

Scénario négaWatt 2022

Annexes du rapport



Sommaire des annexes

ANNEXE 1 - Méthodologie de négaWatt pour le calcul sectoriel de l’empreinte en gaz à effet de serre (GES) de la France.....	2
ANNEXE 2 - Principes de l’obligation conditionnelle de rénovation performante.....	5
ANNEXE 3 - Types de technologies de batteries au lithium.....	7
ANNEXE 4 - Agriculture : le difficile équilibre pour ne pas trop recourir aux produits de synthèse.....	8
ANNEXE 5 - Hypothèses de simulation de la production des installations solaires photovoltaïques.....	9
ANNEXE 6 - PCS / PCI.....	11

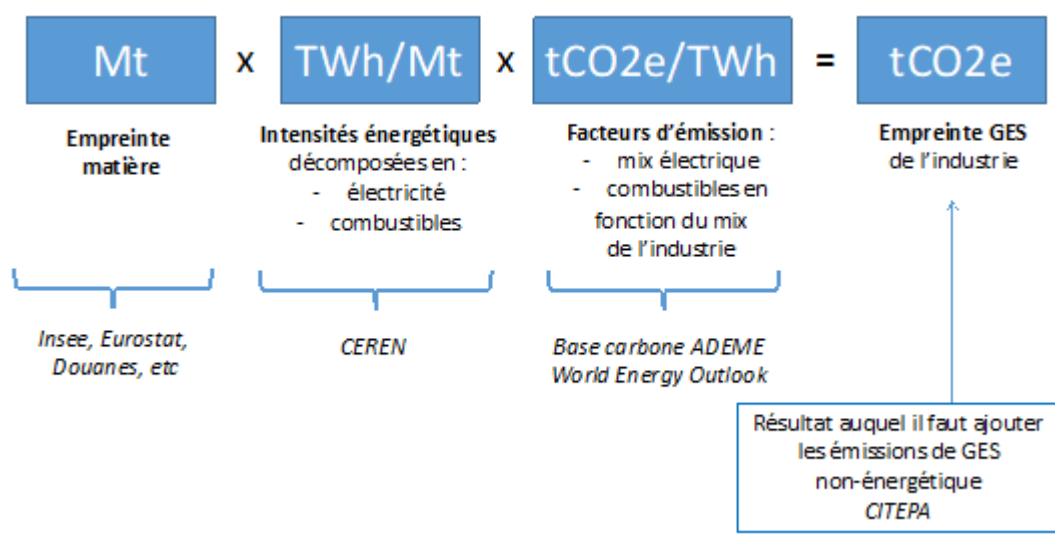
ANNEXE 1 - Méthodologie de négaWatt pour le calcul sectoriel de l’empreinte en gaz à effet de serre (GES) de la France

Industrie et matières premières minérales

L’industrie et les matières premières minérales est le secteur pour lequel les émissions associées au solde commercial sont les plus importantes. Cela s’explique principalement par le phénomène de mondialisation libérale initié dans les années 1990 qui a poussé une délocalisation d’un grand nombre des activités de production dans les pays où le mix électrique et les combustibles utilisés dans l’industrie (plus de charbon et de pétrole) sont bien plus carbonés qu’en France. Par ailleurs, la France a aussi délocalisé ses activités minières en raison d’une forte législation pour réguler les conditions environnementales et sociales de l’exploitation sur le territoire national couplée à des teneurs dans la roche souvent plus faibles et des coûts de production plus élevés qu’à l’étranger.

L’évaluation de l’empreinte climatique de la France passe par l’évaluation de l’empreinte matière des 34 branches industrielles considérées par la nomenclature NACE. Cette empreinte matière analyse les besoins en matières premières, matériaux de base et produits intermédiaires permettant de produire les biens finaux consommés en France. Pour chacune de ces 34 branches industrielles nous appliquons aux tonnages de produits, l’intensité énergétique en MWh/t nécessaire pour les produire et les facteurs d’émissions en tCO₂e/MWh de l’électricité ou des combustibles utilisés en remontant l’ensemble de la chaîne de valeur. A cette opération, nous ajoutons les émissions « non-énergétiques » associées aux procédés de fabrication des biens. Il s’agit par exemple des émissions de GES libérées chimiquement lors de la fabrication du ciment ou de l’ammoniac.

Le schéma ci-dessous regroupe la méthodologie et les sources utilisées pour cette évaluation :



Dans le but d’évaluer les émissions de GES des branches industrielles à l’étranger en 2014, nous avons considéré les données d’intensité énergétique et les facteurs d’émissions fournies par l’AIE à échelle mondiale. Ainsi, l’empreinte GES du secteur industriel et matières premières a été évaluée à hauteur de 190MtCO₂e en 2014 (contre 85MtCO₂e en inventaire national).

De plus, afin d’effectuer le travail prospectif à 2050 pour l’industrie et les matières premières, nous avons été obligés de nous intéresser aux mutations énergétiques à l’échelle mondiale. L’association négaWatt ne réalisant pas de scénario à cette échelle, nous avons donc considéré trois scénarios

différents fournissant des données d'évolution de mix énergétique au niveau mondial, européen et national pour la Chine :

- Le scénario SDS de l'AIE « Sustainable Development Scenario » qui aboutit à une forte réduction des émissions de GES d'ici 2040 sans aboutir à la neutralité climatique ;
- Le scénario SPS de l'AIE « Stated Policy Scenario » dont les émissions de GES à l'échelle mondiale se stabilisent au niveau actuel ;
- Le scénario négaWatt français dont les données de mix électrique et de mix de combustibles utilisés dans l'industrie ont été extrapolées à échelle mondiale.

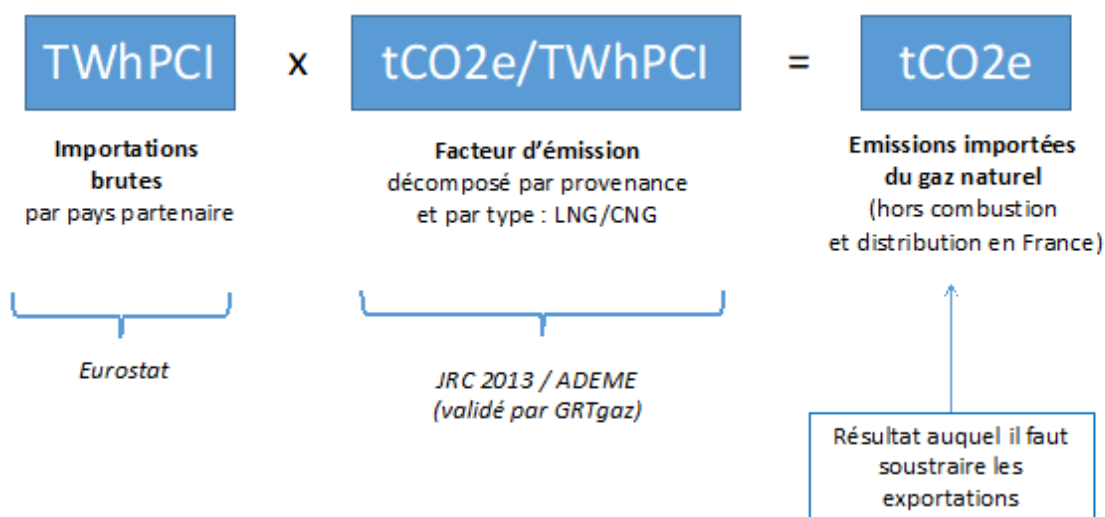
Le travail prospectif à 2050 intègre donc les hypothèses négaWatt de sobriété, d'efficacité énergétique, de recyclage et de stratégie industrielle couplées aux hypothèses de ces scénarios à échelle mondiale.

Énergies fossiles

La France est un grand consommateur et importateur d'énergies fossiles, principalement de pétrole et de gaz naturel. La plus grande partie des émissions des énergies fossiles sont associées à leur combustion sur le territoire. Néanmoins, les étapes à l'amont de leur combustion tels que l'extraction, le transport via gazoduc ou oléoduc ou le raffinage sont loin d'être négligeables et représentent une source importante d'émissions importées.

Le cas du gaz naturel est représentatif : la France en 2014 a importé 450 TWh de gaz naturel ; principalement du gaz naturel via gazoduc mais aussi, en moindre mesure, du gaz naturel liquéfié (GNL). A l'amont des émissions de la combustion dans le territoire (qui est déjà comptabilisé dans l'inventaire national), l'extraction du gaz naturel in situ, les fuites de méthane le long des gazoducs d'acheminement (dont le taux est variable de l'un à l'autre), et les processus énergivores de liquéfaction du GNL doivent être considérés dans l'évaluation de l'empreinte GES de France.

Le schéma ci-dessous regroupe la méthodologie et les sources utilisées pour cette évaluation :



C'est aussi le cas pour le pétrole dont la France a importé 650 TWh brut (et raffiné en France) et 300 TWh déjà raffiné en 2019. Il est donc nécessaire de comptabiliser aussi le processus d'extraction, le raffinage pour le tiers raffiné à l'étranger et les torchères toujours présentes dans certains pays exportateurs comme le Nigeria. Le charbon, très peu importé en France, présente aussi des émissions pour son extraction.

Le travail prospectif à 2050 intègre donc les hypothèses négaWatt de réduction majeure des besoins en énergies fossiles.

Agriculture

L'agriculture est un secteur très importateur mais aussi très exportateur de GES. L'usage des terres, l'élevage et l'usage de pesticides et d'engrais sont comptabilisés dans l'évaluation de l'empreinte GES. Le secteur agricole a importé en 2015 21 MtCO₂eq, cependant il a aussi exporté 29 MtCO₂eq [Source : scénario Aferres]. Les émissions de GES du solde commercial du secteur agricole est donc faiblement négatif hors transport international et indirect. Cette évaluation est basée sur les travaux de l'association Solagro et du scénario Aferres.

Sur ce secteur en particulier, l'Association négaWatt a été en mesure d'évaluer le « fret indirect de premier ordre » grâce aux travaux menés par Solagro et le CIRED dans le cadre des études CECAM [voir sur <https://solagro.org/travaux-et-productions/publications/lempreinte-energetiqueet-carbone-de-la-alimentation-en-francede-la-production-a-la-consommation>] et SISAE. Il s'agit du fret dans les pays d'exportation qui permettent d'acheminer les produits depuis la zone de production jusqu'aux zones d'exportation (voir schéma). Par ailleurs, les émissions du fret français sur le territoire destiné aux exportations agricoles françaises n'est pas comptabilisé dans l'évaluation de l'empreinte GES de ce secteur. Les émissions du transport indirect sont estimées à environ 10 MtCO₂eq en 2014 pour le secteur agricole. Cette évaluation a pu être réalisée uniquement pour ce secteur agricole faute de données sur les autres secteurs industriels.

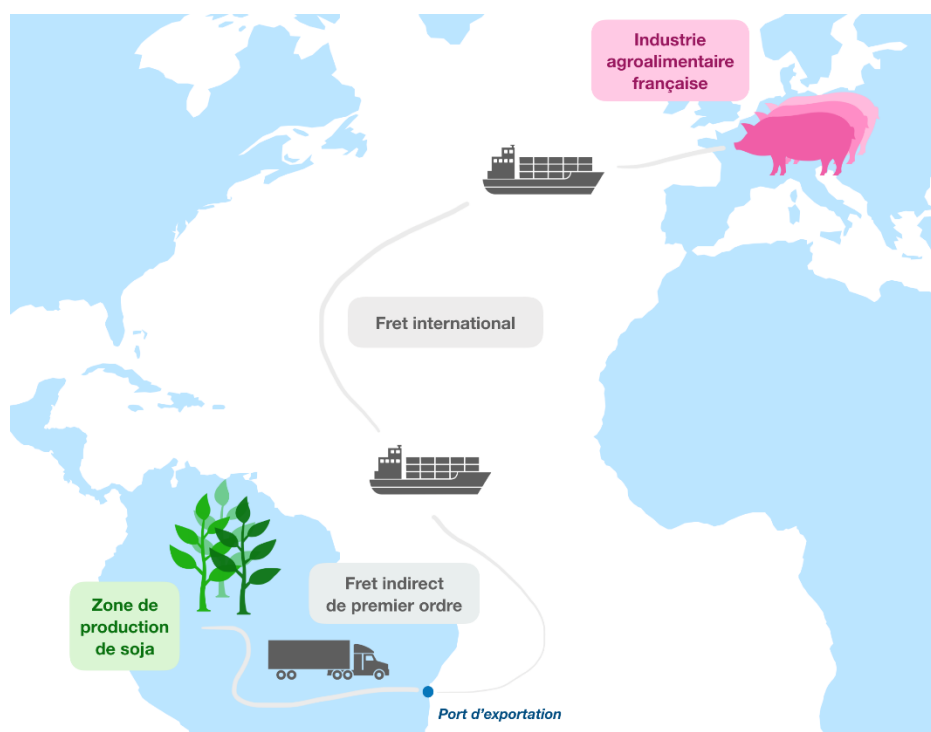


Figure 1 - Fret indirect de premier ordre du soja brésilien

► Dans l'exemple des importations françaises de soja brésilien, le calcul de l'empreinte carbone due au « fret indirect de premier ordre » permet de considérer les émissions liées au transport routier qui achemine le soja entre les zones de production et les ports d'exportations et le transport maritime entre les ports brésiliens et les ports français.

ANNEXE 2 - Principes de l'obligation conditionnelle de rénovation performante

Avec d'autres acteurs professionnels et associatifs, l'Association négaWatt propose un mécanisme d'obligation conditionnelle de rénovation performante (OCRP) pour les logements des ménages.

L'obligation de rénovation est avant tout un engagement de l'Etat à :

Planifier le rythme de rénovation, afin de donner la visibilité nécessaire aux acteurs économiques pour construire des offres adaptées et investir ce marché. L'obligation pourra porter dans un premier temps sur les mutations en maisons individuelles de classe F&G et les ravalements en copropriété (entre 2024 et 2028), puis être progressivement étendue aux autres catégories de logements et hors mutations par la suite [Pour plus d'information voir https://www.negawatt.org/IMG/pdf/210224_note_definition-renovation-globale.pdf].

Le logement social a également toute sa place dans ce programme, puisque les maîtres d'ouvrage disposent déjà de l'ensemble des compétences techniques pour porter des rénovations performantes en grand nombre. Un engagement des bailleurs sociaux sur un programme pluriannuel de rénovation en contrepartie de meilleures capacités d'investissement doit être engagé.

Conditionner l'obligation de rénovation : ne rendre obligatoire la rénovation que lorsque les conditions de sa réussite sont réunies afin qu'aucun ménage ne se retrouve sans moyen de concrétiser son projet de rénovation. Deux conditions s'imposent : l'existence d'une offre technique permettant la réalisation de la rénovation et d'une offre financière couvrant la totalité des travaux.

Développer les offres de rénovation performante : mettre en place des mécanismes d'encadrement et de soutien à la structuration d'offres techniques et commerciales pour la rénovation performante. Deux aspects sont nécessaires :

- la création d'un système de place de marché facilitant la mise en relation des opérateurs avec les ménages, encadré par un cahier des charge technique et commercial et un service de contrôle qualité des travaux ;
- l'engagement d'un grand plan de formation professionnelle et initiale sur la rénovation complète et performante abordant les enjeux techniques, organisationnels et commerciaux, privilégiant les formations sur chantiers et la coordination avec plusieurs corps de métiers. Il s'agit également de revaloriser et donner du sens aux métiers du bâtiment pour les jeunes.

Accompagner les ménages : rendre systématique l'accompagnement des ménages dans des projets de rénovations performantes par un assistant à maîtrise d'ouvrage pris en charge par l'Etat. S'inspirant du modèle allemand, celui-ci se chargerait de réaliser un premier diagnostic du bien puis d'accompagner le ménage dans la sélection d'offres techniques et financières. Encadré par un cahier des charges national, ce service doit toutefois pouvoir s'adapter aux différents contextes territoriaux en s'appuyant sur des dynamiques locales.

Financer le programme de rénovation : mettre en place des outils de financement adaptés aux rénovations performantes, simples et accessibles à tous.

Aujourd'hui, l'un des principaux freins à la massification des rénovations énergétiques performantes est lié à l'absence d'outil de financement dédié, puisque la majeure partie des aides incite encore les ménages à effectuer des gestes partiels. Pourtant, les rénovations complètes et performantes ont comme avantage de pouvoir se financer en transformant des factures de chauffage avant travaux en mensualités de prêt d'un montant équivalent ou inférieur sur une durée d'amortissement cohérente avec les travaux. Ce montage financier assure aux ménages un équilibre en trésorerie et, pour certains, une amélioration de leur pouvoir d'achat dès la première année des travaux.

Il est rendu possible par la mise en place d'un prêt à taux zéro couvrant l'intégralité des travaux, plafonné et remboursable sur une durée ajustable pouvant aller jusqu'à 30 ans, couplé à une part modulable de subventions selon les revenus des ménages. En copropriété, l'abondement d'un fond travaux lors des mutations permet également de protéger les acheteurs face aux travaux nécessaires et inévitables à terme.

Lutter contre la grande précarité énergétique : proposer un service d'accompagnement et de financement adapté et intégré aux dispositifs communs : la grande précarité énergétique nécessite une approche adaptée pour former des ensembles techniques et sociaux en mesure de construire des projets de rénovation et travailler avec des acteurs de proximité avec un outil de financement sans reste à charge. Ces services dédiés peuvent être intégrés dans les dispositifs d'accompagnement et de financement ouverts à tous, pour les rendre plus lisibles, simples d'accès, et éviter toute stigmatisation.

ANNEXE 3 - Types de technologies de batteries au lithium

Dans le scénario négaWatt, trois technologies de batteries au lithium sont envisagées pour répondre aux besoins de la mobilité électrique :

1. Les batteries NMC : ces batteries - dont la cathode est composée de lithium, nickel, manganèse et cobalt - sont très adaptées à la mobilité électrique de par leur forte densité énergétique et leur puissance spécifique permettant au véhicule électrique d'avoir une grande autonomie. Par exemple, la voiture électrique la plus vendue en France, équipée d'une batterie NMC, a une autonomie de 395km pour une capacité de batterie de 52kWh (Fiche technique Renault¹). Le progrès technologique est important sur les batteries li-ion et notamment sur les batteries NMC. Ainsi la densité énergétique des batteries NMC a fortement augmenté et l'augmentation du taux de nickel a permis une forte réduction des taux de cobalt et de manganèse au sein de la cathode. En reprenant l'exemple précédent, la densité énergétique est passée de 80Wh/kg en 2012 pour le premier modèle de voiture à 160Wh/kg pour le dernier modèle sorti en 2019. Par ailleurs, la part de cobalt dans la cathode de la nouvelle génération de batterie (NMC811) présente sur le marché est trois fois inférieure à la première génération (NMC333). Les batteries NMC jouent un rôle très important dans l'exercice de modélisation mené par négaWatt et des hypothèses d'augmentation de leur densité énergétique et de réduction du taux de cobalt sont largement envisagées.
2. Les batteries NCA - dont la cathode est composée de lithium, nickel, cobalt et aluminium - sont aussi très adaptées à la mobilité électrique et sont aussi utilisées pour des véhicules produits aux États-Unis. Leur utilisation dans la mobilité électrique française reste limitée dans cette modélisation.
3. Les batteries LFP - dont la cathode est composée de lithium, fer et phosphate - présentent aujourd'hui des caractéristiques moins performantes que les deux modèles de batterie lithium-ion précédents. Cela dit, elles présentent l'avantage d'être moins onéreuses et de ne pas contenir de cobalt (bien que la teneur en lithium soit légèrement plus importante par kWh de capacité que les batteries NMC et NCA). Les batteries LFP dont des progrès technologiques ont été récemment soulignés reviennent aujourd'hui sur le devant de la scène de la mobilité électrique et leur développement est largement considéré dans le scénario.

¹ <https://www.automobile-propre.com/voitures/renault-zoe/fiche-technique/>

ANNEXE 4 - Agriculture : le difficile équilibre pour ne pas trop recourir aux produits de synthèse

Pour maintenir une certaine productivité des systèmes agricoles tout en minimisant l'impact sur l'environnement, deux précisions importantes doivent être apportées. Se pose en effet la question du maintien d'une certaine quantité d'azote de synthèse, et de pesticides. Il existe des travaux montrant qu'il est possible de nourrir l'Europe entièrement avec l'agriculture biologique, donc sans intrants de synthèse. Toutefois ces travaux ne permettent pas d'apprécier la question de l'empreinte, c'est-à-dire si les échanges entre l'Europe et la France sont améliorés ou dégradés, sur le plan du contenu en gaz à effet de serre du solde importations / exportations, ou sur le plan des impacts sur la biodiversité. D'autre part, la sortie totale de l'azote de synthèse suppose soit de réduire la production de protéines *in fine*, soit de substituer l'azote de synthèse par des surfaces dédiées aux légumineuses, avec bien entendu des combinaisons entre ces solutions. Réduire la production de protéines peut passer par une réduction des exportations, ce qui renvoie au questionnement précédent, ou par une modification plus substantielle des régimes alimentaires, avec encore moins de protéines d'origine animale. Substituer des engrais de synthèse par la fixation symbiotique nécessite de consacrer plus de surfaces ou de biomasse à cet effet. La solution à cette équation est complexe. Le choix que nous avons effectué repose sur un équilibre qui nous conduit à une division par deux de la quantité d'azote d'origine minérale. Par ailleurs, cette production d'azote de synthèse sera entièrement décarbonée car basée sur de l'hydrogène renouvelable et sans émissions de N₂O au stade de la production.

Le même questionnement s'applique aux produits phytosanitaires, mais les progrès des systèmes à bas intrants nous conduisent à conclure qu'il doit être possible d'aller plus loin. On peut ainsi :

- diviser par trois l'utilisation des biocides dans les systèmes en agriculture de conservation, d'où, avec les 70% d'agriculture biologique, une division par 10 ;
- éliminer les molécules les plus toxiques présentant un caractère cancérigène, mutagène ou reprotoxique (CMR) ou un potentiel perturbateur endocrinien (PE).

La diminution des productions agricoles qui serait induite par une sortie complète des produits phytosanitaires pourrait avoir des effets induits en termes de changement indirect de l'utilisation des terres. En effet, à demande égale par ailleurs, une diminution de la production en France ou en Europe induit des besoins de production ailleurs, le gain net n'est donc pas automatiquement positif. C'est vrai pour les gaz à effet de serre, mais cela est vrai également pour la biodiversité. D'où le choix adopté, dans l'attente de travaux à venir, de conserver 30% des surfaces agricoles utilisant encore des produits phytosanitaires, et 70% n'utilisant que des produits autorisés en agriculture biologique.

ANNEXE 5 - Hypothèses de simulation de la production des installations solaires photovoltaïques

La modélisation de la production d'une installation solaire photovoltaïque dépend de trois paramètres.

- sa configuration technique : puissance, famille et type de ventilation². Afin de ne pas trop compliquer l'exercice, on se limite à trois configurations représentatives :
 - un parc au sol de 750 kW
 - une toiture de hangar agricole de 60 kW
 - un toit de maison individuelle de 9 kW
- sa localisation géographique : un point unique pour chacune des 13 régions administratives auquel des données de production annuelle sont attachées
- son orientation : dépendant de l'azimut (angle par rapport au Sud) et de l'inclinaison (angle par rapport au plan horizontal), elle est déterminée par la typologie de l'installation qui est rattachée à un modèle de simulation décrit ci-après.

Catégorie	Azimut	Inclinaison	Modèle PV
Sol	Sud ³	15°	parc_au_sol
Grande toiture plate	Sud	3°	hangar_agricole
Hangar agricole	Sud	10°	hangar_agricole
Ombrière	Sud	10°	hangar_agricole
Toiture Est/Ouest	Un pan Est / un pan Ouest	10°	hangar_agricole
Diffus	Entre Sud-Est et Sud-Ouest	18°	9kwc

Deux autres paramètres sont nécessaires pour pouvoir intégrer dans la simulation l'évolution de la production dans le temps des installations :

² La ventilation des panneaux détermine l'élévation de leur température qui peut faire chuter leur rendement si elle atteint 60°C.

³ L'option de suivi de la course du soleil (« tracking ») n'a pas été prise en compte à cause des incertitudes quant à son réel intérêt dans la durée du fait de coûts d'investissement et de fonctionnement plus élevés.

1. la durée de vie des systèmes : conformément à ce qui est observé sur le terrain, celle des onduleurs est fixée uniformément à 12 ans. Celle des modules tient compte à la fois du retour d'expérience et des potentiels d'amélioration pour chaque famille :

Famille	Durée de vie
Parcs au sol	20 ans en 2020 - 25 ans en 2025 - 30 ans en 2040
Grandes toitures plates	25 ans sur toute la période 2020-2050
Hangars agricoles	30 ans sur toute la période 2020-2050
Ombrières de parking	20 ans en 2020 - 25 ans en 2025 - 30 ans en 2040
Toitures Est-Ouest	25 ans sur toute la période 2020-2050
Petits systèmes diffus	25 ans avant 2017 -> 30 ans à partir de 2018

Ces différences de durée de vie ont un impact sur les puissances démantelées ou renouvelées (dans ce cas avec un gain de puissance à surface équivalente pouvant aller jusqu'à 30%) qui sont prises en compte dans le modèle de simulation.

2. l'évolution des rendements : une baisse de 0,4% par an de la production des panneaux installés est prise en compte dans le modèle qui intègre en revanche une augmentation progressive des rendements de départ jusqu'à atteindre 27 % en 2030 contre 23 % aujourd'hui. Ceci est possible notamment par la généralisation de la technologie de l'hétérojonction, actuellement émergente, qui permet en outre de diviser par deux la quantité de silicium et par 10 la quantité d'argent nécessaires à fabrication des modules (passage respectivement de 4 à 2 tonnes/MW et de 20 à 2 tonnes/GW)⁴.

La production totale du parc photovoltaïque au pas de temps horaire est obtenue par agrégation de la production simulée de chacune de ses composantes telles que définies par application des clés de répartition détaillées ci-dessus.

Cette production est calculée initialement à partir de données d'irradiation horizontale issues de traitement d'images satellite sur la période 2005-2020.

Les années 2020 à 2050 sont simulées à partir des données météo de l'année 2020 auxquelles est appliqué un coefficient d'évolution du climat correspondant au scénario RCP 4.5 du GIEC⁵.

Les données de température extérieure qui peuvent influencer sur le rendement des panneaux sont issues des mesures historiques de Météo France.

⁴ Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B. and Pavel C., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-16225-4, doi:10.2760/160859, JRC119941

⁵ Ce coefficient est déduit d'un document publié par RTE qui donne une évolution moyenne du facteur de charge mensuel entre 2025 et 2050

ANNEXE 6 - PCS / PCI

Dans le scénario négaWatt, tous les calculs, aussi bien en énergie finale qu'en énergie primaire, sont faits en PCS ([Pouvoir Calorifique Supérieur](#)). Cette convention n'est pas habituelle, car on trouve plus fréquemment le PCI ([Pouvoir Calorifique Inférieur](#)) pour les combustibles, sauf pour le gaz naturel qui est facturé en PCS.

Le PCI ne prend pas en compte l'énergie de vaporisation de l'eau présente en fin de combustion (chaleur latente), contrairement au PCS. L'utilisation des PCI se justifie de moins en moins avec l'usage maintenant très commun des chaudières gaz à condensation, et de manière moins répandue, de chaudières fioul à condensation. Enfin, on voit apparaître des chaudières bois à condensation. Exprimés par rapport au PCI, les rendements nominaux des chaudières les plus performantes dépassent ainsi souvent 100 %, ce qui est quand même surprenant...

Il convient donc de bien garder cette convention en tête lors de comparaison avec d'autres exercices de prospective ou d'autres scénarios, où les résultats sont le plus souvent donnés en PCI.

Ce choix augmente donc les quantités d'énergie considérées par rapport au PCI (car PCS = PCI + chaleur latente de l'eau) pour plusieurs vecteurs. Le tableau ci-dessous indique les valeurs moyennes retenues dans le scénario négaWatt :

Combustible	PCS/PCI
charbon	1,052
biomasse solide	1,090
combustibles liquides	1,075
GPL	1,087
combustible gazeux (CH4)	1,111
hydrogène	1,183
déchets	1,064