

Quelle place pour le nucléaire et les énergies renouvelables dans les trajectoires mondiales de neutralité carbone ?

Analyse de l'Association négaWatt, sur la base des travaux du GIEC

Sommaire

Résumé	2
Éléments de contexte.....	3
Les leviers de décarbonation	3
Analyse des leviers de décarbonation au regard des objectifs de développement durable.....	5
Analyse des trajectoires présentées.....	7
Vers une trajectoire mondiale 100 % renouvelable ?.....	9
La priorité doit être donnée aux actions de décarbonation les plus soutenables.....	11
ANNEXE 1 – Soutenabilité des leviers de décarbonation.....	13
ANNEXE 2 – Potentiels et limites du recours aux bioénergies.....	17
ANNEXE 3 – Les quatre « trajectoires 1,5 °C » type présentées par le GIEC.....	21
ANNEXE 4 – Le nucléaire dans les trajectoires 1,5 °C du GIEC.....	25

Résumé

De multiples leviers existent pour réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). Pour le CO₂ (qui représente environ deux-tiers des émissions), les principales actions envisageables sont : la réduction de la consommation d'énergie, le déploiement des énergies renouvelables - électriques ou issues de la biomasse -, et l'utilisation d'autres moyens décarbonés comme le nucléaire ou la capture et séquestration de carbone associées à la combustion d'énergies fossiles.

Ces différentes options ne présentent pas toutes le même niveau de soutenabilité au regard de l'ensemble des 17 objectifs de développement durable (ODD) - parmi lesquels figure la lutte contre le changement climatique, la protection de l'environnement, l'éradication de la faim et de la pauvreté, la protection de l'environnement, etc. - adoptés par l'ONU en octobre 2015, quelques semaines avant l'Accord de Paris. C'est ce qui ressort d'une évaluation de 23 actions de réduction des émissions de GES menée par le GIEC dans son « *Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C* » :

- arrivent en tête **les actions visant à réduire la demande d'énergie** (sobriété et efficacité énergétique), à remplacer des énergies fossiles par des énergies renouvelables électriques ou encore à améliorer la gestion du bétail et du fumier ;
- viennent ensuite celles visant à **renforcer l'usage de la biomasse**, avec toutefois une très forte sensibilité aux conditions de mise en œuvre (environnement local, choix des espèces, modes de culture, usages, etc.) ;
- viennent en dernier celles recourant à **la capture et séquestration du carbone (CSC), à la géo-ingénierie océanique** et au nucléaire - cette dernière option étant même la moins bien notée parmi les 23.

Si **le nucléaire apparaît ici comme étant le levier de décarbonation le moins soutenable**, il reste tout de même présent dans les quatre trajectoires proposées par le GIEC dans le résumé pour décideurs du [Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C](#). Une analyse plus fine du rapport complet montre toutefois que **la part du nucléaire dans le mix énergétique diminue dans la moitié des 90 scénarios qui sous-tendent les quatre trajectoires décrites par le GIEC. Plusieurs scénarios qui atteignent l'objectif 1,5 °C vont jusqu'à réduire le nombre de réacteurs en fonctionnement. À l'inverse, tous les scénarios respectant l'objectif 1,5 °C misent sur une augmentation des énergies renouvelables**, notamment électriques.

Les différents scénarios se distinguent également par le niveau de consommation d'énergie envisagé. On peut à ce titre remarquer que le recours au nucléaire et à la capture-séquestration de carbone est en fait inversement proportionnel au niveau d'action sur la maîtrise de la demande. Autrement dit, si les énergies renouvelables constituent le socle de toutes les trajectoires, le nucléaire et la capture-séquestration ne sont envisagés que lorsque la demande d'énergie est plus élevée.

Si les quatre trajectoires principales proposées par le GIEC comportent toutes une part de nucléaire, d'autres options existent et permettraient de rester en-dessous des 1,5 °C sans utiliser ni cette technologie ni la capture-séquestration de carbone. Comment ? En combinant à la fois une réduction de la consommation et un recours ambitieux aux énergies renouvelables (électriques et bioénergies). **Le recours même modeste au nucléaire ou à la capture et séquestration du carbone** - options clairement identifiées par le GIEC comme étant les moins soutenables - n'est donc pas indispensable pour atteindre l'objectif 1,5 °C.

Éléments de contexte

La publication en octobre 2018 par le [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat](#) (GIEC) du *Rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5°C*, présentant notamment des trajectoires type permettant d'atteindre cet objectif, a fait l'objet, notamment en France, d'une controverse sur le rôle qu'accorderait ce rapport à l'énergie nucléaire dans la lutte contre le changement climatique. En parallèle, d'autres parties prenantes ont cru tirer de ce rapport une mise en garde contre une utilisation accrue de la biomasse. Constatant l'impact délétère sur le débat public de certaines conclusions hâtives et réductrices, l'Association négaWatt a analysé en détail cette publication du GIEC pour en faire ressortir quelques éléments saillants, replaçant chacun de ces sujets dans une hiérarchie globale en termes de priorités et de soutenabilité.

Inscrit dans le droit français par la loi du 8 novembre 2019¹ et hissé au rang de priorité politique de l'Union européenne par le Conseil du 12 décembre 2019² – quatre ans jour pour jour après l'Accord de Paris –, l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 doit aujourd'hui guider toutes les décisions, grandes et petites, de tous les acteurs de la sphère publique comme de la sphère privée. L'objectif est de limiter autant que faire se peut les conséquences délétères du réchauffement climatique en restant en-dessous d'une augmentation de 1,5°C de la température moyenne à la surface du globe.

Les travaux du GIEC, et notamment son Rapport spécial 1,5 °C, sont particulièrement précieux pour éclairer cet enjeu. Ils sont construits sur la base d'une revue minutieuse et collective de la littérature scientifique – soit des milliers de références sur des centaines de thématiques en rapport avec les causes, les effets et les solutions liées au changement climatique.

Le rapport spécial du GIEC n'est ainsi que le reflet de l'état actuel de la connaissance scientifique de phénomènes complexes, avec toutes les limites que cela comporte, en particulier dans les domaines qui relèvent davantage d'une expertise que de la science proprement dite comme l'élaboration de scénarios³. Malgré ces réserves, les analyses menées par le GIEC forment incontestablement la base la plus complète et la plus fiable dont nous disposons pour évaluer les différentes options de décarbonation et leur combinaison dans une stratégie soutenable d'atteinte de la neutralité carbone.

Il est d'autant plus nécessaire que les enseignements que l'on peut en tirer ne soient pas travestis par des interprétations visiblement orientées.

Les leviers de décarbonation

Pour la combustion d'énergie, qui représente environ deux-tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES), il s'agit de trouver des substituts à l'utilisation du charbon (principalement pour la production d'électricité), du pétrole (principalement pour les transports de personnes et de marchandises) et du gaz naturel fossile (principalement dans les bâtiments et dans l'industrie)⁴.

¹ Article 1^{er} de la loi 2019-1147 relative à l'énergie et au climat

² <https://www.consilium.europa.eu/media/41778/12-euco-final-conclusions-fr.pdf>

³ Parmi ces biais figurent notamment la durée même du processus, le caractère par nature non-scientifique au sens strict de la prospective et le mode de financement de la recherche qui peuvent rendre aveugle respectivement aux évolutions rapides de certaines technologies, aux travaux issus de la « société civile » et à des thématiques considérées comme accessoires par les financeurs publics ou privés.

⁴ Les autres émissions proviennent de certains procédés industriels et de l'agriculture, notamment de l'élevage et de certaines cultures comme le riz

À cet effet, trois principaux leviers d'action principaux sont à disposition :

- la réduction de la consommation d'énergie en général, et donc d'énergies fossiles en particulier, par la sobriété et/ou par l'efficacité énergétique ;
- la substitution directe des énergies fossiles par des énergies issues de la biomasse sous forme solide (bois, pailles et résidus divers), liquide (bio-carburants) ou gazeuse (biogaz) ;
- la substitution d'énergies fossiles pour certains usages par de l'électricité qualifiée de décarbonée⁵ (électro-mobilité, pompes à chaleur, etc.), qui peut être d'origine renouvelable ou nucléaire, ou par de l'hydrogène lui-même produit par de l'électricité décarbonée (industrie, mobilité lourde, ...).

Par ailleurs, même une décarbonation intégrale des usages énergétiques des ressources fossiles ne suffira pas pour atteindre la neutralité carbone : un talon incompressible d'émissions issues notamment du secteur agricole (élevage, certaines cultures, etc.) et de certains procédés industriels difficiles à transformer ou à substituer nécessitera la mise en œuvre d'options dites « à émissions négatives ». Ces mesures « d'élimination du carbone »⁶ (EDC) reposent soit sur des mécanismes naturels comme le captage de carbone dans la biomasse et dans les sols *via* des pratiques agricoles et sylvicoles adéquates, soit sur des solutions technologiques comme le captage et la séquestration de carbone dans les formations géologiques (CSC et sa variante BECCS)⁷ ou dans des objets manufacturés (CUC)⁸. Enfin, des options plus complexes, regroupées aujourd'hui sous le terme de géoingénierie visent à modifier les cycles de stockage et de libération du carbone dans la haute-atmosphère ou les océans. Ces dernières, beaucoup plus hypothétiques, ne sont pas considérées par la suite.

La seule description de ces différents leviers ne dit rien de leur efficacité concrète ni même de leur faisabilité réelle, qui sont pourtant les critères essentiels pour l'élaboration d'une stratégie globale et cohérente d'atteinte de la neutralité carbone. L'analyse des combinaisons et des impacts est complexe, et toute conclusion simpliste est nécessairement réductrice. C'est pourquoi le GIEC reste toujours très nuancé et prudent dans ses conclusions sur le sujet. L'argument climatique n'en demeure pas moins un puissant instrument au service des défenseurs ou des détracteurs de certaines solutions.

Deux sujets font particulièrement l'objet d'une telle instrumentalisation dans le débat public en France. Le premier concerne le nucléaire, dont les partisans affirment par exemple que « *tous les scénarios du GIEC nécessitent plus de nucléaire* »⁹, voire que « *selon [ce] rapport des Nations unies (...), maintenir le réchauffement planétaire en dessous de 1,5°C nécessite une forte augmentation de la production d'énergie nucléaire* »¹⁰. Le second concerne la contestation du potentiel de mobilisation dans des quantités importantes et/ou dans des conditions soutenables de la biomasse pour la production d'énergie, dans les stratégies de neutralité carbone ¹¹.

⁵ Ces sources de production d'électricité présentent en analyse de cycle de vie un bilan en émissions de gaz à effet de serre non nul, et dépendant des conditions de leur mise en œuvre, mais très inférieur dans tous les cas à celui de la production directe d'électricité à partir de la combustion d'une ressource énergétique fossile.

⁶ Ce terme regroupe l'ensemble des options pouvant se traduire par des émissions négatives de GES, par des moyens naturels ou technologiques.

⁷ Respectivement capture et séquestration du carbone (de l'anglais CCS, *Carbon Capture and Storage*) et bio-énergie avec capture et séquestration du carbone (de l'anglais BECCS, *Bio-Energy with Carbon Capture and Storage*).

⁸ Capture et utilisation du carbone (de l'anglais CCU, *Carbon Capture and Utilization*).

⁹ Orano, « *Décodage - Climat : tout savoir sur le rapport du GIEC* », non daté.

<https://orano.group/fr/decodage/climat-tout-savoir-sur-le-rapport-du-giec>

¹⁰ Cette interprétation particulièrement poussée émane de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN), « *Rapport du GIEC : respecter l'accord de Paris nécessitera plus de nucléaire* », 9 octobre 2020.

<https://www.sfen.org/rgn/rapport-giec-respecter-accord-paris-necessitera-nucleaire>

¹¹ Concernant le « secteur des terres », c'est-à-dire principalement l'agriculture, l'alimentation, la forêt, voir le rapport spécial du GIEC publié en Août 2019 : « *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems* ».

Le cœur de métier du GIEC est un travail d'analyse de la littérature scientifique, à un instant donné. Il n'en tire pas des préconisations mais des conclusions qui sont par nature toujours provisoires : la compréhension des phénomènes, de leurs causes et de leurs solutions est toujours relative et évolue sans cesse, sans oublier qu'elle est aussi parfois soumise à des éléments non scientifiques.

La richesse de ce travail n'autorise aucune caricature. Il livre néanmoins, dès lors que l'on entre dans sa complexité, des enseignements précieux. Ceux qu'il apporte sur la soutenabilité et la portée des différentes options de réduction des émissions éclairent d'un jour différent les affirmations précédentes.

Analyse des leviers de décarbonation au regard des objectifs de développement durable

En matière de soutenabilité, il peut être utile de rappeler que l'Accord de Paris, signé dans le cadre de la 21^{ème} session de la Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (COP21) avait été précédé de quelques semaines par un autre événement moins médiatisé mais tout aussi important : l'adoption en septembre 2015 par l'Assemblée générale des mêmes Nations-Unies du « *Programme 2030 pour le développement durable* » et de ses 17 « *Objectifs de développement durable* » (ODD) visant à lutter contre les défis mondiaux « *liés à la pauvreté, aux inégalités, au changement climatique, à la dégradation de l'environnement, à la prospérité, à la paix et à la justice* »¹².

Ainsi, même si l'on peut légitimement accorder une certaine priorité à la lutte contre le changement climatique qui fait partie de ces ODD, il est impératif, avant d'affirmer que telle ou telle option de réduction de gaz à effet de serre est une solution « durable » ou « soutenable », de la soumettre à une analyse multicritère en référence aux autres objectifs.

Dans le chapitre 5 de son Rapport spécial 1,5°C¹³, le GIEC se livre précisément à une **évaluation croisée des impacts positifs ou négatifs, au regard des 16 autres ODD, de 23 actions de toutes natures** (sur la demande et l'offre d'énergie, sur le système alimentaire ou encore sur les océans) considérées comme les plus efficaces en matière de réduction des émissions de GES.

Un score fondé sur l'analyse de la littérature scientifique est ainsi proposée par le GIEC pour chaque binôme « action / ODD », assortie le cas échéant d'une fourchette reflétant le degré d'incertitude ou les différences de contexte et de conditions de mise en œuvre, par exemple s'il s'agit de pays riches ou de pays pauvres¹⁴.

Le GIEC n'a pas attribué de score cumulé à chacune des options considérées, se contentant, pour chacun des ODD, de fournir un score minimal et maximal sans les additionner. En se basant sur ce système de notation, l'Association négaWatt a effectué ce calcul en additionnant l'ensemble des valeurs les plus basses d'une part, des plus hautes d'autre part, sans pondération entre les différents objectifs. Cette méthode aboutit à une évaluation globale de chaque option pour l'ensemble des ODD, qui se présente sous la forme d'un intervalle entre le score le plus bas et le score le plus haut, avec une valeur moyenne (voir Annexe 1). Le résultat que l'on peut interpréter comme un « ordre de mérite de soutenabilité » est présenté dans la figure 1.

¹² <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

¹³ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter5_High_Res.pdf

¹⁴ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

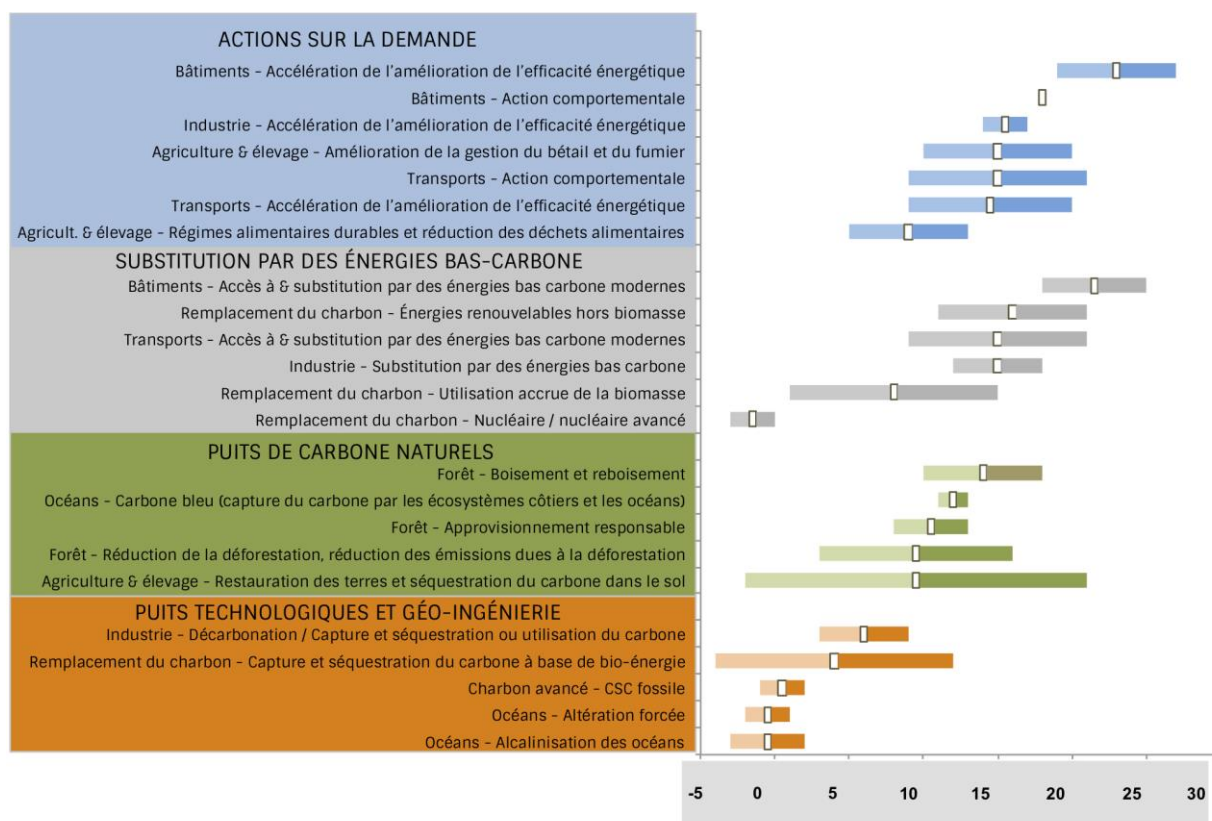


Figure 1 - Comparatif de l'impact agrégé de différents leviers de réduction des émissions de GES sur les objectifs du développement durable
Source : Association négaWatt (2019), d'après GIEC (2018)

Les éléments qui ressortent de cette compilation montrent que les actions les plus bénéfiques pour l'atteinte des ODD et les plus consensuelles concernent l'efficacité énergétique et les changements de comportement dans les bâtiments et les transports, l'amélioration de la gestion de l'élevage, le reboisement et l'accès aux énergies bas-carbone dans les principaux secteurs (bâtiment, industrie et transports).

Les différentes options relatives au « secteur des terres » — agriculture, forêt, alimentation, biomasse — présentent pour la plupart une amplitude importante. L'option « réduction de la déforestation » obtient ainsi une note variant entre +3 et +16, ce qui illustre à quel point l'impact dans ce domaine dépend des conditions de sa mise en œuvre : lorsque la déforestation est destinée à mettre en culture de nouvelles terres, sa limitation peut impacter la sécurité alimentaire si rien n'est fait par ailleurs (comme par exemple changer de régime alimentaire ou améliorer les techniques agricoles). De même, une utilisation massive de terres agricoles en vue de développer à très large échelle les BECS à la place du charbon (score de -4 à +12) peut impacter la sécurité alimentaire et générer des effets socio-économiques négatifs si l'accès aux terres pour les populations locales se voit restreint. L'amplitude de ces intervalles dans le secteur des terres permet de comprendre les débats et les positions antagoniques ; elle impose surtout de prendre pleinement en compte ces enjeux dans l'évaluation des potentiels de biomasse mobilisables pour la production d'énergie (voir Annexe 2).

À l'autre extrémité du spectre, certaines options de réduction des émissions de GES obtiennent des scores très bas, voire négatifs, et de manière assez nette, avec peu d'amplitude. C'est le cas des options les plus incertaines aujourd'hui sur le plan technologique, comme les CSC-CUC ou la géo-ingénierie océanique. C'est aussi le cas du nucléaire, non seulement « avancé » mais aussi existant, pourtant évalué ici dans la configuration censée être la plus efficace vis-à-vis du climat,

c'est-à-dire en remplacement du charbon. Les scores très faibles obtenus par ces options, même avec les réserves d'usage, tend à les disqualifier en tant que « solutions soutenables ».

Pour autant, le mandat et la méthodologie de travail du GIEC consistent à examiner toutes ces options dans les stratégies de réduction des émissions, sans discrimination.

Analyse des trajectoires présentées

Après l'analyse de plus de 400 scénarios ou visions prospectives repérés dans la littérature scientifique, le GIEC a étudié plus précisément près de 90 d'entre eux, considérés comme des « trajectoires 1,5°C », au sens où elles pourraient permettre d'atteindre cet objectif. Il les a rassemblés en quatre familles, correspondant à des dynamiques et donc des « narratifs » contrastés, et illustrées par quatre trajectoires type (voir Annexe 3).

Les deux premières de ces trajectoires (P1 et P2), qui intègrent une action plus forte sur la demande, sont des trajectoires « sans dépassement », c'est-à-dire susceptibles non seulement de limiter le réchauffement moyen en dessous de 1,5°C à la fin du siècle, mais aussi de maintenir le réchauffement sous ce seuil pendant tout le siècle. La trajectoire P3, qui mise davantage sur les évolutions technologiques, correspond à un « dépassement minime », tandis que la dernière (P4), qui ne repose pratiquement que sur le déploiement de technologies se caractérise par un « dépassement marqué », susceptible de conséquences dramatiques au cours du siècle.

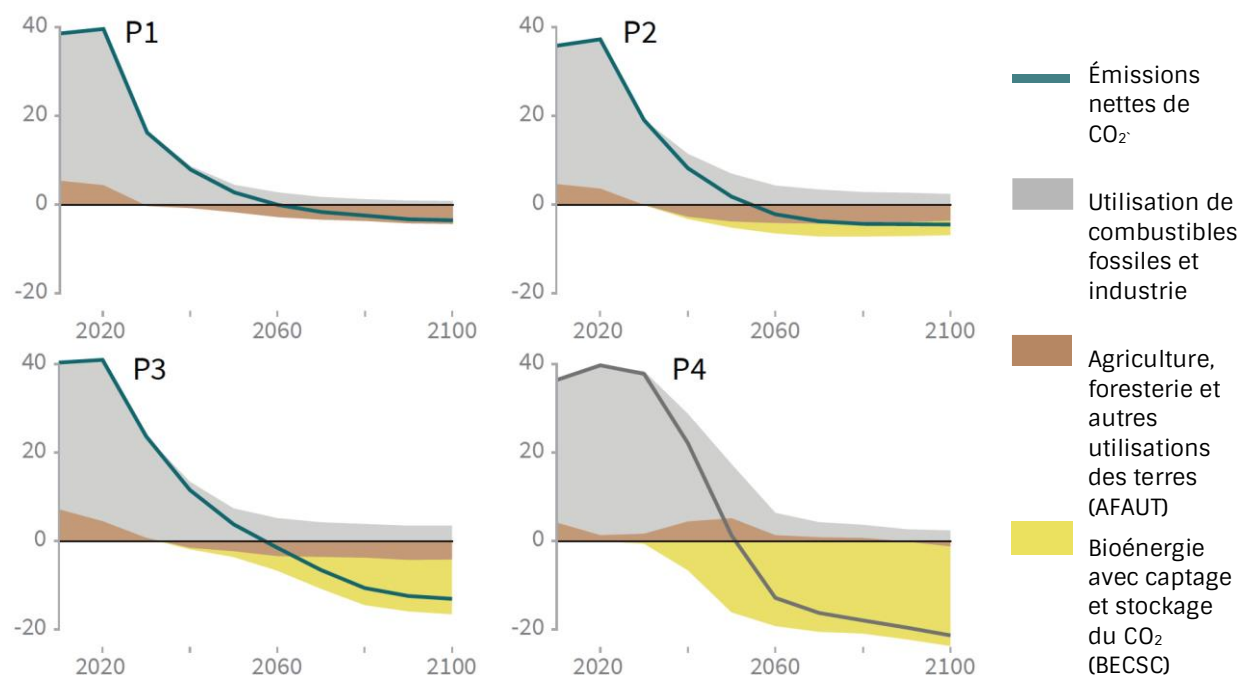


Figure 2 – Bilan des émissions de CO₂ dans les quatre trajectoires type d'atteinte de l'objectif 1,5°C construites par le GIEC pour illustrer la diversité des scénarios existants et des narratifs sous-jacents (GtCO₂/an)
Source : GIEC (2018)

Si tous les aspects du bilan de l'ensemble des émissions de GES sont théoriquement pris en compte dans cette analyse, c'est toutefois essentiellement sous l'angle des seules émissions de CO₂, généralement les mieux couvertes dans les exercices étudiés par le GIEC, que le contenu détaillé des trajectoires est présenté, comme le résume la figure 2. Des différences importantes

apparaissent ainsi entre les trajectoires en matière d'énergie, tant du point de vue du niveau de consommation que du maintien ou non de l'utilisation des énergies fossiles et du recours à la combustion de biomasse, accompagnés ou non de capture et séquestration du carbone.

Le Résumé pour décideurs du GIEC met en en exergue le caractère incontournable dans les trajectoires P1 et P2 « d'une baisse de la consommation d'énergie, notamment grâce à une meilleure efficacité énergétique » et d'une augmentation de « la part de l'électricité dans l'énergie consommée au stade final [...] plus rapide [...] par rapport aux trajectoires axées sur l'objectif de 2°C. » Il souligne également, toujours concernant les trajectoires P1 et P2, que « les énergies renouvelables représentent, selon les projections, 70 à 85 % [...] de la production d'électricité en 2050 (degré de confiance élevé) ».

Un fort développement des énergies renouvelables pour la production d'électricité est d'ailleurs envisagé dans la plupart des scénarios, atteignant 27 % à 96 %, et plus de 67 % dans la moitié d'entre eux. Les scénarios où leur part est la moins élevée sont aussi ceux où l'action sur la demande en général est la plus faible, et le recours à toutes les autres solutions de production « décarbonées » est le plus massif. Ainsi, si le GIEC note dans son résumé que « *la part de l'énergie nucléaire et des combustibles fossiles avec captage et stockage du CO₂ (CSC) devrait, selon les modèles, augmenter dans la plupart des trajectoires* », il offre sur ce point une vision beaucoup plus contrastée.

Tout d'abord, la capture et séquestration du carbone n'apparaît pas indispensable, puisqu'une des quatre trajectoires (P1) illustre une famille de scénarios construits sans faire appel à cette option. Quant au nucléaire, s'il apparaît en hausse dans chacune des trajectoires type, ce n'est pas le cas dans tous les scénarios étudiés, et cette hausse n'est structurante que dans les trajectoires les plus technologiques, P3 et surtout P4. Le GIEC souligne d'ailleurs, dans le Chapitre 2 de son rapport, que « *dans certaines trajectoires [d'atteinte de l'objectif 1,5°C] le nucléaire décline à la fois en puissance installée et en part de la production d'électricité* ». Cette part est en effet plus faible en 2050 qu'aujourd'hui dans la moitié des scénarios à la base des quatre trajectoires.

Le GIEC livre la clé de lecture pour comprendre ces différences : « une faible demande d'énergie apporte plus de souplesse dans le choix des options d'approvisionnement énergétique ; une forte demande d'énergie oblige à mettre en œuvre beaucoup plus d'options d'approvisionnement énergétique sobres en carbone ». Ainsi, un fort développement des renouvelables électriques, présent dans toutes les trajectoires, est indispensable à l'atteinte de l'objectif 1,5°C. Ce n'est pas le cas du nucléaire ou de la CSC. C'est en revanche seulement lorsque ce développement des renouvelables ne s'accompagne pas d'une action résolue sur la demande d'énergie que ces options semblent en effet nécessaires, au prix parfois du réalisme (voir sur ce point l'analyse des projections sur le nucléaire dans les trajectoires dans l'Annexe 4) ou de toute prudence.

C'est d'ailleurs bien plus l'association du nucléaire et de la CSC qui figure dans les trajectoires comme une alternative à la maîtrise des consommations que le nucléaire comme alternative à la CSC. Les trajectoires où l'on fait le plus appel au nucléaire sont aussi celles où l'on mobilise non seulement la CSC mais aussi l'utilisation de la biomasse dans les conditions potentiellement les moins soutenables, avec un développement massif de la BECSC. Le GIEC rappelle avec force que « l'EDC à grande échelle n'est pas une technologie éprouvée et la dépendance à l'égard de cette option menace gravement la capacité de contenir le réchauffement à 1,5 °C. L'EDC apparaît moins nécessaire dans les trajectoires qui mettent fortement l'accent sur le rendement énergétique et la baisse de la demande. »

Vers une trajectoire mondiale 100 % renouvelable ?

Souhaitant mieux comprendre les marges de manœuvre derrière ces constats, l'Association négaWatt s'est livrée, à partir des données fournies par le *Rapport complet*, à un exercice de reconstitution du mix énergétique mondial en 2050 sous-jacent à chacune des 4 trajectoires, en s'appuyant sur les données de l'Agence internationale de l'énergie pour le point de départ situé en 2010. Le résultat est résumé dans la figure 3, en énergie finale.

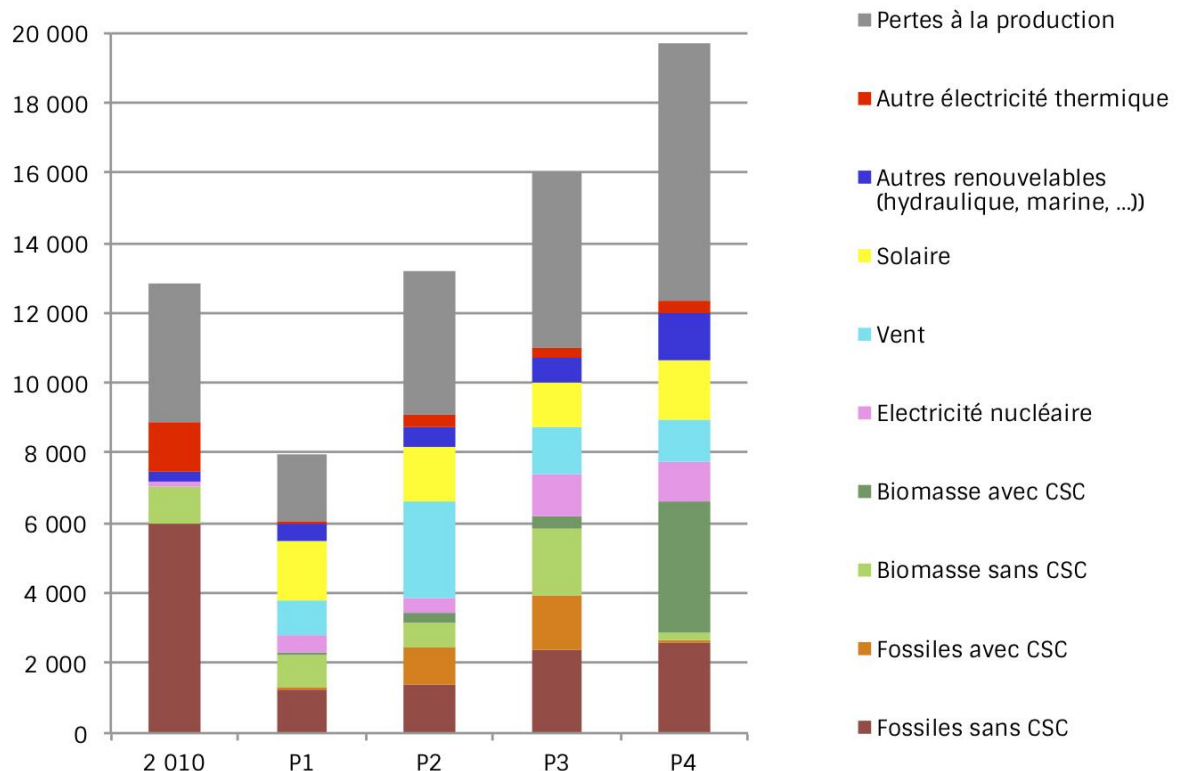


Figure 3 – Bilan énergétique mondial en 2050 dans les quatre trajectoires types proposées par le GIEC (en Gtep)

Source : Association négaWatt (2020), d'après GIEC (2018)

On constate la présence de nucléaire dans les différentes familles de scénarios, mais à un niveau généralement très limité en comparaison de l'éolien et du solaire. On constate aussi que ce recours au nucléaire, ainsi que l'usage des énergies fossiles avec du CSC, voire de la biomasse en BECSC, sont d'autant plus importants que l'évolution de la consommation d'énergie finale est à la hausse.

Les trajectoires proposent différentes combinaisons d'options dont elles matérialisent les potentiels tels qu'ils sont envisagés par la littérature scientifique. On peut remarquer que l'assemblage entre ces potentiels, qu'il s'agisse de l'évolution de la demande ou des différentes sources de production d'énergie, aurait pu être différent.

Une trajectoire s'inscrivant dans la logique de [la démarche négaWatt](#) aurait pu être constituée sur la base des hypothèses les plus ambitieuses trouvées dans la littérature à la fois en matière de maîtrise de la demande (sobriété et efficacité) et de développement des énergies renouvelables,

en donnant la priorité pour ces dernières à l'éolien et au solaire, complétés par le recours à la biomasse et à l'hydraulique¹⁵.

On peut appuyer une telle projection sur plusieurs constats :

Si l'on prend comme référence la trajectoire qui donne le plus de place à la réduction de la demande en énergie finale (P1), cette dernière s'élève en 2050 à 6 milliards de tonnes-équivalent-pétrole (Giga-tep, notées Gtep), soit une baisse de la consommation de 32 % d'ici 2050 à l'échelle mondiale (environ 2,8 Gtep). Vient ensuite la trajectoire P2, dans laquelle la demande s'élève à 9 Gtep.

- On constate par ailleurs que la contribution totale des énergies renouvelables telles que nous les connaissons (soit l'addition de l'éolien, du solaire, de la production hydraulique et de la biomasse sans CSC) est supérieure en 2050 à 4 Gtep en énergie finale pour toutes les trajectoires : elles constituent donc un socle capable *a minima* de couvrir les deux-tiers des besoins projetés dans la trajectoire P1, ou la moitié des besoins de 2010.
- L'addition des potentiels maximaux envisagés pour chacune des grandes familles de production d'énergie renouvelables selon les trajectoires s'élève à plus de 10 Gtep de contribution en énergie finale en 2050.

Il est donc possible d'envisager sur ces bases une trajectoire aboutissant en 2050 à un bilan en énergie finale qui s'appuie sur une forte maîtrise de la demande – sans pour autant pousser celle-ci au potentiel maximal identifié par la trajectoire P1 – et qui mobilise les différentes sources d'énergie renouvelable au-delà du socle de 4 Gtep – sans pour autant épuiser le potentiel maximal que leur attribuent les différentes trajectoires.

Une telle combinaison pourrait par exemple correspondre, comme illustré par la figure 4, à l'addition en énergie finale de :

- 2,8 Gtep d'éolien
- 1,7 Gtep de solaire
- 0,7 Gtep d'autres renouvelables (dont hydraulique)
- 0,3 Gtep d'autre électricité thermique (gaz renouvelable)
- 2,0 Gtep de biomasse

Le total aboutit à 7,5 Gtep, soit un niveau de demande finale intermédiaire entre P1 et P2, auquel s'ajoutent 2,2 Gtep de pertes et d'autoconsommations du secteur de l'énergie pour aboutir à un total de près de 10 Gtep en énergie primaire.

¹⁵ L'énergie hydraulique est intégrée dans la catégorie « autres renouvelables » qu'il n'a pas été possible de décomposer dans le cadre de cet exercice.

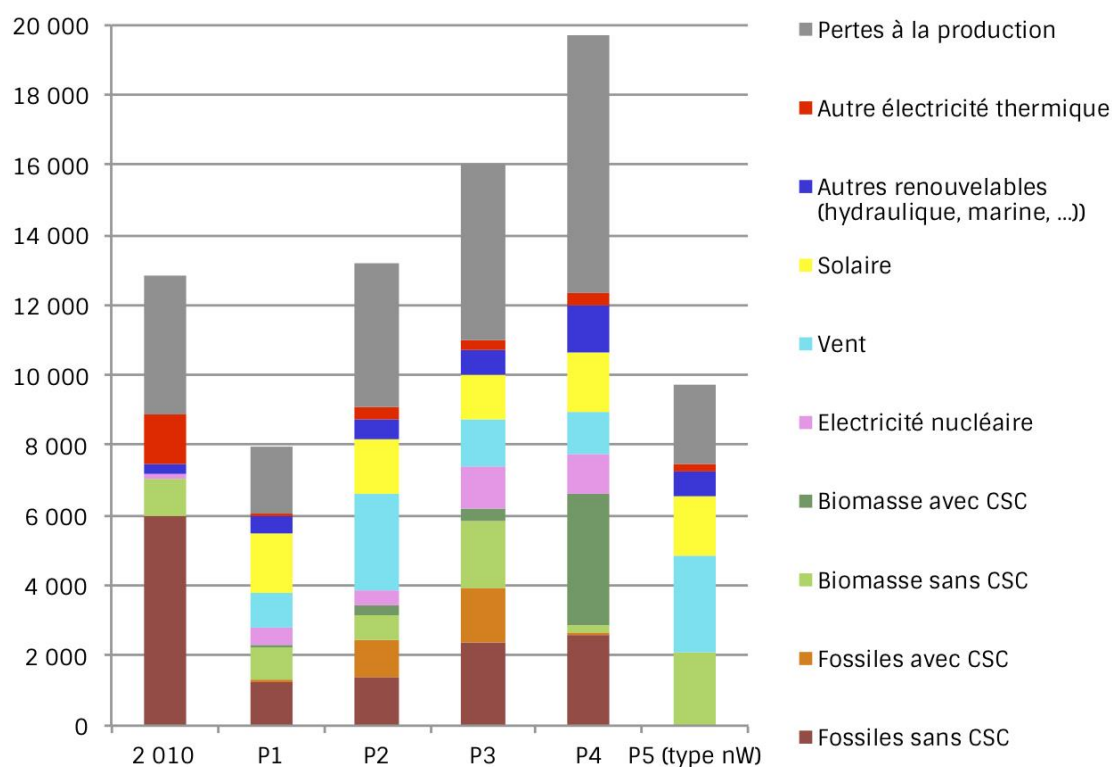


Figure 4 - Bilan énergétique mondial en 2050 dans les quatre trajectoires types proposées par le GIEC (P1 à P4) et recombinaison composée par négaWatt (P5)
 Source : Association négaWatt (2020), d'après GIEC (2018)

Comme on le voit, une telle combinaison (nommée P5 dans le graphique ci-dessus) ne fait appel ni aux fossiles, ni à la CSC, ni au nucléaire, ni à la géoingénierie. Pleinement compatible avec la démarche négaWatt étendue pour l'occasion à l'échelle mondiale, elle répond à l'objectif de neutralité carbone tout en évitant tout recours aux options technologiques de réduction des émissions les moins bien notées au regard des 16 autres ODD. Dit autrement, cette combinaison P5 fait uniquement appel aux leviers de réduction classés comme étant les plus soutenables par le GIEC.

La priorité doit être donnée aux actions de décarbonation les plus soutenables

En conclusion, il est fallacieux d'affirmer que le GIEC considère que le nucléaire est indispensable à la lutte contre les changements climatiques et à l'atteinte de la neutralité carbone. Même dans les scénarios où le nucléaire joue un rôle important, sa place reste nettement inférieure à celle de l'éolien seul et du solaire seul, et loin derrière la biomasse. Les discours mettant en avant le rôle possible du nucléaire devraient insister beaucoup plus sur le rôle nécessaire des renouvelables électriques. Quant à la biomasse, la plupart des scénarios lui donnent un rôle accru. Même dans la famille de scénarios P1 où sa contribution en 2050 est un peu inférieure à celle d'aujourd'hui, les quantités mobilisées augmentent ensuite.

La priorité doit donc être donnée aux actions de décarbonation les plus soutenables, c'est à dire à **la réduction de la demande** par des actions de **sobriété** et d'**efficacité** et à **l'accélération** du développement **des énergies renouvelables**. Comparées aux autres solutions, ce sont aussi celles qui peuvent être le plus rapidement mises en œuvre et à moindre coût. Ensemble, ces « **actions sans regret** » permettent d'envisager un mix énergétique mondial 100 % renouvelable à l'horizon 2050, compatible avec l'objectif 1,5 °C, sans recours aux technologies hasardeuses de capture et séquestration de carbone.

ANNEXE 1 – Soutenabilité des leviers de décarbonation

Dans le chapitre 5 de son Rapport spécial sur les trajectoires susceptibles d'atteindre l'objectif de limitation du réchauffement moyen à 1,5 °C à l'horizon 2100, le GIEC fournit un important travail d'analyse des options possibles pour la réduction des émissions de GES sous l'angle de leur soutenabilité. Soulignant par cet exercice même que la soutenabilité de différentes actions ne se réduit pas à leur seule nature « bas carbone », il recommande d'évaluer les différents moyens de lutte contre le changement climatique à l'aune des 17 Objectifs de développement durable (ODD)¹⁶ adoptés par les Nations-Unies en septembre 2015 dans le cadre de l'Agenda 2030.

Ces 17 objectifs visent à couvrir l'essentiel, sinon l'ensemble des enjeux de soutenabilité, non seulement sur le plan environnemental, mais également bien sûr sur le plan social et sur le plan économique, ainsi que dans le champ de la gouvernance : ils définissent « 17 priorités pour un développement socialement équitable, sûr d'un point de vue environnemental, économiquement prospère, inclusif et prévisible à l'horizon 2030 » en s'appuyant sur cinq grands enjeux transversaux, ou "5P" : les peuples, la planète, la prospérité, la paix et les partenariats. La lutte contre le changement climatique, si elle y figure en bonne place, n'est qu'un parmi ces 17 ODD (le n°13).



Figure 5 – Les 17 Objectifs de développement durable (ODD)

Source : Agenda 2030 des Nations-Unies (2015)

L'un des principes sous-jacents à ce cadre des 17 ODD est explicitement de traiter, par le caractère transversal du cadre programmatique qu'ils offrent, la nature intégrée et indivisible des objectifs, en reconnaissant les liens systémiques entre les dimensions économique, sociale et environnementale. En ce sens, l'analyse croisée des options de réduction des GES, c'est-à-dire d'atteinte de l'objectif n°13, et des autres ODD est éminemment pertinente. Le cadre programmatique des ODD se caractérise également par sa visée opérationnelle, *via* la déclinaison des 17 objectifs en un total de 169 cibles concrètes, elles-mêmes rapportées à 230 indicateurs permettant de suivre les évolutions. Cette base fournit à son tour un référentiel pour l'évaluation

¹⁶ En anglais, objectifs du développement soutenable, ou *Sustainable Development Goals* (SDG).

des impacts de différentes actions pouvant s'inscrire dans le programme sur l'atteinte des différents objectifs, que ceux-ci soient a priori visés par cette action ou non.

L'exercice auquel s'est livré le GIEC a dès lors consisté à mener une revue de littérature scientifique relative à l'évaluation de l'impact des principales actions identifiées de réduction des émissions nettes de GES, regroupées par secteurs, sur les 16 autres ODD, regroupés par thèmes. Le GIEC a ainsi passé au crible 23 options de lutte contre le changement climatique dans les domaines de l'industrie, des bâtiments, des transports, du remplacement du charbon ou de son utilisation « avancée » (CSC), de l'agriculture et de l'élevage, de la forêt et des océans. Ces 23 options couvrent ainsi largement l'ensemble des grands leviers de décarbonation : l'action sur la demande, avec des leviers d'efficacité comme de sobriété (action comportementale), la substitution de la production d'énergie par des énergies bas carbone, le recours aux puits de carbone naturels, et le recours aux puits de carbone technologiques et à la géo-ingénierie.

Objectifs du développement durable des Nations-Unies		Social				Social 2				Environmental				Economique				Score cumulé										
		1	2	3	4	5	10	16	17	6	12	14	15	7	8	9	11	13	Nombre d'ODD évalués									
		Éradication de la pauvreté	Lutte contre la faim	Accès à la santé et bien-être	Accès à une éducation de qualité	Égalité entre les sexes	Réduction des inégalités	Pais, justice et institutions efficaces	Partenariats pour la réalisation des	Accès à l'eau salubre et à l'assainissement	Consommation et production	Vie aquatique	Vie terrestre	Accès à une énergie propre à coût	Accès à des emplois décent et croissance	Infrastructure résiliente.	Villes et communautés durables	Lutte contre le changement	Maximum	Total (valeur médiane)	Minimum							
Industrie	Accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique	+2		+2	+1			+1		+2	+2	-1	+1			+2	+1	+1	+2	n.d.	11	17	15,5	14				
	Substitution par des énergies bas carbone			+2	+1					+2	+2	-2	+2			+1	-1	+2	+2	+2	+2	n.d.	10	18	15	12		
	Décarbonation/CSC/CUC			-1						+2	+1	-1	+2			-1		+2	-2	+2	+2	n.d.	8	9	6	3		
Bâtiments	Action comportementale	+2		+2					+2			+2	+2				+2	+2	+2	+2	n.d.	9	18	18	18			
	Accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique	+2	-1	+2	+2	+2	+1	+1	-1	+2	+2	+2	+2	+1			+2	+2	+2	-1	+2	+2	n.d.	15	27	23	19	
	Accès à la substitution par des énergies bas carbone modernes	+2	0	-1	+2	+1	+1			+2	+2	+2	-1	+2	-1			+2	+2	+2	+2	+3	n.d.	14	25	21,5	18	
Transports	Action comportementale	+2	-1	+2	+2	-1	+1	+1	+2	+1	-1	+2	+2	+2				+2	-2	+2	-2	+2	n.d.	14	21	15	9	
	Accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique	+2	-1		+2					+2	+2	+2	+2	+2				+2	+2	-2	+2	-2	+2	n.d.	10	20	14,5	9
	Accès à la substitution par des énergies bas carbone modernes	+2	-1	0	+2					+2	+1	-1	+2	+2	-1	+2			+2	+2	-2	+2	+2	n.d.	4	21	15	9
Remplacement du charbon	Énergies renouvelables hors biomasse	+2		+2	+1	+1	+1	+1	+2	+2	0	+2	-2	+2	+2	-1	-1	+3	0	0	-1	+2	n.d.	15	21	16	11	
	Utilisation accrue de la biomasse	+2	-2	+2	-2	+2							+1	-2	+2			+1	-2	+3	+1	+1		n.d.	9	15	8	1
	Nucléaire / nucléaire avancé				-1							-1		+2	-1				-1	+1	+1	-1		n.d.	6	0	-1,5	-3
Charbon avancé	CSC à base de bio-énergie	+2	-2	+1	-2	+2	-1						+1	-2	+1			+1	-2	+2	+1	+1		n.d.	9	12	4	-4
	CSC fossile				-1								+1	-2					+2	-1	+1			n.d.	5	2	0,5	-1
	Régimes alimentaires durables et réduction des déchets alimentaires	0	-1	+2	+1					+1	-1	+1	-1	+2	-1	+2			+1	+1	+1	+1		n.d.	11	13	9	5
Agriculture & élevage	Restauration des terres et séquestration du carbone dans le sol	+2	+2	+2	-2	+2	-2	+2	0	+1	0	0	-1	+2	+1	-1	+1		+1	-1	+1	+2	-2	n.d.	14	21	9,5	-2
	Amélioration de la gestion du bétail et du fumier	+2	+2	+2	-2		+2	0	+1	0	+1	+2	+2	-1	+1				+1	+1	+1	+2		n.d.	13	20	15	10
	Réduction de la déforestation, REDD+	+2	+1	-2		+1	+1	-1	+2	+2	+1	-1	+1	-1	+1				+1	+1	-1	+1	-1	n.d.	13	16	9,5	3
Forêt	Boisement et reboisement	+2	-2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+2	+2	-1				+2	+2	+1	+2		+2	n.d.	14	18	14	10
	Approvisionnement responsable					0	0	0	+1	+1	+1	+2	-1	+1				+1	-1	+1	+2	+2	+2	n.d.	11	13	10,5	8
	Alcalinisation des océans			+1	-1														+1	-2				n.d.	2	2	-0,5	-3
Océans	Carbone bleu (capture de carbone par les océans)	+3	+3										+2					+2	0	+3			n.d.	5	13	12	11	
	Altération forcée																		+2	-1	-1			n.d.	2	1	-0,5	-2

Tableau 1 – Synthèse du score attribué à 23 options de réduction des émissions nettes de GES au regard de leur impact sur positif sur l'atteinte des 16 autres ODD
Source : Association négaWatt (2020), d'après GIEC (2018)

Le résultat de cette évaluation, résumé dans le tableau 1, se présente sous la forme d'un score attribué à chaque option de réduction des émissions nettes de GES vis-à-vis de chaque ODD autre que la lutte climatique, chaque fois que cette évaluation est possible. Ainsi, pour chaque binôme « option GES / ODD », le travail synthétisé par le GIEC a commencé par évaluer si la littérature scientifique informe la question de l'impact ou n'en dit rien, soit que ce croisement ne

soit tout simplement pas pertinent, soit qu'il ne soit pas traité à ce jour dans la production scientifique.

Le rapport du GIEC attribue ensuite un score, pouvant varier de -2 pour un impact très significativement négatif à +3 pour un impact fortement positif sur l'atteinte de l'objectif considéré. Dans les cas où la littérature scientifique ne fournit pas une évaluation suffisamment nette, ou indique que l'impact peut varier selon différents facteurs tels que les conditions de mise en œuvre de l'option considérée, le rapport du GIEC fournit un score sous forme de fourchette.

Au final, pour chaque option et chaque objectif de développement durable, le tableau compilé par le GIEC fournit des informations sur l'existence ou l'absence d'une interaction directe et, le cas échéant, le score estimé de cette interaction – en fonction de la nature positive ou négative de l'impact de l'option de l'objectif, et de son niveau d'intensité. Lorsque l'impact est discuté, ou dépend principalement de conditions spécifiques, le tableau fournit les scores minimum et maximum. Le GIEC ne fournit cependant pas de scores cumulés. Pour apprécier plus facilement, sous forme synthétique, le résultat de cette évaluation très complète du point de vue de la soutenabilité potentielle des différentes options d'une stratégie de décarbonation, l'Association négaWatt a complété le tableau en calculant ce score.

Celui-ci est obtenu pour chacune des 23 options par addition des scores que lui attribue le tableau sur chacun des 16 ODD, avec une valeur moyenne entourée d'un maximum et d'un minimum, en tenant compte de la fourchette cumulée des scores par objectif pour chaque option. Ce total fournit une indication globale du caractère plus ou moins soutenable des différentes options, même s'il faut souligner qu'il est obtenu sans aucune pondération entre les ODD, alors que dans la pratique, en fonction des situations, leur importance relative n'est pas uniforme.

Outre les discussions relatives à une éventuelle pondération entre les ODD, ces résultats doivent être interprétés prudemment. Comme le montre le tableau plus détaillé publié par le GIEC, la qualité de l'évaluation que fournit la littérature scientifique concernant le score de chacune de ces options / objectifs est hétérogène. Pour chacune d'entre elles, des informations supplémentaires sont fournies par le GIEC sur le niveau de preuve (principalement basé sur la quantité de publications disponibles), le niveau d'accord au sein de la communauté scientifique montré par ces publications, et le niveau de confiance que cette littérature apporte. Ces niveaux sont très variables. En outre, l'interaction évaluée ne couvre parfois que certains aspects (ou cibles des ODD) reflétés dans les quelques lignes d'explication que le GIEC fournit pour chaque cas. Inversement, le tableau ne fournit pas d'explication des raisons pour lesquelles certaines options sont considérées comme n'ayant pas d'interaction directe avec certains objectifs, ce qui dans certains cas peut être discutable ; le simple manque de littérature scientifique sur le sujet peut en être la cause.

Tout en appelant au renforcement et à l'approfondissement de cette démarche, les résultats démontrent l'intérêt de celle-ci pour caractériser la nature plus ou moins soutenable des différentes options. Elles se différencient essentiellement selon deux critères : leur score médian, sur lequel des écarts très importants peuvent apparaître entre les options évaluées, et la sensibilité du score global, et donc de l'impact, aux conditions de mise en œuvre, qui appelle dans certains cas à une très grande attention. Plus précisément, on peut tirer sur la base de cette évaluation les enseignements suivants :

- certaines options semblent clairement n'avoir que des effets positifs, ou les plus positifs, sur les objectifs de développement durable. C'est par exemple le cas de la sobriété et de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment, ou de l'efficacité dans l'industrie ;

- d'autres options présentent clairement un impact positif global, bien qu'elles puissent avoir des impacts négatifs importants sur certains des objectifs, ce qui nécessite une mise en œuvre maîtrisée. C'est le cas de l'action comportementale (sobriété) ou de l'amélioration de l'efficacité dans le secteur des transports, de l'utilisation d'énergies renouvelables autres que la biomasse pour remplacer le charbon, ou du reboisement ;
- l'équilibre entre les effets positifs attendus et les éventuels effets négatifs semble encore plus critique, bien que le résultat global reste positif, pour des options telles que la décarbonisation par le CSC dans l'industrie ou une utilisation accrue de la biomasse à des fins énergétiques. Dans ces cas, l'impact positif sur la soutenabilité pourrait être particulièrement sensible aux conditions de mise en œuvre ;
- enfin, certaines options semblent avoir un impact beaucoup moins positif sur la soutenabilité à l'échelle mondiale, voire générer le risque d'un impact globalement négatif. Cela concerne en particulier l'utilisation du CSC ou de la bioénergie avec le CSC pour remplacer les combustibles fossiles, ainsi que l'option nucléaire.

ANNEXE 2 – Potentiels et limites du recours aux bioénergies

Une approche par les limites planétaires

La consommation actuelle de biomasse à l'échelle mondiale est d'environ 1,2 Gtep, soit 50 EJ¹⁷. De nombreuses études ont tenté d'estimer le potentiel global de biomasse pouvant être disponible pour les bioénergies dans l'avenir.

- Les estimations varient entre **moins de 50 EJ à plus de 1000 EJ**¹⁸
- Selon le rapport spécial du GIEC 1,5 °C, la biomasse représenterait entre **40 et 312 EJ** selon les différents scénarios (soit 10 à 54% du total de l'énergie primaire), et **154 EJ** pour les scénarios médians (26 % du total de l'énergie primaire)¹⁹
- le Global Energy Assessment donne une fourchette de **160–270 EJ** de bioénergies²⁰
- L'Agence internationale de l'énergie fonctionne avec une limite de **150 EJ** de matières premières de biomasse durable pour leurs scénarios²¹.
- Différentes études confirment ces fourchettes^{22,23}
- Certains chercheurs avancent des potentiels encore plus élevés au-dessus de 300 EJ²⁴, mais avec un faible consensus.

Selon le GIEC²⁵, le niveau de consensus sur une valeur atteignant le double de la consommation actuelle, soit 100 EJ ou 2,4 Gtep, est élevé. Au-delà le consensus va décroissant. Il reste encore assez élevé pour une valeur de 150 EJ ou 3,6 Gtep, il est moyen pour 200 EJ, et devient plus faible au-delà de 250 EJ.

La communauté scientifique est donc largement d'accord sur le fait que le potentiel technique durable pour la bioénergie d'ici 2050 atteint au moins le double de la production actuelle, et **le consensus reste élevé pour le triple, soit 150 EJ, qui est la valeur médiane des scénarios examinés par le GIEC.**

C'est cette valeur de 150 EJ qui a été utilisée dans la combinaison P5 présentée plus haut dans le corps de la note.

¹⁷ 1 Exajoule (10¹⁸ Joule) vaut 24 Mtep

¹⁸ ipcc_wg3_ar5_chapter7, § 11.13.2 , p. 870

¹⁹ Chapter 2: Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development, 4 Juin 2018

²⁰ T. Johannsen, N. Nakicenovic, A Patwardhan et al, Summary for policymakers – Global energy assessment, Toward a sustainable future, 3-30. https://iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_SPM.pdf

²¹ International Energy Agency. Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy. 2017. www.iea.org/reports/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy.

²² Chum H, Faaij A, Moreira J, et al. Bioenergy. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation

²³ Haberl H, Erb K-H, Krausmann F, et al. Bioenergy: how much can we expect for 2050? Environ Res Lett 2013; 8:31004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/031004>

²⁴ Creutzig F, Ravindranath NH, Berndes G, Bolwig S, Bright R, Cherubini F, et al. Bioenergy and climate change mitigation: An assessment. Glob Change Biol, Bioenergy 2015;7:916–44. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>.

²⁵ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the IPCC.ipcc_wg3_ar5_full, figure 11.20, p. 871/1436

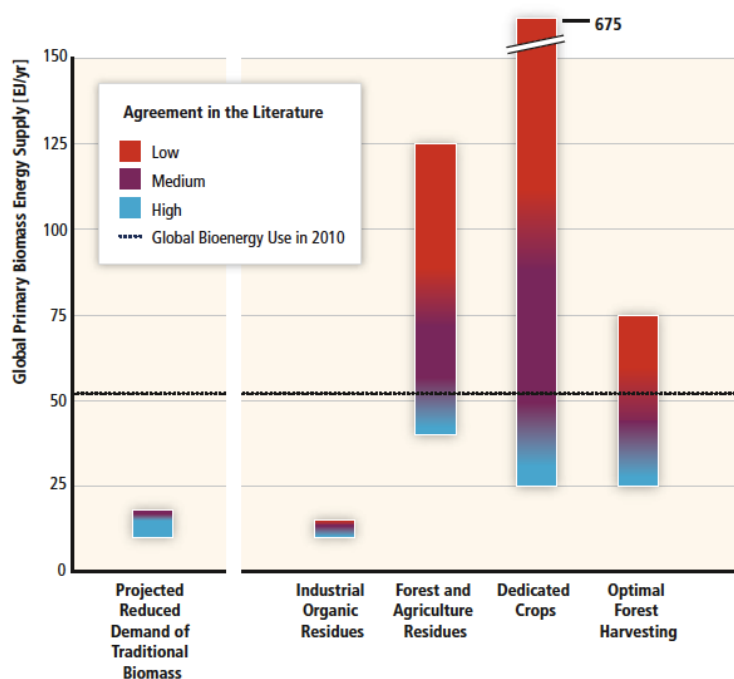


Figure 6 - Potentiel de bioénergies par secteur en 2050. GIEC, Climate change 2014. Working group 3 (mitigation).

Les BECSC et les bioénergies

Dans les scénarios du GIEC, de nombreuses mentions concernant les bioénergies font référence en réalité aux BECSC – c'est-à-dire les bioénergies avec capture et stockage de carbone – produites à partir de cultures dédiées. Ainsi le rapport spécial sur les terres [SRCCCL] indique que les surfaces dédiées aux bioénergies dans les scénarios SSP5²⁶ sont de 760 millions d'hectares, qui peuvent être comparées aux 1600 à 1900 millions d'hectares estimées de terres arables au niveau mondial²⁷. On retrouve une valeur voisine dans le rapport spécial 1,5 °C avec 724 Mha dans les scénarios P4 pour 260 EJ de bioénergies au total. Ces surfaces restent élevées dans P3 avec 283 Mha (110 EJ), de 93 Mha dans P2 (75 EJ) et 22 Mha dans P1 (42 EJ, la seule famille de scénarios qui voit une diminution des bioénergies à l'horizon 2050).

²⁶ Les SSP – shared socio-economic pathways – décrivent des scénarios socio-économiques en cohérence avec les scénarios climatiques. Dans le SR 1.5, seuls les SSP1, 2 et 5 permettent d'atteindre l'objectif 1°5.

²⁷ [SRCCCL] Special report on climate change : Land. Summary for policy makers, p.37. 2019.

A. Sustainability-focused (SSP1)
Sustainability in land management, agricultural intensification, production and consumption patterns result in reduced need for agricultural land, despite increases in per capita food consumption. This land can instead be used for reforestation, afforestation, and bioenergy.

B. Middle of the road (SSP2)
Societal as well as technological development follows historical patterns. Increased demand for land mitigation options such as bioenergy, reduced deforestation or afforestation decreases availability of agricultural land for food, feed and fibre.

C. Resource intensive (SSP5)
Resource-intensive production and consumption patterns, results in high baseline emissions. Mitigation focuses on technological solutions including substantial bioenergy and BECCS. Intensification and competing land uses contribute to declines in agricultural land.

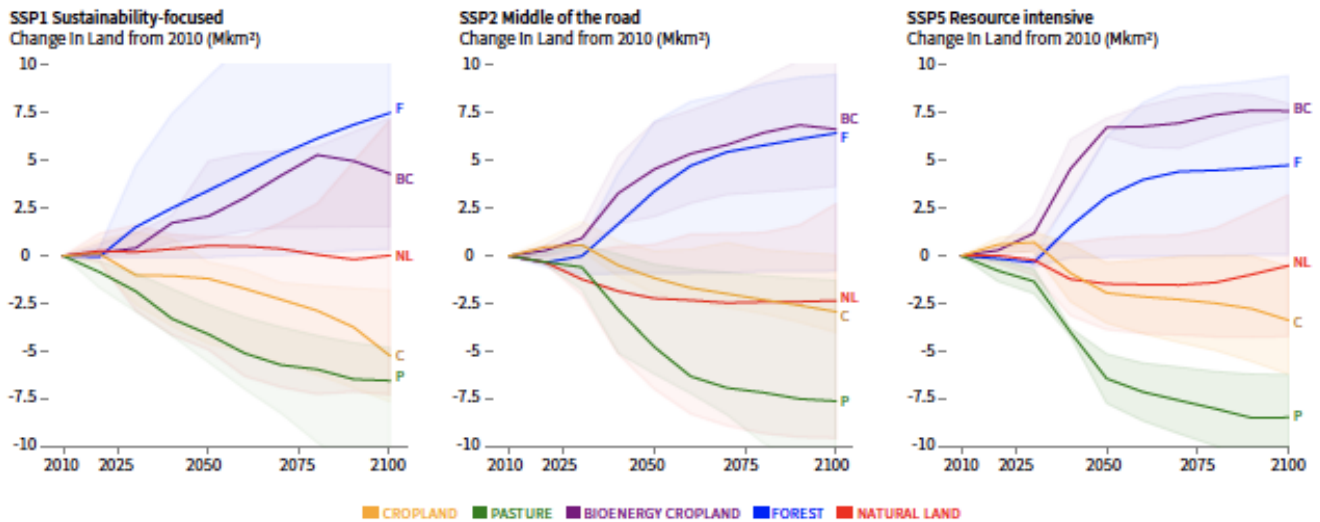


Figure 7 - Évolution des surfaces selon les 3 scénario socio-économiques compatibles avec les 1,5 °C. [SRCCCL]
Source : GIEC (2019)

Le rapport spécial sur les terres [SRCCCL] indique que si le potentiel de mitigation des bioénergies et des BECCS est élevé, son impact négatif sur la sécurité alimentaire mondiale l'est également. On comprend aisément que l'ampleur de cet impact est directement liée à la quantité de terres utilisées pour la culture de bioénergies.

Mais le recours aux meilleurs pratiques peut améliorer significativement les différents impacts, notamment le choix des ressources et l'utilisation de terres marginales ou abandonnées.

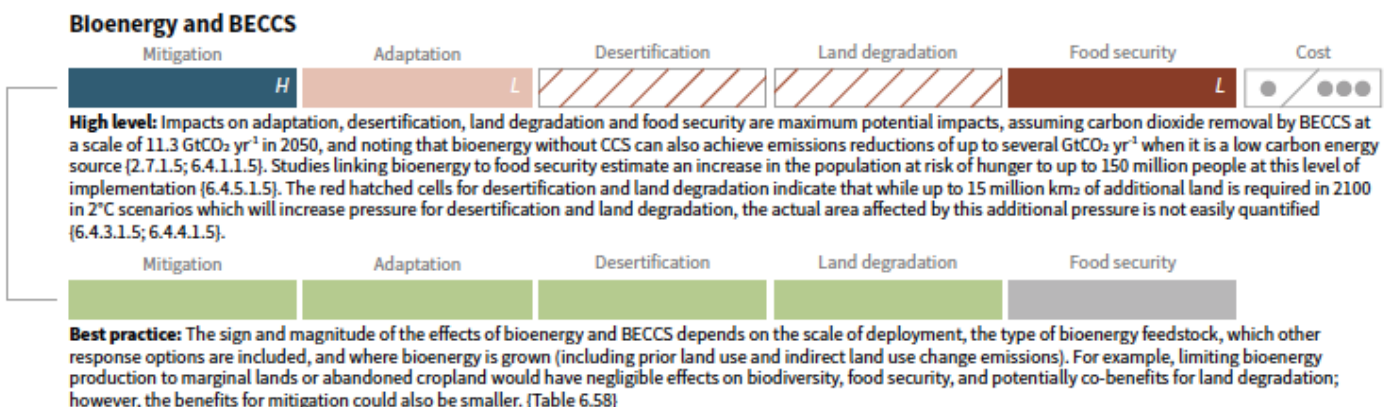


Figure 8 – Impact de l'utilisation des bioénergies et des BECSC en fonction des niveaux et des conditions de déploiement
Source : GIEC (2019)

	Horizon	Unité	P1	P2	P3	P4
Réduction émissions CO ₂	2030 vs 2010	%	-58	-47	-41	+4
Réduction CH ₄ agricole	2030 vs 2010	%	-24	-48	+1	+14
Réduction N ₂ O agricole	2030 vs 2010	%	+5	-26	+15	+3
Surfaces dédiées aux bioénergies	2050	Mha	22	93	283	724
CO ₂ capturé par les BECSC	Cumul d'ici 2100	Gt	0	151	414	1.191
Production de bioénergies	2050	EJ	42	75	111	259

Tableau 2 – Comparaison d'indicateurs liés au déploiement des bioénergies dans les trajectoires P1 à P4
Source : GIEC (2018)

Le rôle de la biomasse dans les scénarios de transition énergétique

- Scénario négaWatt : la consommation primaire de bioénergies est de 420 TWh PCS pour 71 millions d'habitants, soit 20 GJ par personne. À la différence des scénarios P3 et P4 du GIEC, les bioénergies dans le scénario négaWatt mobilisent peu de surfaces agricoles dédiées. La logique suivie consiste à utiliser les sous-produits et co-produits des activités agricoles et forestières en recherchant systématiquement les synergies entre les différents usages et en limitant autant que possible les compétitions (voir le scénario Afterres2050).
- Scénario Long Term Strategy (UE) : le scénario 1.5 Tech prévoit 320 Mtep de bioénergies, le scénario 1.5 Life 220 Mtep, soit pour 500 millions d'habitants respectivement 27 et 18 GJ.

ANNEXE 3 – Les quatre « trajectoires 1,5 °C » type présentées par le GIEC

Le résumé pour décideurs du rapport du GIEC sur l'atteinte de l'objectif 1,5 °C s'articule, pour la partie relative aux stratégies de réduction des émissions nettes de GES et des trajectoires associées, sur la comparaison de quatre trajectoires « type » de réduction des émissions. Ces trajectoires, dénommées P1 à P4, sont souvent interprétées comme de véritables scénarios, auxquels certains prêtent même un caractère prescriptif, laissant penser que le GIEC fournirait ainsi une liste limitative de stratégies à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif.

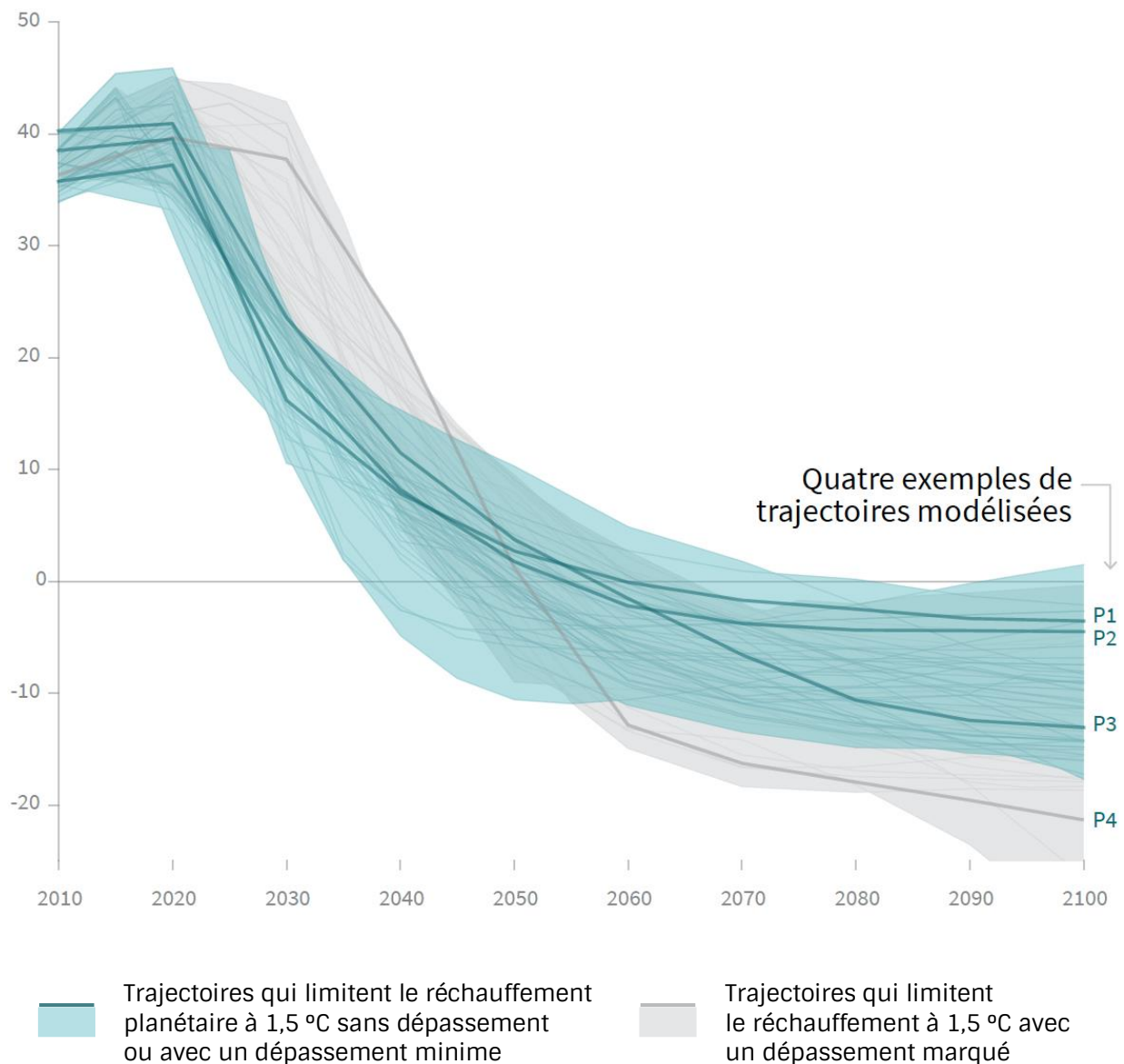


Figure 9 – Évolution des émissions nettes annuelles de CO₂ dans les scénarios 1,5 °C analysés par le GIEC et les quatre trajectoires type illustratives (GtCO₂/an)

Source : GIEC (2018)

En réalité, ces quatre trajectoires n'ont qu'un caractère illustratif. Elles ne constituent pas en elles-mêmes des scénarios, au sens d'exercices prospectifs cohérents développés en tant que tels, même si elles correspondent à des trajectoires d'émissions modélisées et évaluées par le GIEC²⁸. Ces trajectoires sont en fait choisies parmi un faisceau constitué sur la base de 89 scénarios ou visions prospectives publiés susceptibles d'atteindre l'objectif 1,5 °C, eux-mêmes retenus par le GIEC parmi plus de 400 scénarios ou visions référencés.

Comme l'illustre la figure 9, les quatre trajectoires retenues sont illustratives des différentes dynamiques d'émissions nettes de CO₂ décrites par ces scénarios et visions, ou déduites de leur caractérisation²⁹. Ces dynamiques se distinguent notamment sur trois points : la vitesse avec laquelle s'engage la baisse des émissions nettes, la date à laquelle ces émissions passent par la « neutralité carbone » (zéro émissions nettes) au cours du siècle, et l'ampleur corrélative des émissions nettes négatives jusqu'à la fin du siècle. Selon la manière dont elles combinent ces différents facteurs, les trajectoires permettent d'atteindre l'objectif d'un réchauffement moyen limité à 1,5 °C (avec une probabilité suffisamment élevée) sans dépassement temporaire de ce niveau de réchauffement au cours du siècle, avec un faible dépassement temporaire, ou au prix d'un dépassement important (*overshoot*). Les trajectoires P1 et P2 illustrent la famille des trajectoires sans dépassement, P3 celle des trajectoires avec faible dépassement et P4 celle des familles avec dépassement marqué.

Il y a bien sûr de nombreuses manières possibles de combiner les options de réduction des émissions nettes pour atteindre chacune des trajectoires. Chacune des dynamiques considérées tend toutefois à s'inscrire dans une certaine priorité entre les leviers de décarbonation, en lien notamment avec leur capacité différente à produire des réductions à des amplitudes et des échelles de temps différentes : la chronologie de réduction est dictée par le rythme de déploiement envisageable en fonction de l'inertie de mise en œuvre ou des échéances de disponibilité considérées pour les différentes options.

Le travail mené par le GIEC a ainsi permis d'identifier, derrière les dynamiques différentes d'émissions, une certaine homogénéité de forme dans la combinaison des solutions retenues par les scénarios ou visions correspondants. À chaque type de trajectoire correspondrait ainsi une certaine philosophie concernant les priorités d'action et le potentiel de réduction des émissions nettes prêté à chacune d'elles. C'est cette homogénéité dans la diversité que le rapport spécial du GIEC cherche à capturer dans ces « trajectoires type ».

Ainsi, au-delà des données chiffrées sur lesquelles elles sont calées, c'est davantage la philosophie générale sous-jacente à chacune qui caractérise à travers ces trajectoires quatre familles. Le GIEC fournit pour chacune de ces trajectoires type un narratif qui résume les dynamiques sociétales, économiques et technologiques dans lesquelles elles s'inscrivent :

P1 : « Scénario selon lequel les innovations sociales, commerciales et technologiques engendrent une réduction de la demande d'énergie en 2050 alors que les conditions de vie s'améliorent, en particulier dans l'hémisphère Sud. Un système énergétique de moindre envergure

²⁸ Ces trajectoires P1 à P4 correspondent respectivement aux trajectoires d'émissions évaluées sous les appellations respectives LED, S1, S2 et S5 dans le chapitre 2 du rapport spécial du GIEC.

²⁹ Les exercices prospectifs et modélisations prenant pour l'essentiel en compte les seules émissions de CO₂ (souvent autour d'une modélisation centrée sur le système énergétique), c'est cette composante majeure des émissions qui est considérée pour caractériser et comparer les nombreuses trajectoires retenues. Des trajectoires d'émissions des autres gaz à effet de serre compatibles avec l'objectif 1,5 °C sont prises en compte séparément (notamment le méthane, CH₄ et le protoxyde d'azote, N₂O) mais elles ne sont pas différenciées en rapport avec les dynamiques sur le CO₂ et les narratifs correspondants.

permet une décarbonation rapide de l'énergie fournie. Le boisement est la seule option d'EDC retenue ; il n'est pas fait recours aux combustibles fossiles avec captage et stockage de dioxyde de carbone (CSC) ni à la BECSC. »

P2 : « Scénario qui met beaucoup l'accent sur la durabilité, y compris l'intensité énergétique, le développement humain, la convergence économique et la coopération internationale, ainsi qu'une réorientation vers des modes de consommation durables et robustes, des innovations technologiques à faible intensité de carbone et des systèmes d'utilisation des terres bien gérés, avec une acceptabilité sociétale limitée pour ce qui est de la BECSC. »

P3 : « Scénario intermédiaire selon lequel le développement sociétal comme le développement technologique suivent des schémas habituels. La réduction des émissions s'obtient principalement par une modification de la façon dont l'énergie et les produits sont obtenus et, dans une moindre mesure, par une réduction de la demande. »

P4 : « Scénario à forte intensité de ressources et d'énergie selon lequel la croissance économique et la mondialisation aboutissent à l'adoption à grande échelle des modes de vie à forte intensité de GES, y compris une demande forte de carburants et de produits de l'élevage. La réduction des émissions s'obtient principalement par des moyens technologiques qui font un usage intensif de l'EDC au moyen de la BECSC. »

Ces narratifs très contrastés se reflètent dans les bilans fournis par le rapport du GIEC sur l'évolution du bilan en énergie et en gaz à effet de serre à 2030 et à 2050 dans les différentes trajectoires. Ces bilans caractérisent la manière dont les différentes familles de scénarios hiérarchisent les priorités et l'articulation dans le temps entre les différents leviers de décarbonation – en particulier du système énergétique. Les indications chiffrées, bien qu'illustratives d'une certaine diversité à l'intérieur de chaque famille, valent surtout pour la comparaison qu'elles permettent entre les familles : on voit ainsi apparaître, au fil des différences entre les trajectoires, les écarts entre les priorités qu'elles définissent en fonction d'une préférence implicite en termes de soutenabilité et d'une appréciation diverse du potentiel de chacune des actions.

Bilan des trajectoires en 2030	P1	P2	P3	P4
Émissions de CO ₂ (par rapport à 2010)	-58 %	-47 %	-41%	-4%
Émissions agricoles de CH ₄ (par rapport à 2010)	-24 %	-48 %	+1 %	+4 %
Émissions agricoles de N ₂ O (par rapport à 2010)	+5 %	-26 %	+15 %	+3 %
Émissions de GES (par rapport à 2010)	-50 %	-49 %	-35 %	-2 %
Demande en énergie finale (par rapport à 2010)	-15 %	-5 %	+17 %	+39 %
Part des renouvelables dans l'électricité	60 %	58 %	48 %	n.d.
Production d'énergie primaire (par rapport à 2010)				
Charbon	-78 %	-61 %	-75 %	-59 %
Pétrole	-37 %	-13 %	-3 %	+86 %
Gaz naturel	-25 %	-20 %	+33 %	+37 %
Nucléaire	+59 %	+83 %	+98 %	+106 %
Biomasse	-11 %	0	+36 %	-1 %
Renouvelables hors biomasse	+430 %	+470 %	+315 %	+110 %
Bilan des trajectoires en 2050	P1	P2	P3	P4

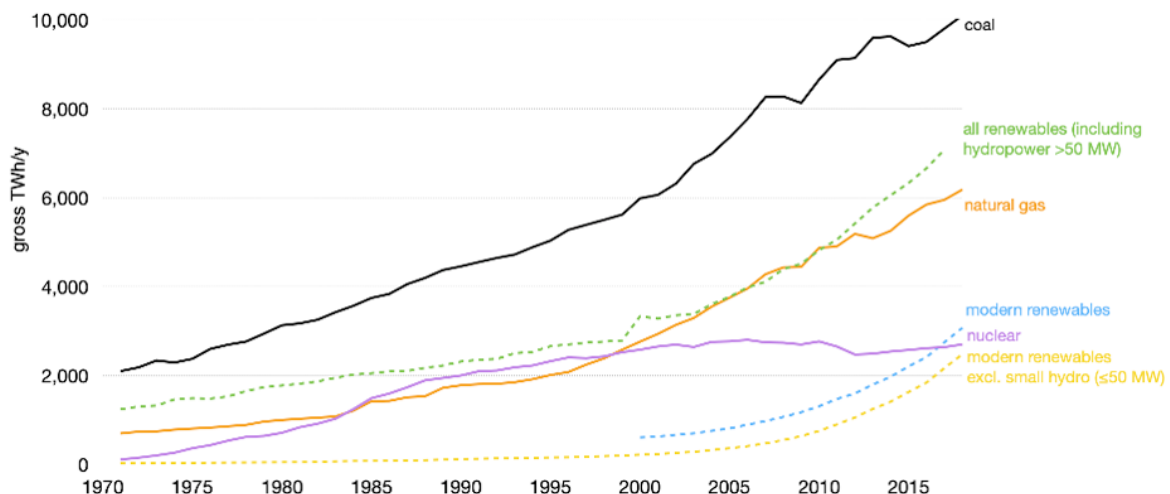
Émissions de CO ₂ (par rapport à 2010)	-93 %	-95 %	-91 %	-97 %
Émissions agricoles de CH ₄ (par rapport à 2010)	-33 %	-69 %	-23 %	+2 %
Émissions agricoles de N ₂ O (par rapport à 2010)	+6 %	-26 %	0	+39 %
Émissions de GES (par rapport à 2010)	-82 %	-89 %	-78 %	-80 %
Demande en énergie finale (par rapport à 2010)	-32 %	+2 %	-21 %	-44 %
Part des renouvelables dans l'électricité	77 %	81 %	63 %	70 %
Production d'énergie primaire (par rapport à 2010)				
Charbon	-97 %	-77 %	-73 %	-97 %
Pétrole	-87 %	-50 %	-81 %	-32 %
Gaz naturel	-74 %	-53 %	+21 %	-48 %
Nucléaire	+150 %	+98 %	+501 %	+468 %
Biomasse	-16 %	+49 %	+121 %	+418 %
Renouvelables hors biomasse	+833 %	+1327 %	+878 %	+1137 %
Superficie des cultures bioénergétiques (Mkm ²)	0,2	0,9	2,8	7,2
Bilan des trajectoires en 2100	P1	P2	P3	P4
CSC cumulé jusqu'en 2100 (GtCO ₂)	0	348	687	1218
dont BECSC cumulé (GtCO ₂)	0	151	414	1191

Tableau 3 – Indicateurs mondiaux caractérisant quatre trajectoires type de réduction des émissions nettes de GES conformément à un objectif de limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C

Source : GIEC (2018)

ANNEXE 4 – Le nucléaire dans les trajectoires 1,5 °C du GIEC

Le nucléaire, qui a fourni 10,4 % de la production d'électricité mondiale en 2019, a vu cette part décliner de façon quasi-continue depuis le maximum de 17,5 % atteint en 1996. Si sa production a continué à croître jusqu'en 2006 pour atteindre un maximum de 2 660 TWh, elle a essentiellement stagné depuis (avec un recul temporaire significatif dans la suite de la catastrophe de Fukushima, survenue en mars 2011). Le nombre de réacteurs actuellement en construction - une cinquantaine - reste faible en regard des perspectives de fermetures, l'âge moyen des 409 réacteurs en fonctionnement et des 31 réacteurs en arrêt de long terme atteignant 30,7 ans, dessinant une perspective de déclin³⁰. La compétitivité croissante des énergies renouvelables, et la dynamique dont elles bénéficient, viennent renforcer ce tableau. La production de l'ensemble des « nouvelles énergies renouvelables », c'est-à-dire hors électricité hydraulique, fort d'une croissance rapide, a en effet dépassé pour la première fois en 2018-2019 la production nucléaire.



A B Lovins et al., "Relative deployment rates of renewable and nuclear power: a cautionary tale of two metrics," *Environ. Res. & Soc. Sci.* **38**:188-192 (2018), doi:10.1016/j.erss.2018.01.005. BP 2019 data. Preliminary 2018 coal & gas data from IEA, "Global Energy & CO₂ Status Report 2018," Mar 2019, <https://webstore.iea.org/global-energy-co2-status-report-2018>. Small hydro in 2018 est d from 2017 data.

Figure 10 – Production mondiale d'électricité par source, 1971-2018
Source : Rocky Mountain Institute (2019)

Dans ce contexte, l'argument d'une éventuelle nécessité de cette technologie dans la lutte contre le changement climatique devient un point clé pour orienter les décisions relatives à la poursuite ou non de cette option. En d'autres termes, dans un nombre croissant de situations, de nouveaux projets nucléaires ne peuvent se développer que grâce à des mécanismes substantiels de soutien financier (tarifs aménagés, subventions, garanties...) dont une des principales justifications proposées est la lutte contre le changement climatique.

Derrière l'affirmation que la production électronucléaire est une technologie peu émettrice de gaz à effet de serre, qui ne fait pas question³¹, il est nécessaire d'objectiver cette discussion en la replaçant dans une perspective plus large d'analyse comparée des différentes options de lutte

³⁰ Voir le World Nuclear Industry Status Report, www.worldnuclear.org

³¹ Même si la discussion se poursuit concernant l'évaluation complète, en analyse de cycle, des émissions indirectes associées à cette filière.

contre le dérèglement climatique. Cette question doit être posée dans des termes systémiques. Il s'agit à la fois d'évaluer la capacité intrinsèque de chaque option à contribuer aux objectifs d'atteinte de la neutralité carbone (et plus loin, de maintien sous 1,5 °C du réchauffement moyen à l'horizon 2100), et les implications du recours plus ou moins poussé aux différentes options.

L'atteinte de la « neutralité climatique », c'est-à-dire la mise en œuvre d'une trajectoire susceptible de limiter le réchauffement moyen à moins de 1,5 °C à l'horizon du siècle, suppose notamment de décarboner autant que possible le secteur de l'énergie à l'horizon 2050. Parmi les principaux leviers qui existent pour cela figure la substitution des énergies fossiles par de l'électricité décarbonée, souvent complétée par un transfert d'usage (électrification). Le nucléaire est sur ce plan, pour l'essentiel, en concurrence avec les énergies renouvelables.

Comparaison nucléaire / renouvelables

Contrairement à une assertion souvent entendue, le GIEC n'affirme à aucun moment que le développement du nucléaire est indispensable à l'atteinte de la neutralité carbone. Certes, de 2010 à 2050, la production nucléaire augmente d'un facteur 2 à 6 dans les quatre trajectoires types qu'il présente. Mais le GIEC souligne que si une majorité des scénarios étudiés intègrent un recours accru au nucléaire, d'autres proposent une trajectoire 1,5 °C sans mobiliser ce levier, et intègrent parfois un déclin significatif du nucléaire. La construction de nouveaux réacteurs n'apparaît pas comme une condition strictement nécessaire à l'atteinte de cet objectif.

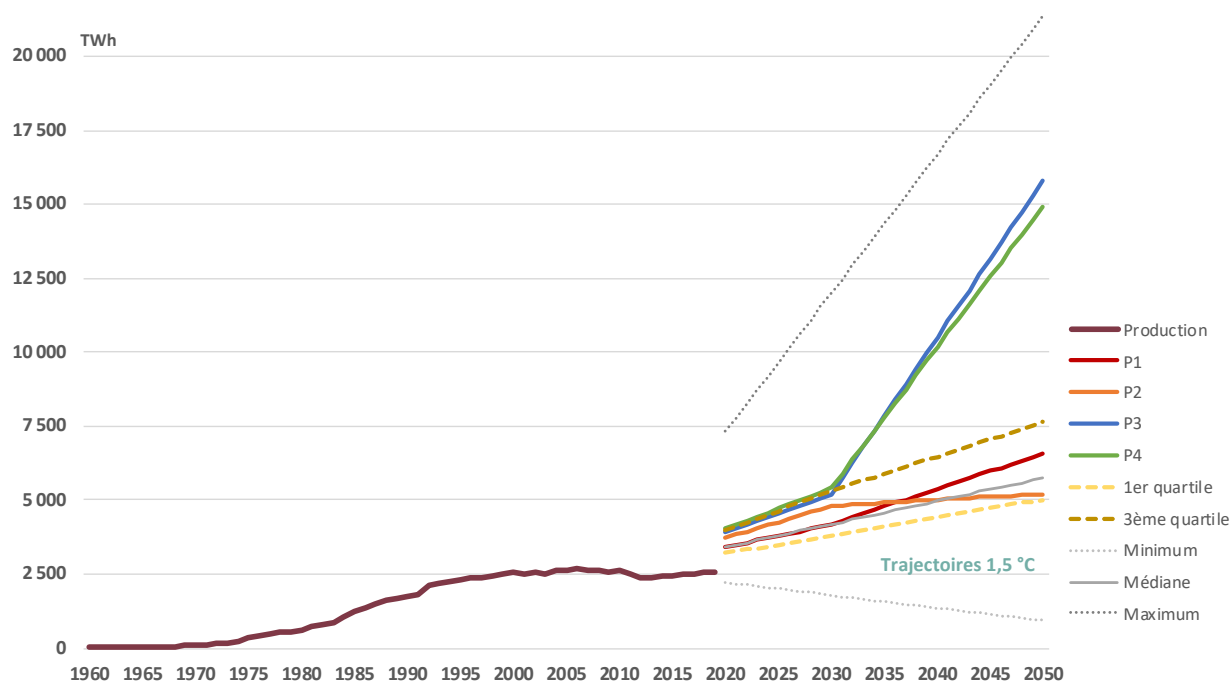


Figure 11 – Évolution de la production d'électricité d'origine nucléaire de 1960 à 2019 et dans les quatre trajectoires type P1 à P4, aux bornes de l'interquartile³² et dans les trajectoires minimum, médiane et maximum parmi les trajectoires 1,5 °C
Source : Association négaWatt (2020), d'après GIEC (2018)

³² L'interquartile désigne l'écart entre les deux quartiles intermédiaires, ses bornes correspondent donc respectivement à la limite supérieure du 1er quartile (ou limite inférieure du 2ème quartile) et la limite supérieure du 3ème quartile (ou limite inférieure du 4ème).

Dépassement nul ou faible (50 trajectoires sur 85)		Production électrique (TWh)			Part dans la production (%)			Évolution 2020-50
		2020	2030	2050	2020	2030	2050	
Renouvelables	Min.	5 139	9 003	25 183	19,0 %	37,3 %	58,9 %	+265 %
	Méd.	7 300	17 583	40 417	26,3 %	53,7 %	77,1 %	+448 %
	Max.	11 611	31 028	90 072	41,8 %	79,7 %	96,7 %	+1 088 %
Nucléaire	Min.	2 367	1 889	858	8,6 %	5,2 %	1,0 %	-64 %
	Méd.	3 011	4 294	6 103	12,1 %	14,3 %	8,1 %	+71 %
	Max.	5 153	10 222	17 978	18,3 %	31,6 %	27,5 %	+497 %
Fossiles	Min.	10 967	625	0	47,3 %	2,0 %	0,0 %	-100 %
	Méd.	16 508	10 142	4 114	61,3 %	30,0 %	8,6 %	-74 %
	Max.	19 097	18 353	16 044	67,4 %	52,9 %	25,2 %	-56 %
Total	Min.	23 203	22 578	35 267	n.a.	n.a.	n.a.	+28 %
	Méd.	27 347	32 172	59 883				+115 %
	Max.	31 661	42 333	98 467				+255 %
Dépassement marqué (35 trajectoires sur 85)		Production électrique (TWh)			Part dans la production (%)			Évolution 2020-50
		2020	2030	2050	2020	2030	2050	
Renouvelables	Min.	5 072	8 350	23 525	17,4 %	25,1 %	35,6 %	+237 %
	Méd.	7 328	14 811	48 108	28,4 %	42,7 %	82,4 %	+597 %
	Max.	8 842	24 125	76 089	33,0 %	65,7 %	94,7 %	+868 %
Nucléaire	Min.	2 367	1 889	858	8,6 %	5,1 %	1,1 %	-64 %
	Méd.	3 011	4 478	6 364	10,9 %	14,7 %	11,2 %	+149 %
	Max.	3 911	11 592	32 167	13,7 %	23,5 %	39,6 %	+722 %
Fossiles	Min.	13 636	8 608	217	54,0 %	24,3 %	0,3 %	-99 %
	Méd.	17 358	13 356	3 289	61,6 %	42,0 %	6,3 %	-80 %
	Max.	21 322	24 317	32 811	71,0 %	59,5 %	33,2 %	+54 %
Total	Min.	24 597	24 889	39 069	n.a.	n.a.	n.a.	+39 %
	Méd.	28 178	34 794	69 861				+138 %
	Max.	31 656	49 308	100 861				+219 %
Avec ou sans dépassement (85 trajectoires)		Production électrique (TWh)			Part dans la production (%)			Évolution 2020-50
		2020	2030	2050	2020	2030	2050	
Renouvelables	Min.	5 072	8 350	23 525	17,4 %	25,1 %	35,6 %	+237 %
	Méd.	7 328	16 528	42 700	28,0 %	51,5 %	77,5 %	+508 %
	Max.	11 611	31 028	90 072	41,8 %	79,7 %	96,7 %	+1 088 %
Nucléaire	Min.	2 367	1 889	858	8,6 %	5,1 %	1,0 %	-64 %
	Méd.	3 011	4 303	6 289	10,9 %	14,3 %	8,9 %	+121 %
	Max.	5 153	11 592	32 167	18,3 %	31,6 %	39,6 %	+722 %
Fossiles	Min.	10 967	625	0	47,3 %	2,0 %	0,0 %	-100 %
	Méd.	17 042	10 669	3 917	61,6 %	34,0 %	8,1 %	-76 %
	Max.	21 322	24 317	32 811	71,0 %	59,5 %	33,2 %	+54 %
Total	Min.	23 203	22 578	35 267	n.a.	n.a.	n.a.	+28 %
	Méd.	27 803	33 336	62 439				+131 %
	Max.	31 661	49 308	100 861				+255 %

Tableau 4 – Production d'électricité d'origine renouvelable, nucléaire et fossile dans les trajectoires 1,5 °C sans dépassement ou avec faible dépassement (50 trajectoires) et dans les trajectoires 1,5 °C avec dépassement marqué (35 trajectoires)³³

Source : GIEC (2018)

³³ Seules 85 trajectoires parmi les 89 déclarées comme recensées sont comptabilisées par le GIEC dans ce tableau de synthèse.

La valeur médiane d'évolution du nucléaire dans les 89 trajectoires retenues est une augmentation de 121 % entre 2020 et 2050. En valeur médiane également, la part du nucléaire dans la production d'électricité en 2050 est de 9 % : dit autrement, la place du nucléaire dans l'électricité tend en fait à diminuer dans la moitié des scénarios et visions compatibles avec l'objectif de 1,5 °C analysés par le GIEC.

Si la majorité des trajectoires repérées est assez resserrée autour de cette valeur médiane, les valeurs plus éloignées témoignent de visions beaucoup plus contrastées³⁴. Le quatrième quartile comprend des trajectoires de croissance très marquée du nucléaire, allant jusqu'à un maximum de +722 % en 2050 par rapport à 2020. À l'inverse, le premier quartile regroupe des trajectoires de faible progression voire de baisse de la production nucléaire, allant jusqu'à -64 %. Cette valeur minimale correspond à une projection sans nouveau nucléaire, où seuls les réacteurs actuellement en service (dont la majorité ferme dans les trente années qui nous séparent de 2050) ou les réacteurs déjà en construction en 2020 sont pris en compte³⁵.

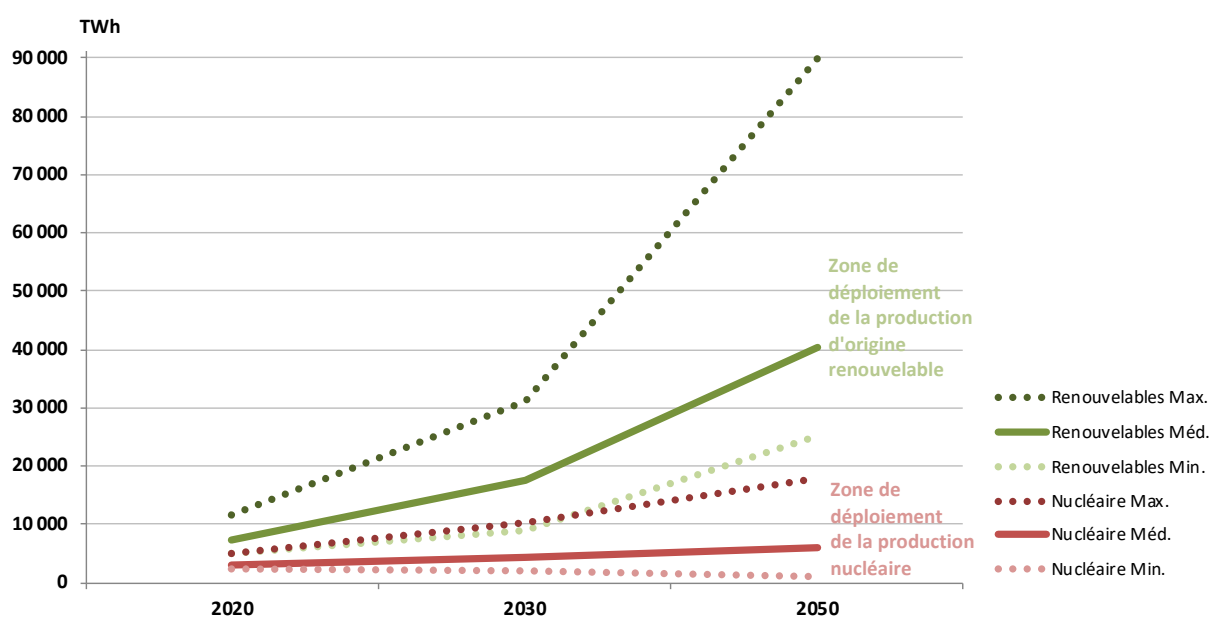


Figure 12 – Trajectoire minimum, médiane et maximum de production d'électricité d'origine renouvelable et de production d'électricité nucléaire en 2030 et en 2050 dans l'ensemble des trajectoires 1,5°C sans dépassement ou avec dépassement minimale (50 trajectoires)
Source : Association négaWatt (2020), d'après GIEC (2018)

À l'inverse, il faut souligner que le rapport spécial du GIEC retient dans les quatre trajectoires type un fort développement des énergies renouvelables électriques, fournissant à l'horizon 2050 entre 63 et 81 % de la production électrique. La valeur médiane de croissance de la production d'électricité par les renouvelables entre 2020 et 2050 dans les 89 trajectoires référencées est de +508 %, avec un maximum de +1 088 % et un minimum de +237 %. Parmi l'ensemble des 50 trajectoires atteignant l'objectif 1,5 °C sans dépassement marqué au cours du siècle, comme l'illustre la figure 12, toutes projettent une production d'électricité d'origine renouvelable supérieure à la production nucléaire à l'horizon 2050.

³⁴ L'amplitude de l'interquartile autour de la valeur médiane en 2050 reste faible, entre -13 % et + 33 %, par rapport à l'amplitude entre minimum et maximum (respectivement -84 % et + 272 % par rapport à la médiane).

³⁵ On peut noter au passage qu'une trajectoire de ce type, sans nouveau nucléaire, figure parmi les 35 scénarios ou visions avec dépassement marqué, une famille de scénarios pourtant représentée par la seule trajectoire type P4, qui intègre un très fort développement du nucléaire.

Au total, l'ensemble de la production d'origine renouvelable fournit entre 35,6 % et 96,7 % de l'électricité dans les 85 trajectoires pour lesquelles le GIEC recense une quantification de l'évolution du secteur électrique, avec une valeur médiane à 77,5 %. Le nucléaire fournit par comparaison 1 % à 39,6 % de l'électricité mondiale, avec une valeur médiane à 8,9 %. Il existe donc en réalité, dans la vision globale que dessinent dans l'état actuel des études prospectives les scénarios 1,5°C reconnus, un fort contraste : d'un côté, le caractère respectivement incontournable du développement massif des énergies renouvelables électriques et de l'autre, le caractère optionnel du soutien au nucléaire.

Cette vision est cohérente avec les vitesses de déploiement respectives de ces filières et de leur production, telle qu'elle a pu être observée au cours du temps. L'ensemble des énergies renouvelables, hydroélectricité comprise, fournit d'ores et déjà plus de deux fois plus d'électricité que le nucléaire. Les renouvelables hors hydroélectricité atteignent aujourd'hui à elles seules un niveau de production comparable à celui du nucléaire, mais le point remarquable est que leur développement est beaucoup plus récent (environ 20 ans contre plus de 50 pour le nucléaire) : elles ont connu une accélération continue au cours des deux dernières décennies, avec un rythme d'augmentation annuelle de leur production plus élevé que le nucléaire lors de ses décennies d'expansion.

Ce différentiel de capacité de développement, lié à la compétitivité respective de ces options, est aujourd'hui reconnu, et clairement mis en avant dans la dernière édition du World Energy Outlook (WEO) de l'Agence internationale de l'énergie³⁶. Le scénario basé sur les déclarations politiques des États (*Stated Policies Scenario*) prévoit une augmentation de +757 TWh du nucléaire entre 2018 et 2040, contre +9 354 TWh de renouvelables hors hydro (+8 073 TWh d'éolien et PV, +1 281 TWh d'autres renouvelables). Dans le scénario de relèvement de l'ambition jugé possible par l'AIE (*Sustainable Development Scenario*), l'Agence prévoit +1 691 TWh de nucléaire et +16 534 TWh de renouvelables hors hydro (+13 645 TWh d'éolien et PV, +2 889 TWh d'autres renouvelables).

Cohérence des stratégies

Mais les trajectoires dessinées par le GIEC, qui ne sont pas elles-mêmes des scénarios mais témoignent de la façon dont les études prospectives tendent à assembler les différentes options, nous renseignent également sur les visions plus larges au sein desquelles se joue l'arbitrage entre nucléaire et renouvelables électriques. Ainsi, pour la partie énergétique, les quatre trajectoires portent sur des leviers d'action très différents. On peut en particulier les distinguer selon la manière dont elles actionnent quatre grands leviers pour réduire la consommation d'énergies fossiles et les gaz à effet de serre associés : les économies d'énergie, la substitution de la combustion d'énergie fossile par de la combustion de biomasse, et le développement des renouvelables électriques d'une part, et du nucléaire d'autre part (pour se substituer à la production d'électricité d'origine fossile et au-delà par l'électrification des usages).

Ainsi, dans les logiques sous-jacentes aux nombreux scénarios étudiés par le GIEC dont ces quatre trajectoires proposent une synthèse, on peut remarquer d'abord que la mobilisation du nucléaire ne joue pas de rôle véritablement significatif et ne constitue qu'un appoint dans les trajectoires P1 et P2. Elle apparaît au contraire d'autant plus forte que l'action sur la demande est faible et le développement des renouvelables électriques modéré comme dans P3 et P4. En d'autres termes, les visions dans lesquelles le développement du nucléaire est important pour la lutte contre le changement climatique vont de pair avec une défiance vis-à-vis de la faisabilité de ces options voire une forme d'opposition à leur mise en œuvre.

On peut également remarquer que les trajectoires, donc les visions dans lesquelles on s'appuie le plus sur le nucléaire, sont celles où l'action de réduction de la consommation d'énergies fossiles

³⁶ Agence internationale de l'énergie, *World Energy Outlook 2019*, novembre 2019.

reste moindre (même si un transfert s'opère du charbon et du pétrole vers le gaz). Elles vont en fait de pair avec un recours massif à des solutions de forçage technologique de la capture de carbone par les sols (captation d'émissions et stockage dans des structures géologiques), notamment par le déploiement à grande échelle des technologies dites BECCS (bioénergie avec captage et stockage du carbone). Celles-ci doivent intervenir dans la seconde moitié du siècle pour compenser une action trop lente et un cumul d'émissions trop élevé dans la trajectoire P3, et doivent même être mobilisées massivement bien avant 2050 (et plus encore ensuite) dans les visions représentées par la trajectoire P4.

La moindre mise en œuvre des options de maîtrise de la consommation d'énergie et de développement des énergies renouvelables conduit donc à développer des visions où le recours à des technologies porteuses de risques voire non prouvées (captation à grande échelle et surtout stockage du carbone) est nécessaire. Ce sont également les trajectoires où la maîtrise des effets du dérèglement climatique pendant ce siècle est la moins assurée, du fait d'une chronique d'émissions globalement plus élevée sur la première moitié du siècle, et supposée être compensée par le déploiement de technologies d'émissions négatives ensuite. Outre le caractère irréversible d'une situation dans laquelle les émissions négatives ne s'avèreraient pas possibles à un tel niveau, ces trajectoires comportent un risque plus grand de dépassement transitoire entre maintenant et la fin du siècle du seuil de 1,5 °C de réchauffement moyen), voire un effet certain d'overshoot pour P4, avec tous les désordres que cela peut faire apparaître.

Faisabilité des trajectoires

L'analyse détaillée des trajectoires prévues pour le nucléaire dans les exercices examinés par le GIEC, telle qu'elle ressort des points de passage à 2020, 2030 et 2050 fournis par le rapport spécial, interroge pour finir sur le réalisme et la faisabilité de certaines projections. La figure suivante illustre l'évolution des besoins de nouvelle capacité nucléaire nécessaires pour fournir la production électrique selon la progression prévue dans les quatre trajectoires type présentées par le GIEC.

Ces projections tiennent compte de la capacité installée du parc nucléaire en fonctionnement, avec une hypothèse de durée de vie moyenne de 50 ans pour les réacteurs existants, et des réacteurs actuellement en construction, avec des hypothèses de date de mise en service conformes aux projections officielles des porteurs de projet. Ces projections font apparaître des besoins de mise en service de nouveaux moyens de production dès 2020, ce qui est évidemment impossible. Cet écart, d'autant plus marqué dans les trajectoires P3 et P4 où le recours au nucléaire est plus important, est dû au fait que les courbes de croissance de la production nucléaire envisagées dans ces trajectoires sont construites à partir de 2010, et basées sur des taux de croissance qui ne se sont pas réalisés entre 2010 et 2020.

Les réacteurs manquants ne pourront en réalité pas être mis en service avant une dizaine d'années. Le GIEC, dans son rapport, observe en effet que l'hypothèse à retenir actuellement pour le délai entre la décision d'engager la construction d'un réacteur nucléaire et sa mise en service est comprise entre 10 et 19 ans. Ainsi, aucun nouveau réacteur en supplément de ceux actuellement recensés en construction ne saurait entrer en fonctionnement avant 2030 environ, renforçant considérablement l'écart accumulé entre ces trajectoires théoriques et la réalité du système électrique.

Le nombre de réacteurs à mettre en service d'ici 2030 pour respecter le point de passage des quatre trajectoires atteint pourtant, en conservant les hypothèses précédentes sur la durée de vie moyenne du parc existant et les échéances de fin pour le parc en construction, un niveau considérable : il faudrait avoir respectivement réussi à mettre en service à cette date l'équivalent en puissance de 289 réacteurs de 900 MWe (correspondant à la puissance moyenne du parc actuel) dans la trajectoire P1, 395 dans P2, 462 dans P3 et 498 dans P4...

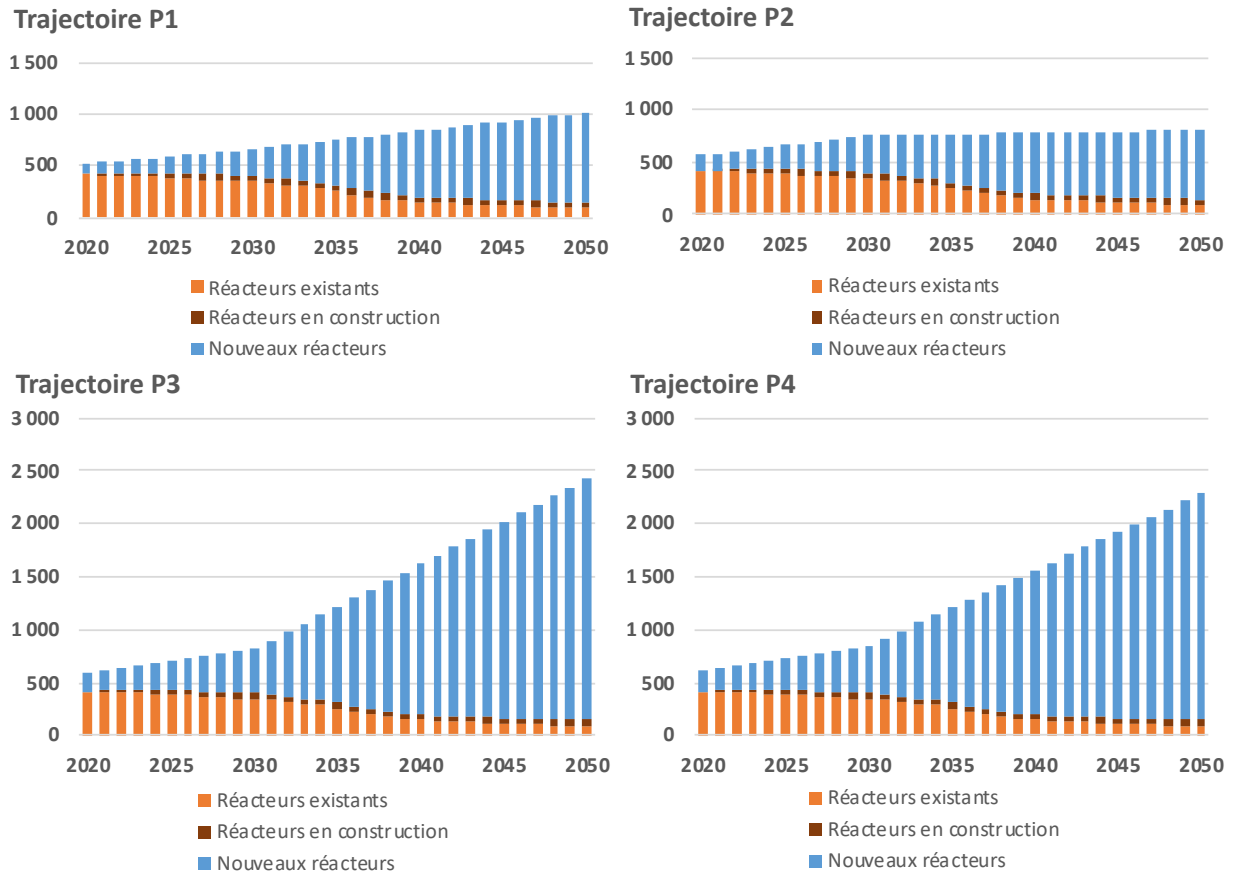


Figure 13 – Évolution de la puissance nucléaire installée nécessaire dans les quatre trajectoires type 1,5 °C, répartie entre réacteurs existants en 2020, mise en service de réacteurs mis en construction avant mi-2020 et nouveaux réacteurs à mettre en chantier (GWe)
 Source : Association négaWatt (2020), d'après AIEA (2020), GIEC (2018)

Au-delà de cette échéance, le rythme de construction doit évidemment rester élevé, surtout dans les trajectoires s'appuyant le plus sur le nouveau nucléaire. Ainsi, toujours avec les mêmes hypothèses et pour des réacteurs qui resteraient d'une puissance moyenne de 900 MWe, le rythme moyen de nouvelles mises en service entre 2030 et 2050 doit se situer autour de 23 réacteurs par an dans P1 (pour un total de 678) et 11 réacteurs par an dans P2 (pour un total de 340). Cela représente respectivement, en ordre de grandeur, le double et l'équivalent de la moyenne atteinte dans la longue durée pour la construction du parc actuel³⁷. Il n'en va pas de même pour les trajectoires P3 et P4, qui supposent de maintenir sur trente ans un rythme annuel deux fois plus élevé que le pic atteint au plus fort de la construction du parc actuel (un peu plus de trente par an en 1984-85) : il faudrait ainsi mettre en service environ 69 réacteurs par an dans P3 (pour un total de 2 065) et 63 dans P4 (pour un total de 1 883).

Cette difficulté n'est peut-être pas propre au nucléaire : l'ensemble des hypothèses et projections relatives aux différentes options dans les trajectoires type comme dans l'ensemble des scénarios analysés mériterait sans doute d'être passé au même crible (puisque cela interroge globalement la robustesse des exercices prospectifs ou de leur examen scientifique). S'agissant du nucléaire, elle renforce en tous cas d'autant plus l'écart constaté entre l'argument de l'urgence climatique pour une priorité d'action en faveur du nucléaire, et la capacité réaliste du nucléaire à répondre à cette urgence.

³⁷ Au total, 630 réacteurs ont été mis en service en 65 années depuis le premier en 1954 (409 en fonctionnement, 31 en arrêt long terme, et 190 définitivement arrêtés), soit une moyenne proche de 10 par an.