



Synthèse sur controverse technique

Version 1 finale du 08 octobre 2024

Intensité carbone de l'énergie électrique produite par l'EPR2 et plus généralement par l'énergie nucléaire

INTENSITÉ CARBONE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE PRODUITE PAR L'EPR2 ET PLUS GÉNÉRALEMENT PAR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Introduction

La France s'est engagée dans la lutte contre le changement climatique. Pour ce faire, elle s'est dotée d'une feuille de route, intitulée Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), introduite par la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015. Cette feuille de route a deux ambitions : atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français [1]. La production d'énergie, et plus spécifiquement la production d'électricité, est un secteur potentiellement fortement émetteur de GES, en fonction de la composition du mix énergétique mis en œuvre, dont notamment le mix électrique.

La lutte contre le changement climatique, ainsi que l'importance de la définition du mix électrique dans le cadre de cet objectif, fait consensus parmi les contributeurs.

La décision de construction de la paire de réacteurs nucléaires EPR2 à Gravelines s'inscrit dans le cadre de la SNBC car ces réacteurs seront inclus dans le mix électrique français. À ce titre, ces nouveaux réacteurs devront viser à produire de l'électricité tout en minimisant les émissions de GES. En d'autres termes, la décision de construction des EPR2 devra prendre en considération l'intensité carbone de ce moyen de production d'électricité, et notamment en la comparant aux moyens alternatifs.

Il y a consensus sur le fait que la prise en compte de l'intensité carbone des EPR2, et plus généralement de l'énergie nucléaire, est un enjeu de la décision de construction.

Le calcul de l'intensité carbone

Les émissions de GES du secteur électrique sont généralement quantifiées en termes d'intensité carbone, grandeur dont l'unité de mesure est le $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$, c'est-à-dire la quantité de gaz à effet de serre émis en gramme de dioxyde de carbone équivalent par kilowattheure d'électricité produite. L'évaluation quantitative de l'intensité carbone dépend de la méthode employée, et notamment des variables suivantes : périmètre géographique considéré, date à laquelle l'étude a été réalisée, et exhaustivité de l'étude en termes de phases du cycle de vie. En ce qui concerne l'énergie nucléaire, les phases suivantes du cycle de vie peuvent être incluses dans le périmètre de l'évaluation : matières premières, construction, fabrication du combustible, démantèlement et gestion des déchets.

La nécessité de la mise en œuvre d'une méthode appropriée pour le calcul de l'intensité carbone fait consensus parmi les contributeurs, et

notamment en ce qui concerne la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des réacteurs.

Pour fixer les ordres de grandeur, l'intensité carbone de la production d'électricité à partir de charbon sur l'ensemble de son cycle de vie est évaluée par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans une fourchette comprise entre **740 et 910 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** , pour une valeur médiane à **820 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** (cf Table A.III.2 de [2]) ; à noter que la production d'électricité par le charbon est le moyen de production le plus carboné parmi l'ensemble des moyens évalués dans cette référence. Autre exemple : les valeurs du GIEC pour le gaz (fossile) en cycle combiné sont comprises dans la fourchette **410 et 650 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** , pour une valeur médiane à **490 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** .

Le fait que l'énergie nucléaire ait une intensité carbone inférieure aux moyens de production basés sur l'énergie fossile fait consensus parmi les contributeurs. En revanche, le débat porte sur la valeur à considérer pour l'intensité carbone de l'énergie nucléaire, et notamment celle des EPR2, sur l'ensemble de leur cycle de vie, et ce dans le contexte particulier du mix électrique français. Nous allons détailler dans la suite les différentes valeurs proposées par les contributeurs dans cet objectif.

Le choix de cette valeur quantitative est important, car il permet de comparer l'énergie nucléaire à des solutions alternatives, comme les énergies renouvelables, et ce, dans l'objectif de définir le mix électrique le plus pertinent au regard des enjeux.

Évaluation du maître d'ouvrage, et autres évaluations françaises

Dans le Dossier du maître d'ouvrage (DMO) rédigé par EDF et RTE, l'intensité carbone du parc nucléaire actuel en France est évaluée à **4 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** [3]. Cette valeur est issue d'une étude de EDF réalisée en 2022. Cette étude répond aux exigences des normes internationales ISO 14040, ISO 14044 et ISO/TS 14071 relative aux Analyses de cycle de vie (ACV). Ces normes comportent des exigences au sujet de la prise en compte exhaustive des phases du cycle de vie ainsi qu'au sujet de la compétence et de la complémentarité des différents spécialistes consultés ; certains contributeurs relèvent à ce titre la présence dans le panel consulté de l'économiste Alain Grandjean associé au cabinet Carbone4. Cette étude a fait l'objet d'un processus de revue critique classique dans une publication scientifique.

Les contributeurs relèvent également la synthèse de l'ADEME (Agence de la transition écologique). Cette synthèse cite en premier lieu la valeur de **6 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** considérée dans la « Base Carbone » (aujourd'hui renommée « Base Empreinte »), qui est la base publique officielle des valeurs d'intensité carbone [5]. Dans la même référence, l'ADEME cite également une étude du CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives) qui établit l'intensité carbone du parc nucléaire français à **5,3 $\text{g-CO}_{2\text{eq}}/\text{kWh}$** . L'origine de la différence

entre EDF et le CEA est expliquée par l'ADEME comme provenant notamment d'un écart de valeur d'intensité carbone de la phase « production » ; une mise à jour ultérieure du CEA, réalisée conjointement avec ORANO, a conduit à des résultats similaires à ceux d'EDF [5].

Évaluation du GIEC

Le GIEC a été créé en 1988 sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Son objectif de fournir des évaluations de l'état des connaissances sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade. Dans le cadre de sa mission, le GIEC propose notamment une synthèse des évaluations normalisées (selon l'ISO 14040 et l'ISO 14044) des émissions de gaz à effet de serre des différents moyens de production d'énergie, sur la base de publications provenant de différentes parties du monde et compilées à l'occasion du rapport AR5 de 2014. Concernant l'énergie nucléaire, sur l'ensemble du cycle de vie, le GIEC propose une fourchette comprise entre **3,7 et 110 g-CO_{2eq}/kWh**, avec une valeur médiane à **12 g-CO_{2eq}/kWh** [2].

Tout d'abord, il est constaté que la valeur de 4 g-CO_{2eq}/kWh des études françaises est incluse dans la fourchette proposée du GIEC. Elle est inférieure à la valeur médiane fournie par le GIEC, à savoir 12 g-CO_{2eq}/kWh, valeur également relevée par certains contributeurs de la cellule¹. D'autres contributeurs proposent plutôt de considérer la valeur de **66 g-CO_{2eq}/kWh**, proche de la moyenne de la fourchette proposée par le GIEC, et qui trouve son origine comme étant la valeur moyenne de la méta-analyse de B. Sovacool 2008 [9].

La représentativité des valeurs du GIEC est critiquée en ce qui concerne son applicabilité spécifiquement au cas français, et ainsi au cas des réacteurs EPR2. En effet, par exemple, au sujet des données issues des rapports du GIEC, l'ADEME précise ainsi : « *Attention : même si les valeurs ont été "harmonisées" (sur un même périmètre de cycle de vie), il existe une grande variabilité dans ces valeurs qui restent des moyennes internationales : elles sont données à titre indicatif et n'ont pas lieu de remplacer les valeurs proposées dans la Base Carbone®, spécifiques au cas français* » [5].

L'applicabilité de la fourchette proposée par le GIEC est contestée notamment vis-à-vis de la consommation d'énergie de la fabrication du combustible, et notamment celle de la phase d'enrichissement de l'uranium ; cette phase est aujourd'hui réalisée dans l'installation George Besse II de Tricastin, dont la technologie par ultracentrifugation a permis une baisse très significative de la consommation d'énergie par rapport à la technologie de diffusion gazeuse – d'un facteur 50 [7]. D'autres contributeurs relèvent également que les valeurs du rapport

du GIEC, publié en 2014, sont relativement anciennes ; leur applicabilité aux nouveaux réacteurs est contestée, au regard notamment de l'augmentation de leur complexité, induites par la complexité des réglementations, par exemple en matière de sécurité, et de nature à augmenter les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie.

Le GIEC propose un graphique comparant les différentes sources d'énergie, reproduit en Figure 1. Ce graphique permet d'illustrer quelle que soit la valeur considérée (médiane, moyenne, minimale ou maximale), l'énergie nucléaire se place dans le même domaine que d'autres sources considérées bas-carbone.

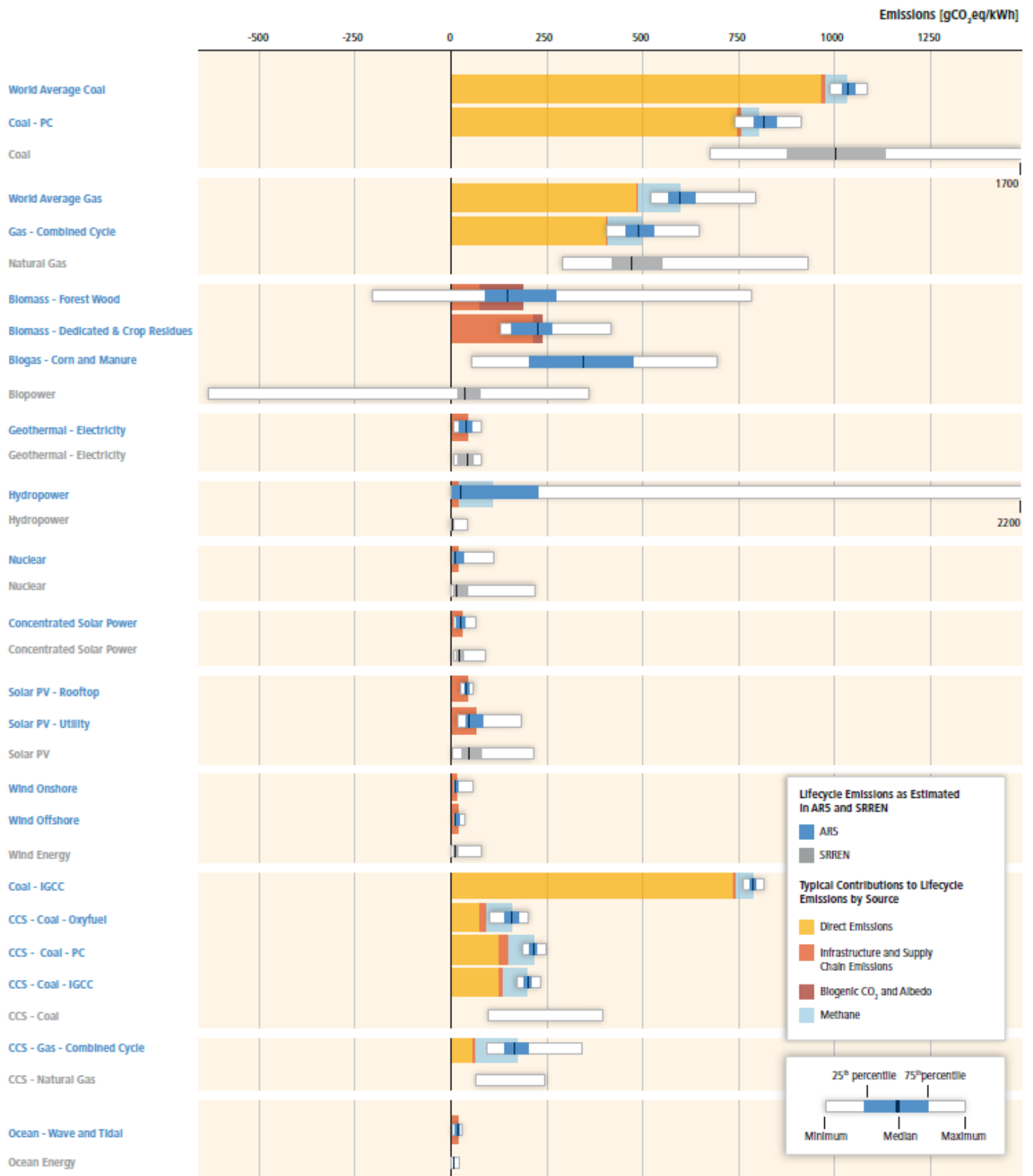
L'ensemble des contributeurs cite le GIEC en tant que référence concernant les émissions de GES de l'énergie nucléaire. Toutefois, le choix de la valeur du GIEC à considérer pour le mix électrique français, ne fait pas consensus – on relève une dispersion des valeurs à considérer de 4 à 66 g-CO_{2eq}/kWh. Le dissensus porte sur le choix de la valeur la plus représentative dans cette fourchette : valeur médiane ou valeur moyenne, et applicabilité de la fourchette proposée par le GIEC vis-à-vis du cas spécifiquement français : électricité déjà bas-carbone à prendre en compte dans le cycle de vie, date des évaluations, et conception spécifique de l'EPR2 notamment en matière de complexité, Par ailleurs, il est constaté, sur la base du rapport du GIEC, que quelle que soit la valeur considérée (médiane, moyenne, minimale ou maximale), l'énergie nucléaire se place dans le même domaine que d'autres sources considérées bas-carbone.

Autres évaluations internationales

En 2021, le JRC (Joint research center, Centre de recherche commun) de la Commission Européenne a mené une étude DNSH (Do not significant harm, Absence de préjudice important) de l'énergie nucléaire, incluant notamment les émissions de gaz à effet de serre de cette source d'énergie. Cette étude a conduit à analyser plusieurs études de type ACV, dont trois ont été sélectionnées sur la base du fait qu'elles étaient récentes et faisaient preuve d'exhaustivité (incluant toutes les phases et notamment la phase de gestion des déchets). L'étude a conduit aux trois valeurs suivantes : **5,3 g-CO_{2eq}/kWh** pour les Réacteurs à eau pressurisée (REP, en cycle mixte), **5 g-CO_{2eq}/kWh** pour les réacteurs EPR de troisième génération en cycle ouvert, et **4,6 g-CO_{2eq}/kWh** pour les EPR en cycle fermé [6].

médiane est moins sensible aux valeurs extrêmes de l'échantillon que la valeur moyenne.

¹ En statistiques, la valeur médiane d'un ensemble de valeurs est la valeur au-dessus de laquelle se trouvent la moitié des valeurs, et au-dessous de laquelle se trouvent l'autre moitié des valeurs. La valeur



Origine : GIEC 2014 [11].

Figure 1 : Comparaison de l'intensité carbone de différentes sources d'énergie selon le GIEC

En 2017, le World information service on energy (WISE) publie une étude sur les émissions du nucléaire. Cette étude tient compte de l'ensemble du cycle de vie de l'énergie nucléaire ; elle aboutit à la valeur de 117 g-CO_{2eq}/kWh [8]. Sont également citées l'étude de B. Sovacool de 2008 aboutissant à une valeur moyenne de 66 g-CO_{2eq}/kWh [9], et l'étude de M. Jacobson, directeur de l'Atmosphere and Energy Program de l'Université de Stanford, dont le résultat conduit à une fourchette de 78 à 178 g-CO_{2eq}/kWh, en fonction du mix électrique utilisé pour l'extraction de l'uranium et d'autres variables [10].

Synthèse

Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, la France s'est dotée d'une feuille de route, intitulée Stratégie nationale bas-carbone (SNBC). La décision de construction d'une paire d'EPR2 à Gravelines s'inscrit dans ce programme et doit être évaluée vis-à-vis de ses émissions de gaz à effet de serre (GES).

La nécessité de la lutte contre le changement climatique et l'évaluation dans ce cadre de l'intensité carbone du projet d'EPR2 à Gravelines (et plus généralement de l'énergie nucléaire) fait consensus au sein de la cellule.

En revanche, le débat réside dans la valeur à considérer en ce qui concerne l'intensité carbone de l'énergie nucléaire, et notamment dans le cadre du mix électrique français et plus spécifiquement celle des réacteurs EPR2. À ce titre, on relève trois grands ensembles de valeurs :

- *les valeurs basses* : de l'ordre de **4 à 6 g-CO_{2eq}/kWh**, issues d'EDF en 2022 [4], du CEA en 2009 [5] et considérées par l'ADEME dans la « Base Carbone / Base Empreinte » [5]. Ces études ont été réalisées en conformité avec les exigences de la méthode ACV (Analyse du cycle de vie) telle que définies par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044, et ce dans le cadre du parc français actuel et du mix électrique français. S'intègrent dans cette fourchette les valeurs issues de la méta-analyse du JRC de la Commission Européenne en 2021 [6]. Ces valeurs sont également à rapprocher de la valeur basse de la fourchette proposée par le GIEC en 2014 [2] ;
- *les valeurs moyennes* : entre **12 à 66 g-CO_{2eq}/kWh**. La première valeur est la valeur médiane de la fourchette proposée par le GIEC en 2014 [2] tandis que la deuxième valeur est égale à la valeur moyenne issue de l'étude de B. Sovacool en 2008 [9]. Cette dernière valeur est par ailleurs proche de la moyenne entre les valeurs extrêmes de la fourchette issue des travaux du GIEC. Ces valeurs sont issues de méta-analyses à l'échelle mondiale, établies sur la base de mix énergétiques qui ne sont pas toujours représentatifs des spécificités du mix électrique français (production bas-carbone, ultracentrifugation) ;
- *les valeurs hautes* : de l'ordre de **110-120 g-CO_{2eq}/kWh**, borne haute de la fourchette du GIEC [2] et valeur proposée par une étude du WISE de 2017 [8], voire jusqu'à **178 g-CO_{2eq}/kWh**,

valeur haute issue de l'étude de M. Jacobson de l'Université de Stanford en 2020 [10].

Même si l'on considère les valeurs les plus extrêmes, **il y a consensus au sein de la cellule sur le fait que l'énergie nucléaire produit une électricité nettement moins carbonée que le charbon ou le gaz** – dont l'intensité carbone est respectivement de 820 g-CO_{2eq}/kWh et 490 g-CO_{2eq}/kWh selon les valeurs médianes du GIEC. Ce constat est à rapprocher de la conclusion du GIEC dans le chapitre 7 de son rapport AR5 de 2014 : « *L'énergie nucléaire est une source mature d'énergie de base à faibles émissions de gaz à effet de serre.* » [11] p. 517.

La cellule constate toutefois un dissensus important au sujet de la valeur précise à considérer, lequel conduit à une dispersion très importante des résultats. En effet, la réduction des émissions de GES, par rapport, par exemple à une centrale au gaz (fossile) peut être estimée à :

- un facteur 7 à 40 en considérant les valeurs moyenne d'intensité carbone (issues d'une analyse du parc mondial de réacteurs et d'études internationales, ne prenant pas nécessairement en compte les spécificités du mix électrique français),
- un facteur 80 à 120 en considérant les valeurs basses d'intensité carbone (issues d'études françaises prenant en compte les spécificités du parc français).

Il est à noter que l'ensemble des contributeurs cite les valeurs proposées par le GIEC ; toutefois, les valeurs proposées par le GIEC s'étalent sur une fourchette assez large (3,7 et 110 g-CO_{2eq}/kWh, avec une valeur médiane à 12 g-CO_{2eq}/kWh). Cette dispersion des résultats du GIEC explique la diversité des conclusions de chaque contributeur, et ce à partir d'une référence identique. Les points de divergence concernent notamment le choix de la valeur à considérer : médiane ou moyenne (cette dernière étant plus sensible aux valeurs extrêmes), ou l'applicabilité de l'ensemble de la fourchette proposée (et donc la représentativité de la médiane ou de la moyenne) au cas spécifiquement français, dont l'électricité est déjà bas-carbone. Il est à noter que sur la base du rapport du GIEC (cf Figure 1), quelle que soit la valeur considérée (médiane, moyenne, minimale ou maximale), l'énergie nucléaire se trouve dans le même domaine que d'autres sources d'énergie considérées comme bas-carbone.

S'il y a consensus au sein de la cellule sur le fait que l'intensité carbone doit être déterminée sur la base de calculs récents prenant en compte l'ensemble du cycle de vie des réacteurs nucléaires, certains contributeurs insistent sur le fait que les évaluations de l'intensité carbone doivent être spécifiquement réalisées selon la méthode ACV (Analyse du cycle de vie) définie par les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044, et qu'elles doivent être adaptées aux spécificités du mix électrique local, c'est-à-dire, en l'occurrence, du mix électrique français. D'autres contributeurs indiquent que cette évaluation doit

prendre en compte la hausse de la complexité de conception des réacteurs récents.

La détermination d'une valeur d'intensité carbone précise et faisant consensus est importante pour l'évaluation de l'efficacité des actions prises au titre de la lutte contre le réchauffement climatique. Elle permet en particulier de réaliser des comparaisons entre plusieurs scénarios de mix électriques et énergétiques futurs, incluant des parts différentes de nucléaire et de moyens alternatifs, dont notamment les énergies renouvelables.

Références

- [1] *Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)*, Gouvernement français (publié le 19/12/2018, mis à jour le 21/07/2022, consulté le 30/09/2024) [\[lien\]](#)
- [2] *Annex III : Technology-specific Cost and Performance Parameters, in Fifth Assessment Report (AR5), Working Group 3 (WG3)*, GIEC (2014) [\[lien\]](#)
- [3] *Gravelines - Projet de construction d'une paire de réacteurs EPR2 – Dossier des Maîtres d'Ouvrage*, EDF et RTE (Août 2024) [\[lien\]](#)
- [4] *ACV du kwh nucléaire EDF – version 2022*, EDF (05 mai 2022) [\[lien\]](#)
- [5] *Base Carbone – Scope 2 : émissions indirectes – énergie – Électricité – Moyens de Production – Conventionnel*, ADEME (consulté le 30/09/2024) [\[lien\]](#)
- [6] *Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the 'Do No Significant Harm' Criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*, EUR 30777 EN; Publications Office of the European Union: Luxembourg, ISBN 978-92-76-40537-5 (2021) [\[lien\]](#)
- [7] *Confusion sur les chiffres d'émissions de CO2 du nucléaire*, SFEN (publié le 06/01/2020, mis à jour le 28/09/2021, consulté le 30/09/2024) [\[lien\]](#)
- [8] *Climate change and nuclear power – An analysis of nuclear greenhouse gas emissions*, WISE (2017) [\[lien\]](#)
- [9] Sovacool B., *Valuing the greenhouse gas emission from nuclear power A critical survey*, Energy Policy, vol. 36, no. 8, pp 2950-2963, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.017> (août 2008) [\[lien\]](#)
- [10] Jacobson M. Z., *Evaluation of Nuclear Power as a Proposed Solution to Global Warming, Air Pollution, and Energy Security, in 100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything*, Cambridge University Press, New York, (2020) [\[lien\]](#)
- [11] *Chapter 7 : Energy Systems*, GIEC, in Fifth Assessment Report (AR5), Working Group 3 (WG3), GIEC (2014) [\[lien\]](#)