

ÉNERGIES FOSSILES : ANALYSE DES TRAJECTOIRES COMPATIBLES AVEC UN SCÉNARIO 1.5° C

Juin 2024



**INSTITUT
DE LA FINANCE
DURABLE**

PARIS EUROPLACE

INTRODUCTION

Le financement des activités vertes et en transition est essentiel pour permettre de construire l'économie bas-carbone de demain. En parallèle, l'atteinte des objectifs climatiques implique également de réduire l'usage des énergies fossiles, à l'origine de 80% des émissions de gaz à effet de serre, selon une trajectoire permettant un alignement progressif vers la neutralité carbone, qui doit combiner la contrainte carbone avec la faisabilité technique et économique.

Au-delà des engagements déjà pris sur le charbon et sur le pétrole et le gaz non conventionnels, se pose donc aujourd'hui la question du financement du pétrole et du gaz en général. De nombreux acteurs de la Place de Paris développent déjà leurs propres méthodologies d'alignement compatibles avec les objectifs de Paris et un scénario 1.5°C. A noter que la réussite de la transition énergétique implique une action globale de l'ensemble des acteurs: ces engagements ne doivent pas se limiter aux acteurs de la Place de Paris si l'objectif est la réduction des investissements dans les énergies fossiles au niveau mondial.

L'objectif de ce groupe de travail est ainsi de développer des outils de compréhension des scénarios alignés 1.5°C pour rendre l'utilisation de ces scénarios la plus simple et adaptée possible aux besoins des acteurs financiers dans le développement d'une stratégie d'investissement compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris. Dans un contexte de forte attention sur les stratégies des entreprises et en particulier des institutions financières quant au financement des énergies fossiles, **ce chantier vise à construire un référentiel d'analyse à partir duquel ces institutions pourront individuellement construire ou faire évoluer leur stratégie.**

La première étape des travaux est de recenser les principaux scénarios énergie-climat alignés avec un objectif 1.5°C qui sont aujourd'hui utilisés par les acteurs de la Place. L'Agence internationale de l'énergie (AIE), le Networking for Greening the Financial System (NGFS, sur la base de scénarios produits par des instituts de recherche), l'International Renewable Energy Agency (IRENA), BloombergNEF (BNEF) et bien d'autres¹, sont autant d'institutions qui proposent des scénarios pour modéliser les possibles trajectoires de décarbonation. Chacun de ces scénarios ont leurs spécificités de modélisation (périmètre d'analyse, nombre de variables, méthode d'optimisation, etc.) et font différentes hypothèses sur les leviers de décarbonation (maturité et coût des technologies, disponibilités des terres, etc.).

Les différences d'approche entre les scénarios peuvent parfois être difficiles à appréhender. Ainsi, au cours de l'automne 2023, le groupe de travail de l'Institut de la finance durable a mené **une série d'auditions avec les experts et scientifiques du climat**. Ces travaux permettent de faire un état de la science, de comparer les méthodologies et de dégager les principaux enseignements à retenir pour les investisseurs et financeurs.

Cette analyse vise ainsi à aligner les acteurs de la Place sur leur compréhension des trajectoires d'investissement compatibles avec un scénario 1.5°C. Elle a pour objectif de dégager les principaux enseignements des scénarios énergie-climat de référence aujourd'hui disponibles.

¹ Comme le One Earth Climate Model (OECM) commandé par la Net-Zero Asset Owner Alliance et la European Climate Foundation.

SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Les travaux du groupe de travail s'appuient sur six scénarios de provenance d'institutions de référence dans le domaine de la modélisation climatique: l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le Networking for Greening the Financial System (NGFS, s'appuyant sur les travaux de laboratoires de recherches), l'International Renewable Energy Agency (IRENA) et BloombergNEF (BNEF). Chacun des scénarios développés ont leur spécificités de modélisation (scope d'analyse, nombre de variables, méthode d'optimisation, etc.) et font des hypothèses différentes sur les leviers de décarbonation (maturité et coût des technologies, disponibilités des terres, etc.). Néanmoins, l'analyse de ces scénarios permet de dégager des tendances claires concernant les trajectoires relatives aux énergies fossiles compatibles avec un réchauffement limité à 1.5°C

TRAJECTOIRES ÉNERGÉTIQUES : LES SCÉNARIOS 1.5°C TRACENT UN CHEMIN COMMUN POSSIBLE MAIS ÉTROIT.

1. Pour atteindre le Net Zero en 2050, la décarbonation du secteur énergétique est prioritaire, aussi bien dans les usages d'énergie que dans la production d'énergie.
2. Pour décarboner les usages et la production d'énergie, les solutions reposant sur l'électrification des usages et l'efficacité énergétique sont prioritaires, car ce sont les plus efficaces dans une grande majorité des usages (action de décarbonation au coût d'abattement du CO₂ le plus abordable).
3. Des solutions importantes de décarbonation des usages et de la production d'énergie sont déjà matures: véhicule électrique, pompe à chaleur, substitution des moyens carbonés de production d'électricité (notamment le charbon) par des moyens bas-carbone de production d'électricité.
4. Vers 2050, la demande d'énergie finale (en sortant notamment les énergies fossiles du mix énergétique) devra baisser, et en parallèle la demande en électricité devra augmenter.

5. D'ici à 2050, la consommation de charbon et de pétrole devra être drastiquement réduite. La tendance à la forte baisse de la demande en gaz est également très claire, même si plus variable en fonction des scénarios.

6. Répondre à la hausse de la demande en électricité décarbonée exige une hausse très significative de la production, via un mix diversifié reposant principalement sur une forte croissance des énergies renouvelables.

7. Le rôle anticipé de l'hydrogène varie d'un scénario à l'autre à cause de son coût de production encore très élevé, et doit être prioritairement destiné aux secteurs les plus difficile à décarboner.

8. Le CC(U)S et les solutions à émissions négatives (BECCS, DACCS, afforestation) seront probablement nécessaires pour atteindre l'objectif 1.5°C mais ces leviers sont contraints, notamment par des limites physiques.

TRAJECTOIRES D'INVESTISSEMENTS : LES SCÉNARIOS 1.5°C REPOSENT SUR DES RATIOS D'INVESTISSEMENT RADICALEMENT INVERSÉS.

1. Afin de respecter les trajectoires limitant le réchauffement à 1,5°, les investissements dans les énergies fossiles devraient être divisés par 2, voire par 4, d'ici à 2050 par rapport à 2020. Selon l'AIE, ces investissements devraient même être divisés par 2 d'ici 2030, et ne devraient pas financer de nouveaux projets de production.
2. Les investissements en approvisionnement dans les énergies bas-carbone doivent être multipliés par 2,5 à 3 fois dès 2030 par rapport aux montants de 2020.
3. En termes de ratio, les investissements dans la transition énergétique doivent représenter 10\$ pour 1\$ dans les énergies fossiles d'ici 2030, contre 1\$ pour 1\$ il y a encore 5 ans et 1,7\$ pour 1\$ aujourd'hui.

1. COMPARER LES SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE POUR IDENTIFIER LES CONVERGENCES ET LES GRANDES TENDANCES

5

Les auditions menées par le groupe de travail

6

Les scénarios de l'étude

7

«Tous les modèles sont faux, mais certains sont utiles»

10

Chaque scénario repose sur un récit d'avenir spécifique : les hypothèses sous-jacentes sont centrales pour les comprendre

11

2. TRAJECTOIRES PHYSIQUES : LES ENSEIGNEMENTS CLÉS DES SCÉNARIOS ÉNERGIE-CLIMAT

12

La transition énergétique est un passage de relais entre des énergies fossiles à celles à faibles émissions

13

Les leçons clés des scénarios énergie-climat au niveau mondial

14

Se fixer des points de passage à court et moyen termes pour rester en dessous des 1,5°C

25

Des scénarios de transition très variables en fonction du pays et de la région du monde

26

3. TRAJECTOIRES D'INVESTISSEMENTS : LES RATIOS D'INVESTISSEMENT DOIVENT ÊTRE INVERSÉS

29

CONCLUSION

33

ANNEXES

34



ÉNERGIES FOSSILES : ANALYSE
DES TRAJECTOIRES COMPATIBLES
AVEC UN SCÉNARIO 1.5°C

1. COMPARER LES SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE POUR IDENTIFIER LES CONVERGENCES ET LES GRANDES TENDANCES

LES AUDITIONS MENÉES PAR LE GROUPE DE TRAVAIL

La première phase des travaux vise à dégager les messages clés des principaux scénarios énergie-climat existants alignés sur un objectif 1.5°C. Si ces scénarios se fondent sur des méthodologies et des hypothèses différentes, l'objectif est de dégager les grandes tendances, malgré la diversité d'approches des scénarios présentés. Les scénarios se fondent sur une analyse physique des systèmes d'énergie et d'émissions de CO₂ mais aussi certains proposent une projection en termes d'investissements nécessaires. Une analyse comparative sur les deux volets est présentée ici.

Il convient ainsi d'identifier les paramètres déterminants dans la définition des trajectoires relatives aux énergies fossiles et explorer les incertitudes liées à ces paramètres mais aussi les convergences de leurs conclusions. L'objectif de ces travaux est ainsi de :

- Comparer les différentes hypothèses des scénarios: niveau de la demande d'énergie finale (sobriété, croissance des émergents, etc.), potentiel de croissance des énergies bas-carbone, potentiel en efficacité énergétique, possibilités de déploiement des solutions de CCS, BECCCS, AFOLU, hydrogène, etc., niveau «d'overshoot», probabilité d'occurrence des scénarios, etc.
- Analyser les implications de chaque scénario sur la demande en énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz,...) et bas carbone (éolien, photovoltaïque, nucléaire,...)
- Construire un diagnostic des trajectoires au niveau mondial mais aussi, dans la mesure du possible au niveau sectoriel et régional;
- Etablir un constat commun concernant les trajectoires d'investissement dans le secteur énergétique.

Le groupe de travail a mené une série d'auditions avec les équipes scientifiques de plusieurs institutions de référence :

- **L'Institut du développement durable et des relations internationales** avec Henri Waisman qui dirige le programme Deep Decarbonization Pathways.
- **L'Agence International de l'Energie** avec Tanguy de Bienassis et Jérôme Hilaire qui travaillent sur les scénarios du World Energy Outlook.
- **La Banque de France et le Network for Greening the Financial System (NGFS)** avec Clément Payerols et Paul Champey qui travaillent sur les scénarios du NGFS.
- **BloombergNEF** en présence de David Hostert, Global Head of Economics & Modeling.
- **Ploy Achakulwisut, membre du GIEC et du Stockholm Environment Institute**, et auteure d'un article sur les stratégies de réduction des énergies fossiles dans la lutte contre le réchauffement climatique, «Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions» avec Peter Erickson, Céline Guivarch, Roberto Schaeffer, Elina Brutschin, and Steve Pye, publié dans la revue *Nature*.

→ Un nouvel échange avec les équipes de **l'Agence Internationale de l'Énergie**, Tanguy de Bienassis et Jérôme Hilaire, pour qu'ils présentent le nouveau World Energy Outlook 2023 et les différences avec la version précédente.

Des échanges avec les principales entreprises énergétiques françaises ont été organisés pour mieux comprendre comment ils utilisent ces scénarios dans leur travail stratégique :

- **Total Energies** avec Thomas-Olivier Leauthier, chief economist de Total Energies, et Jean-Pascal Cléménçon, Senior Vice President Strategy & Markets,
- **Electricité de France** avec Charles Weymuller, économiste en chef.

Enfin, pour l'Institut de la Finance Durable, **Carbone 4** a réalisé une analyse quantitative de comparaison des scénarios énergie-climat.

LES SCÉNARIOS DE L'ÉTUDE

Les travaux du groupe de travail s'appuient sur six scénarios de référence provenant d'institutions de référence dans le domaine de la modélisation climatique. Chacun de ces scénarios ont leurs spécificités de modélisation (scope d'analyse, nombre de variables, méthode d'optimisation, etc.) et prennent des paris différents sur les leviers de décarbonation (maturité et coût des technologies, disponibilités des terres, etc.). Ces spécificités sont à prendre en compte dans la compréhension des modèles.

IEA Global Energy and Climate Model – Net Zero Energy 2050

[IEA World Energy Outlook 2023](#);

Les scénarios énergie-climat de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sont issus d'un modèle d'optimisation partielle dit «bottom-up» qui simule la demande, l'offre, les prix et la transformation du système énergétique.

Le scénario Net Zero Energy 2050 définit une trajectoire pour que le secteur mondial de l'énergie atteigne des émissions nettes de CO₂ nulles d'ici 2050. Il ne repose pas sur des réductions d'émissions provenant de l'extérieur du secteur énergétique globale pour atteindre ses objectifs. Le secteur énergétique au sens de l'AIE doit être compris comme au sens global du terme comme l'ensemble de l'énergie consommé dans les secteurs du bâtiment, du transport, l'industrie et de la production énergétique en tant que tel. Dans le modèle, l'accès universel à l'électricité est atteint d'ici 2030. Il repose sur une hypothèse de forte croissance des énergies propres avec une faible utilisation des technologies de capture et stockage de carbone. L'AIE entend les énergies propres comme toute énergie avec une faible empreinte carbone ce qui comprend non seulement les énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermie, biomasse,...) mais aussi le nucléaire, l'hydrogène et les énergies fossiles avec capture de carbone.

IRENA – 1.5C Scenario

[World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway](#);

L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) fournit une modélisation de la transition du système énergétique avec un accent sur les énergies renouvelables.

Le Scénario 1.5 est une transition ordonnée visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5°C d'ici la fin du siècle, en mettant l'accent sur les énergies renouvelables. Il atteint des émissions nettes nulles en 2050. Le modèle est basé sur les statistiques énergétiques avec un lien vers un modèle macro-économique pour l'analyse socio-économique. Il repose sur une hypothèse de croissance générale de la demande énergétique et donc à la fois sur une forte croissance des énergies bas carbone mais aussi une utilisation importante du gaz comme énergie de transition. Cette hypothèse implique donc l'utilisation importante de technologie de capture et stockage de carbone. Le secteur de l'utilisation des terres n'est pas couvert.

NGFS GCAM – Net Zero 2050

[NGFS Scenario Explorer](#)

Sur la base de scénarios produits par des instituts de recherche, le Network for Greening the Financial System (NGFS) fournit une modélisation de transition dans le but de développer la gestion des risques climatiques dans le secteur financier. Développé par un consortium de laboratoires, le modèle GCAM est un modèle d'équilibre partiel du secteur de l'énergie et des terres, qui suppose des consommateurs et des producteurs prenant des décisions avec les informations dont ils disposent au temps t.

Ce scénario du NGFS prévoit que les émissions mondiales de CO₂ atteignent zéro net en 2050. De plus, les pays ayant un engagement clair envers un objectif de politique spécifique de zéro net à la fin de 2020 sont supposés atteindre cet objectif. Le scénario fait l'hypothèse d'une sortie plus progressive des énergies fossiles (comparativement à d'autres scénarios étudiés) en reposant notamment sur des hypothèses techno-optimistes concernant les possibilités de capture et stockage de carbone.

NGFS REMIND-MAgPIE – Net Zero 2050

[NGFS Scenario Explorer](#)

Développé par le Postdam Institute for Climate Impacts, le modèle REMIND-MagPIE combine un modèle d'équilibre général sur le secteur de l'énergie et la macroéconomie avec un modèle d'équilibre partiel sur le secteur des terres, en supposant, à l'instar de GCAM, des consommateurs et des producteurs prenant des décisions avec les informations dont ils disposent au temps t. Le modèle REMIND a une approche «perfect foresight où les agents prévoient parfaitement les coûts futurs jusqu'en 2050.

Ce scénario du NGFS prévoit que les émissions mondiales de CO₂ atteignent zéro net en 2050. De plus, les pays ayant un engagement clair envers un objectif de politique spécifique de zéro net à la fin de 2020 sont supposés atteindre cet objectif. Ce scénario repose sur l'hypothèse d'une relative décroissance de la consommation énergétique d'ici à 2050. Ainsi, il repose comparativement moins sur le développement des EnR et du CCS avant 2050 (la quantité de CCS néanmoins augmente après 2050 pour compenser un overshoot des émissions).

NGFS MESSAGEix-GLOBIOM - Net Zero 2050

[NGFS Scenario Explorer](#)

Développé par l'International Institute for Applied Systems Analysis et le PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, MESSAGEix-GLOBIOM est un modèle d'évaluation intégré conçu pour évaluer la transformation des systèmes énergétique et terrestre face aux défis du changement climatique et d'autres problèmes de durabilité. Le modèle MESSAGE a une approche «perfect foresight» où les agents prévoient parfaitement les coûts futurs jusqu'en 2050.

Ce scénario du NGFS prévoit que les émissions mondiales de CO₂ atteignent zéro net en 2050. Ce scénario est reposé sur un récit intermédiaire entre les hypothèses de GCAM et de REMIND: il s'appuie à la fois sur la sobriété énergétique, une transition gaz et le développement d'énergies renouvelables. Il repose très peu sur le développement du CCS.

BloombergNEF NEO 2022 - Net Zero Scenario

[New Energy Outlook 2022](#)

Faisant partie du groupe Bloomberg, BloombergNEF (BNEF) est un fournisseur de recherche stratégique couvrant les marchés mondiaux des matières premières et les technologies disruptives qui impulsent la transition vers une économie à faible émission de carbone. Le BNEF New Energy Outlook 2022 (NEO 2022) est une analyse de scénarios à long terme de BloombergNEF (BNEF) sur l'avenir de l'économie de l'énergie couvrant l'électricité, l'industrie, les bâtiments et les transports, ainsi que les principaux moteurs façonnant ces secteurs jusqu'en 2050.

Le scénario NEO 2022 NZS décrit une évolution de l'économie de l'énergie pour atteindre des émissions nettes nulles en 2050. Contrairement aux autres scénarios qui visent 1,5°C en 2100, il vise 1,77°C en 2050 (sans modéliser jusqu'à 2100): c'est un scénario «well below 2°C» et non 1,5°C. Cette hypothèse, fondamentale dans la modélisation, lui donne donc davantage de souplesse dans la sortie des énergies fossiles. De part cette différence d'objectif, il repose donc moins sur le CCS mais mise néanmoins sur le déploiement rapide et important des énergies renouvelables, du nucléaire et d'autres technologies à faibles émissions de carbone dans le secteur de l'électricité. Il mise également dans l'adoption de carburants plus propres dans les secteurs de la consommation finale, notamment l'hydrogène et la bioénergie, ce qui repose donc sur une hypothèse d'utilisation importante des terres pour la production d'énergie. Si ce scénario est utilisé pour atteindre 1,5°C en 2100, il repose donc implicitement sur une hypothèse d'overshoot et donc CCS important après 2050. Ainsi, de par sa nature légèrement différente des autres scénarios, le scénario BNEF est gardé à part dans les comparaisons.

«TOUS LES MODÈLES SONT FAUX, MAIS CERTAINS SONT UTILES»²

Comme toute exercice de modélisation, ces scénarios sont utiles pour se projeter à l'avenir et anticiper des tendances en fonction d'hypothèses fixées, mais ils ne visent pas à réaliser des prévisions précises du futur. Il est utile de rappeler les limites inhérentes aux scénarios climatiques³:

- Ces scénarios ont l'ambition d'être alignés avec l'Accord de Paris qui vise à limiter le réchauffement de la planète à 1,5°C ou «très en dessous» de 2°C. Ces objectifs impliquent une «traduction» de la hausse de température en budget carbone planétaire. Or, de par la complexité des sous-jacents climatiques, il existe une certaine incertitude dans les correspondances exactes entre budget carbone et élévation de la température moyenne à la surface du globe. Ainsi, par convention, la plupart des scénarios ne donnent qu'une certitude à 50% de chances de tenir les objectifs affichés. Autrement dit, pour un budget carbone donné, les incertitudes liées aux phénomènes climatiques ne permettent pas de garantir à plus de 50% que la température sera réellement maintenue en-dessous 1,5°C s'il devait se réaliser comme ainsi projeté.
- Comme vu ci-dessous, de nombreux scénarios climatiques concernent uniquement le CO₂ émis par la combustion des énergies fossiles et n'intègrent pas donc certains autres secteurs émissifs. Ainsi, les émissions relevant de l'utilisation des terres, de la gestion des forêts et de l'agriculture ne sont souvent pas prises en compte, tout comme les émissions d'autres gaz à effet de serre (même s'ils sont progressivement de plus en plus pris en compte dans les exercices de modélisation récents). Ainsi, l'absence d'une part non-négligeable des émissions dans ces scénarios crée une incertitude supplémentaire sur le respect du budget carbone et donc sur l'atteinte des objectifs de réchauffement.
- La croissance est une variable exogène des scénarios. Les scénarios intègrent rarement l'effet des transformations majeures de la décarbonation sur l'activité économique. Or, de telles transformations du système énergétique impliqueraient nécessairement des impacts sur le taux de croissance.
- Les scénarios reposent sur de nombreuses hypothèses sous-jacentes prises par le modélisateur. Ainsi, toutes les hypothèses ne sont pas forcément documentées ou justifiées, ce qui peut conduire à des résultats parfois contestables. Les trajectoires de décarbonation dans les différents scénarios impliquent en effet des hypothèses sur la mobilisation d'une multitude de leviers de décarbonation (déploiement des EnR, de la capture et du stockage du carbone, des technologies d'élimination du CO₂, de l'hydrogène, de la biomasse, de l'efficacité énergétique, de la sobriété, etc.). Ces hypothèses peuvent être ainsi parfois ambitieuses par rapport aux observations empiriques ou aux capacités anticipables de déploiement dans les prochaines décennies compte tenu des contraintes techniques, physiques, économiques ou sociales. Même s'il est utile de multiplier les exercices pour «tester» différentes conditions possibles de transition carbone, il convient au moment de la prise de décision de rester prudent quant au poids des différentes solutions, étant donné les risques importants liés à la non-atteinte de nos objectifs climatiques.

² Cet aphorisme est attribué au statisticien George Box.

³ Nous nous inspirons ici de quelques points de vigilance cités par Reclaim Finance dans sa note d'octobre 2020, «Scénarios climatiques: 5 pièges à éviter pour contenir le réchauffement à 1,5°C»

CHAQUE SCÉNARIO REPOSE SUR UN RÉCIT D'AVENIR SPÉCIFIQUE : LES HYPOTHÈSES SOUS-JACENTES SONT CENTRALES POUR LES COMPRENDRE

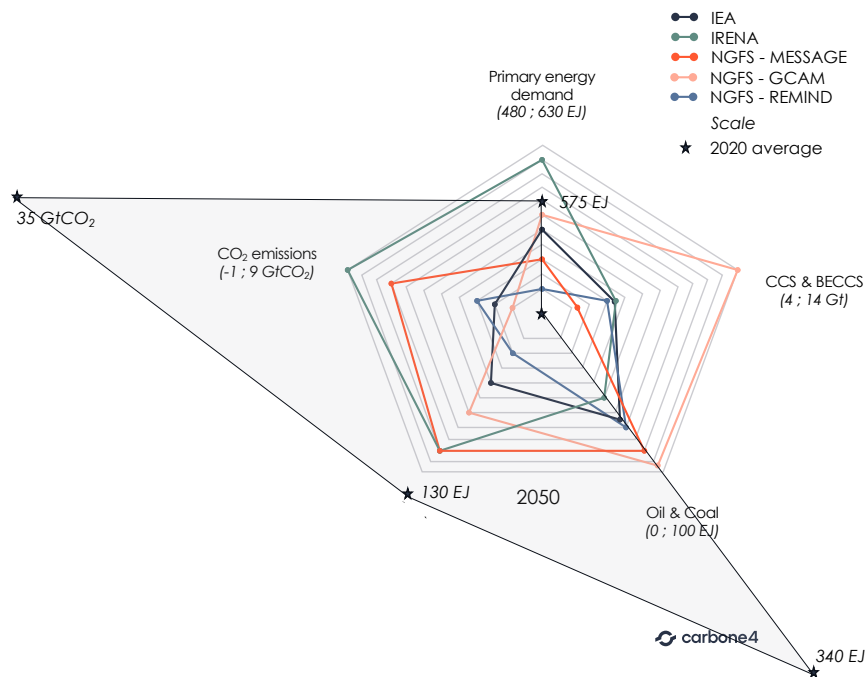


Figure – Etoiles représentatives des principaux scénarios énergie-climat en 2050
Source: Carbone 4, IFD

Par rapport à 2020, tous les scénarios prévoient :

- une consommation d'énergie primaire qui varie peu, au global, entre 2020 et 2050 (575 EJ en 2020 et entre 630 et 480 EJ selon les scénarios en 2050) mais qui cache des évolutions sectorielles et géographiques majeures.
- une très forte diminution des émissions de CO₂ liées aux activités énergétique du fait d'une très forte diminution de la consommation de charbon, de pétrole et de gaz.

Ces scénarios 1,5°C atteignent tous le Net Zero en 2050 mais ils reposent sur des hypothèses différentes en ce qui concerne le rôle de chaque technologie (voir l'étoile reflétant les différents narratifs des scénarios). Ils doivent être considérés comme des combinaisons d'hypothèses indissociables.

En regardant l'étoile résumant les scénarios, différents narratifs se dégagent :

- REMIND fait le pari de l'efficacité énergétique et de la sobriété ;
- GCAM et IRENA sont des scénarios davantage pro-technologie concernant les capacités de stockage du carbone (CCS). IRENA repose sur un overshoot relativement plus important en 2050 avant d'atteindre 1.5°C en 2100 ;
- MESSAGE est un scénario intermédiaire entre REMIND et GCAM ;
- Le NZE de l'AIE et le NZS de Bloomberg reposent peu sur la capture de CO₂ mais reposent sur des hypothèses ambitieuses sur le développement des énergies décarbonées (qui apparaissent réalistes au vu de la progression des EnR ces dernières années⁴).

⁴ Voir les analyses de l'AIE citées plus haut.



ÉNERGIES FOSSILES : ANALYSE
DES TRAJECTOIRES COMPATIBLES
AVEC UN SCÉNARIO 1.5°C

2. TRAJECTOIRES PHYSIQUES : LES ENSEIGNEMENTS CLÉS DES SCÉNARIOS ÉNERGIE-CLIMAT

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE EST UN PASSAGE DE RELAIS ENTRE DES ÉNERGIES FOSSILES À CELLES À FAIBLES ÉMISSIONS

Dans les scénarios, l'avenir énergétique est porté par les technologies à faibles émissions carbone: le solaire, l'éolien, la géothermie, les bioénergies, etc. Il s'agit d'exploiter au mieux toutes les sources décarbonées.

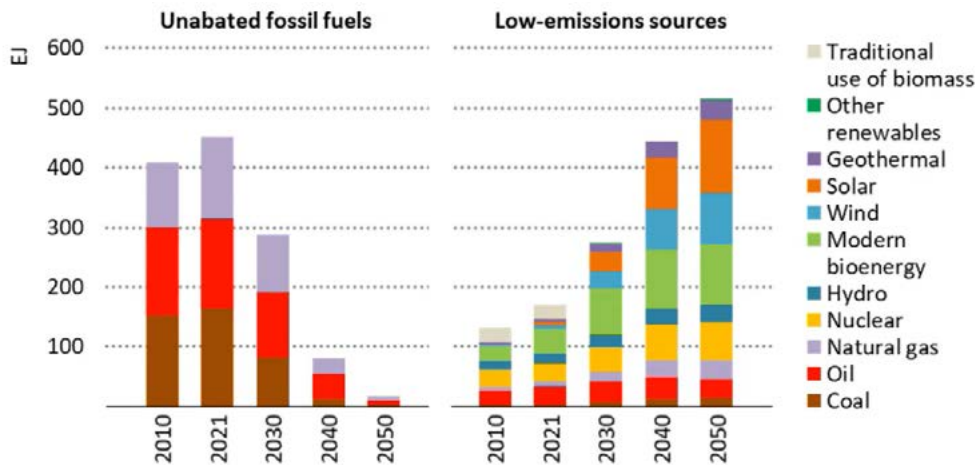


Figure – Evolution des sources de production énergétique dans le système énergétique global du scénario NZE de l'AIE

Source: AIE – WEO 2022

Dans le scénario NZE de l'AIE, comme dans beaucoup d'autres, une part significative du résiduel d'énergies fossiles est couplé avec des technologies de CCS.

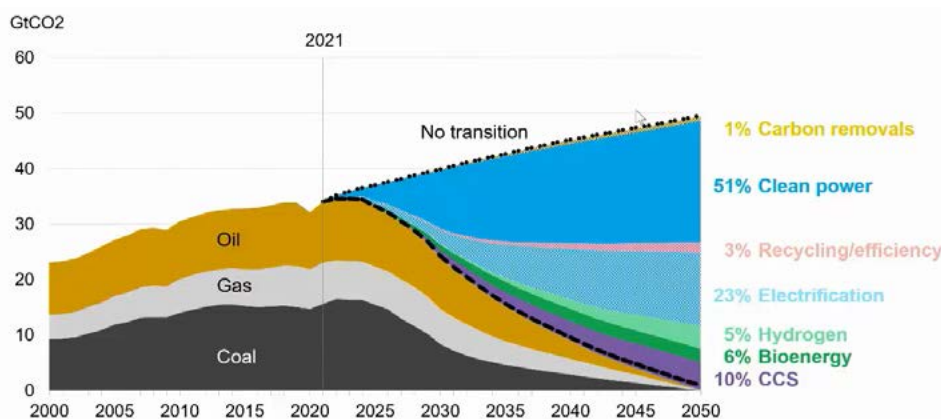


Figure – Réductions des émissions de CO₂ dues à la combustion des énergies fossiles, NZS par rapport à un scénario sans transition, couvrant l'ensemble du système énergétique

Source: BloombergNEF – NEO 2022

Le scénario de BloombergNEF est cohérent avec les estimations de l'AIE, la grande majorité de l'effort de décarbonation (plus de 75% ici) repose sur le développement de capacités de production d'électricité bas carbone (51%) assortie de l'électrification du secteur énergétique (23%) et d'un gain en efficacité énergétique (cette dernière prenant une part plus faible dans le scénario BNEF que dans celui de l'AIE). Le dernier quart concerne des technologies qui ne sont pas encore entièrement matures (hydrogène, bioénergie en dehors du secteur de l'électricité, capture et stockage de carbone, la capture et le stockage de carbone direct dans l'air, etc.).

LES LEÇONS CLÉS DES SCÉNARIOS ÉNERGIE-CLIMAT AU NIVEAU MONDIAL

1. Pour atteindre le Net Zero en 2050, la décarbonation du secteur énergétique est prioritaire, aussi bien dans les usages d'énergie que dans la production d'énergie.

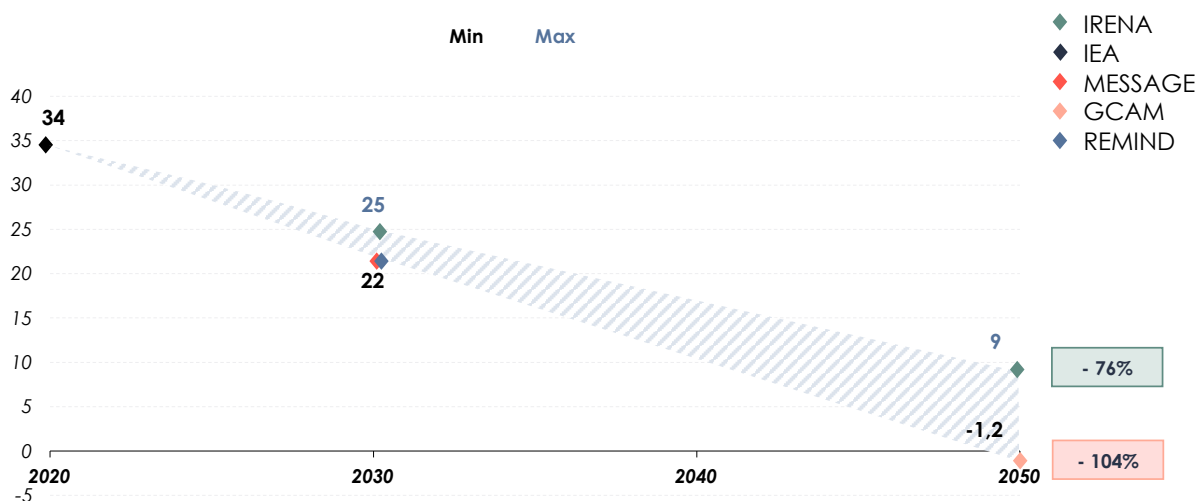


Figure – Fourchette d'émissions de CO₂ liées à l'énergie dans les scénarios à 1,5°C
Source: Carbone 4, IFD

La décarbonation de l'activité humaine passe principalement par la décarbonation de l'énergie, que ce soit dans son usage (se chauffer, se déplacer, produire, se nourrir) et dans sa production. Le Global Carbon Budget⁵ fait état d'émissions de 34 GtCO₂ en 2020 dans une fourchette d'incertitude de 33-36 GtCO₂. Les modèles climatiques utilisés pour les différents scénarios envisagés montrent une certaine variabilité dans les projections d'évolution des émissions de CO₂ liées à l'énergie. Pour atteindre le Net Zero en 2050, les émissions de CO₂ liées à l'énergie doivent diminuer entre 2020 et 2050, de -76% à -104% en fonction des scénarios considérés.

⁵ globalcarbonbudget.org/

2. Pour décarboner les usages et la production d'énergie, les solutions reposant sur l'électrification des usages et l'efficacité énergétique sont prioritaires, car ce sont les plus efficaces dans une grande majorité des usages (action de décarbonation au coût d'abattement du CO₂ le plus abordable).

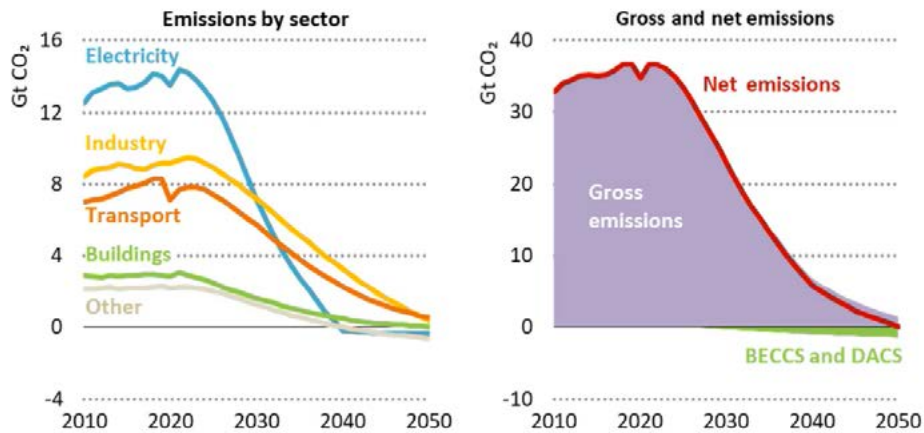


Figure – Décroissance des émissions de CO₂ par secteur dans le NZE de l'AIE

Source: AIE – WEO 2022

Tous les secteurs doivent contribuer à la transition même si le coût de la décarbonation n'est pas le même pour toutes les technologies. L'un des points clés de la transition est l'électrification du secteur énergétique. Par ailleurs, la courbe d'émissions du secteur électrique décroît beaucoup plus rapidement que les autres et devient même négative grâce à la production à partir de biomasse combinée à de la capture et du stockage de carbone. La bioénergie avec captage et stockage de dioxyde de carbone (BECCS; aussi connue sous son acronyme anglais BECCS) est un processus consistant à produire de l'énergie à partir de biomasse, qui a absorbé du carbone atmosphérique lors de sa croissance, et à capturer et stocker le carbone lors de la production d'énergie, le retirant ainsi de l'atmosphère. Néanmoins, le BECCS souffre de limites qui ne lui permettent d'avoir qu'un rôle marginal dans la décroissance des émissions de CO₂ (voir plus loin).

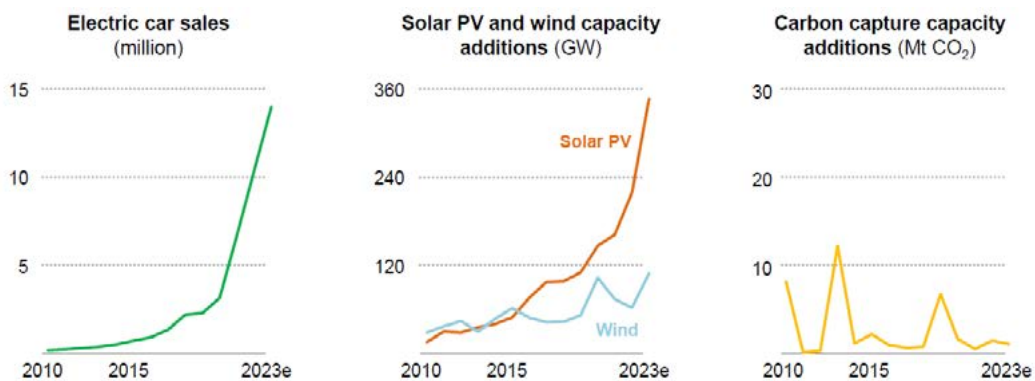


Figure – Croissance des leviers de décarbonation ces 15 dernières années

Source: AIE – WEO 2023

Selon l'AIE, la récente croissance des énergies renouvelables laisse ouverte la possibilité d'un scénario 1.5°C, mais cela demande un déploiement rapide des autres technologies de la décarbonation (véhicules électriques, CCS, etc.).

3. Des solutions importantes de décarbonation des usages et de la production d'énergie sont déjà matures : véhicule électrique, pompe à chaleur, substitution des moyens carbonés de production d'électricité (notamment le charbon) par des moyens bas-carbone de production d'électricité.

Aujourd'hui la décarbonation du secteur énergétique global est le plus efficace en termes de coût: les technologies sont disponibles et peu chère. Dans certains secteurs, les coûts de transition peuvent être plus élevés et les technologies bas carbone parfois même n'existent pas pour remplacer les technologies carbonées (ex: aviation et maritime, agriculture, etc.).

Selon le scénario de l'AIE⁶, 80% des solutions dont on a besoin pour atteindre les objectifs en 2030 sont déjà disponibles: les objectifs de triplement des installations en EnR, de doublement de l'efficacité énergétique, et de division par 4 des fuites de méthane dans l'extraction des énergies fossiles, qui représentent 80% de l'effort, reposent sur des technologies déjà matures.

En ce qui concerne les objectifs de 2050, les technologies existent à 53% selon l'AIE⁷. La petite moitié restante doit être développée dans les plus brefs délais en investissant massivement dans la R&D.

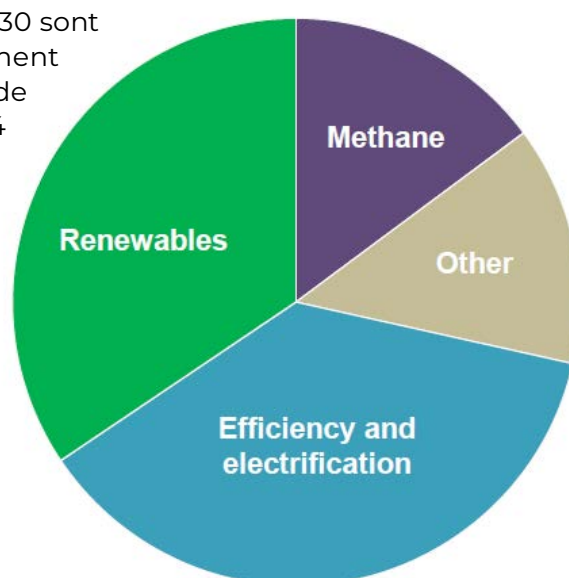


Figure – Réductions d'émissions par mesure d'ici à 2030 dans le scénario NZE de l'AIE
Source: AIE – WEO 2023

⁶ AIE (2023), World Energy Outlook

⁷ AIE (2023), World Energy Outlook

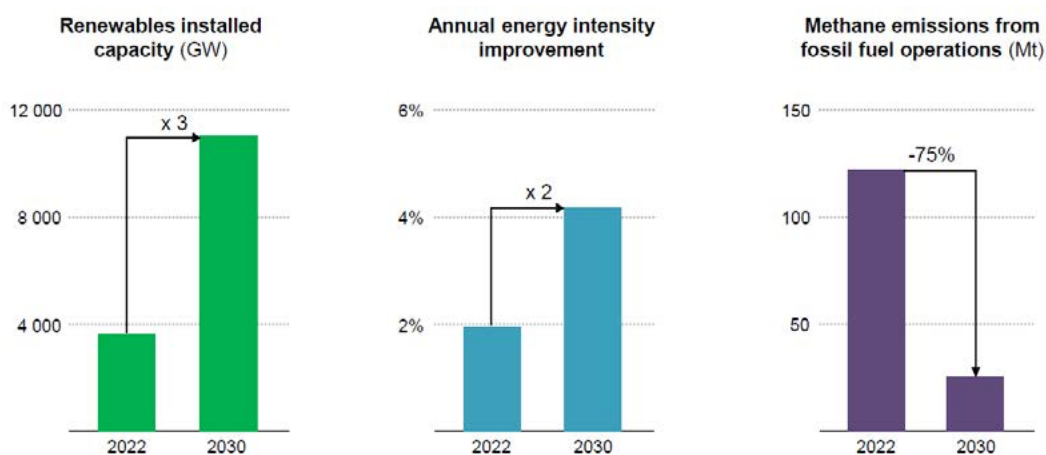


Figure – Evolutions des principaux leviers de décarbonation du NZE de l'AIE

Source: AIE, WEO 2023

L'installation de capacités d'énergies renouvelables et l'électrification du secteur énergétique sont des mesures bien connues. En revanche, la réduction des fuites de méthane dans l'extraction des énergies fossiles l'est moins et représente un levier rapide et non-négligeable de la décarbonation du secteur. Elle permet une réduction immédiate des émissions produites lors de l'activité de l'extraction de pétrole et gaz. Il existe une liste de mesures concrètes permettant de réduire les émissions de méthane des industries extractives jusqu'à -60%⁸: arrêt immédiat du torchage, électrification des activités d'extraction et des centrales pour liquéfier le gaz, équipement des centrales de CCS, massification de l'utilisation d'hydrogène dans les raffineries, etc.

Les émissions de méthane contribuent à environ 30% du réchauffement observé depuis la révolution industrielle⁹. Le secteur de l'énergie est le principal secteur émissif: pétrole (49MtCH₄/an), gaz (29MtCH₄/an), charbon (40MtCH₄/an) et bioénergie (10MtCH₄/an). Le secteur de l'extraction énergétique représente 1/3 des émissions de méthane actuelles issues de l'activité humaine. 70% des émissions de méthane issues du secteur de l'énergie sont attribuées au dix pays les plus émetteurs: Etats-Unis tout d'abord, suivis de près par la Russie, puis la Chine (premier émetteur sur le charbon). La quantité de méthane émise dans l'atmosphère par les opérations liées à l'extraction d'énergies fossiles en 2023 représente 170bcm (plus que la production annuelle de gaz du Qatar): à titre illustratif, la demande annuelle européenne en gaz est de 320bcm. Ces fuites sont ainsi non-négligeables dans la contribution au dérèglement climatique: réduire 75% des émissions de méthane du secteur de l'énergie avant 2030 est crucial pour limiter le réchauffement sous 1.5°C.

⁸ Audition de l'Agence Internationale de l'Energie, Institut de la Finance Durable, le mardi 12 septembre 2023.

⁹ www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2024

4. Vers 2050, la demande d'énergie finale (en sortant notamment les énergies fossiles du mix énergétique) devra baisser, et en parallèle la demande en électricité devra augmenter.

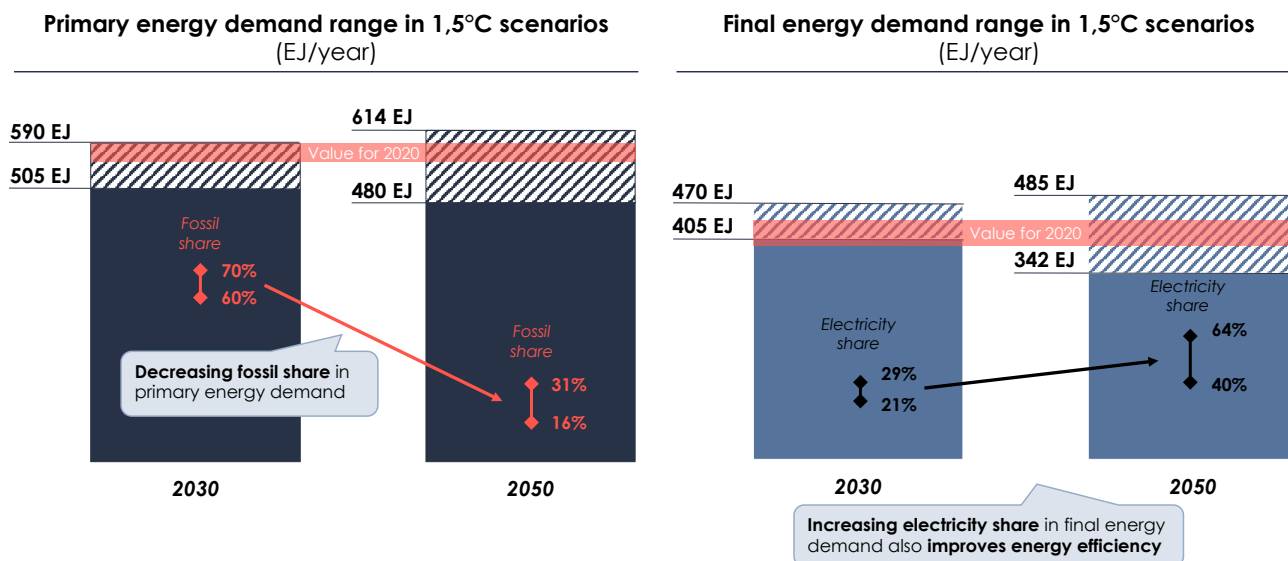


Figure – Evolution de la demande en énergie primaire et finale dans les scénarios 1.5°C

Source: Carbone 4, IFD

L'ensemble des scénarios met en avant deux phénomènes concomitants et conduisant à une demande globale d'énergie primaire relativement stable d'ici à 2050 (malgré des divergences entre les scénarios) :

- Diminution de la part des énergies fossiles dans la demande d'énergie primaire : entre 2030 et 2050, selon les scénarios, la part des énergies fossiles est divisée par 2, voire 4, dans la demande d'énergie primaire.
- L'augmentation de la part de l'électricité dans la demande d'énergie finale améliore également l'efficacité énergétique : entre 2030 et 2050, selon les scénarios, la part de l'électricité dans la demande finale est multiplié, a minima, par 2.

5. D'ici à 2050, la consommation de charbon et de pétrole devra être drastiquement réduite. La tendance à la forte baisse de la demande de gaz est également très claire, même si plus variable en fonction des scénarios.

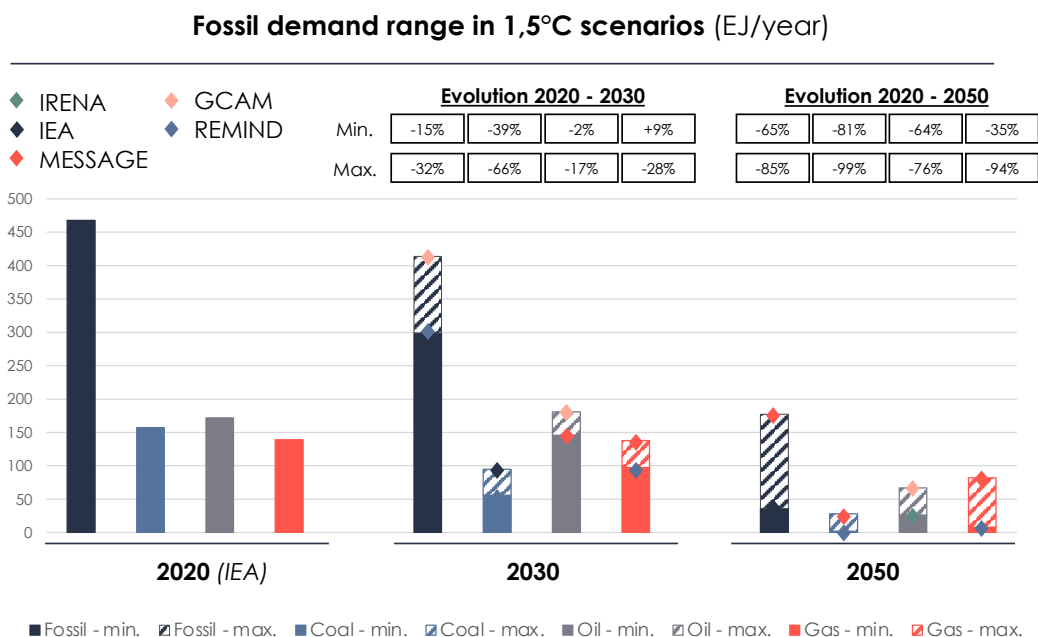


Figure – Fourchettes d'évolution de la demande en énergies fossiles dans les scénarios 1.5°C

Source: Carbone 4, IFD

Dans chaque scénario, la demande en énergies fossiles est divisée au moins par 3 entre 2020 et 2050, et jusqu'à divisée par 6 dans certains d'entre eux. La demande de charbon et de pétrole est drastiquement réduite dans tous les scénarios pour atteindre des niveaux résiduels en 2050. La demande résiduelle concernera principalement les usages pétrochimiques du pétrole. Le rôle à long terme du gaz dans la transition est plus variable, la demande est divisée par 1,5 ou par 20 d'ici 2050 selon le scénario.

A noter que les scénarios qui s'appuient sur le gaz s'appuient principalement sur des centrales à gaz couplées avec du CCS, ce qui est un pari risqué: «Les trajectoires plus élevées pour le gaz sont rendues possibles par un CCS et une élimination du dioxyde de carbone plus importants, mais elles sont probablement associées à une représentation inadéquate dans les modèles de la capacité régionale de stockage du CO₂ et de l'adoption de la technologie»¹⁰. Les conditions de déploiement de cette solution seront étudiées plus en détail dans la suite des travaux du chantier 5 de l'IFD.

¹⁰ Achakulwisut et al., (2023), Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions, Nature Communications

6. Répondre à la hausse de la demande en électricité décarbonée exige une hausse très significative de la production, via un mix diversifié reposant principalement sur une forte croissance des énergies renouvelables.

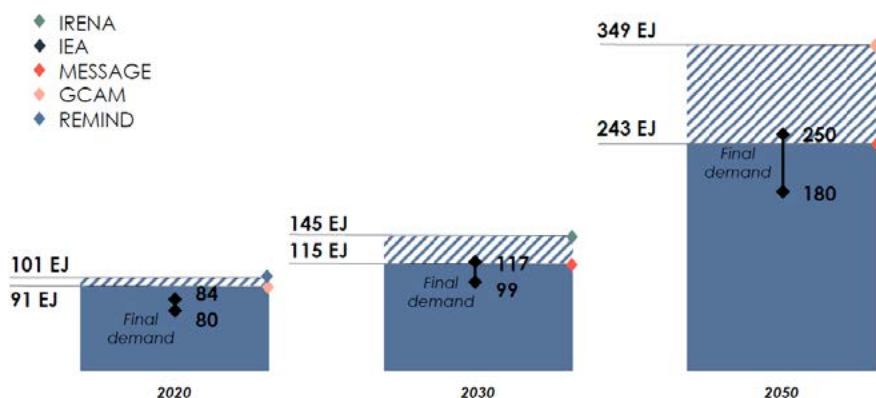


Figure – Fourchettes de production d'électricité dans les scénarios à 1.5°C (EJ/an)

Source: Carbone 4, IFD

Note de lecture: les volumes de demande finale (fourchettes au centre des barres d'historgramme) sont également mesurés en EJ. Ces volumes sont plus faibles que pour la production dans la mesure où une part de l'électricité est destinée à des usages secondaires

La production d'électricité augmente dans tous les scénarios: quel que soit le scénario, la production d'électricité doit être multipliée, a minima, par 2,5, si ce n'est 4, entre 2020 et 2050.

Le graphique permet de faire apparaître également la demande finale en électricité, dont on observe qu'elle augmente moins vite que la production d'électricité car l'électricité est davantage utilisée comme vecteur d'énergie secondaire dans le cadre de la transition, par exemple pour la production d'hydrogène par électrolyse.

La forte croissance des énergies renouvelables nécessite de manière transitoire un socle de production d'électricité carbonée commandable (permettant de répondre aux besoins de flexibilités du système électrique, générés par les renouvelables intermittentes).

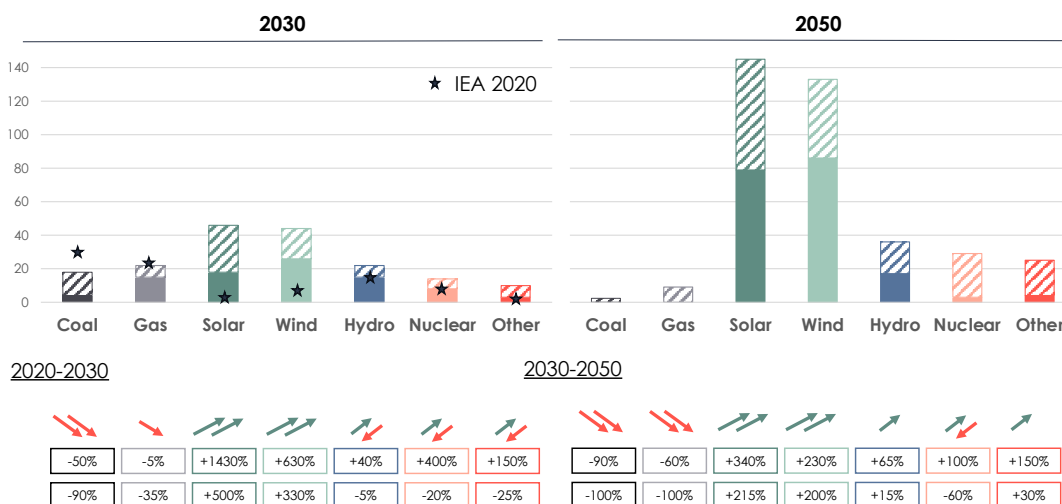


Figure – Fourchettes de production d'électricité par type d'énergie dans les scénarios à 1.5°C en 2030 et 2050

Source: Carbone 4, IFD

Note de lecture: Les parties hachurées représentent la fourchette entre le minimum et le maximum des six scénarios étudiés.

Pour massifier la production d'électricité, les énergies renouvelables sont clés. Il s'agit d'un déploiement massif de capacités solaires et éoliennes pour remplacer la production d'énergie fossile, une tendance observée quel que soit le scénario. La production d'énergie solaire doit, en moyenne, multiplier par 40 entre 2020 et 2050, et par 15, en moyenne, pour l'énergie éolienne. Le rôle à long terme de l'hydroélectricité et du nucléaire, quant à lui, est plus variable et dépend fortement du contexte local et des choix politiques.

7. Le rôle anticipé de l'hydrogène varie d'un scénario à l'autre à cause de son coût de production encore très élevé et doit être prioritairement destiné aux secteurs les plus difficile à décarboner.

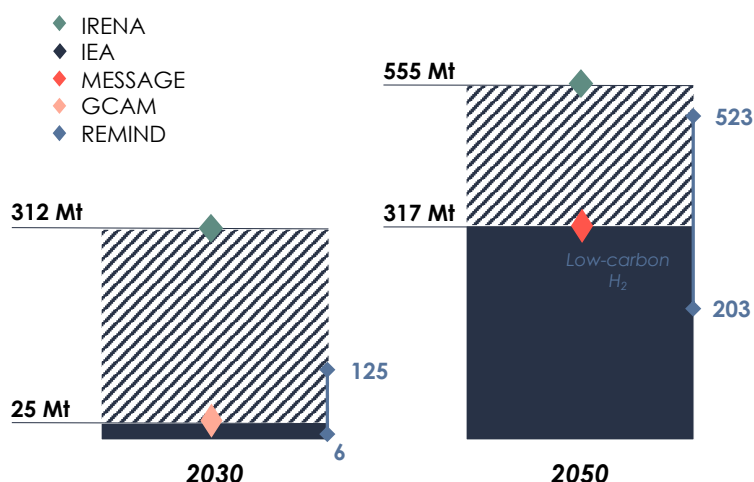


Figure – Fourchettes de comparaison des productions d'hydrogène entre 2030 et 2050 dans les scénarios 1.5°C

Source: Carbone 4, IFD

Note de lecture: les volumes de production d'hydrogène bas carbone finale (fourchettes sur le côté des barres d'histogramme) sont également mesurés en EJ. Ces volumes sont plus faibles que pour la production totale dans la mesure où une part de l'hydrogène produite reste carbonée.

Le rôle à long terme de l'hydrogène dans les scénarios à 1,5°C est très variable. La production d'hydrogène est multipliée par 2 à 10 entre 2030 et 2050 en fonction des scénarios envisagés. L'hydrogène à faible teneur en carbone, dans tous les scénarios, représente une part majoritaire de la production d'hydrogène. L'hydrogène bas carbone est fait à partir d'électrolyse soit à partir de gaz naturel avec CCS (hydrogène bleu) soit à partir d'énergie renouvelable (hydrogène vert).

Cette technologie joue néanmoins un rôle secondaire dans les scénarios climatiques à cause de son coût élevé. Pour un hydrogène vert (produit par électrolyse à partir d'énergie renouvelable), le coût restait au mieux au-dessus des 75€/MWh en 2020¹¹. A titre de comparaison, ces coûts sont systématiquement plus élevés que le coût des énergies renouvelables variés en fonctions des technologies (solaire, éolien terrestre, éolien en mer, géothermie, etc.) et des projets entre 23€/MWh à 71€/MWh à la même date¹². Cependant, avec la baisse du coût de l'électrolyse, les auteurs estiment que les coûts peuvent descendre pour atteindre moins de 40€/MWh d'hydrogène vert dès 2035¹³, ce qui pourrait être un coût éventuellement plus compétitif en fonction des usages.

¹¹ Inès Bouacida, Nicolas Berghmans, «Hydrogène pour la neutralité climat: conditions de déploiement en France et en Europe», janvier 2022, IDDRI, [lien](#)

¹² ADEME, «Coût des énergies renouvelables et de récupération en France», 2019

¹³ Inès Bouacida, Nicolas Berghmans, janvier 2022

L'ordre de mérite des utilisations finales de l'hydrogène est important à prendre en compte pour investir dans des projets de production d'hydrogène «sans regret»:

1. L'hydrogène vert pour remplacer l'hydrogène d'origine fossile dans les utilisations existantes (ammoniac, méthanol, engrais...)
2. L'hydrogène vert pour les nouvelles utilisations qui ont peu d'options de décarbonisation (transport maritime, industrie sidérurgique, flexibilité du réseau...)
3. Le cas échéant, l'hydrogène vert pour les nouvelles utilisations qui disposent de bonnes options de décarbonisation (transport routier).

L'hydrogène est en revanche beaucoup moins compétitif pour la production d'électricité.

8. Le CC(U)S et les solutions à émissions négatives seront probablement nécessaires pour atteindre l'objectif 1.5°C mais ces leviers sont contraints, notamment par des limites physiques.

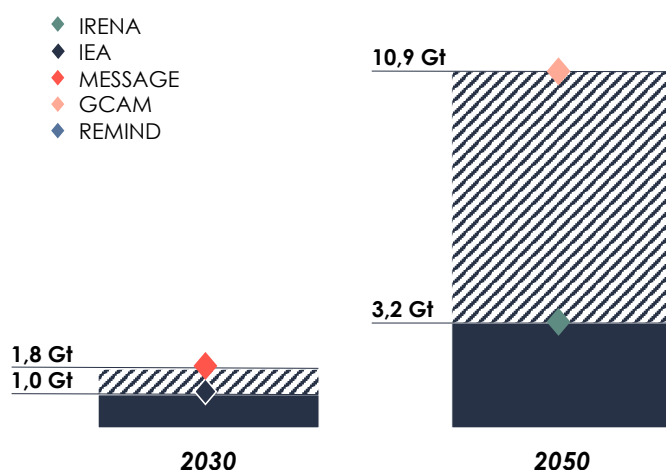


Figure – Fourchettes de comparaison du volume de CCS entre 2030 et 2050 dans les scénarios 1.5°C
Source: Carbone 4, IFD

Le rôle à long terme du CC(U)S dans les scénarios à 1,5°C est très variable. La capacité annuelle de captage et de stockage du carbone est multipliée par 3 à 10 entre 2030 et 2050 en fonction des scénarios envisagés: elle présente une fourchette très importante en 2050. Même la fourchette basse de 3 GtCO₂e est une valeur significativement importante par rapport à la fourchette des émissions résiduelles modélisée pour 2050, qui se situe entre 9 et -1,2 Gt de CO₂. Le CC(U)S est ainsi un pari fort des scénarios aujourd'hui, mais il demeure risqué au vu de l'immaturation de la technologie à ce stade.

Si les investissements dans le CC(U)S doivent augmenter, pour rester crédible par rapport aux contraintes physiques, ceux-ci doivent rester complémentaires aux investissements dans la réduction des émissions brutes de gaz à effet de serre, d'autant plus que l'efficacité de ces technologies reste encore incertaines à grande échelle.

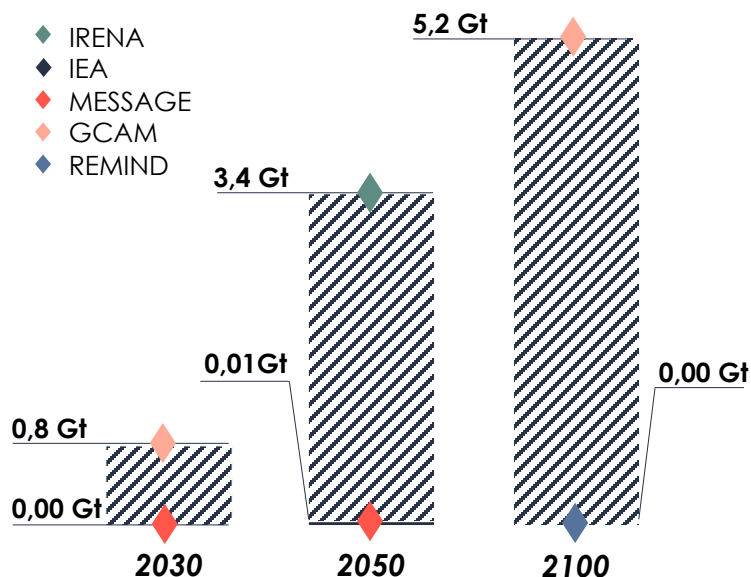


Figure – Fourchettes de comparaison du volume de BECCS entre 2030, 2050 et 2100 dans les scénarios 1,5°C

Source: Carbone 4, IFD

Pour ce qui concerne plus précisément le *bioenergy carbone capture and storage* (BECCS), son rôle dans les scénarios 1,5 °C est également très variable. L'IRENA et le modèle GCAM du NGFS lui accordent un rôle important dans leur scénario, quand l'AIE et les modèles MESSAGE et REMIND du NGFS accordent un poids presque nul à cette solution.

A l'instar du CCS, les volumes en jeu (3GtCO₂eq. pour la fourchette haute en 2050) sont considérables par rapport à la fourchette des émissions modélisées pour 2050. Ainsi, il demeure risqué de parier sur la réussite du déploiement massif de ces technologies pour limiter le réchauffement climatique.

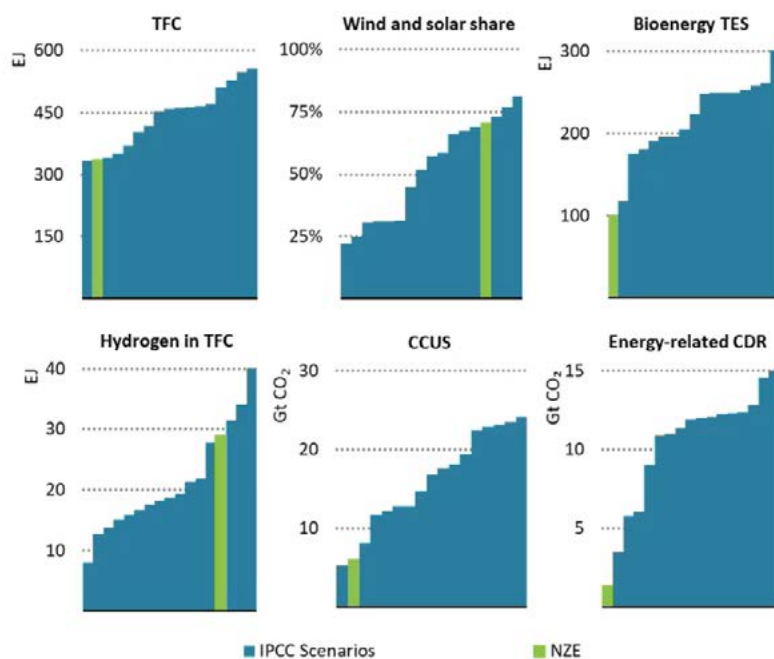


Figure – Comparaison du NZE de l'AIE avec les scénarios de la base de données du GIEC

Source: AIE – WEO 2022

Note de lecture: Ce graphique représente le positionnement du NZE de l'AIE par rapport aux scénarios de la base de données du GIEC. On observe ainsi que le scénario NZE repose comparativement plus fortement sur le déploiement des énergies renouvelables et de l'hydrogène que la moyenne des scénarios du GIEC. En revanche, il repose comparativement moins sur les technologies de CCUS, d'élimination du CO₂ et de biomasse.

Focus: les incertitudes liées au capture et stockage de carbone (CCS) et aux technologie d'élimination du CO₂ dans l'atmosphère (CDR)¹⁴

Deux hypothèses cruciales dans les modèles climatiques concernent la disponibilité des méthodes pour retirer le CO₂ de l'atmosphère (CDR pour *carbone dioxide removal* – comprenant notamment les technologies de *direct air carbon capture and storage*, le *bio energy carbon capture and storage* et l'afforestation) et de la technologie de capture et stockage de carbone (CCS pour *carbon capture and storage*), aucune des deux n'ayant encore été déployée à grande échelle.

Selon le GIEC «le CDR déployé à grande échelle est non prouvé, et le recours au [CDR] est un risque majeur pour la capacité de limiter le réchauffement à 1,5 °C»¹⁵. Or, de nombreux modèles reposent sur une CDR à très grande échelle, avec une élimination obtenue soit par séquestration du carbone par reboisement et afforestation, soit par bioénergie avec CCS (BECCS). Cette dépendance est très controversée au sein de la communauté scientifique.

Les modèles visant à minimiser les coûts totaux du système favorisent souvent la CDR: les éliminations ultérieures de CO₂ offrent un moyen de repousser les coûts des décennies dans le futur, entraînant des coûts actualisés plus faibles. Cependant, cet horizon lointain accroît l'incertitude du déploiement. De plus, si les solutions de CDR ne peuvent pas être déployées dans la mesure attendue, il sera trop tard pour un ajustement sur les émissions brutes qui auront déjà eu lieu.

Les solutions permettant de générer des émissions négatives, sont fortement contraintes. Des analyses récentes montrent que très peu de modèles restent dans les limites raisonnables correspondant aux capacités réelles de ces solutions. En particulier, les capacités de stockages de CO₂ sont limitées. Des analyses récentes estiment que «*La capacité de stockage de CO₂ maximale (...) est de 8,6 GtCO₂ par an vers le milieu du siècle, après prise en compte des différences régionales réelles en matière de capacité de stockage et de taux d'injection*»¹⁶. Certains scénarios se situeraient donc au-delà de cette limite, comme on le voit avec GCAM.

Les forêts et le BECCS nécessitent tous deux une superficie de terrain considérable. Par exemple, la capture de 11,5 Gt de CO₂ par an à l'aide de BECCS (par rapport aux émissions mondiales annuelles actuelles de 40 Gt de CO₂) nécessiterait une superficie de terrain de 380 à 700 Mha, ce qui équivaut à 25 à 46% des terres arables mondiales. Capturer la même quantité avec des forêts nécessiterait trois fois plus de terrain que le BECCS (GIEC, 2022). Cette exigence en matière de terres soulève des préoccupations concernant la concurrence avec la production alimentaire et les impacts sur la biodiversité là où les terres sauvages sont converties. En tenant compte de ces limites, les chercheurs ont estimé ce qui pourrait être considéré comme le potentiel maximal durable des différentes approches de la CDR (de Coninck et al., 2018; Fuss et al., 2018).

¹⁴ Focus issu en grande partie du rapport "Navigating Energy Transitions: Mapping the road to 1.5°C", International Institute for Sustainable Development, Octobre 2022, www.iisd.org/publications/report/navigating-energy-transitions

¹⁵ Rogelj, Shindell et Jiang, 2018, Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels, p. 96, [lien](#)

¹⁶ Achakulwisut et al., (2023), Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions, Nature Communications

Même à des niveaux potentiellement réalisables, les incertitudes persistent quant à savoir si et comment la CDR ou la CCS peuvent être réalisées. Le déploiement de la CCS à ce jour est constamment en retard par rapport aux attentes. Après plus de 30 ans d'efforts pour commercialiser la CCS, il n'existait fin 2022 que 27 installations de CCS en exploitation, d'une capacité totale nominale de 36 Mt de CO₂ (0,1 % des émissions mondiales). Seules cinq de ces installations visent à assurer le stockage à long terme du CO₂ (Institut mondial pour la CCS, 2021). De nombreux projets de CCS ont échoué (Robertson et Mousavian, 2022; Wang, Akimoto et Nemet 2021), et les coûts restent élevés par rapport à d'autres alternatives à faibles émissions de carbone.

Ainsi, les technologies de CCS et d'émissions négatives (BECCS, DACCS, afforestation) seront probablement nécessaires pour atteindre l'objectif 1.5°C mais ces leviers sont contraints, notamment par des limites physiques. Mais au-delà des limites physiques, l'un des facteurs limitants sera également les coûts de ces projets. La manière dont seront régulées ces technologies et les émissions carbone (par exemple par le prix du carbone) permettra ou non leur viabilité économique.

SE FIXER DES POINTS DE PASSAGE À COURT ET MOYEN TERMES POUR RESTER EN DESSOUS DES 1,5°C

Les scénarios climatiques permettent aux acteurs de se fixer un calendrier d'actions à travers le temps. A titre illustratif, l'AIE a fait cet exercice pour son scénario NZE en fixant des objectifs à court et moyen termes à respecter pour rester en ligne avec le scénario.

Ils proposent quelques points de passage nécessaires:

- Dès aujourd'hui, plus de nouveaux projets d'extraction d'énergies fossiles sans CCS («no new oil and gas fields approved for development and now new coal mines of mines extensions»¹⁷): un investisseur investit dans de nouveaux projets sur de nouveaux champs d'extraction ne pourrait se définir comme aligné sur le scénario NZE.
- Dès 2025, plus aucune vente de chaudière à base d'énergies fossiles.
- En 2030, plus aucune centrale à charbon sans CCS dans les économies développées¹⁸.
- Electricité 100% décarbonée en 2035 dans les pays développés (et en 2040 partout dans le monde).
- En 2040, la moitié des bâtiments existants ont subi une rénovation énergétique performante.
- En 2035, 100% des ventes de voiture sont électriques

¹⁷ WEO 2022, AIE

¹⁸ Wording de l'AIE est "Phase out of unabated coal in advanced economies", avec la définition suivante: "Advanced economies: OECD regional grouping and Bulgaria, Croatia, Cyprus, Malta and Romania."

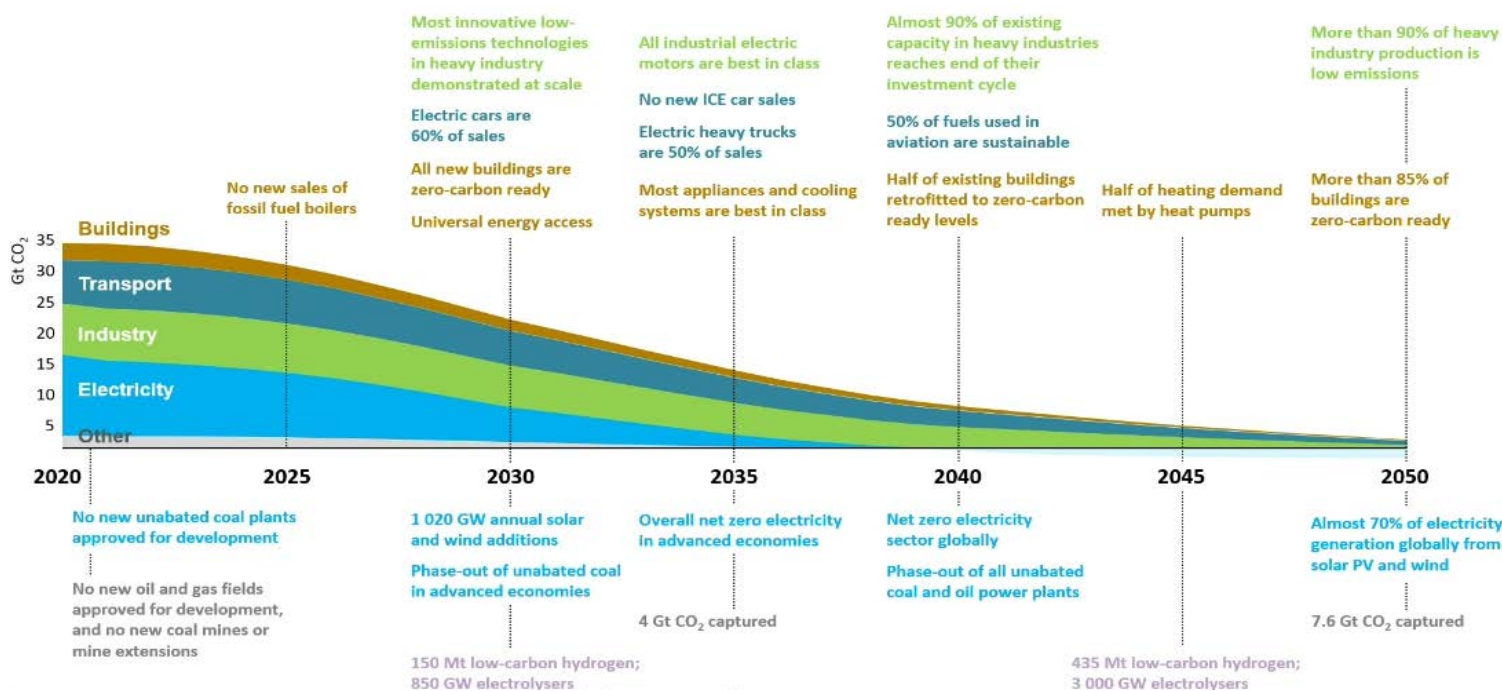


Figure – Les principaux passages pour atteindre 1,5°C dans le NZE de l'AIE

Source: AIE – WEO 2022

DES SCÉNARIOS DE TRANSITION TRÈS VARIABLES EN FONCTION DU PAYS ET DE LA RÉGION DU MONDE

Au niveau mondial, l'avenir du système électrique s'appuiera sur les énergies bas carbone. Le pétrole, le charbon et le gaz sont rapidement éliminés tandis que le nucléaire garde une part non-négligeable, aux côtés des bioénergies. L'hydrogène reste une partie minime du mix électrique car il s'agit de la technologie la plus coûteuse. Il est intéressant de noter que les grandes tendances mondiales cachent les spécificités régionales qui seront très fortes.

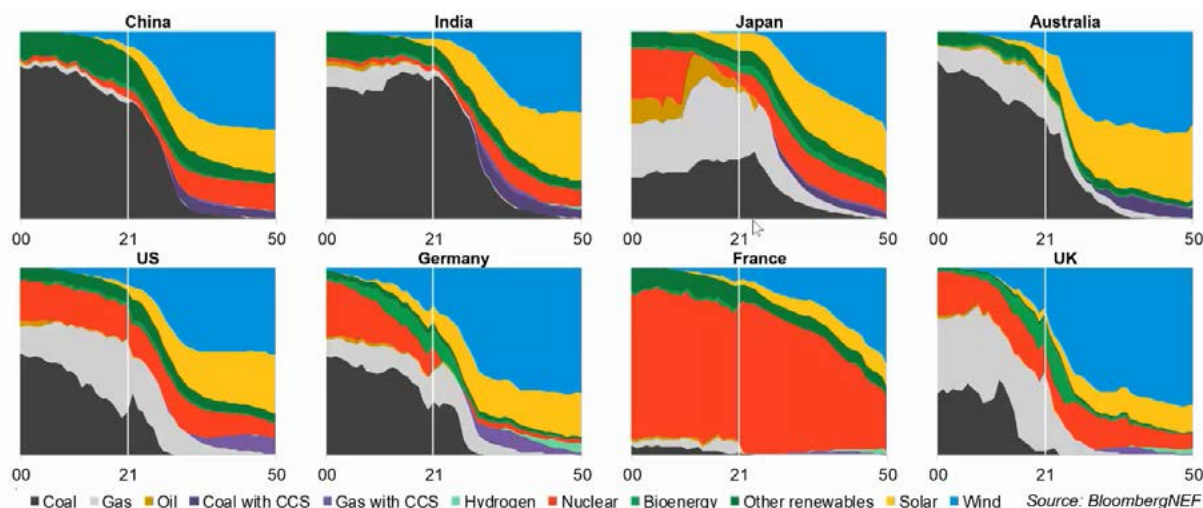


Figure – Scénarios de transition du mix de production électrique en fonction du pays

Source: BloombergNEF – NEO 2022

Il existe une multitude de solutions par pays: chaque pays a sa propre trajectoire de production électrique en fonction de choix politiques et économiques propres. Par exemple, la France dispose déjà d'un mix électrique bas-carbone grâce à l'énergie nucléaire, tandis que l'Australie dépend aujourd'hui fortement du charbon et s'appuiera en 2050 principalement sur l'éolien et le solaire. Le Royaume-Uni s'appuie actuellement largement sur le gaz: en 2050, étant donné sa situation géographique, la majorité de son électricité proviendra de l'éolien.

Focus: la Stratégie Nationale Bas Carbone 3 – le scénario de référence pour la France

La stratégie française pour l'énergie et le climat constitue la feuille de route du Gouvernement français pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour assurer l'adaptation de l'économie aux impacts du changement climatique. Elle se déclinera dans les prochains mois en une Loi de programmation et deux décrets – la stratégie nationale bas carbone (SNBC), la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) – et un document programmatique, le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC).

Le défi de la SNBC-3: «sortir de la dépendance aux énergies fossiles»

Le choix qui a été fait par la France, il y a plusieurs décennies, de l'indépendance électrique et du nucléaire, nous permet aujourd'hui de bénéficier d'une avance en termes de décarbonation et de compétitivité de notre électricité. Ainsi, notre production, décarbonée à plus de 90 %, couvre l'essentiel du temps nos besoins nationaux.

Cependant, comme dans la plupart des grands pays industrialisés, notre bouquet énergétique reste encore dominé par les énergies fossiles, avec 37 % de pétrole et 21 % de gaz naturel dans notre consommation d'énergie finale.

La stratégie française pour l'énergie et le climat en quelques chiffres:

- **Sobriété énergétique:** baisse de la consommation d'énergie finale de -25% en 2030, -32% en 2035 et de -40 à -50 % en 2050, par rapport à 2021.
- **Sortie des énergies fossiles:** division par 2 de la consommation d'énergie fossile entre 2021 et 2030, par 3 d'ici à 2035, avant d'atteindre la sortie totale des énergies fossiles en 2050.
- **Rééquilibrage du mix énergétique français:** alors que les énergies fossiles représentent 60% de la consommation d'énergie finale aujourd'hui (17% pour le nucléaire et 23% pour les énergies renouvelables), en 2035, les énergies fossiles ne représenteront que 29% grâce à une montée en puissance du nucléaire (33%) et des EnR (38%).
- **Augmentation de la production d'électricité décarbonée:** croissance de 21% de la production française d'ici à l'horizon 2030 et 2035, par rapport à 2021, de 55% entre 2021 et 2050. Cette croissance reposant à la fois sur le développement du programme nucléaire (+29% des capacités de production entre 2021 et 2035) et des énergies renouvelables.

- **Des besoins d'investissements dans les énergies renouvelables considérables:** Concernant le photovoltaïque, la SNBC-3 prévoit la multiplication par 3 de la production solaire d'ici à 2030, et par 5 en 2035. Elle prévoit une multiplication par 2 de la production de l'éolien terrestre d'ici à 2035, par 14 pour l'éolien en mer d'ici à 2030, et par 70 d'ici à 2035 (en passant de 2 parcs aujourd'hui installés à 36 en 2035). Pour les EnR, non-déstinés à la production électrique, la SNBC-3 prévoit une croissance de 63% en 2030 et une multiplication par 2 en 2035 de la production de chaleur et de froid renouvelable et de récupération. Elle prévoit également la multiplication par 5 du biogaz en 2030 et par 6 en 2035.
- **L'hydrogène, pari à la marge:** si la France compte développer des capacités dans l'hydrogène, sa production restant marginale dans le mix énergétique en 2030 (0,5%) et en 2035 (0,9%).
- **Les investissements supplémentaires dans le secteur de l'énergie** sont supposés atteindre 8 milliards d'euros par an d'ici 2030, à peu près également répartis entre production nucléaire, production d'énergies renouvelables et réseaux (source: rapport Pisani-Ferry-Mahfouz sur estimations RTE, Rexecode et Ademe).



ÉNERGIES FOSSILES : ANALYSE
DES TRAJECTOIRES COMPATIBLES
AVEC UN SCÉNARIO 1.5°C

3. TRAJECTOIRES D'INVESTISSEMENTS : LES RATIOS D'INVESTISSEMENT DOIVENT ÊTRE INVERSÉS

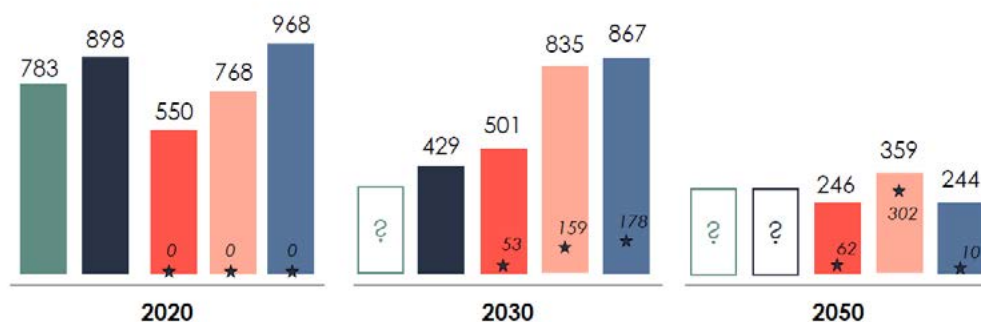
1. Les investissements dans l’approvisionnement en énergies fossiles doivent être divisés par 2, voire par 4, d’ici à 2050 par rapport à 2020 notamment avec même une division par 2 dès 2030 selon l’AIE, et ne doivent pas financer de nouveaux projets de production.

★ CCS

- ◆ IRENA
- ◆ IEA
- ◆ MESSAGE
- ◆ GCAM
- ◆ REMIND

Figure – Investissements dans l’approvisionnement en énergies fossiles (milliard\$/an)

Source: Carbone 4, IFD



Ces chiffres reposent sur de multiples hypothèses que révèle la fourchette de valeurs pour 2020, mais la tendance dominante à l’horizon 2050 est une diminution importante des investissements dans l’approvisionnement en combustibles fossiles. REMIND indique une division par 4 des investissements dans l’approvisionnement en énergies fossiles entre 2020 et 2050. MESSAGE et GCAM indiquent une division par 2 entre 2020 et 2050 des investissements dans l’approvisionnement en énergies fossiles. L’AIE indique une diminution drastique dès 2030: le scénario indique le besoin d’une division par deux des investissements dans les énergies fossiles entre 2020 et 2030¹⁹.

On voit en parallèle que notamment GCAM et REMIND, où la décroissance des investissements dans l’approvisionnement en énergies fossiles est la plus faible en 2030, reposent davantage sur le CCS (les investissements dans le CCS en 2030 se situent respectivement en 159 et 178 milliards de dollar par an en 2030, soit 3 fois plus que MESSAGE par exemple).

Ces investissements dans les énergies fossiles peuvent paraître encore conséquents entre 2030 et 2050. Il convient de préciser que la nature des investissements change radicalement. Les investissements restants ne sont pas dirigés vers de nouveaux projets d’extraction mais vers l’optimisation et la maintenance des infrastructures existantes, par exemple la réduction des émissions fugitives de méthane de l’industrie fossile.

¹⁹ www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

Les investissements restants doivent être analysés en détail (objet des prochaines étapes des travaux), notamment en termes de :

- répartition géographique
 - position dans la chaîne de valeur fossile
 - d'autres hypothèses structurant les scénarios (utilisation du CCS, BECCS...).
- Les investissements dans le CCS sont très variables en fonction des modèles et témoignent bien de la diversité de scénarios possibles de décarbonation.

2. Les investissements dans la production électrique bas-carbone doivent être multipliés par 2,5 à 3 fois dès 2030 par rapport aux montants de 2020.

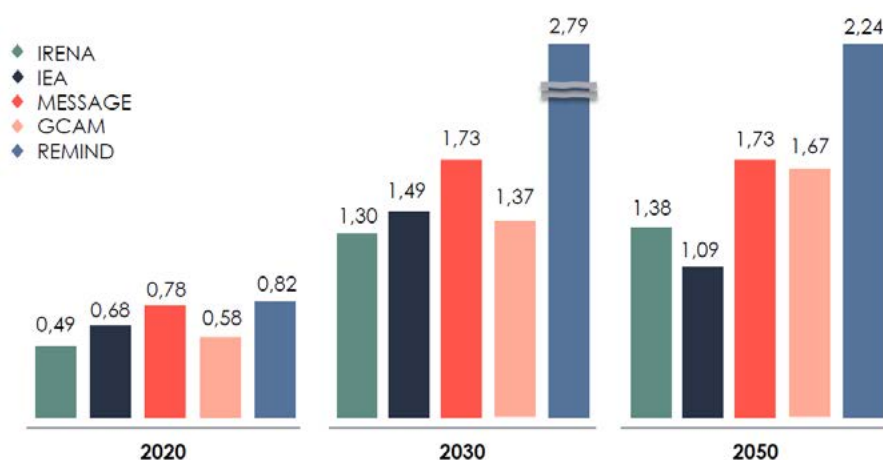


Figure – Investissements dans la production électrique bas-carbone (trillion\$/an)

Source: Carbone 4, IFD

Les besoins d'investissement dans la production électrique à faible teneur en carbone augmentent fortement dans tous les scénarios, et ce avant 2030. Quel que soit le scénario, les besoins d'investissements dans la production électrique bas-carbone sont multipliés par 2,5 à 3 fois en 2030 par rapport aux montants de 2020.

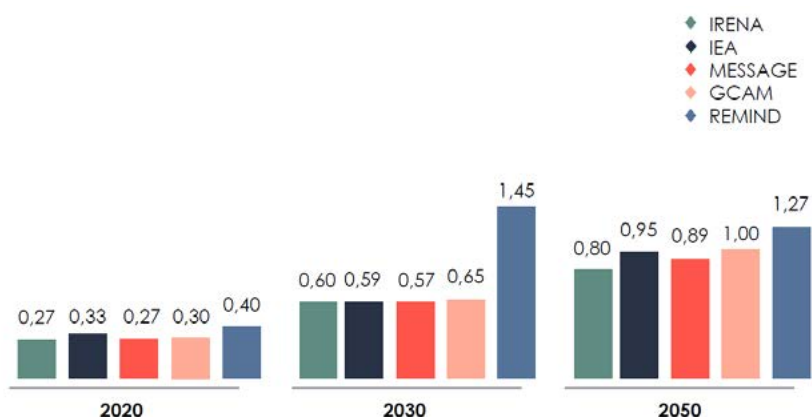


Figure – Investissements dans le réseau énergétique (trillion\$/an)

Source: Carbone 4, IFD

Quel que soit le scénario, les besoins d'investissement dans le réseau, le stockage et la flexibilité sont multipliés par 4 ou 5 et doublent dès 2030.

3. En termes de ratio, les investissements dans la transition énergétique doivent représenter 10\$ pour 1\$ dans les énergies fossiles d'ici 2030, contre 1\$ pour 1\$ il y a encore 5 ans et 1,7\$ pour 1\$ aujourd'hui.

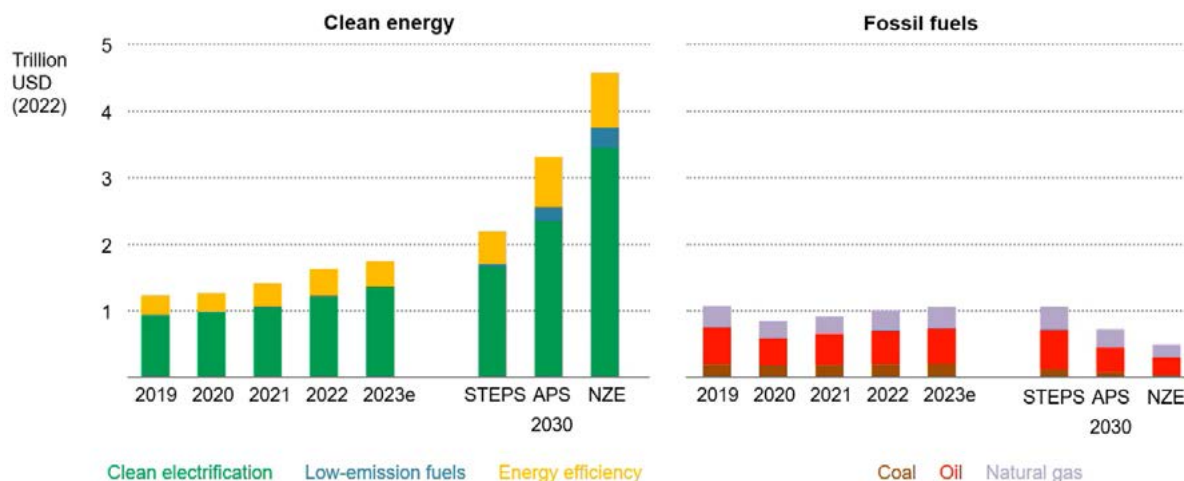


Figure – Comparaison des investissements dans les énergies bas-carbone et les énergies fossiles dans les scénarios de l'AIE

Source: AIE – WEO 2022

Selon l'AIE²⁰, si le ratio était d'environ 1\$ d'investissement dans la transition bas-carbone pour 1\$ dans les énergies fossiles il y 5 ans, aujourd'hui il est de 1,7 pour 1. Mais pour être sur la bonne voie, il faudrait se situer à 10\$ dans la transition pour 1\$ dans les énergies fossiles en 2030. Au sein de ces 10\$ pour la transition bas-carbone, 6\$ vont pour la production d'énergies bas carbone (y compris stockage, réseau, etc.). Les investissements dans les énergies décarbonées ne sont aujourd'hui pas suffisants pour compenser dans les projections de production la baisse des investissements dans les énergies fossiles.

En 2030, il demeure des investissements résiduels dans les énergies fossiles (pour l'efficacité énergétique, le CCS, les utilisations non-énergétiques,...).

²⁰ AIE, WEO 2023

CONCLUSION

Cette comparaison des trajectoires d'alignement des énergies fossiles souligne que le chemin est étroit pour une transition vers un modèle énergétique durable qui limite le réchauffement climatique à 1.5°C. Les données présentées mettent en évidence la nécessité d'augmenter considérablement les investissements dans les énergies bas carbone pour réduire drastiquement ceux dans les énergies fossiles dès les 5 années à venir. Les investissements dans les énergies bas carbone *permettent* de baisser les investissements dans les énergies fossiles.

Les perspectives futures pour ces travaux impliquent une analyse approfondie des politiques et des technologies nécessaires pour atteindre ces objectifs. D'une part, il s'agira de poursuivre l'analyse géographique et sectorielle de ces données. D'autre part, ces différents scénarios reposent en partie sur des leviers de décarbonation encore incertains (capture et stockage de carbone, hydrogène, biomasse, etc.). Les scénarios étudiés ne prennent que peu en compte les contraintes techniques, physiques et économiques de ces différentes technologies. La perspective de l'Institut de la Finance Durable est ainsi d'approfondir leur compréhension en développant un cadrage physique et socio-économique des différents leviers.

Il est crucial de continuer à élaborer des outils de compréhension des scénarios alignés sur 1.5°C afin d'accompagner les décideurs financiers dans leurs stratégies d'investissement. En mobilisant l'expertise scientifique et en intégrant les évolutions du marché, la Place de Paris peut jouer un rôle clé dans la transition vers un avenir énergétique durable et résilient.

ANNEXES

I. LISTE DES MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL

Président	Pierre Palmieri directeur général délégué de la Société Générale
Coordinateur	Nicolas Lancesseur directeur climat et environnement de l'IFD
Rapporteur	Vincent Burnand-Galpin chargé de mission finance durable de l'IFD

ACPR – BANQUE DE FRANCE

CLERC Laurent

ADEME

GARNERO Mathieu

AFD

KACHENOURA Djedjiga

AFEP

BOQUET Nicolas

AFG

PIRES Ana

AIE

DE BIENASSIS Tanguy

AMF

CASTELBOU Guillaume

AMUNDI

FOLL Julien

BANK OF AMERICA

SERRAVALLE Salvatore

AUTHIER Amandine

BLUNOMY

GUILLO Sébastien

MURZEAU Victor

GALICHON Inès

BNP PARIBAS

MILLER Julie

UNDI Tilly

BPCE

MARANGONI Sébastien

BPIFRANCE

MENIGAULT Christophe

CAISSE DES DEPOTS

ROSEMONT Jacques

VITIELLO Virginie

CARBONE 4

DUGAST César

GRILLET Céleste

MARGO Michaël

CGDD

BRUNA Enrica

CREDIT AGRICOLE

CAMPOS Eric

CRÉDIT AGRICOLE ASSURANCES

SOPHIENNE

DG TRESOR

FAMERY Elisa

LANNOY Marine

OLAONDO Iban

DGEC

BUGNET Auriane

EDF

BERTIN Anne-Elisabeth

ENGIE

LUCILLE Pierre-Laurent

TREMBLAY Clément

ETHIFINANCE

ZAEPFEL Tessa

FBF

DEGOUVE Karen

DEGOUVE Karen

FRANCE ASSUREURS

CANALE Elena

GROUPAMA

SERKINE Laura

ILB

VOISIN Stéphane

INSTITUT LOUIS BACHELIER

JOUKER Lina

PLANTIER Gabriel

LA BANQUE POSTALE

BOUSQUET Anne-Laure

LA BANQUE POSTALE AM

CHARRIER Héléna

GIRAULT Julien

MEDEF

DOUGUET Sébastien

LEGER Jean-Baptiste

MOONSHOT

POISSON Adrien

NEXIALOG CONSULTING

VERMOT-GAUCHY Luc

OBSERVATOIRE DE LA FINANCE DURABLE

VILPOUX Edouard

OSTRUM

CHEVALLIER Joséphine

PERICLES

AMIC Antoine

CALLAC Elise

ROTHSCHILD AND CO

LAGNY Alice

SEKULARAC Andrea

SOCIETE GENERALE

CHAPPERT Benoit

HAMDAOUI Hadjira

SWISSLIFE

CLERMONT David

TOTAL ENERGIES

CLEMENÇON Jean-Pascal

WWF

BONE Guillaume

PUGLIESE Antoine

PENDARIES Renaud

WAHL Guillaume

II. GLOSSAIRE

ENERGIES BAS CARBONE VS. ENERGIES RENOUVELABLES

Les termes «énergie bas carbone» et «énergie renouvelable» sont souvent utilisés de manière interchangeable, mais la distinction est importante pour comprendre les scénarios énergie-climat :

→ **Énergie renouvelable** : L'énergie renouvelable, également appelée énergie alternative, désigne une catégorie d'énergies produites à partir de ressources naturelles qui se renouvellent en permanence. Ces ressources comprennent le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la chaleur interne de la Terre (géothermique). Les énergies renouvelables ne s'épuisent pas avec leur utilisation et sont considérées comme durables à long terme. Elles sont aussi caractérisées par leur faible impact environnemental et leur contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

→ **Énergie bas carbone** : Une énergie est dite bas carbone lorsqu'elle ne produit pas ou peu d'émissions carbonées (ou équivalent en gaz à effet de serre). Dans les scénarios énergie-climat, les énergies bas carbone englobent toutes les énergies avec une faible empreinte carbone (en dessous d'un certain seuil conventionnel). Pour définir le degré de décarbonation d'une énergie, on prend en compte la totalité de son cycle de vie : construction des équipements, exploitation, recyclage, etc. L'empreinte carbone est mesurée en quantité de CO_2 émise pour produire un kilowattheure d'électricité. Ainsi, les énergies renouvelables font partie des énergies propres, mais d'autres énergies en font partie tels que le nucléaire, l'hydrogène vert (fait à partir d'électricité renouvelable), l'hydrogène bleu (fait à partir de gaz naturel avec capture de CO_2), la biomasse et les énergies fossiles avec capture de CO_2 .

SECTEUR ÉNERGÉTIQUE VS. SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE GLOBAL

La distinction entre secteur énergétique et système énergétique globale est souvent utilisée dans les scénarios énergie-climat en particulier par l'Agence Internationale de l'Énergie.

→ **Le secteur énergétique** : il comprend uniquement l'activité de production d'énergie (production d'énergies fossiles, production d'électricité, etc.).

→ **Le système énergétique global** : il comprend toute l'activité économique reposant sur une consommation d'énergie (secteur énergétique, industrie, transport et bâtiment principalement).

Ainsi le secteur énergétique est un sous-ensemble du système énergétique global.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été menés par l'Institut de la Finance Durable dans le cadre des travaux des chantiers climat en réponse à la demande de Bruno Le Maire, Ministre de l'Economie et des Finances, pour faire de la Place financière de Paris une référence dans la transition climatique.

Les travaux ont été pilotés par Cécile Goubet, directrice générale de l'Institut de la Finance Durable et les équipes de l'Institut de la Finance Durable.

L'Institut de la finance durable remercie l'ensemble des membres du groupe de travail pour leur implication, en particulier la Société Générale (Thomas Bobrie, Hacina Py, Olivier Picard et Hadjira Hamdaoui), Electricité de France (Elisabeth Bertin et Charles Weymuller) et BNP Paribas (Julie Miller et Guillaume Poupy).

L'Institut de la finance durable remercie les experts qui ont contribué aux travaux dont en particulier Henri Waisman (Institut du développement durable et des relations internationales), Tanguy de Bienassis et Jérôme Hilaire (Agence International de l'Energie), Clément Payerols et Paul Champey (Banque de France et le Network for Greening the Financial), David Hostert, Ava Zekri et Julia Rault (Bloomberg) et Ploy Achakulwisut (membre du GIEC et du Stockholm Environment Institute) et Lucie Pinson, Antoine Laurent et Paul Schreiber (Reclaim Finance).

L'Institut de la Finance Durable remercie enfin les équipes du cabinet de conseil Carbone 4 pour leur conseil et la réalisation de la comparaison des scénarios énergie-climat, notamment César Dugast, Michaël Margo et Céleste Grillet.

L'IFD remercie Observatoire de la Finance Durable et l'ADEME pour le soutien financier dans la réalisation de cette étude grâce au programme européen LIFE.



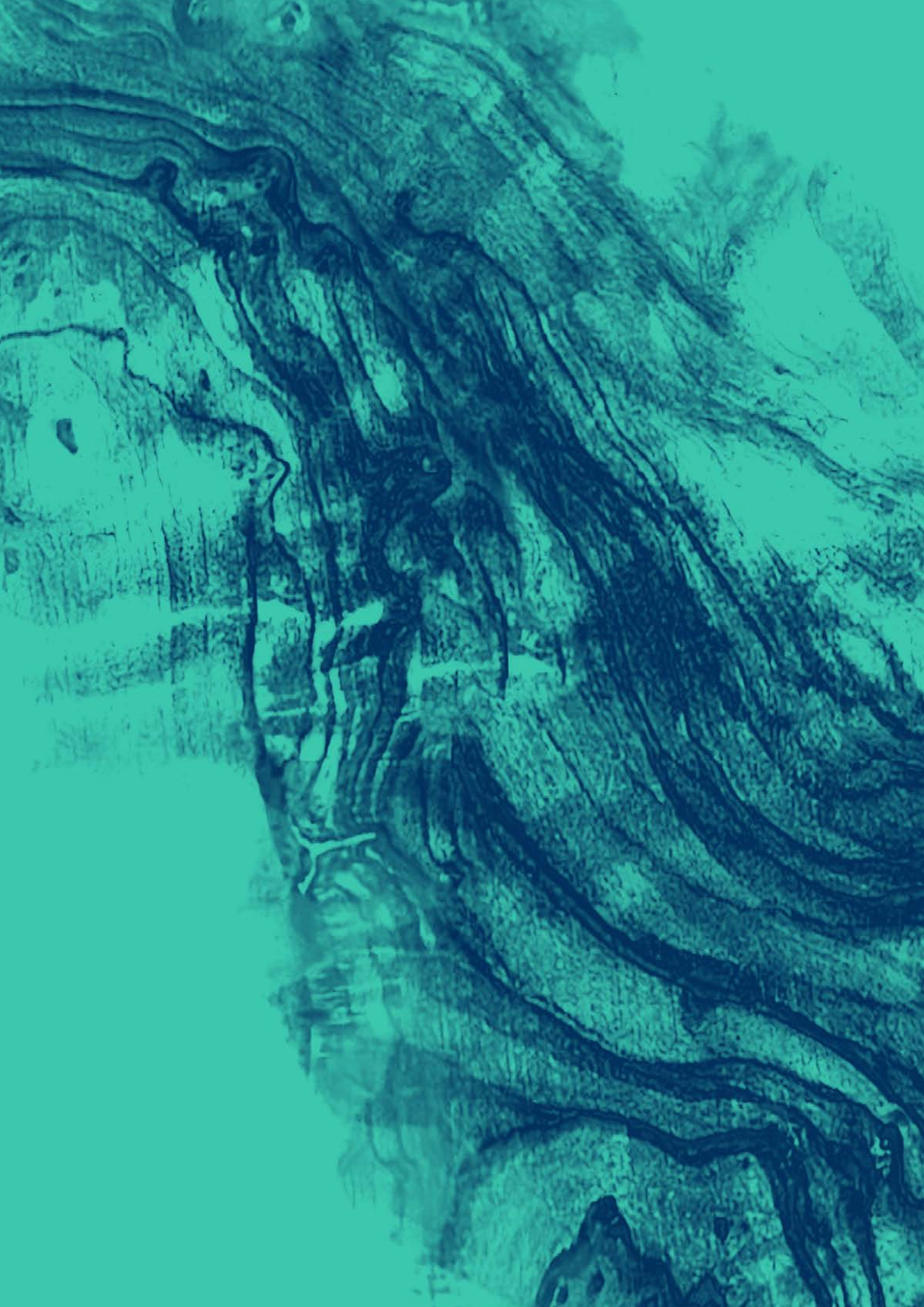
Directeur de la publication

Yves Perrier, Président de l'IFD

Rédacteurs

Ce document a été rédigé par l'équipe de l'Institut de la Finance Durable, Vincent Burnand, chargé de mission finance durable, avec l'appui de Cécile Goubet, directrice générale de l'IFD, Nicolas Lancesseur, directeur climat et environnement de l'IFD, et les équipes du cabinet de conseil Carbone 4 dont Céleste Grillet, Michaël Margo et César Dugast.

POUR PLUS D'INFORMATIONS CONTACT@IFD-PARIS.COM





INSTITUT
DE LA FINANCE
DURABLE

PARIS EUROPLACE