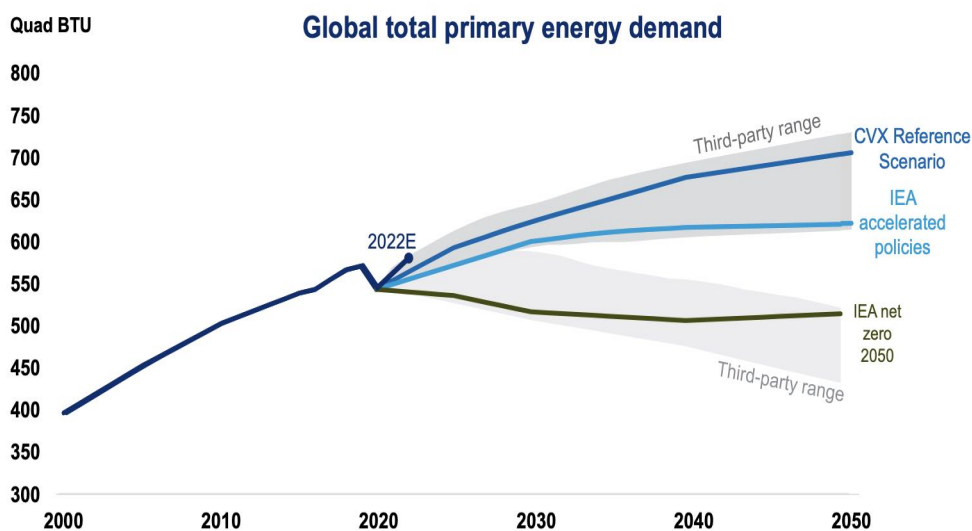
réduction plus rapide des émissions dans la production d'électricité et les processus industriels. Ces scénarios peuvent être utilisés pour explorer les changements supplémentaires clés qui pourraient aider le système énergétique mondial à passer de sa trajectoire actuelle à une voie de décarbonisation plus rapide et plus profonde.

Les scénarios de la compagnie CHEVRON

Dans un contexte où le scénario « zéro émission nette » de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) décrit la voie à suivre par le secteur énergétique pour atteindre l'objectif de neutralité carbone et conclut qu'aucun nouvel investissement dans des projets d'approvisionnement en énergies fossiles n'est nécessaire et que la baisse du prix du pétrole est inéluctable (36 dollars le baril en 2030 et 24 dollars le baril en 2050), il est intéressant de regarder le Chevron Strategic Outlook, présenté en avril 2023 par son économiste en chef, Rob Schwiers.

Deuxième compagnie des Etats-Unis, Chevron mise sur trois éléments de la transition énergétique : (1) le maintien de la prospérité économique, (2) la sécurité énergétique (en diversifiant ses actifs) et (3) la protection environnementale (via la production d'énergies renouvelables). A l'image d'ExxonMobil, Chevron prévoit un scénario (CVX référence) quelque supérieur à ceux de l'AIE (Accelerated Policies et Net Zero). La demande d'énergie primaire devrait continuer à augmenter.

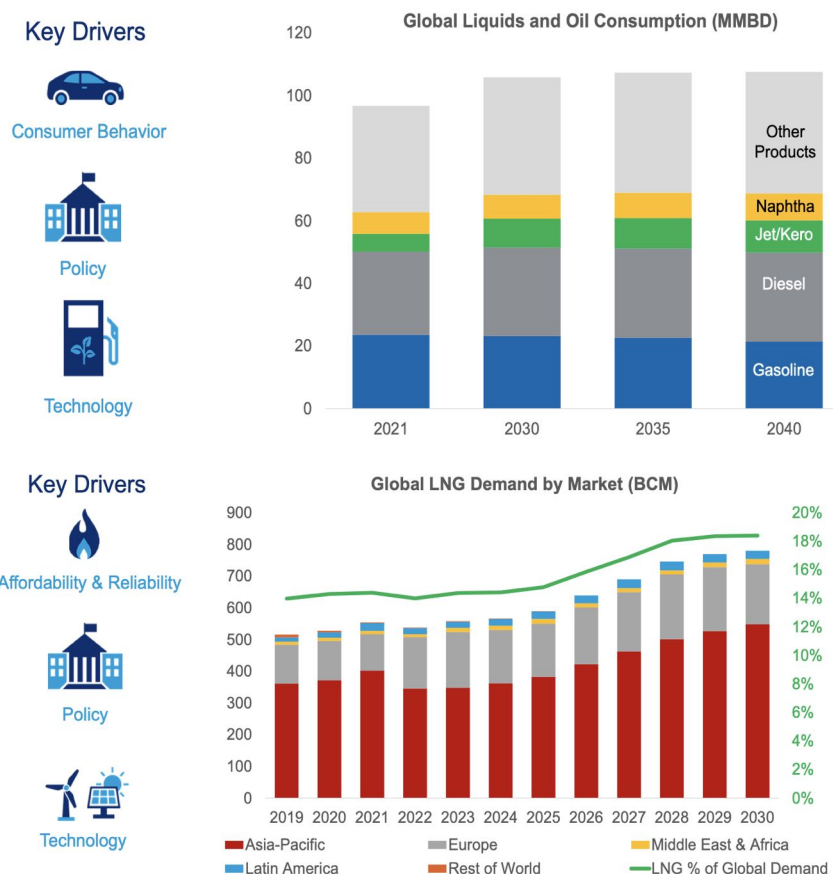
Figure 23 : Les scénarios de demande d'énergie



Source : Chevron (2023)

On retrouve une démarche similaire à celle d'ExxonMobil, une tendance de fond au maintien des énergies fossiles (demande de diesel, kérosène, produits chimiques) et une montée en puissance du GNL (gaz liquéfié), avec des clés de lecture portées par le comportement des consommateurs, les politiques publiques et les avancées technologiques.

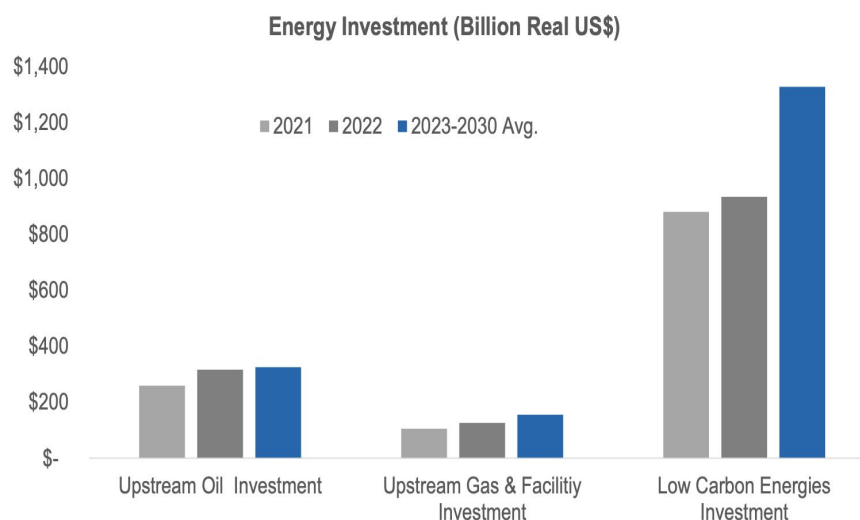
Figure 24 : Demande de pétrole et de GNL



Source : Chevron (2023)

Si les énergies renouvelables constituent les investissements nécessaires de la future chaîne de valeur de l'énergie, il sera nécessaire de continuer à investir dans l'exploration et l'extraction de nouveaux gisements de gaz et de pétrole.

Figure 25 : Les investissements dans le pétrole, le gaz et les énergies renouvelables



Source : Chevron (2023)

La stratégie de Chevron est de combiner d'importants investissements dans les renouvelables (cible d'intensité carbone, gestion du méthane, techniques de capture du carbone, hydrogène) avec des rendements élevés des actifs financiers (gestion de portefeuille, logique de coût, croissance du secteur énergétique traditionnel, distribution de dividendes aux actionnaires). Les investissements sont donc assujettis à une certaine discipline (amélioration des marges, efficacité du capital, détermination du taux de croissance annuel composé - TCAC - permettant de calculer le rendement annuel moyen des investissements).

Figure 26 : Investissements et croissance du capital chez Chevron



Source : Chevron (2023)

Les deux cibles de Chevron sont la réduction de l'intensité carbone (réduction de 35% de l'intensité carbone sur les activités amont - extraction pour 2028, Zéro net émission sur les scopes 1 et 2 pour 2050, réduction de 5% du scope 3 pour 2028) et la croissance des énergies vertes (séquestration du CO₂ à hauteur de 25 millions de tonnes par an, production d'hydrogène à hauteur de 150 kilos tonnes par an, production de biocarburants).

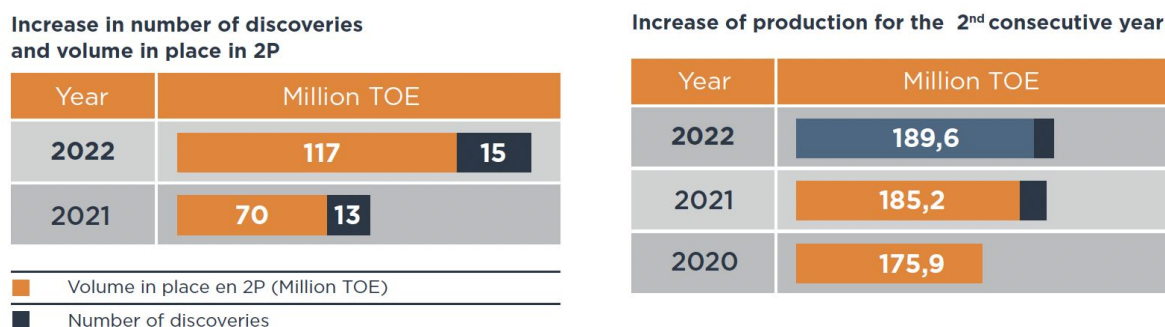
La stratégie énergétique de Sonatrach

Sonatrach (fondée en 1963) est la première entreprise pétrolière et gazière d'Algérie et l'une des plus grandes en Afrique. Son établissement a marqué une étape cruciale dans la nationalisation des ressources énergétiques du pays, permettant à l'Algérie de contrôler ses propres richesses naturelles. Au fil des décennies, Sonatrach a évolué pour devenir un acteur clé non seulement dans l'économie nationale, mais aussi sur la scène internationale. Sonatrach, la compagnie nationale algérienne des hydrocarbures, acteur clé de l'industrie énergétique en Afrique, représente environ 30% de la production totale de pétrole et de gaz sur le continent.

En 2023, elle a enregistré d'excellents résultats, avec un chiffre d'affaires de 21 milliards de dollars à l'exportation pour les cinq premiers mois de l'année. La production primaire d'hydrocarbures a atteint 80 millions de tonnes équivalents pétrole (TEP) en mai 2023, représentant une augmentation de 2 % par rapport à 2022.

De plus, 68 millions de TEP ont été commercialisés, dont 38 millions exportés (Sonatrach, 2022).

Figure 27 : Hausse du niveau de production et de découvertes de gisements



Source : Annual Report (Sonatrach, 2022)

En date du 21 juillet 2024, Sonatrach a dévoilé sa stratégie de neutralité carbone pour répondre aux défis climatiques. On y trouve un ensemble de mesures et des actions, dont la réduction des émissions des gaz à effet de serre, l'augmentation du niveau d'intégration des énergies renouvelables, ainsi que le développement des solutions de séquestration naturelle et technologique du carbone. Cinq axes constituent les principaux leviers de sa stratégie énergétique.

Premier axe : Équilibre entre émissions et absorptions

Il s'agit d'atteindre un équilibre entre les émissions de GES et les absorptions par des puits de carbone d'ici la seconde moitié du siècle. Avec un budget de à 1 milliard de dollars, Sonatrach a programmé avec la Direction générale des forêts (DGF), la plantation de 10 millions d'arbustes pour capter le carbone pour arriver à terme de plus 420 millions d'arbres sur 560 000 hectares

Deuxième axe : Réduction des Émissions de gaz torchés

L'Algérie figure parmi les pays ayant des niveaux significatifs de gaz torchés. Durant l'année 2023, le volume global des gaz torchés au niveau des activités opérationnelles de Sonatrach était de 2,72 milliards de m³. L'entreprise anticipe une baisse de 28% de sa production de gaz torchés au cours des années (2020-2024), soit un volume de gaz torché évité de 1,06 milliards de m³. L'année 2023 a également été marquée par la généralisation du dispositif au niveau des activités, ainsi que la réalisation de la base de référence des émissions GES de l'entreprise, le lancement des actions d'amélioration de la granularité et de la qualité des données pour les émissions et les sources de GES. Le processus sera renforcé, par l'introduction progressive des dispositifs de mesure et de monitoring continus des émissions des gaz à effet de serre (GES), basés sur les approches ascendantes (capteurs, caméras) et descendantes (satellites, aircraft, drones.)

Par ailleurs, l'Algérie est impliquée, à travers sa compagnie pétrolière Sonatrach, dans le partenariat mondial pour la réduction du torchage et du méthane (GFMR), qui vise

à mettre fin au torchage systématique et à réduire les émissions de méthane du secteur pétrolier et gazier à un niveau proche de zéro d'ici 2030. Dans ce cadre, Sonatrach a mené des efforts importants pour réduire ses gaz torchés notamment au niveau de plusieurs champs pétroliers dans l'amont pétrolier et cela depuis déjà près de 30 ans. La réalisation d'unités de récupération du gaz torché a permis de ramener le taux de gaz brûlé de 5,43% en 2020 à 3,19% en 2024.

Pour les émissions fugitives de méthane, Sonatrach a retenu un objectif de réduction de ce gaz à un niveau proche de zéro d'ici 2030. Pour cela, elle a procédé à la signature d'une convention cadre avec l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) pour identifier par satellite les fuites de méthane et mesurer les quantités de CO₂ émises.

Troisième axe : Captage et Séquestration du CO₂

Sonatrach a développé des projets de captage et de séquestration du carbone, en identifiant des sites adaptés pour stocker le CO₂ dans des réservoirs. La première expérience mondiale de séquestration du carbone a été réalisée par Sonatrach en 2004 sur son site Krechba (3,8 millions de tonnes ont été capturées).

Quatrième axe : Energie Renouvelables

Sonatrach intègre davantage d'énergies renouvelables dans son mix énergétique tout en développant des filières pour les carburants bas carbone et l'hydrogène vert, en visant la couverture d'ici 2030 de 80% des besoins énergétiques de ses sites pétroliers par des centrales solaires. L'objectif est de réduire, de façon responsable et durable, la consommation d'hydrocarbures sur site et les émissions de gaz à effet de serre. Le groupe compte se doter à terme, d'une capacité de production de l'ordre de 1,3 gigawatts. Via cette contribution au programme de neutralité carbone de l'Algérie, Sonatrach permet de réaliser une économie de près de 1.6 milliards de m³ de gaz destiné à la vente à l'horizon 2040.

Cinquième axe : l'efficacité énergétique

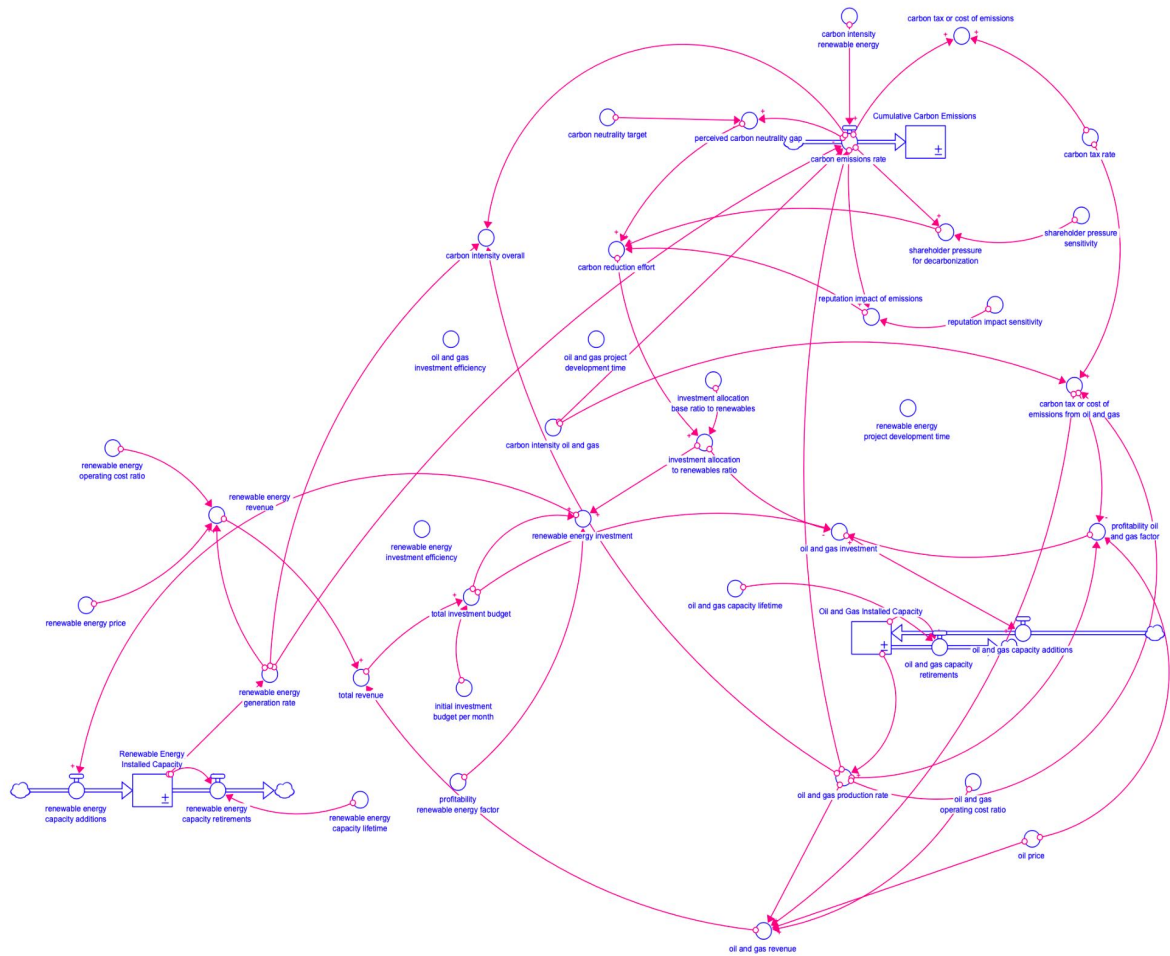
Un programme d'audits énergétiques est mis en place pour améliorer l'efficacité des installations, contribuant ainsi à la réduction des consommations. Environ 90% des sites industriels de Sonatrach ont déjà été audités dans le cadre de l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Un exercice de modélisation quantitative

A partir des indicateurs mentionnés précédemment (investissements dans les énergies renouvelables, investissements dans le pétrole et le gaz, capacités installées, investissements dans de nouveaux projets, revenus du pétrole, du gaz et des énergies renouvelables, intensité carbone, objectifs intermédiaires) et des exercices de scénarisation des compagnies pétrolières (BP, Chevron, Exxon Mobil, Shell, Total

Energies³⁵), nous avons cherché à produire un diagramme stock - flux afin d'appréhender l'objectif de neutralité carbone. Réalisé sous Stella, ce modèle en dynamique des systèmes (Sterman, 2000) élargit la structure initiale en introduisant plusieurs nouvelles variables et relations afin de simuler la dynamique complexe des compagnies pétrolières qui s'engagent dans la neutralité carbone. L'objectif de cet exercice est de boucler les boucles de rétroaction en se concentrant sur les décisions d'investissements, les capacités, les revenus et les émissions carbone.

Figure 28 : Le modèle Énergétique

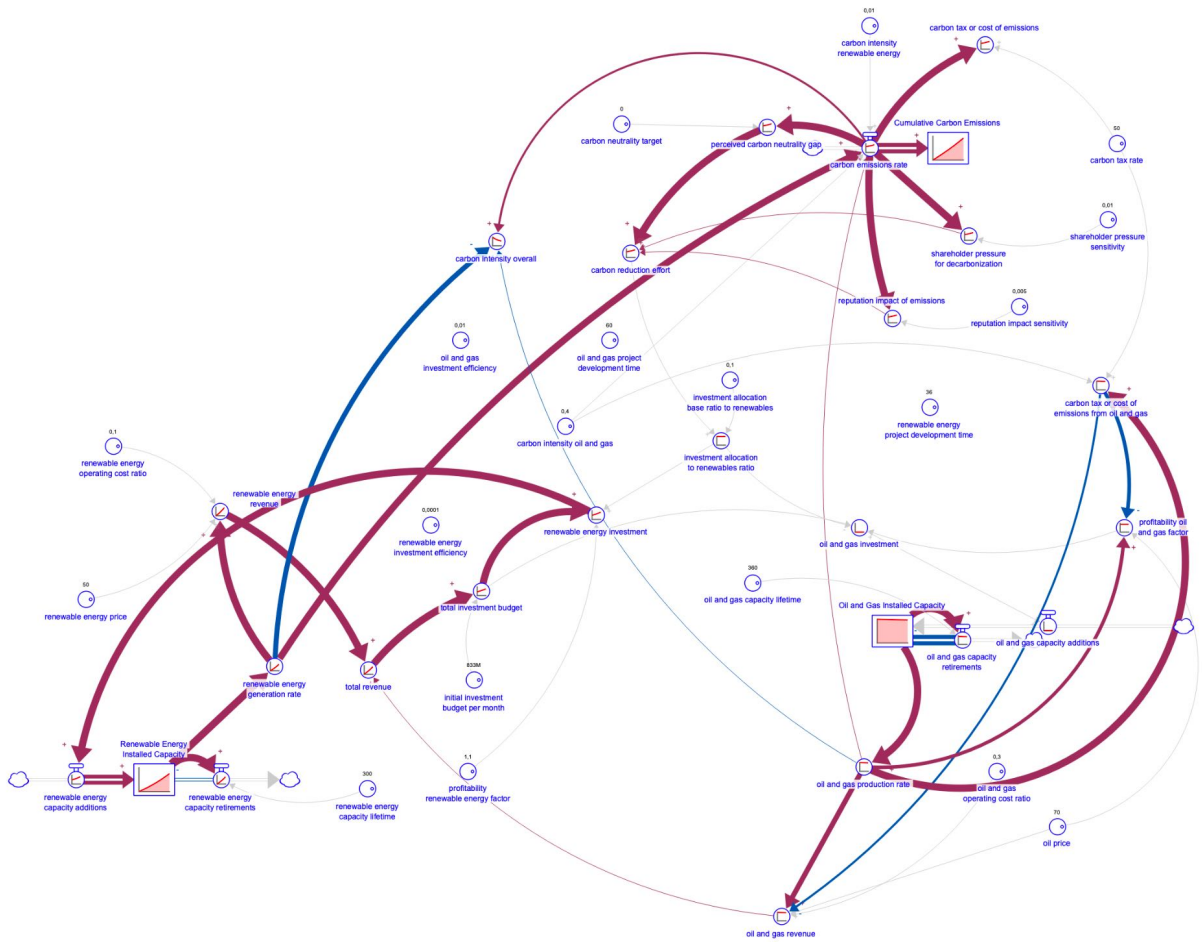


Source : Les auteurs

La simulation du modèle (voir modèle en annexe) permet d'identifier les dynamiques en action, c'est-à-dire les boucles de rétroaction positives ou/et négatives au sein du système neutralité carbone.

³⁵ Compte tenu du particularisme de la société Sonatrach, nous avons choisi de réaliser un modèle différent qui ne sera pas présenté ici, mais fera l'objet d'une présentation (6 novembre 2025) lors des prochains séminaires du CERDI.

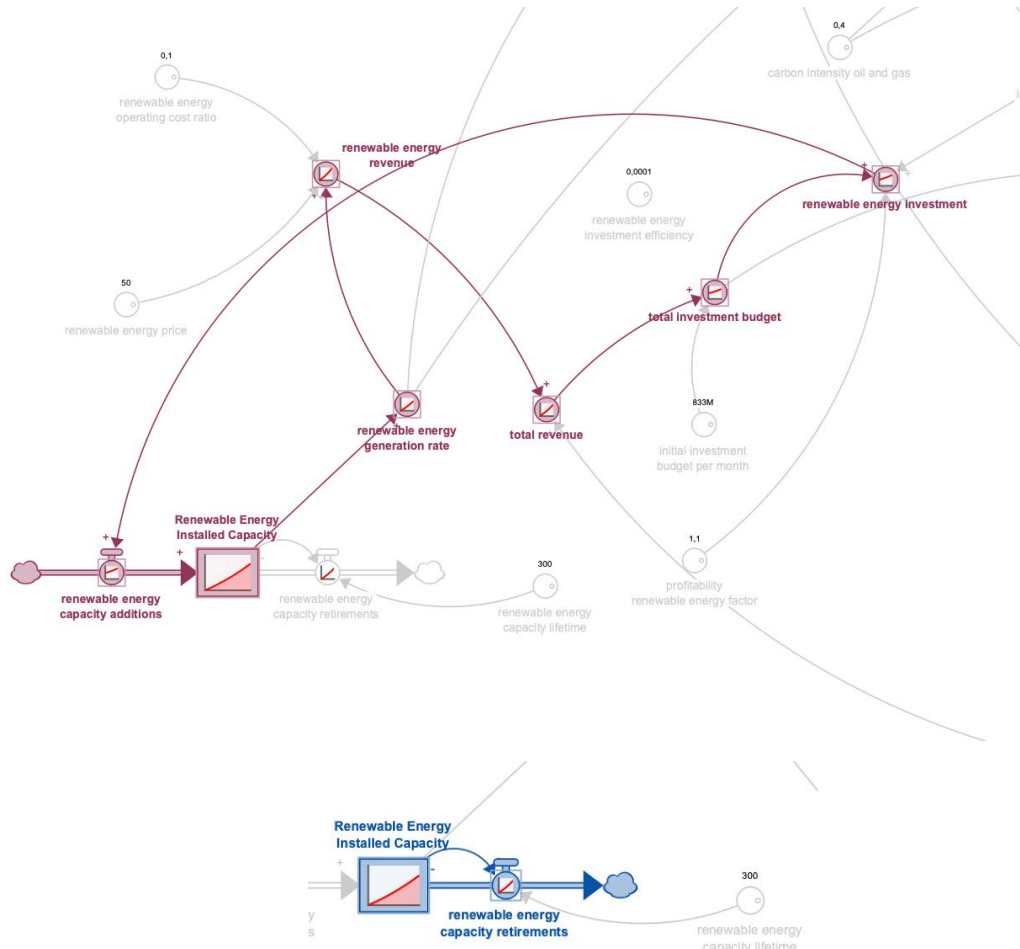
Figure 29 : La dynamique de la neutralité carbone



Source : Les auteurs

La boucle de rétroaction renforçante (R1) a été établie autour des investissements dans les énergies renouvelables. L'augmentation de ces investissements entraîne une hausse des capacités en énergies renouvelables, qui accroît la capacité installée en énergie renouvelable. Cela stimule le taux de production des énergies renouvelables. La hausse des revenus des énergies renouvelables contribue au revenu total (bénéfique) qui augmente ensuite les dépenses d'investissement. Ce qui permet d'investir davantage dans les énergies renouvelables. Ceci crée un archétype de "Succès pour la performance" dans lequel le succès initial dans le domaine des énergies renouvelables peut stimuler une croissance supplémentaire.

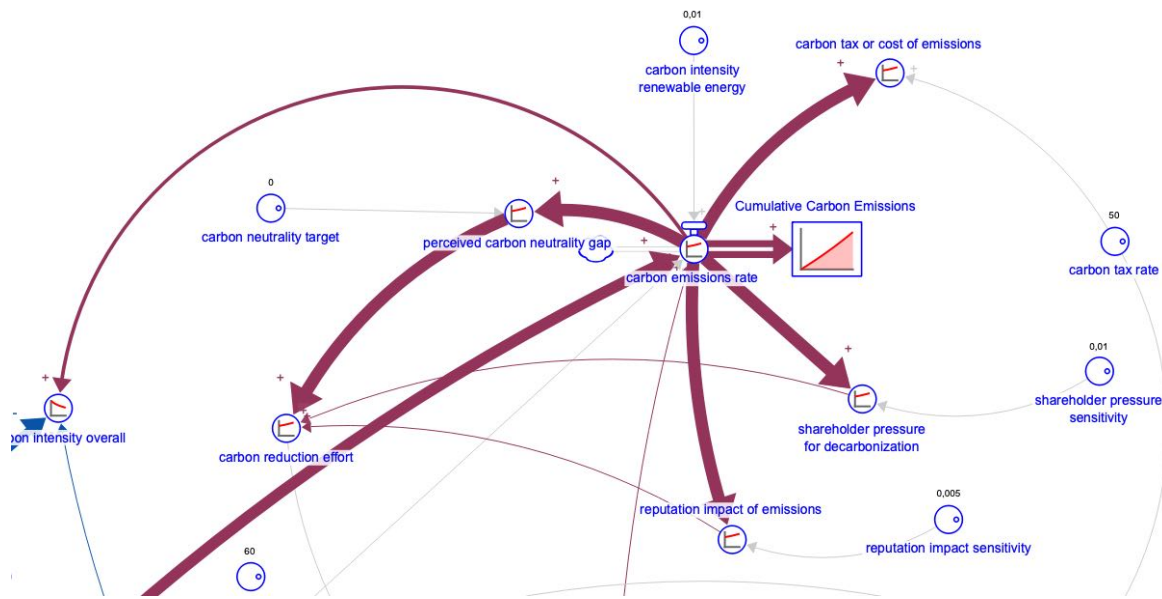
Figure 30 : La boucle R1 des énergies renouvelables



Source : Les auteurs

Une boucle de rétroaction d'équilibre (B1) introduit l'objectif de neutralité carbone. Le taux d'émissions des GES introduit un écart de neutralité carbone perçue par rapport à l'objectif de neutralité carbone. Cet écart, associé à la pression des actionnaires en faveur de la décarbonisation et à l'impact des émissions sur la réputation, stimule les efforts de réduction des émissions de carbone. Ces efforts augmentent le ratio d'allocation des investissements aux énergies renouvelables, ce qui entraîne un transfert de fonds vers les investissements dans les énergies renouvelables. À mesure que la capacité renouvelable augmente et produit davantage d'énergie propre, elle réduit le taux d'émissions de carbone, comblant ainsi l'écart de neutralité carbone perçue. Cela représente un archétype de « solutions qui échouent » si l'effort est insuffisant, ou un « transfert de la charge » si l'accent est mis uniquement sur les énergies renouvelables sans s'attaquer au déclin des combustibles fossiles.

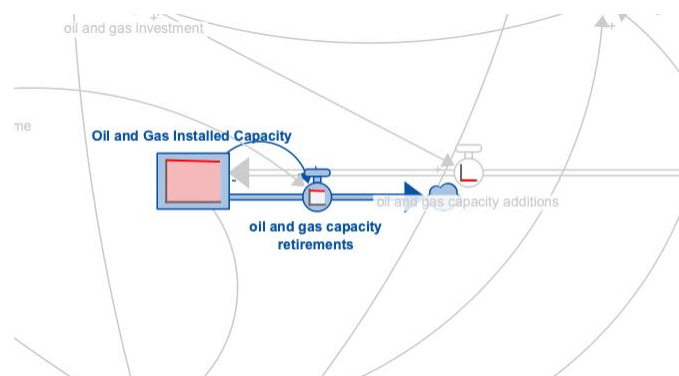
Figure 31 : La boucle B1 de la neutralité carbone



Source : Les auteurs

Une autre boucle de rétroaction d'équilibrage (B2) se concentre sur le déclin des investissements dans les combustibles fossiles en raison des coûts du carbone. Un taux d'émissions de carbone élevé entraîne une augmentation de la taxe carbone ou du coût des émissions, ce qui a un impact particulier sur la taxe carbone ou le coût des émissions provenant du pétrole et du gaz. Cela réduit le facteur de rentabilité du pétrole et du gaz, rendant les investissements dans le pétrole et le gaz moins attractifs. La réduction des investissements entraîne une diminution des ajouts de capacité pétrolière et gazière, ce qui finit par réduire la capacité installée pétrolière et gazière et le taux de production pétrolière et gazière, ce qui abaisse ensuite le taux d'émissions de carbone. Cette boucle agit comme un mécanisme de « limites à la croissance » pour les opérations liées aux combustibles fossiles, où les coûts externes limitent l'expansion.

Figure 32 : La boucle B2 du déclin des investissements dans le pétrole et le gaz



Source : Les auteurs

Les objectifs intermédiaires sont implicitement modélisés à travers les paramètres (objectif de neutralité carbone) et (écart perçu en matière de neutralité carbone), qui influencent directement le paramètre effort de réduction des émissions de carbone et, par conséquent, l'allocation des investissements. Les revenus provenant du pétrole/gaz et des énergies renouvelables sont désormais calculés de manière explicite et intégrés au budget d'investissement global, créant ainsi un lien dynamique entre la performance financière et l'orientation stratégique. L'intensité carbone est utilisée pour calculer les émissions liées à la production, fournissant ainsi une mesure directe de l'impact environnemental.

Au-delà du paramétrage du modèle (prix du baril de pétrole fixé à 70 \$) et de son calibrage, les résultats tendent à souligner que même avec des investissements en énergies renouvelables très élevés, l'objectif de neutralité carbone pour 2050 devra s'étendre sur une période beaucoup plus longue (2050 à 2070 ?), voire pourrait très vite être irréaliste, compte tenu des stratégies des compagnies pétrolières. Rappelons que les énergies fossiles dominent encore largement le mix énergétique mondial (80% selon les *chiffres clés de l'énergie*, 2024). Leur part a reculé depuis 1980 (5 points) toutefois il reste encore beaucoup de chemins à faire pour arriver à une neutralité carbone. Les compagnies pétrolières soufflent à la fois le chaud et le froid sur la transition énergétique. D'un côté, elles s'appuient sur la neutralité carbone pour diversifier leurs sources de revenus et répondre aux pressions des gouvernements et des ONG, de l'autre, elles cèdent très vite aux sirènes de la rentabilité financière lorsqu'elles peuvent satisfaire les attentes de leurs actionnaires et des objectifs de performance financière. La stratégie pourrait dès lors consister à vendre entre 50 et 75% de ses actifs renouvelables une fois que ceux-ci atteignent leur date de retour sur investissement (date de mise à jour commerciale) et qu'ils ne sont plus risqués. Au final, l'entrée dans les renouvelables serait une stratégie de maximisation du portefeuille de valeurs et de gestion des risques. En mai 2025, Total Energies a signé un accord de vente avec HitecVision (société d'investissement norvégienne) pour la session de 50% de Polska Grupa Biogazowa (PGB), valorisée à 190 millions d'euros. Avec 20 unités en opération et une capacité de production de plus de 450 GWh de biométhane équivalent, PGB est le leader du biogaz en Pologne. En septembre 2025, Total Energies a cédé la moitié d'un portefeuille composé de centrales solaires en Amérique du Nord (Etats-Unis) à un fonds assurance géré par la société d'investissement KKR. Valorisée à près de 950 millions de dollars, la transaction porte sur 6 centrales solaires représentant une capacité totale de 1,3 gigawatt, ainsi que 41 installations de production totalisant 140 mégawatts.

Conclusion

Dans un contexte d'urgence climatique (émissions de GES) et de raréfaction des matières premières, les Etats comme les acteurs du secteur énergétique se livrent régulièrement au jeu des scénarios. Il s'agit de trouver les meilleures trajectoires pour atteindre la neutralité carbone et s'engager dans une véritable transition énergétique. Il existe des divergences importantes entre les visions des Etats et des agences internationales qui prônent la sortie des énergies fossiles, et les compagnies pétrolières et gazières qui entrevoient encore de formidables plus-values à faire sur le pétrole et le gaz. Mais tous les acteurs s'accordent à dire qu'il est nécessaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de considérer le système énergétique dans sa globalité en prenant en compte la dimension sociale (les usages énergétiques significatifs, les organisations, la gouvernance, les parties prenantes, ainsi que des inégalités d'accès, de la précarité), géopolitique (conflits et intérêts géopolitiques), la environnementale (facteurs de pollution, influence des conditions climatiques sur l'approvisionnement et la sécurité énergétique), culturelle (comportement, mode de vie), technologique (place des brevets et des innovations) et économique (croissance du PIB, prix du pétrole, réserves de fossiles...) de l'énergie

Pour de nombreux acteurs du secteur énergétique, et notamment les compagnies pétrolières et gazières, la technologie représente la clé d'une transition réussie, il s'agit à la fois de faire preuve d'anticipation (imaginer les futurs possibles), de se préparer aux nouveaux métiers associés aux énergies renouvelables, de prôner une utilisation sobre mais efficiente de l'énergie, d'accompagner juridiquement ceux qui s'engagent dans la neutralité carbone...

La transition énergétique est à la fois complexe et systémique. Complexe car elle ne conduit pas à un mix énergétique préalablement défini. Systémique car elle oblige à dépasser les représentations sectorielles afin d'embrasser toutes les interdépendances de l'énergie avec d'autres enjeux de société (mobilité, logement, gestion des déchets, alimentation...). Pour faire face à cette situation d'incertitude et mobiliser les forces vives, les Etats ont rédigé des feuilles de route (nationales) dans lesquelles toutes les actions et les objectifs intermédiaires sont chiffrés. Ces feuilles de route s'appuient sur des scénarios (la transition énergétique n'est pas un long fleuve tranquille) pour réduire significativement les émissions de CO₂ et atteindre l'objectif de neutralité carbone pour 2050. Les ingrédients de ce remède de cheval sont désormais bien connus : investissements massifs dans les énergies renouvelables, réduction de l'utilisation des énergies fossiles, essor des biocarburants, nouvelles technologies visant à capturer et séquestrer le CO₂, développement de l'hydrogène...

Les compagnies pétrolières et gazières occupent une place centrale dans ces feuilles de route, même si elles ne sont pas directement mentionnées par les Etats. Par leurs activités de prospection, d'extraction, de logistique et de vente de produits pétroliers et gaziers, elles peuvent être à la fois des catalyseurs ou des freins de la transition

énergétique. L'analyse des scénarios et des stratégies de six compagnies pétrolières et gazières (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Total Energies et Sonatrach) souligne à la fois les investissements massifs réalisés dans les énergies renouvelables, l'exploitation des biocarburants et de l'hydrogène ou encore les techniques de capture du CO₂. A ce titre, les compagnies pétrolières s'inscrivent dans une démarche de transition énergétique. Toutefois, une analyse plus fine de leur plan stratégique montre très clairement une volonté de continuer à extraire le maximum de pétrole et de gaz du sous-sol (via un partenariat ou des achats agressifs d'entreprises). Depuis 10 ans, les compagnies multiplient les projets d'extraction de ressources naturelles et investissent des sommes colossales dans les gisements pétroliers (allant de ce fait à l'encontre des prescriptions de l'Agence Internationale de l'énergie, 2024). Elles ont également cherché à optimiser la rentabilité de leur portefeuille d'actifs en diversifiant les sources de rentabilité et les risques. De ce point de vue, les investissements dans les énergies renouvelables s'inscrivent dans une dynamique de rentabilité de court et moyen terme (une fois les actifs amortis et sans risques, c'est une revente avec plus-values) mais pas dans un cadre de changement de paradigme. Un tel positionnement nous oblige à poser un autre regard sur les scénarios prospectifs des compagnies pétrolières et gazières. Le scénario Zéro nette émission semble s'éloigner de plus en plus. Les énergies fossiles représentant encore près de 80% des énergies totales consommées, pourraient infléchir leur course mais pas disparaître du paysage énergétique. Les scénarios de Chevron et d'Exxon Mobil qui assurent qu'il faudra encore compter sur les énergies fossiles en 2050, tablent encore sur près de 50% des énergies fossiles dans le mix énergétique. Les pressions des Etats et des ONG pourraient amener certaines compagnies à revoir leur copie, toutefois, la réalité montre plutôt des coups d'arrêts (notamment en 2025) dans la stratégie du tout renouvelable. L'idée d'une neutralité carbone n'est donc pas à écarter pour 2050, mais il faudra compter sur les compagnies pétrolières et gazières pour souffler le chaud et le froid sur la transition énergétique.

Références bibliographiques

- ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Synthèse*.
- ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Compressé*.
- ADEME (2013). *Les scénarios de transition énergétique 2030 - 2050*.
- ANCEL F. (2018). *Perspectives Energies 2050*. Connaissance des Énergies, Editions.
- ANSARI D., HOLZ F., AL KUHLANI H. (2019). *Energy Outlooks Compared: Global and Regional Insights*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin.
- AOUN M.C (2018), *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, Connaissances des Énergies, 15-18.
- APPERT O. (2018), *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, Connaissances des Energies, 19-22.

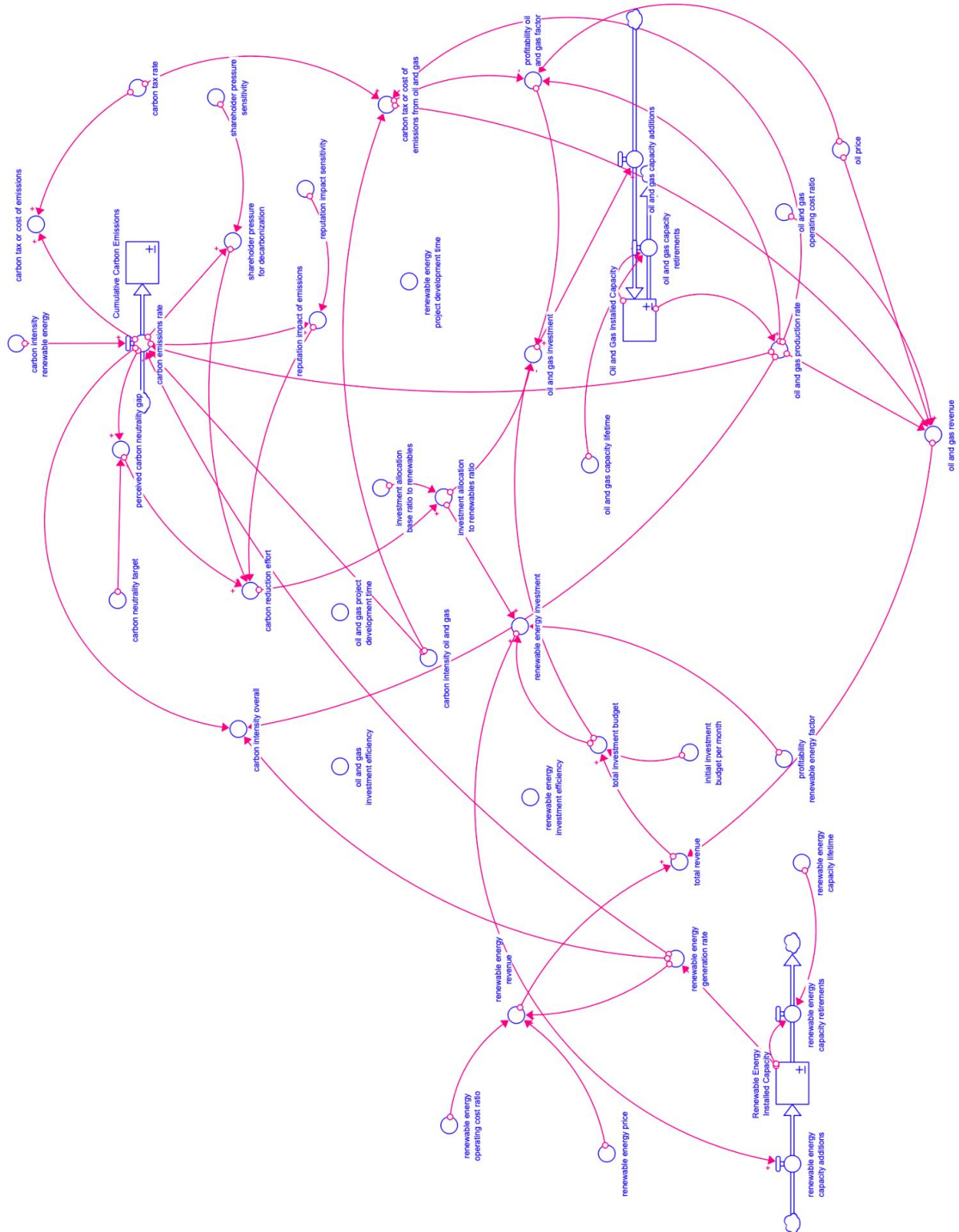
- AISSAOUI A. (2001), *Algeria: The Political Economy of Oil and Gas*. Oxford University Press.
- BAKHTI D. (2017), *Nouveau paradigme de la transition énergétique à l'ère du développement durable*, https://www.researchgate.net/publication/324164448_Nouveau_paradigme_de_la_traNsition_eNergetique_a_l%27ere_du_developpemeNt_durable_cas_de_l%27algerie
- BELLEVRAT A.R, RUDINGER A., COLOMBIER M., GUERIN E. (2013). *Scénarios de transition énergétique*. IDDRI. Working Paper, n°9, 13 juin.
- BERGER G. (1959). *L'attitude prospective*. Encyclopédie française, tome XX, Le monde en devenir : histoire, évolution, prospective. Paris. Société Nouvelle de l'Encyclopédie française. p. 20/54/12-14.
- BERGER G. (1957). Sciences Humaines et prévision. *Revue des deux Mondes* (1829-1971), 1er février, 417 - 426.
- BOUBEKER B. (2008), *L'Algérie et son industrie pétrolière : État, Compagnies, Marchés*. Paris: CNRS Éditions.
- BP (2023). *BP Statistical Review of World Energy 2023*. BP. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- BP (2024), *Net Zero Progress Update 2024*.
- CDE (2018). *Perspectives énergétiques 2050*. Connaissance de l'énergie.
- CHEVRON (2025), *Impacts of Net Zero 2050 Scenario*, <https://www.asyousow.org/resolutions/2021/12/9-chevron-request-to-improve-climate-related-audit-procedures>
- CHEVRON (2023). *Rapport annuel 2023*. Chevron. <https://www.chevron.com/investors/annual-report>
- CHEVRON (2023), *Chevron Strategic Outlook*, https://www.ief.org/_resources/files/events/9th-joint-iea-ief-opec-workshop-on-the-interactions-between-physical-and-financial-energy-markets/16-2023-04-27---chevron_rob-schwiers.pdf?utm_source=chatgpt.com
- CIEPA (2024). *Rapport sur les émissions de méthane dans le secteur énergétique*.
- CLIMATE ACTION TRACKER (2023), *Country Policies and Targets*. <https://climateactiontracker.org/>
- CME (2013). *Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050*. Conseil Mondial de l'Énergie.
- COLLSTE D., AGUIAR A.P D., HARMACKOVA Z.V, GALAFASSI D., PEREIRA L.M, SELOMANE O., DER LEEUW S. (2019). *Three Horizons for the Sustainable Development Goals : A Cross Scale Participatory Approach for Sustainability Transformations*. https://sustainability.sciencesconf.org/data/pages/52.Collste_2019.pdf
- CORMIER C., TESKE S. (2013), *Scenario for Energy transition*. Greenpeace France.
- CURRY A. (2012). The Scenarios Question in *The Future of Futures*. Association of Professional Futurists.

- CURRY A., HODGSON A. (2008). Seeing in Multiple Horizons : Connecting Futures to Strategy. *Journal of Futures Studies*. Vol 13 (1). 1 - 20.
- DIEMER A. (2015). Loi sur la transition énergétique, croissance verte et développement durable. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 23 - 46.
- DIEMER A. (2008), La question énergétique au cœur du développement durable ? *Cahiers du CERAS*, janvier, 1 -32.
- DURUISSEAU K. (2014). *L'émergence du concept de transition énergétique. Quels apports de la géographie*. BSGLG, 63, 21 - 34.
- ENEA CONSULTING (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Énergies*, p. 57 - 60.
- EXXON MOBIL GENERAL OUTLOOK (2025), *Our view to 2050*. <https://corporate.exxonmobil.com/sustainability-and-reports/global-outlook>
- EXXON MOBIL (2024), *Perspectives mondiales*, <https://corporate.esso.fr/-/media/france/files/2024/perspectives-mondiales---exxonmobil-global-outlook-vff.pdf>
- EXXON MOBIL (2023). *Rapport annuel 2023*. ExxonMobil.
- EXXON MOBIL (2019). *Outlook for Energy Data*.
- FMI (2022), *Rapport annuel sur l'économie algérienne*
- GODET M. (1990). Integration of scenarios and Strategic Management. *Futures*. September, 730 - 739.
- GODET M. (1983). Impacts croisés : exemples d'applications. *Futuribles*. Novembre. 41 - 51.
- IEA (2024), *World Energy Outlook 2024*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- IEA (2024), *Global Methane Tracker, Report, March*, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024/>
- IEA (2021). *Renewables, Analysis and Forecast to 2026*. Report. December.
- IEA (2021). *World Energy Outlook, October*.
- IEA (2021). *Net Zero by 2050, A Road Map for the Global Energy Sector*, Report, May.
- IEA(2020). *Global Energy Review, July*.
- IEA (2019). *World Energy Outlook 2020, Executive Summary*.
- IEA (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*.
- IRENA (2023). *Global Renewables Outlook*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2023>
- IRENA (2018). *Rapport. Agence Internationale pour les énergies renouvelables*.
- IRENA (2012). *Rapport. Agence Internationale pour les énergies renouvelables*.

- JEFFERSON M. (2012). Shell Scenarios: what really happened in the 1970s, and what may be learned for Current World Prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, vol 79.
- JEFFERSON M., VOUDOURIS V. (2011). Oil Scenarios for Long Term Business Planning : Royal Dutch Shell and Generative Explanation, 1960 - 2020. *CIBS Working Papers Series* n°18. January, 41 P.
- LES ECHOS (2023), *La quasi totalité des producteurs de pétrole et de gaz continuent d'investir dans les énergies fossiles*, le 15 novembre, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/la-quasi-totalite-des-producteurs-de-petrole-et-de-gaz-continuent-dinvestir-dans-les-energies-fossiles-2028995>
- MULLER G. (2021), Applying Roadmapping and Conceptual Modeling to the Energy Transition: A Local Case Study. *Sustainability*, 13, 3683. <https://doi.org/10.3390/su13073683>
- NEO (2024), *Future Energy Scenarios, pathways at a glance*, July, 18 p. <https://www.neso.energy/publications/future-energy-scenarios-fes>
- OFFICE FOR NATIONAL STATISTICS (2023), *Greenhouse Gas Emissions, UK Provisional Estimates, 2023*. UK Government.
- ONU (2024). *Rapport sur les Objectifs de Développement Durable*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>
- ONU. (2023, 8 septembre). *Rapport sur l'élimination progressive des combustibles fossiles*.
- PHAAL R., FARRUKH C.J.P, PROBERT D.R (2004), Technology Roadmapping - A planning framework for evolution and revolution, *Technological Forecasting and Social Change*, vol 71, issues 1-2, January - February, p. 5 - 26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6)
- RAGAZZI G. (2019). *Les modèles économiques dans la Transition Énergétique bas carbone à l'échelle locale*. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres.
- RECLAIM FINANCE (2024), *Assessment of ExxonMobil's Climate Strategy*.
- REVEST C. (2013). *Les termes clés de la transition énergétique*. Sciences et Techniques. <https://balises.bpi.fr/les-termes-cles-de-la-transition-energetique/>
- RICARDO ENERGY AND ENVIRONMENT (2023). *UK Environmental Accounts*. Office for National Statistics.
- RUEDINGER A., AYKUT S.C (2015), Les transitions énergétiques allemande et française. *Annuaire français de relations internationales*. Paris: La Documentation française, 16, 389-407.
- SCHOEMAKER P.J.H, VAN DER HEIJDEN C.A.J.M (1993). Strategic Planning at Royal Dutch. Shell. *Journal of Strategic Change*. Vol 2, 157 - 171.
- SHARPE B., HODGSON A., LEICESTER G., LYON A., FAZEY I. (2016). Three Horizons : a Pathways Practice for Transformation. *Ecology and Society*. June, vol 21 (2), 16 p.
- SHARPE B. (2013). *Three Horizons : Patterning of Hope*. Triarchy Press. Axminster. Devon. UK.

- SHARPE B., HODGSON T., PAGE I. (2006). *Energy Security and Climate Change*. Discussion Paper. International Futures Forum. Aberdour.
- SHELL (2019). *Outlook for Energy: A perspective to 2040*. Report.
- SHELL (2012). *40 years of Shell Scenarios, 1972 - 2012*.
- SHELL (2008). *Shell Global Scenarios to 2025*, 2nd Edition.
- SONATRACH (2022), rapport annuel 2022.
- SONATRACH (2020). *Rapport Annual 2020*. Sonatrach.
- THE ECONOMIST (2024), *Energy Transition has been profoundly misunderstood*, 10 novembre, https://www.economist.com/culture/2024/11/10/energy-transition-has-been-profoundly-misunderstood?utm_medium=cpc.adword.pd&utm_source=google&ppccampaignID=18151738051&ppcadID=&utm_campaign=a.22brand_pmax&utm_content=conversion.direct-response.anonymous&gad_source=1&gbraid=0AAAAADBuq3JPzXJBBBunuK6SqWPNG1NDp&gclid=Cj0KCCQiAvP-6BhDyARIsAJ3uv7b_81piQny5l0Dazr4vrzLcCDyG-9CdISMHLMIOK6dLVu0uGb8nz0AaAlehEALw_wcB&gclid=aw.ds
- THE SHIFT PROJECT (2022), *Le plan de transformation de l'économie française*, Odile Jacob.
- TOTAL (2020). Communiqué de presse, résultat du quatrième trimestre 2020.
- UK CLIMATE COMMITTEE (2023), *The Sixth Carbon Budget: The UK's Path to Net Zero*. UK Government.
- U.S Department of Energy. (2023), *Hydrogen Energy Strategy*. <https://www.energy.gov/hydrogen-strategy>
- U.S. Department of Energy (2023), *Hydrogen Strategy Update to Market*, December.
- YERGIN D. (1991). *The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power*. Simon & Schuster.

ANNEXE - Modèle stock flux



CONCLUSION

Nous avons focalisé notre recherche autour d'une question centrale « *Que reste-t-il de la transition énergétique : des scénarios prospectifs aux stratégies bas carbone des compagnies pétrolières ?* » en insistant sur le rôle des scénarios prospectifs et leur articulation avec les stratégies bas carbone des acteurs pétroliers et gaziers. Cette thèse aborde également la question de la modélisation du système énergétique (Pfenninger et al., 2014) via la mobilisation des outils (CLD, SFD) de la dynamique des systèmes (Serman, 2000) et ceux de la démarche prospective (Godet, 1990 ; Berger, 1959) et des récits stratégiques (Schwartz, 1991 ; Curry & Hodgson, 2008). Elle vise enfin à cerner l'interprétation des scénarios de transition énergétique, par les sphères académiques, institutionnelles et industrielles. Il s'agit finalement de comprendre comment ces scénarios arrivent à orienter ou à légitimer les stratégies des compagnies pétrolières ainsi que les politiques publiques (Gladkykh et al., 2021 ; Mietzner & Reger, 2005). Pour ce faire, nous avons structuré notre recherche en trois axes de travail :

- Une lecture de la littérature sur les scénarios débouchant sur une typologie de quatre approches. Il a été possible de croiser ces approches (scenario planning, prospective, Three Horizons; Nssp) avec des scénarios plus institutionnels (AIE, CME) en vue de visualiser les trajectoires futures et les leviers d'actions engagées (O'Neill et al., 2014 ; David et al., 2014).

- La mise en exergue du rôle de ces scénarios prospectifs sur les politiques nationales. Dans le cas de la France, les scénarios de l'ADEME, de RTE, NegaWatt ou The Shift Project permettent de comprendre la façon dont les scénarios influencent les futures trajectoires énergétiques, les programmes et les feuilles de route nationales.

- Une analyse comparative des stratégies bas carbone de six compagnies pétrolières et gazières (BP, Chevron, ExxonMobil, Shell, Sonatrach et Total Energies) et leurs liens avec les feuilles de routes nationales.

Ce choix a permis de dépasser une lecture technique de la transition énergétique et de suggérer une analyse systémique et intégrée du système énergétique. Il nous invite à utiliser ces scénarios non comme des outils neutres d'aides à la décision, mais comme des scénarios narratifs porteurs de visions du monde et de rapports de pouvoir (Diemer, 2021 ; Schwartz, 1991).

Le premier article publié en 2023 et intitulé « *Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050 : le retour en grâce des scénarios et de la prospective* », avait pour objectif de dresser un état des lieux du contexte énergétique mondial, son étroite dépendance aux hydrocarbures dont 80 % de l'énergie consommée est d'origine fossile (pétrole, gaz,

charbon), ses disparités géographiques Moyen-Orient (98,8 % fossile), Afrique (91,3 %), Asie (87,4 %), Europe (73,6 %), sa rigidité et ses enjeux environnementaux..., mais également de proposer une analyse approfondie de la littérature en matière de scénarios. L'étude s'appuie sur les quatre grandes approches de la scénarisation, à savoir celle du scénario planning (Wack, 1985), de la prospective (Godet, 1990), des Three Horizons (Curry & Hodgson, 2008) et des Narrative Shared Socioeconomic Pathways (O'Neill et al., 2014) tout en proposant une analyse des scénarios proposés par deux grandes institutions internationales (AIE, CME). Il ressort clairement de cette étude que les scénarios sont des outils permettant de cerner des trajectoires futures, porteuses de force et d'imaginaires politiques (Schwartz, 1991 ; Mietzner & Reger, 2005). Ce sont de véritables grilles de lecture systémique pour la compréhension des leviers d'action, des ruptures possibles et des trajectoires souhaitables (David et al., 2014). Ils permettent de modéliser les interactions complexes entre sécurité énergétique, impératifs climatiques, justice sociale et contraintes géopolitiques (IEA, 2021 ; CME, 2019).

Ce travail insiste sur la nécessité d'aller au delà de la trilogie conventionnelle (Business as Usual, scénario médian, vision optimiste) et de se baser sur des hypothèses de travail robustes, la détermination d'un cadre structurel, des modèles utiles et des récits cohérents (Godet, 1994 ; Diemer, 2021). La scénarisation apparaît ainsi comme une démarche essentielle et un axe de recherche à part entière pour la modélisation du système énergétique, elle assure ainsi la mise en œuvre efficace des feuilles de route des politiques publiques de la transition énergétique.

La sobriété énergétique y est identifiée comme un levier stratégique, porteur d'un changement de paradigme (Maresca, 2014 ; Villalba & Semal, 2018 ; Diemer, 2015). Elle est perçue non seulement comme un moyen de réduire notre consommation, mais également comme une manière d'interroger nos modes de vie, nos pratiques sociales et nos imaginaires collectifs.

Dans le second article publié en 2024 et intitulé « *Les scénarios de transitions énergétiques de la France à l'horizon 2050* », notre travail de recherche s'est concentré sur les trajectoires prospectives élaborées par quatre importantes institutions françaises : l'ADEME, RTE, NégaWatt et The Shift Project. L'analyse montre que bien que les ambitions et les hypothèses de ces scénarios soient distinctes, elles convergent toutes vers l'objectif commun de la neutralité carbone à l'horizon 2050 avec un mix énergétique reposant sur le développement des énergies alternatives, en prenant compte les dimensions sociale, territoriale et comportementale. Certaines institutions parient sur la sobriété radicale et misent sur une réduction de 55 % de la consommation énergétique (les scénarios de l'ADEME), d'autres insistent sur le rôle de l'innovation et misent sur les technologies de captages du CO₂. Le mix énergétique attendu à l'horizon 2050 devrait comporter entre 70 % et 100 % d'énergies renouvelables selon les cas, et engager des investissements estimés entre 750 et 1000 milliards €. Le seul scénario qui a opté pour une vision systémique est celui de NégaWatt fondée sur la

circularité et l'efficacité énergétique, avec une réduction des émissions de GES par un facteur 9.

Dans cet article, nous avons mobilisé les outils de la dynamique des systèmes (Sterman, 2001 ; Richardson, 1997), notamment les diagrammes de boucles causales (Causal Loop Diagrams, CLD) via le logiciel VENSIM. Ces outils ont permis de faire ressortir les interdépendances entre les variables clés, les flux et les stocks, et de mettre en évidence les leviers de la transformation. Cette analyse a mis en évidence la diversité des visions stratégiques, allant de la sobriété radicale et de la rupture à la croissance verte technologique innovante, tout en précisant les limites de ces scénarios entre faisabilité technique, acceptabilité sociale et cohérence environnementale (Diemer et al., 2024 ; ADEME, 2021 ; RTE, 2021). Dans la continuité du premier article traitant des concepts théoriques de la scénarisation énergétique, cet article aborde la question de l'adaptation empirique et comparative des scénarios français, permettant ainsi de croiser les enjeux globaux et territoriaux de la transition énergétique. Par conséquent, les scénarios prospectifs ont démontré qu'ils ne sont pas de simples outils de décision, mais ce sont des dispositifs de gouvernance qui orientent les politiques des pouvoirs publics et les stratégies énergétiques des grands groupes pétroliers.

Le troisième et dernier article, publié en 2025 et intitulé "*Les stratégies et les scénarios des compagnies pétrolières à l'horizon 2050, freins ou catalyseurs de feuilles de route nationales de la transition énergétique*", s'est attaché à analyser les stratégies de décarbonation des six compagnies pétrolières et gazières – BP, Total Energies, Shell, Chevron, Exxon Mobil et Sonatrach - tout en les articulant avec les feuilles de routes nationales de la neutralité carbone. En effet, le secteur des hydrocarbures étant parmi les contributeurs du réchauffement climatique (près de 70 % des émissions mondiales des GES selon les estimations du GIEC, 2023), il reste parmi les acteurs importants dans l'effort mondial de décarbonation, au regard de sa capacité à investir, à innover et à changer ledit système énergétique.

Feuilles de route climatiques nationales et stratégies bas-carbone : alignement ou divergence ? L'examen comparatif mené dans le cadre de cette recherche, avait pour objectif d'analyser les stratégies suivies par les six majors du secteur pétrolier, d'exploiter les résultats des trajectoires scénarisées des feuilles de route nationales et d'évaluer dans quelle mesure les stratégies de décarbonation pouvaient être influencées ou non par les objectifs des feuilles de route.

L'analyse comparative des documents officiels de la feuille de route de l'Algérie, des Etats-Unis, de la France et du Royaume-Uni montre une certaine convergence vers un objectif commun : la réduction de l'empreinte carbone des systèmes énergétiques vers l'horizon 2050. Les feuilles de route de la France et du Royaume-Uni ont des trajectoires ambitieuses qui ont été cadrées dans les deux pays par un arsenal juridique robuste dédié à la transition énergétique avec des programmes stratégiques à long terme. La France à travers la *Stratégie Nationale Bas-Carbone* (SNBC) et la *Programmation*

Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), vise l'intensification du nucléaire en développant des nouveaux réacteurs EPR (environ 70 % de l'électricité), l'accélération des énergies renouvelables (solaire, éolien), ainsi que le recours à l'efficacité énergétique dans le bâtiment et l'industrie. Le Royaume-Unis mise sur la continuité de l'action de sortie du charbon amorcée en 2024 ainsi que le développement soutenu de l'éolien offshore. Sa feuille de route climat (*Climate Change Act et du Net Zero Strategy*) vise pour 2035 une décarbonation totale du système électrique avec le déploiement de nouvelles technologies notamment, l'hydrogène et le captage du carbone CCUS. Les États-Unis, malgré une économie dépendante aux énergies fossiles, a adopté une stratégie de neutralité carbone à l'horizon 2050 « *Deep Decarbonization Pathways Network* ». Cette feuille de route traduit une stratégie de transition fédérale ambitieuse enclenchée sous l'Inflation Reduction (IRA) considérée comme une approche incitative qui a drainé plus de 370 milliards \$ pour subventionner les infrastructures et développer les nouvelles technologies. La feuille de route retient un objectif de triplement de la capacité du solaire et éolienne installée en 2030, l'électrification massive du secteur de transport et du bâtiment, et la substitution progressive des centrales à gaz. L'Algérie, pays rentier dont l'économie repose presque dans sa totalité, sur des recettes d'exportation des hydrocarbures, a amorcé une feuille de route bas-carbone depuis 2020. Cette feuille de route reste prudente et articulée sur la valorisation des ressources en gaz naturel (GNL et GPL) ainsi que sur le développement du solaire (15 GW d'ici 2030).

Le contraste entre ces stratégies bas-carbone montre la complexité du système énergétique mondial, la difficulté de penser sa transformation et la nécessité d'identifier les leviers d'action. Pour l'analyse comparative des stratégies des six compagnies, les objectifs du scénario Net Zéro Émissions (NZE) de l'AIE ont été pris comme référence. En effet, ce scénario prévoit pour contenir le réchauffement climatique à 1,5°C, d'ici 20250, de baisser la production de pétrole de 21 % et celle du gaz de 13 % d'ici 2030 (par rapport à 2023) avec une baisse conséquente allant à environ 75 % des investissements dans les énergies fossiles entre 2025 et 2035. Sur cette même période, il est attendu un accroissement d'un facteur de 2,5 les investissements pour le développement des énergies alternatives (3 fois plus en 2023). Le scénario NZE a retenu comme hypothèse de base, la cessation de tout programme de développement et de recherche des nouveaux projets pétroliers et gaziers.

Les analyses des stratégies bas carbone des majors pétrolières apparaissent nettement en discordance avec les objectifs du Scénario NZE. Seule, Total Energie affiche une trajectoire qui reste en partie alignée, avec une diminution de 36 % de ses émissions (Scope 1+2). TotalEnergies a ainsi prévu de développer les énergies renouvelables, en augmentant sa capacité nette installée de 15 GW (2025) à environ 58 GW en 2030. La part des renouvelables dans le mix énergétique de TotalEnergies atteindrait alors 8 % en 2030. Cependant, cette dernière continue à investir massivement dans ses projets d'exploration, ce qui contredit la trajectoire NZE. BP a réduit ses émissions de 15 %

toutefois ses investissements dans les énergies fossiles restent encore importants. ExxonMobil, Chevron et Shell sont quant à elles en net décalage avec les prescriptions du scénario NZE, elles avancent des taux de réduction de leurs émissions de méthane autour de 9 à 13 % mais avec une stratégie nettement tournée vers les hydrocarbures..

Les points principaux qui ressortent de notre étude comparative montrent que dans l'ensemble, il y a deux grandes tendances. Certaines entreprises comme Total énergie et BP intègrent les objectifs de scénarios nationaux dans leurs stratégie bas carbone, cependant les compagnies des pays dépendants des hydrocarbure comme les USA et l'Algérie continuent à afficher un programme d'exploration et de développement des gisements d'hydrocarbures soutenu, en donnant la priorité à la rentabilité financière, aux technologies de compensation, de séquestration de carbone (CCS) et à la diversification. Aussi, un déséquilibre net est observé entre les investissements accordés par ses compagnies pour le renouvelable et les énergies fossiles. 70% des investissements vont vers les hydrocarbures alors que les investissements pour les énergies de substitution augmentent à peine d'un milliards d'euros chaque année. De plus et selon la revue de Mckenzie, nous assistons au cours de l'année 2025 à une renonciation et une rétractation de certaines de ces compagnies sur les objectifs des investissements bas carbone retenus dans leurs stratégies initiales.

Au-delà des trois articles publiés, notre travail de thèse insiste sur deux apports majeurs : (1) une lecture systémique des scénarios proposés par les institutions nationales que sont l'ADEME, RTE, Négawatt et The Shift Project. En mobilisant la dynamique des systèmes, via les diagrammes de boucles causales (CLD) et le logiciel VENSIM, nous avons pu mettre en valeur différents modèles de comportements associés à des drivers différents (sobriété énergétique, justice énergétique, efficacité énergétique). Dans le cas des stratégies mises en place par les compagnies pétrolières et gazières, la réalisation d'un modèle quantitatif sous Stella a permis d'appréhender les boucles de rétroaction (renforçantes et équilibrantes) qui régissent les décisions d'investissement, les capacités installées, les revenus et les émissions de GES des compagnies pétrolières. (2) la prise en compte de la question de la circularité (souvent négligée) dans la scénarisation de la transition énergétique. L'analyse de certains scénarios a confirmé que la circularité est en lien directe avec la sobriété énergétique ainsi que la rationalisation par l'efficacité énergétique. Cependant, les acteurs privés du secteur hydrocarbures ne se sont pas encore appropriés d'une manière adéquate cette approche où les boucles ouvertes (extraction -consommation-déchet) demeurent prédominantes. Ce dernier point nous amène à évoquer les limites des scénarios prospectifs lorsqu'ils sont abordés du point de vue de la stratégie industrielle, car ils font souvent face à des chocs exogènes (notamment liés aux tendances des marchés internationaux, à l'équilibre géopolitique ou encore aux enjeux climatiques).

A la lumière des résultats de notre thèse, il y a lieu de préciser - comme toute démarche scientifique - les limites rencontrées lors de notre travail de recherche et qu'il

convient d'énumérer en vue d'identifier les points d'amélioration et les perspectives pour de nouveaux travaux complémentaires.

La première limite concerne les données d'entrée collectées dans le cadre de notre sujet. La thèse repose principalement sur des données publiques - rapports annuels publiés par les institutions en charge de la transition énergétique, Outlook énergétiques des compagnies pétrolières, feuilles de route climatiques produites par les entreprises elles-mêmes. Même si les sources de données restent institutionnalisées, il manque une certaine transparence sur les hypothèses utilisées, les modèles et les calculs utilisés pour la construction de ces scénarios. Cette limite est également présente pour les compagnies pétrolières qui présentent dans leur rapports annuels et Outlook des données consolidées sans le détail précis sur les calculs sous-jacents qui leur ont permis de tracer leurs trajectoires sur l'horizon 2030-20250. De plus, l'impartialité n'est pas assurée pour des données générées et manipulées par les entreprises elles-mêmes,

La deuxième limite que nous avons rencontrée dans notre étude, c'est la difficulté d'accès à des données comme ceux de Sonatrach et données non publiées en liens avec investissements engagés pour les nouveaux programmes de recherche, de développement et d'exploration de nouveaux gisements d'hydrocarbure ;

La troisième est en lien avec la temporalité et le contexte international. La thèse n'a pas pris en compte différents faits intervenus en 2025, notamment la nomination de Donald Trump et sa position sur les défis climatiques, la poursuite de la guerre entre l'Ukraine et la Russie, ou encore la révision des engagements climatiques de certains états pour des raisons de sécurité énergétique.

La quatrième limite concerne le scope très restreint choisi pour couvrir notre recherche (acteurs, zones géographiques). Notre thèse s'est limitée à l'étude du cas français, pays de l'Europe très engagé dans la lutte contre les changements climatiques et les compagnies majors pétrolières de pays européens ou occidentaux (France, Royaume-Uni, États-Unis). Cette approche présente le risque de ne pas avoir fait la lumière sur la logique des pays producteurs et exportateurs du pétrole et gaz naturel en particulier ceux du Moyen-Orient, d'Asie ou d'Afrique, ni celle des puissances comme l'Inde ou la Chine.

Ces limites ne remettent pas en cause la pertinence des résultats obtenus, mais appellent au principe de précaution dans leur généralisation. En perspective, des pistes peuvent être suggérées pour continuer cette recherche en élargissant le champ de l'étude à d'autres acteurs du secteur pétrolier et gazier, en étudiant l'influence de puissances telles que l'Inde ou la Chine afin d'analyser leur influence croissante sur les dynamiques globales des transitions énergétiques ; ou encore en mobilisant l'intelligence artificielle (AI) dans le processus de modélisation des scénarios énergétiques complexes (la nouvelle version du logiciel Stella offre désormais la

possibilité de définir un modèle quantitatif avec un jeu de données via la narration des hypothèses et des variables à prendre en compte).

Ainsi, engager la réflexion sur ce qu'il reste de la transition énergétique, c'est questionner les outils que nous utilisons pour établir les récits sur l'avenir et les rendre opérationnels. De là, il ressort que les scénarios sont avant tout des dispositifs destinés à affiner nos trajectoires vers un objectif pré-fixé, ici la neutralité carbone. Ils ne signifient pas que tous les acteurs partagent ce même objectif, mais qu'une sorte de consensus (ou de compromis) doit finalement émerger.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2009). *Marchés, emplois et enjeux énergétiques liés aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique. Situation 2007 - 2008*. Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.

ADEME (2013). *Les scénarios de transition énergétique 2030 - 2050*.

ADEME (2021), *Futurs Énergétiques-2050-principaux-resultats, résumé exécutif*, octobre.

ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Compressé*.

ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Compressé*.

ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Synthèse*.

AISSAOUI A. (2001), *Algeria: The Political Economy of Oil and Gas*. Oxford University Press.

ALVARES C. (2021). *COP 26, le pacte de Glasgow, reflet du déni climatique des pays riches*. Novethic, le 15 novembre. <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/le-pacte-de-glasgow-n-est-que-le-reflet-du-deni-climatique-des-pays-riches-150309.html>

ANCEL F. (2018). *Perspectives Energies 2050*. Connaissance des Énergies, Editions.

ANSARI D., HOLZ F., AL KUHLANI H. (2019). *Energy Outlooks Compared : Global and Regional Insights*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin.

ANSARI D., HOLZ F., AL KUHLANI H. (2019). *Energy Outlooks Compared: Global and Regional Insights*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin.

AOUN M.C (2018), *Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Énergies*, 15-18.

AOUN M.C (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Énergies*, 15-18.

APPERT O. (2018), *Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Energies*, 19-22.

APPERT O. (2018). Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Energies, 19-22.

ASSOCIATION NEGAWATT (2021). La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale. Synthèse du scénario NegaWATT 2022. <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>

ATTALAH M. (2020), L'apport de la science-fiction, raconter le capitalisme... in Desaunay C., De Jouvenel F. (eds), Scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050. Rapport VIGIE 2020, Futuribles International.

AYMOZ G. (2018). Les outils mis au service des pouvoirs publics pour promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments. Annales des Mines, n°90, 45 - 48.

BAGHAI M., COLEY S., WHITE D. (1999). The Alchemy of Growth : Practical Insights for Building the Enduring Enterprise. Perseus Books.

BAKHTI D. (2017), Nouveau paradigme de la transition énergétique à l'ère du développement durable, https://www.researchgate.net/publication/324164448_Nouveau_paradigme_de_la_transition_energetique_a_l_ere_du_developpement_durable_cas_de_algerie

BALLOT-MIGUET B., BUI-VIVAN F., DURAND J.P, GOUSSARD L., PETIT S., TIFFON G. (2019). Industrie et grande distribution : sociologie de l'efficacité énergétique. La Revue de l'Energie, n°646, 16 - 30.

BALZANI V. (2019), Saving the planet and the Human Society : Renewable Energy, Circular Economy, Sobriety. Substantia. International Journal of the History of Chemistry, vol 3 (2), 9 - 15.

BELLEVRAT A.R, RUDINGER A., COLOMBIER M., GUERIN E. (2013). Scénarios de transition énergétique. IDDRI. Working Paper, n°9, 13 juin.

BERGER G. (1957). Sciences Humaines et prévision. Revue des deux Mondes (1829-1971), 1er février, 417 - 426.

BERGER G. (1959). L'attitude prospective. Encyclopédie française, tome XX, Le monde en devenir : histoire, évolution, prospective. Paris. Société Nouvelle de l'Encyclopédie française. p. 20/54/12-14.

BESSALEM C., DIEMER A., BATISSE C., BENAMARA M. (2022), Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective, Revue Francophone du Développement Durable, n°19, Mars, p. 1 - 67.

BOBIN J.L, NIFENECKER H., STEPHAN C. (2021), L'énergie dans le monde, bilan et perspectives, EDP Sciences.

BOUBEKER B. (2008), L'Algérie et son industrie pétrolière : État, Compagnies, Marchés. Paris: CNRS Éditions.

BOULANGER P.M (2007)). Les barrières à l'efficacité énergétique. Reflets et perspectives de la vie économique, tome XLVI, 49 - 62.

BP (2023). BP Statistical Review of World Energy 2023. BP. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

BP (2024), Net Zero Progress Update 2024.

BRAULT P., DOLLET A. (2013), Introduction aux Mix Énergétique, CNRS Edition.

CDE (2018). Perspectives énergétiques 2050. Connaissance de l'énergie.

CHANCEL L, SAUJOT M. (2013). Inégalités, vulnérabilités et transition énergétique, IDDRI, Policy Briefs, n°02/13 www.iddri.org

CHARLIER D. (2014). Efficacité énergétique dans le bâtiment et paradoxe énergétique : quelles conséquences pour la transition énergétique. Revue d'Economie Industrielle, vol 148, 4e trimestre, 229 - 262.

CHATEAU B. (2016). Les politiques d'efficacité énergétique : problématiques, moyens et outils d'évaluation. Encyclopédie de l'énergie.

CHEVRON (2023), Chevron Strategic Outlook, https://www.ief.org/_resources/files/events/9th-joint-iea-ief-ope-workshop-on-the-interactions-between-physical-and-financial-energy-markets/16-2023-04-27---chevron_rob-schwiers.pdf?utm_source=chatgpt.com

CHEVRON (2023). Rapport annuel 2023. Chevron. <https://www.chevron.com/investors/annual-report>

CHEVRON (2025), Impacts of Net Zero 2050 Scenario, <https://www.asyousow.org/resolutions/2021/12/9-chevron-request-to-improve-climate-related-audit-procedures>

CIEPA (2024). Rapport sur les émissions de méthane dans le secteur énergétique.

CLIMATE ACTION TRACKER (2023), Country Policies and Targets. <https://climateactiontracker.org/>

CME (2013). Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050. Conseil Mondial de l'Énergie.

COCHET Y. (2000). Stratégie et moyens de développement de l'efficacité énergétique et des sources d'énergie renouvelables en France. Rapport au Premier Ministre.
<http://www.ofme.org/documents/actualite/200009/cochet.pdf>

COLIN A., VAILLES C., HUBERTICE R. (2019), Comprendre les scénarios de transition - Huit étapes pour lire et interpréter ces scénarios, 4CE (Institute for Climate Economics).

COLLSTE D., AGUIAR A.P D., HARMACKOVA Z.V, GALAFASSI D., PEREIRA L.M, SELOMANE O., DER LEEUW S. (2019). Three Horizons for the Sustainable Development Goals : A Cross Scale Participatory Approach for Sustainability Transformations.
https://sustainability.sciencesconf.org/data/pages/52.Collste_2019.pdf

CORMIER C., TESKE S. (2013), Scenario for Energy transition. Greenpeace France.

CURRY A. (2012). The Scenarios Question in The Future of Futures. Association of Professional Futurists.

CURRY A., HODGSON A. (2008). Seeing in Multiple Horizons : Connecting Futures to Strategy. Journal of Futures Studies. Vol 13 (1). 1 - 20.

CURRY A., HODGSON A., KELNAR R., WILSON A. (2006). Intelligent infrastructure systems : The scenarios - towards 2055. London : Foresight Programme. Retrieved April 18, 2008, from http://www.foresight.gov.uk/Previous_Projects/Intelligent_Infrastructure_Systems/Reports_and_Publications/Intelligent_Infrastructure_Futures/Index.html

DAURES P., FRISCH J.R (1974). Le nouveau contrat mondial : les effets de la crise énergétique sur l'équilibre international. Revue d'Economie Politique. Vol 84, n°5, 639 - 647.

DAVID B., DE LATTRE-GASQUET M., MATHY S., MONCOMBLE J.E, ROZENBERG J. (2014). Prospective énergétique : le possible, le souhaitable et l'acceptable. Futuribles, n°398, janvier-Février. 37 - 47.

DAVIS S.J & al. (2018), Net-Zero Emissions Energy Systems. Science, n°360, june 29th, 1-2.

DELEPOUVE M. (2016), *Transition énergétique, changement de société*, Editions du Croquant.

DEMAILLY D. & al. (2019), *I4CE, combining economic recovery with the climate*. Institute for Climate Economics. Annual Report.

DENOLLE A.S (2016). *Commentaire de la loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte*. *Revue Juridique de l'Environnement*, vol 41, 99 - 104.

DERDEVET M. (2013). *La précarité énergétique : un chantier européen prioritaire*. *Géoéconomie*, n°66, 37 - 50.

DERY P. (2007). *Substitution énergétique Mythe ou réalité ? Rapport sur l'Énergie*.

DESAUNAY C., DE JOUVENEL F. (2020), *Scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050*. Rapport VIGIE 2020, Futuribles International.

DEVALIERE I. (2008). *Au-delà des impayés d'énergie, comment appréhender la précarité énergétique ? Population, vulnérabilités et inégalités écologiques*, vol 1, 191 - 201.

DIEMER A. (2008), *La question énergétique au cœur du développement durable ? Cahiers du CERAS*, janvier, 1 -32.

DIEMER A. (2015a), *Une théorie décroissante de l'énergie*. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 192 - 212.

DIEMER A. (2015a). *Loi sur la transition énergétique, croissance verte et développement durable*. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 23 - 46.

DIEMER A. (2021), *Pourquoi la sobriété énergétique doit s'imposer aux économies du Nord*, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°18, octobre, p. 85 - 97.

DIEMER A. (2022), *Immersion dans la dynamique des systèmes, les 16 étapes de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (Systems Dynamics)*, *Revue Francophone du Développement Durable*, vol 20, p. 11 - 30.

DIEMER A., BUSCAGLIA A. (2024), *Le dilemme des découvertes de mines de lithium à l'échelle de l'écosystème territorial, le cas de la mine de Beauvoir dans l'Allier*, *Revue Francophone du Développement Durable* (en cours de révision).

DIEMER A., LEGRAND A., SANTOS J., MORTADA R., BOUAKKAZ S., GIRIN M. (2023), Matériaux biosourcés et rénovation énergétique, le rôle du chanvre dans les PCAET des intercommunalités, le cas de Riom Limagne et Volcans, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°23, Mars, p. 1 – 21.

DNV GL (2020). La société norvégienne indépendante de classification.

DOE & NREL (2022), Pathways to Net Zero for the US Energy Transition.

DOE (2022–2026), Strategic Frameworks for Energy Transition, Department of Energy, USA.

DUCKWORTH M., DUNN C., RINGLAND G., SCHULTZ W., WILLIAMS H. (2018), Drivers of Change. SAMI Consulting. Robust decisions in uncertain times. October, 28 p.

DUPLESSIS B. (2009). Mise en œuvre des contrats de performance énergétique pour l'amélioration des installations de production frigorifique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005241/document>

DURUISSEAU K. (2014). L'émergence du concept de transition énergétique. Quels apports de la géographie. *BSGLg*, 63, 21 - 34.

ELOI L. (2012), Faut-il décourager le découplage ? *Revue de l'OFCE*, n°120, p. 235 - 257.

ENEA CONSULTING (2018). Point de vue. Perspectives Energies 2050, *Connaissances des Énergies*, p. 57 - 60.

ENGIE, (2021), Dashboard de la transition énergétique.

ENGINE NO. 1, Fonds activiste ayant influencé la gouvernance d'ExxonMobil.

EXXON MOBIL (2019). Outlook for Energy Data.

EXXON MOBIL (2023). Rapport annuel 2023. ExxonMobil.

EXXON MOBIL (2024), Perspectives mondiales, <https://corporate.esso.fr/-/media/france/files/2024/perspectives-mondiales---exxonmobil-global-outlook-vff.pdf>

EXXON MOBIL GENERAL OUTLOOK (2025), Our view to 2050. <https://corporate.exxonmobil.com/sustainability-and-reports/global-outlook>

EZRATTY V., DUBURCQ A., EMERY C., LAMBROZO J. (2009). Liens entre l'efficacité énergétique du logement et la santé des résidents : résultats de

l'étude européenne LARES. Environnement, Risques et Santé, vol 8, n°6, 497 - 506.

FAZELI R., DAVIDSDOTTIR B. (2015). Energy Modeling of Danish Housing Stock Using System Dynamics. Conference Paper, 33rd International Conference of System Dynamics, 1 - 19. https://www.researchgate.net/publication/281375438_Energy_Modeling_of_Danish_Housing_Stock_Using_System_Dynamics/figures?lo=1

FEIDT M. (2009). Efficacité énergétique, quels critères ? Termotecnica, vol 2, 26 - 33.

FHSC (2009). Scenario Planning. Guidance Note. Foresight Horizon Scanning Centre. Government Office for Science. October. 37 p.

FMI (2022), Rapport annuel sur l'économie algérienne

FONTECAVE M., GRAND D. (2021), Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage, Comptes rendus. Chimie. vol 24, n°2, p. 331 -350

FORRESTER J.J (1968), Principles of Systems, Pegasus Communications.

FRANCE NATURE ENVIRONNEMENT (2021), France Nature Environnement, Des scénarios énergétiques pour éclairer les choix à venir, 30 novembre.

FRERIS L., INFELD D. (2021). Les énergies pour une production d'électricité. Dunod.

FRESSOZ J.B (2014), Pour une histoire désorientée de l'énergie, 25èmes journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, Février, Créteil. Paris. HAL 00956441.

FURJIMORIA S. (2017), SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways, Global Environmental Change 42, p. 268-283

GARFINKEL H. (1967), Studies in Ethnomethodology. Englewood Cliffs. Prentice Hall. Traduction française, Recherches en Ethnométhodologie, PUF, 2007.

GAUDIN T. (2005), La prospective. PUF. Seconde édition (2013).

GAUDIN T. (2018). Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Énergies, p. 77-82.

GAUDIN T. et al. (1990). 2100, récit du prochain siècle, Payot.

GAZPROM (2020). Energy Report. August.

GEA. Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2012. ISBN 9781 10700 5198 hardback 9780 52118 2935 paperback.

GIRAUDET L. G, BOURGEOIS C., QUIRION P. (2020). Efficacité économique et effets distributifs de long terme des politiques de rénovation énergétique des logements. *Economie et Prévision*, n°217, 43 - 63.

GLADKYKH G., DAVIDSDOTTIR B., DIEMER A. (2021), When Justice Narratives meet energy system models : Exploring energy efficiency, sustainability and universal access in Sub-Saharan Africa. *Energy Research and Social Science*, 79, p. 1 - 17.

GODET M. (1977), *Crise de la prévision, Essor de la prospective*, Presses Universitaires de France.

GODET M. (1983). Impacts croisés : exemples d'applications. *Futuribles*. Novembre. 41 - 51.

GODET M. (1990). Integration of scenarios and Strategic Management. *Futures*. September, 730 - 739.

GODET M. (1993), Apprendre à anticiper in HATEM F. (ed), *La prospective, pratiques et méthodes*, Economica.

GODET M. (2001), *Manuel de Prospective Stratégique*, tome 1, une discipline intellectuelle, tome 2, L'Art et la Méthode. Dunod.

HATEM F. (1993), *La prospective, pratiques et méthodes*, Economica.

HERBST A., TORO F., REITZE F., JOCHEM E. (2012), Introduction to Energy Systems Modelling, *Swiss Journal of Economics and Statistics*, vol 148, 111 - 135.

HEUBAUM H., BIERMANN F. (2015). Integrating Global Energy and Climate Governance : The Changing Role of The International Energy Agency. *Energy Policy*, vol 87, p. 229 - 239.

[https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/doc_strategie_nationale_hydrogene_v.fr_\(sept.2023\)_65b65e6f0b8eb.pdf_65b65e6f0b8eb.pdf](https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/doc_strategie_nationale_hydrogene_v.fr_(sept.2023)_65b65e6f0b8eb.pdf_65b65e6f0b8eb.pdf)

HUSSERL E. (1913), *Logische Untersuchungen*, Erster Band. Prolegomena zur reinen Logik. Halle a.d.S, Max Niemeyer. Traduction française *Recherches Logiques*, tome 1, *Prolégomènes à la logique pure*, PUF, 1959.

IBBITSON J., BRICKER D. (2019), *Empty Planet, The Shock of Global Population Decline*, Penguin, Random House.

IEA (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*.

IEA (2019). *World Energy Outlook 2020, Executive Summary*.

IEA (2021). *Net Zero by 2050, A Road Map for the Global Energy Sector*, Report, May.

IEA (2021). *Renewables, Analysis and Forecast to 2026*. Report. December.

IEA (2021). *World Energy Outlook*, October.

IEA (2022). *A 10-Point Plan to Cut Oil Use*. International Energy Agency, march 18th, 17 p.

IEA (2024), *Global Methane Tracker*, Report, March, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024/>

IEA (2024), *World Energy Outlook 2024*, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

IEA(2020). *Global Energy Review*, July.

IIDF (2016). *La transition. Connaître et partager pour agir*. Octobre. Institut international de la francophonie.

IPPC (2021), *Climate Change 2021 – The biophysical Science Basis*. [archive], sur ipcc.ch (consulté le 15 août 2021).

IPPC (2022), *Climate change 2022, Mitigation of Climate change, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2913 p.

IRENA (2023). *Global Renewables Outlook*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2023>

IRENA (2012). *Rapport*. Agence Internationale pour les énergies renouvelables.

IRENA (2018). *Rapport*. Agence Internationale pour les énergies renouvelables.

JACCARD M. K (2005), *Sustainable Fossil Fuels : The Unusual Suspect in the Quest for Clean And Enduring Energy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

JANCOVICI (2012). *Les limites énergétiques de la croissance*, Gallimard, Le débat, n°171, p. 80 - 95.

JEFFERSON M. (2012). Shell Scenarios : what really happened in the 1970s, and what may be learned for Current World Prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, vol 79.

JEFFERSON M., VOUDOURIS V. (2011). Oil Scenarios for Long Term Business Planning : Royal Dutch Shell and Generative Explanation, 1960 - 2020. CIBS Working Papers Series n°18. January, 41 p.

JEMLI R., CHTOUROU N. (2019). Mutation énergétique et développement durable : survol théorique. In R. Feki, S. Redzepagic (eds), *Orienter l'investissement vers un développement durable et une croissance partagée*. CEMAFI International.

JENKINS K., McCAULEY D., HEFFRON R., HANNES S., REHNER R. (2016), Energy justice : A conceptual review. *Energy Research and Social Science*, 11, p. 174-182,

JOUZEL J. (2021), COP 26, le problème c'est le fossé entre les textes et la réalité. *Libération*, 13 novembre.

JULIAN M. (2021), Evaluation et optimisation des stratégies visant à introduire les énergies renouvelables dans la production électrique pour l'habitat. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

KALLIS G. & al. (2018), Research on Degrowth, *Annual Review of Environment and Resources*, vol 43, 291 - 316. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025941>

LANNON C.P (2012), Causal Loop Construction : The Basics, *The Systems Thinkers*, vol 23, n°8, p. 7-8.

LATOUCHE S. (2014), *Survivre au Développement*, Mille et Une Nuits.

LATOUCHE S., HARPAGES D. (2013). Le temps de la décroissance. *Le Bord de l'eau*.

LAZAR R. (2014), Transition énergétique : quels moyens pour diversifier le mix énergétique ? *Revue de l'Energie*, vol 622, p. 457 - 462.

LEVACHER L., CLODIC D., MARECHAL F. (2009). Efficacité énergétique pour l'industrie, des technologies existantes aux solutions innovantes. ECLEER. https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2009/Communications/60.pdf

LEVY J.B (2021), Extraits du propos introductif du PDG d'EDF relatifs aux énergies renouvelables. Commission du Sénat, le 10 novembre.

- LIPIETZ A. (2012). Le Green Deal. La Découverte.
- LUTZ W., GOUJON A., KC S., STONAWSKI M., STILIANAKIS N. (2018), Demographic and Human Capital Scenario for the 21st century. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
- LUTZ W., MUTTARAK R. (2017), Forecasting Societies Adaptive Capacities Through A Demographic Metabolism Model, Nature Climate Change, vol 7, 177 - 184.
- MARESCA B. (2014). Sur le chemin de la sobriété énergétique. Engager les français au-delà des éco-gestes. CREDOC, Consommation et modes de vie, n°265, 1 - 4.
- MEADOWS D. (1999), Leverage Points, places to intervene in a System. The System Institute.
- MEUNIER F. (2008), Les énergies renouvelables, Le cavalier Bleu.
- MIETZNER D., REGER G. (2004), Scenario Approaches History, advantages and disadvantages. EU Seminar. New Technologies Foresight, Forecasting & Assessment, Seville, 13 - 14 may, p. 48 - 61.
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHESION DES TERRITOIRES (2023), Travaux de préparation de la stratégie française énergie - climat, restitution des groupes de travail, 12 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/dossier-presse-travaux-preparation-strategie-francaise-energie-climat-restitution-des-groupes>
- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2021), Rapport environnemental de la stratégie nationale bas carbone, 227 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-01-20_MTES_EES-SNBC2_rapport.pdf
- Ministère de l'Énergie et des Mines (2023). Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène (SNDH). République Algérienne Démocratique et Populaire.
- NAUDET G., REUSS P. (2008), Marchés et prix de l'énergie, EDP Sciences.
- NEGAWATT (2022), Présentation powerpoint diaporama-Conférence de présentation du scénario Négawatt
- NEGAWATT (2022), scénario-négawatt-2022-rapport-complet-partie 4
- NEGAWATT (2022), scénario-négawatt-2022-rapport-synthèse

OCDE (2014). Intensité énergétique. In Economic, Environmental and Social Statistics, Éditions OCDE, Paris. DOI : <https://doi.org/10.1787/factbook-2014-43-fr>

OFATE-DFBEW (2022), Baromètre de la transition électrique allemande - Edition Printemps.

ORIOU J. (2020), Efficacité énergétique en Allemagne, Etat des lieux : novembre 2020, Office franco-allemand pour la transition énergétique, OFATE - DFBEW, p. 1-6.

O'NEILL B. (2015), The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, p. 169, 180.

O'NEILL B.C & Al. (2017), The Roads Ahead : Narratives for Shared Socioeconomic Pathways describing world Futures in the 21st Century, Global Environmental Change, Vol 42, January, 169 - 180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>

PAPON P. (2000), L'anticipation des ruptures. la prospective des sciences et techniques, et l'identification précoce des zones de rupture. Futuribles, n°366, Recherches, Sciences et Techniques.

PERSSON L. & al. (2021). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. Environmental Science and Technology. November, p. A - L.

PERTHUIS C., SOLIER B. (2018). La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique. Chaire Economie du Climat. Septembre. <https://www.chaireconomie.duclimat.org/wp-content/uploads/2018/09/18-09-14-FLM-Transitions-énergétiques.pdf>

PESCATORI A., STUERMER M., VALCKX N. (2021), La flambée des prix de l'énergie risque de durer jusqu'à l'an prochain, Fonds Monétaire International (FMI), Blog. <https://www.imf.org/fr/News/Articles/2021/10/22/blog-surgiving-energy-prices-may-not-ease-until-next-year>

PFENNINGER S., HAWKES A., KEIRSTEAD J. (2014), Energy Systems Modeling for Twenty-first Century Energy Challenges, Renewable and Sustainable Energy Review, vol 33, p. 74 - 86.

PINEAU P.O (2021). L'efficacité énergétique pour soutenir la transition énergétique : enrichir le Québec et lutter contre les changements climatiques. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2021/08/MemoireLoiEE_HEC-Pineau_aout2021.pdf

POUGET CONSULTANTS (2022), Pouget Consultants, Communiqué-commun-scénarios-bâtiment-FINAL « Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios, ADEME, NégaWatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone 4, 25 mars.

RAGAZZI G. (2019). Les modèles économiques dans la Transition Énergétique bas carbone à l'échelle locale. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres.

RAILLARDS N. (2022), The Shift Project, Elaboration d'une méthodologie de scénarisation des systèmes énergétiques.

RAWORTH K. (2017), Meet the doughnut : the new economic model that could help end inequalities, World Economic Forum, Avril 28th.

RECLAIM FINANCE (2025), Rapport sur les financements bancaires dans les énergies fossiles.

RENOU P. (1991), Modélisation des substitutions énergétiques dans les pays de l'OCDE, Cahier du CEG, n°10, hal-02432734.

REVEST C. (2013). Les termes clés de la transition énergétique. Sciences et Techniques. <https://balises.bpi.fr/les-termes-cles-de-la-transition-energetique/>

RIAHA K. (2017), The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications, Global Environmental Change 42, p. 153-168.

RICHARDSON G. (1997), "Problems in Causal Loop Diagrams Revisited," System Dynamics Review 13(3), 247-252.

RICHARDSON G., LANNON C. (1997), Problems with Causal-Loop Diagrams, The Systems Thinker, vol 7 (10),

ROCKSTRÖM J. & al. (2009), A Safe Operating Space for Humanity, Nature, vol 461, 472 - 475. <https://doi.org/10.1038/461472a>

ROCKSTRÖM J. & al. (2009). Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity. Ecology and Society, vol 14, 1 - 26.

ROJEY A. (2021), Techniques de l'ingénieur, les contraintes de la transition énergétique, Transition énergétique-Enjeux et perspectives, 10 septembre.

RTE (2021), 2050 Rapport-complet-Détails des compléments apportés à la version de l'étude futurs énergétiques 2050, 25 octobre.

RTE (2021), Futurs-Énergétiques-2050-principaux-résultats - Résumé Exécutif, octobre.

RTE (2022), BP 2050 rapport-complet chapitre production-électricité réacteur.

RTE (2022), Compte-rendu atelier-Scénario-Bas-Carbone 2022-04-08, analyse critique des scénarios, 05 mai.

RTE (2022), Futurs énergétiques 2050 _ rapport complet, février.

RTE (2022), Futurs-Énergétiques-2050-principaux-résultats.

RTE (2022), https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale, le 18/05/2022

RUEDINGER A., AYKUT S.C (2015), Les transitions énergétiques allemande et française. Annuaire français de relations internationales. Paris : La Documentation française, 16, 389-407.

SCHOEMAKER P.J.H, VAN DER HEIJDEN C.A.J.M (1993). Strategic Planning at Royal Dutch. Shell. Journal of Strategic Change. Vol 2, 157 - 171.

SCHWARTZ P. (1991). The Art of Long View. Doubleday Publisher.

SER (2020). L'évaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires. Syndicat des Energies Renouvelables.

SHARPE B. (2013). Three Horizons : Patterning of Hope. Triarchy Press. Axminster. Devon. UK.

SHARPE B., HODGSON A., LEICESTER G., LYON A., FAZEY I. (2016). Three Horizons : a Pathways Practice for Transformation. Ecology and Society. June, vol 21 (2), 16 p.

SHARPE B., HODGSON T. (2006). Intelligent Infrastructure Futures Technology Forward Look. Report for the Foresight Programme of the Office of Science and Technology (UK). London. http://databaseanswers.org/foresight/Technology_Forward_Look.pdf

SHARPE B., HODGSON T., PAGE I. (2006). Energy Security and Climate Change. Discussion Paper. International Futures Forum. Aberdour.

SHELL (2008). Shell Global Scenarios to 2025, 2nd Edition.

SHELL (2012). 40 years of Shell Scenarios, 1972 - 2012.

SHELL (2019). Outlook for Energy : A perspective to 2040. Report.

SHELL (2023), Shell Energy Transition Strategy.

SIGNORET S. (2022), Technique de l'ingénieur, « La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale » , Rapport de synthèse, <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>

SNBC (2020), Décret n°2020-457 du 21 avril 2020 relatifs aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone, <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=y6caEB3Z2Xl2VgQFFEHik8z07XbCaxyWqP6yb6mJnWc=>

SNBC (2020), Stratégie nationale bas carbone, la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, mars 2020, 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf

SNBC (2020), Stratégie nationale bas carbone, la transition écologique et solitaire vers la neutralité carbone, synthèse, mars, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>

SONATRACH (2023), Rapport Annuel 2023.

SONATRACH (2024), Rapports spécifiques sur la stratégie énergétique et les investissements fossiles.

SPITTLER N., GLADKYKH G., DIEMER A., DAVIDSDOTTIR B. (2019), Understanding the Current Energy Paradigm and Energy System Models for More Sustainable Energy System Development. *Energies*, vol 12, 1584, 1-22.

STEFFEN W. & al. (2015). Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*. February, vol 347, Issue 6223.

STEINERT-BERLIN T. (2022), Long term Price Scénarios in European power and flexibility markets, OFATE, May.

STERLING GREGG J., NYBORG S., HANSEN M., SCHWANITZ V.J, WIERLING A., ZEISS J.P, DELVAUX S., SAENZ V., POLO-ALVAREZ L., CANDELISE C., GILCREASE W., ARROBBIO O., SCIULLO A., PADOVAN D. (2020), Collective Action and Social Innovation in the Energy Sector : A Mobilization Model Perspective. *Energies*, vol 13, p. 1 - 24.

STERMAN J. (2001), System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. *California Management Review*, 43(4), 8-25. <https://doi.org/10.2307/41166098>

STOFFAES C. (1982). La vérité (économique) sur le prix du pétrole. Politique étrangère, vol 47, n°3, 595 - 616.

THE SHIFT PROJECT (2020), PTEF-Décarboner-la-chimie, Rapport Final, janvier.

THE SHIFT PROJECT (2020), Rapport de synthèse-Vision-globale v1-PTEF, octobre.

THE SHIFT PROJECT (2021), Habiter dans une société bas carbone.

THE SHIFT PROJECT (2021), TSP RF-Emploi Synthèse, Décembre.

THE SHIFT PROJECT (2022), Climat, crises : Le plan de transformation de l'économie française, Odile Jacob.

THE SHIFT PROJECT (2022), Construction neuve et rénovation : les points communs des scénarios ADEME, Négawatt, The Shift Project et Pouget Consultants / Carbone.

THE SHIFT PROJECT (2022), PTEF-Decarboner-l'industrie_-Ciment_-Rapport-final, janvier.

THE SHIFT PROJECT (2022), PTEF-Décarboner-l'industrie-SYNTHESE, janvier.

TOTAL (2020). Communiqué de presse, résultat du quatrième trimestre 2020.

TOTAL ENERGIES (2024), Sustainability and Climate Report.

TOULOUSE E. (2020). La sobriété énergétique. Une notion disruptive de plus en plus étudiée. La Revue de l'Energie, n°649, mars-avril, 21 - 32.

UK GOVERNMENT (2022), British Energy Security Strategy.

VILLALBA B., SEMAL L. (2018). Sobriété énergétique. Contraintes matérielles, équité sociale et perspectives institutionnelles. Editions Quae.

WEC (2013). World Energy Scenarios : Composing Energy Futures to 2050. World Energy Council.

WIESENFELD B. (2013), Promesses et réalités des énergies renouvelables, EDP Sciences.

WIRZ H. (2018). Décroissance et sobriété : une nouvelle mission pour l'urbanisme ? Tous Urbains, n°22, 26 - 29.

ZAZINETTI (2008), Le peuplement de la Terre se concentre t'il sur les littoraux ? Population et Avenir, n° 689, p. 14 - 16.