

# S'affranchir des énergies fossiles dès 2060 grâce au nucléaire <sup>(1)</sup>

Par **Élisabeth HUFFER**  
et **Hervé NIFENECKER**  
Association « Sauvons le Climat »

Un développement rapide de la production d'énergie nucléaire pour atteindre 173 EJ/an <sup>(2)</sup> (4 152 Mtep, 47 921 TWh) en 2060, puis 605 EJ/an (14 520 Mtep, 167 585 TWh) en 2110, permettrait de limiter l'élévation de la température globale moyenne de surface (GMST <sup>(3)</sup>) à 1,5 °C par rapport à sa valeur préindustrielle, tout en réduisant la quantité de CO<sub>2</sub> à stocker en passant des 800 Gt envisagées dans le scénario MESSAGE-Efficiency original à 275 Gt dans le scénario objet du présent article, et en doublant l'énergie primaire totale disponible entre 2015 et 2110.

## Introduction

Pour limiter l'augmentation de la température globale moyenne de surface (GMST) à 1,5°C par rapport à la période préindustrielle, comme l'a recommandé le GIEC à la suite de la Conférence de Paris, la COP21, il faudrait que le budget carbone soit limité à 600 Gt de CO<sub>2</sub> (Figueres *et al.*, 2017 <sup>(4)</sup> ; IPCC COP19, 2013). Figueres *et al.* proposent un profil d'émissions qui atteindra son maximum en 2025, avec environ 43 Gt/an.

Afin de déterminer si un tel objectif est réaliste, nous prenons comme base le scénario MESSAGE-Efficiency du GEA (Global Energy Assessment, 2012) qui satisfait le RCP 2,6 <sup>(5)</sup> défini par le GIEC pour limiter l'élévation de la GMST à 2°C. La démarche du GEA et, d'une façon générale, celle du GIEC pour construire des scénarios énergétiques est décrite dans l'Encadré 1 de la page suivante.

## Le scénario MESSAGE-Efficiency

Le scénario Efficiency est le plus sobre des trois scénarios MESSAGE <sup>(6)</sup> proposés par l'IIASA <sup>(7)</sup>. Supposant la fin du nucléaire, il se conforme à la condition RCP2.6 au prix

d'un recours intensif au captage et stockage du carbone (CSC), qui atteindrait 15 GtCO<sub>2</sub> par an en 2110 (voir la Figure 1 de la page 105). La réussite de la technologie CSC est loin d'être assurée pour un stockage cumulé de 800 Gt à la fin du siècle, stockage qui s'avérerait insuffisant, puisque ce scénario conduirait tout de même à une augmentation de 1 100 GtCO<sub>2</sub> dans l'atmosphère en 2100, ne permettant pas de se conformer à la nouvelle recommandation du GIEC, faite en conclusion de la COP21, d'une augmentation de la GMST inférieure à 1,5°C (RCP1.9, environ). Il est à noter que si la technologie CSC ne se développait pas, l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère serait de 1 900 Gt, soit trois fois plus que le budget CO<sub>2</sub> autorisé.

Dans ce contexte, il s'avère qu'un développement rapide et substantiel de la production nucléaire serait efficace pour réduire l'usage des combustibles fossiles et les émissions de CO<sub>2</sub> associées. Celui que nous proposons <sup>(8)</sup> repose sur la satisfaction des conditions suivantes :

- des réserves suffisantes d'uranium naturel (ou de thorium) ;
- la disponibilité de réacteurs surgénérateurs industriels ;
- une quantité de matière fissile suffisante pour permettre l'entrée en fonctionnement des premiers réacteurs surgénérateurs.

Dans ce scénario, une première étape consiste à déployer des réacteurs à neutrons lents, REP ou CANDU <sup>(9)</sup>, en attendant la disponibilité industrielle des surgénérateurs. Ce déploiement va permettre de produire le plutonium nécessaire au démarrage des surgénérateurs, supposés être,

(1) Le présent article reprend certains arguments développés, notamment par les coauteurs, dans l'article "Nuclear energy and bio energy carbon capture and storage, keys for obtaining 1.5°C mean surface temperature limit", *Int. J. Global Energy Issues*, vol. 40, n°3/4, 2017.

(2) 1 EJ = 277 TWh = 24 Mtep.

(3) Global Mean Surface Temperature.

(4) FIGUERES C. *et al.* (2017), "Three years to safeguard our climate", *Nature*, vol. 546, p. 593.

(5) RCP : Representative Concentration Pathway; RCP2.6 : forçage de 2,6 W/m<sup>2</sup>.

(6) Les scénarios MESSAGE couvraient la période allant de 2005 à 2100. Dans cet article, nous avons modifié la période considérée, pour couvrir les années 2015 à 2110, du fait que l'évolution entre 2005 et 2015 a été faible.

(7) International Institute for Applied Systems Analysis.

(8) BERGER A. *et al.* (2017), *Int. J. Global Energy Issues*, vol. 40, n°1/2.

(9) Réacteurs refroidis à l'eau lourde, dont les premiers exemplaires ont été développés par le Canada (Canadian Deuterium Uranium).

## Encadré 1 – La fabrique des scénarios du GIEC

Rappelons tout d'abord que le GIEC comporte trois groupes :

- Le GR I décrit les *éléments scientifiques* concernant l'évolution du climat ;
- Le GR II évalue les *impacts, adaptation, vulnérabilités* de cette évolution ;
- Le GR III étudie les stratégies permettant l'*atténuation du changement climatique*.

C'est donc au sein du GR III que sont sélectionnés les scénarios susceptibles de limiter le réchauffement climatique. Les auteurs de scénarios doivent se conformer aux contraintes imposées par le GIEC (par exemple, une limite du forçage radiatif de 2,6 W/m<sup>2</sup> comme le RCP2.6 pour l'AR5 (5<sup>th</sup> Assessment Report) pour l'élaboration des scénarios présentés lors de la COP21, ou la fixation à 1,5°C de la limite de l'augmentation de la température moyenne de surface, comme indiqué dans le dernier rapport spécial SR1.5 paru en 2018. Les auteurs de tels scénarios ont donc tout intérêt à signaler les références de leurs publications (dans des revues à comité de lecture) à l'Unité de support technique (TSU) du GR III. Ce dernier, pour procéder à la rédaction de ses rapports, fait une méta-analyse des publications dont il a connaissance. Une communauté des « scénaristes climatiques » s'est constituée sous la forme de l'IAMC<sup>(10)</sup> (Integrated Assessment Modeling Consortium), fondé par trois institutions : Stanford Energy Modeling Forum (EMF), International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA<sup>(11)</sup>) et Japan's National Institute for Environmental Studies (NIES). L'IAMC organise régulièrement des conférences, qui permettent aux « scénaristes climatiques » de présenter leurs travaux oralement ou par le biais de posters.

L'IAMC s'est doté d'une gouvernance, dont l'instance principale est le SSC (Scientific Steering Committee), dont la composition est la suivante :

- Electric Power Research Institute (EPRI) (United States) ;
- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (Austria) ;
- The Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL) (Netherlands) ;
- Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research (JGCR) (United States) ;
- Institute at the University of Maryland (PNNL/JGCRI) (United States) ;
- National Institute for Environmental Studies (NIES) (Japan) ;
- Stanford Energy Modeling Forum (EMF) (United States) ;
- Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) (Germany).

On notera l'absence, non seulement de la France, mais aussi de la Chine, de l'Inde, de la Russie et du Royaume-Uni, soit tous des pays ayant un programme de construction de réacteurs en cours... En 2007, le GIEC a demandé à la communauté scientifique de mettre à jour les premiers scénarios énergétiques et climatiques mis au point en 2000, les scénarios SRES<sup>(12)</sup> (Special Report on Emissions Scenarios). L'IAMC fut créé à cette occasion et les nouveaux scénarios étaient spécifiés par leur RCP. Quatre catégories de scénarios furent ainsi prises en charge par quatre maîtres d'œuvre :

Scénario	RCP	Maître d'œuvre	Contact
IMAGE	2,6	PBL	Detlef van Vuuren
MiniCAM	4,5	PNNL	Katherine Calvin
AIM	6,0	NIES	Toshihiko Masui
MESSAGE	8,5	IIASA	Keywan Riahi

En 2012, à l'instigation de l'IIASA, et sous sa coordination, fut lancé le "Global Energy Assessment" (GEA) qui a pour ambition de faciliter l'accès de tous à l'énergie d'une façon équitable et durable. Les résultats de cette recherche sont disponibles en accès libre, sous forme de fichiers Excel, sur le site de l'IIASA à l'adresse suivante : <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/ene/geadb/dsd?Action=htmlpage&page=about>

L'IIASA est devenu, en pratique, la plaque tournante des études de scénarios pour le GIEC.

Les membres de l'IIASA sont des pays dont la représentation est assurée par des institutions universitaires ou académiques. Les pays membres sont les suivants : Autriche, Brésil, Chine, Égypte, Finlande, Allemagne, Inde, Indonésie, Iran, Israël, Japon, Corée, Malaisie, Mexique, Norvège, Russie, Afrique du Sud, Suède, Ukraine, Royaume-Uni, États-Unis, Vietnam. Là encore, on notera l'absence de la France.

(10) <http://www.globalchange.umd.edu/iamc/>

(11) <http://www.iiasa.ac.at/>

(12) <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>

## Encadré 2 – GISOC et SLC (« Sauvons le Climat »)

Le groupe GISOC (Global Initiative to Save Our Climate) est constitué de Berger A., Bles T., Bréon F.-M., Brook B. W., Deffrennes M., Durand B., Hansen P., Huffer É., Grover R. B., Guet C., Liu W., Livet F., Nifenecker H., Petit M., Pierre G., Prévot H., Ren L., Richet S., Safa H., Salvatores M., Schneeberger M. et Zhou S. (2017).

Le Groupe III du GIEC a publié son rapport en avril 2014. Ce rapport était important, puisqu'il devait influencer les États lorsqu'il s'agirait de définir leurs politiques énergétiques, aussi bien en ce qui concerne l'efficacité énergétique que la définition d'un mix électrique. En ce qui concerne ce dernier, il existe actuellement des différences de stratégie importantes entre les pays, selon qu'ils envisagent ou non de sortir du nucléaire en recourant plus longtemps à l'usage de combustibles fossiles pour la production d'électricité. Les deux stratégies sont illustrées par celle de la France et celle de l'Allemagne. On pouvait donc espérer que les deux choix possibles seraient exprimés de façon équitable au sein du GR III.

Ce n'est pas du tout l'impression que donnait l'évaluation du nucléaire faite par les membres du groupe dans le résumé établi à l'attention des décideurs (SPM<sup>(13)</sup>), dans les termes suivants :

« L'énergie nucléaire est une méthode mature de production d'électricité de base et à faible émission de CO<sub>2</sub>, mais sa part dans la production mondiale d'électricité décline depuis 1993. Elle pourrait fournir une contribution bas carbone croissante à la production, mais plusieurs barrières et risques s'opposent à son développement (évidence robuste, haut niveau d'accord).

Sont inclus les risques opérationnels et les préoccupations associées, les risques de l'extraction minière de l'uranium, les risques financiers et réglementaires, les problèmes non résolus de la gestion des déchets, la prolifération des armements nucléaires et une opinion publique hostile (évidence robuste, haut niveau d'accord).

De nouvelles technologies pour le cycle des combustibles et les réacteurs qui permettraient de surmonter ces obstacles sont l'objet de recherches et développements et des progrès ont été faits concernant la sûreté et le stockage des déchets. »

Le ton de cette critique reflète probablement les opinions des auteurs du rapport. Rappelons que l'Allemagne avait pris, dès 2002, la décision de sortir du nucléaire, alors que le texte cité ci-dessus a été publié en 2014.

À la rédaction des 16 chapitres du rapport, ont contribué 8 auteurs travaillant dans des institutions ou universités françaises, à comparer aux 73 auteurs allemands ! Si on limite le décompte aux seuls auteurs principaux, on trouve 5 Français travaillant dans des institutions ou universités françaises, pour 27 Allemands. La contribution allemande n'est dépassée que par celle des États-Unis, avec 49 auteurs principaux. Le Royaume-Uni en compte 14, les Pays-Bas et l'Italie 9 chacun.

Un certain nombre de physiciens et ingénieurs de l'association « Sauvons le Climat » trouvèrent la prise de position du rapport du Groupe III (AR5) à la fois scandaleuse et, surtout, dangereuse pour le climat, puisqu'elle conduisit à l'abandon de la seule production, avec l'hydroélectricité, n'émettant pas de CO<sub>2</sub> et pleinement pilotable. Des chercheurs d'autres nationalités (Chinois, Indiens, Australiens, Belges, Autrichiens, Américains) partageaient eux aussi la même indignation, ce qui conduisit à la création du groupe GISOC.

Pour influencer la rédaction du rapport du Groupe III, il faut pouvoir s'appuyer sur des publications. Il n'existait pas de scénarios mondiaux rendant justice au nucléaire. Le GISOC en construisit : il en publia un premier, intitulé "How much can nuclear energy do about global warming?"<sup>(14)</sup>, lequel permettait de respecter le critère RCP2.6 (2 degrés de plus que la température moyenne préindustrielle). Le GIEC ayant révisé ses objectifs en visant une hausse maximale de 1,5 degré, le GISOC fut l'un des premiers groupes à publier un scénario respectant ce nouvel objectif, "Nuclear energy and bio energy carbon capture and storage, keys for obtaining 1.5°C mean surface temperature limit"<sup>(15)</sup>. Ces deux articles ont été cités dans le dernier rapport du GIEC, « SR1.5 ». Le GISOC a donc réussi à crever le plafond de verre antinucléaire du GIEC.

(13) Traduction par SLC du texte anglais.

(14) <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2017.080766>

(15) <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2017.086622>

dans ce scénario, des RNR (réacteurs rapides refroidis au sodium). À noter que les résultats seraient les mêmes quel que soit le type de réacteur surgénérateur, dont plusieurs sont à l'étude. Le RNR a l'avantage d'afficher une expérience équivalente à trois cents années-réacteur et il y en a deux de taille industrielle actuellement en exploitation en Russie, un autre qui devrait démarrer en Inde en 2019, et

un quatrième de faible puissance en fonction en Chine, un pays qui a lancé plusieurs autres projets. En France, le réacteur Phenix a fonctionné pendant trente-six ans et a fait la démonstration de l'intérêt de la surgénération. Le réacteur Super-Phénix a été arrêté en 1997 pour des raisons politiques, alors qu'il avait produit près de 4 TWh en 1996. C'est donc une technologie éprouvée.

Dans notre scénario, les REP et CANDU sont déployés jusqu'à atteindre une puissance de 2 325 GWe, chaque réacteur étant supposé fonctionner pendant cinquante ans. Ces réacteurs produisent de l'électricité, mais aussi le Pu nécessaire au démarrage des RNR qui entreront en production à partir de 2030. Dans ces conditions, il est consommé 10 millions de tonnes d'uranium naturel par rapport à des ressources estimées à 16 millions de tonnes par le NEA<sup>(16)</sup>. Les RNR, quant à eux, n'étant pas confrontés à la limite des ressources en uranium, leur déploiement dépendra de l'inventaire de Pu accumulé et de leur temps de doublement<sup>(17)</sup> fixé ici à quarante ans. Les autres paramètres sont fixés comme indiqué ci-dessous :

- une production annuelle d'électricité nucléaire : 7,9 TWh/GWe ;
- une production de plutonium (Pu) par les REP pour constituer l'inventaire de démarrage des RNR de 250 kg/an/GWe ;
- une production de Pu par les CANDU de 600 kg/an/GWe ;
- un besoin en uranium naturel par an par REP de 1 GWe : 120 t/GWe ;
- une production, par un RNR, de Pu excédentaire par rapport au renouvellement de sa matière fissile de 200 kg/an/GWe ;
- un inventaire total de Pu d'un RNR de 1 GWe avec la technologie PUREX de 8 tonnes de Pu ;
- un inventaire total de Pu d'un RNR de 1 GWe avec des combustibles métalliques et l'extraction par pyro-métallurgie (projet IFR US) : 5,5 tonnes de Pu.

Dans ce dernier cas, l'on obtient la courbe correspondant à la Figure 2 ci-contre, qui montre l'évolution de la puissance nucléaire dans le temps. Dans l'hypothèse où les performances envisagées pour les combustibles métalliques ne pourraient être obtenues, il faudrait alors augmenter le stock initial de Pu grâce à un parc de CANDU.

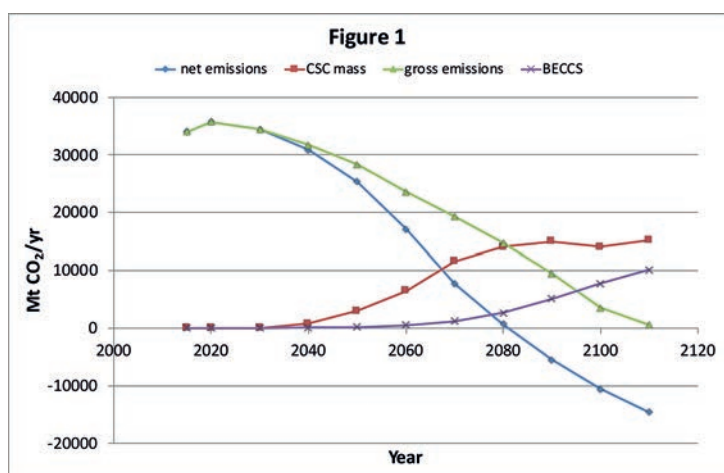


Figure 1 : Émissions de CO<sub>2</sub> (brutes et nettes) et masse de CO<sub>2</sub> stockée par CSC (totale et par traitement de la biomasse) du scénario Efficiency. Les émissions nettes correspondent aux émissions brutes diminuées du tonnage de CO<sub>2</sub> stocké. Nous avons décalé la référence temporelle de dix ans par rapport au scénario d'origine.

(16) Nuclear Energy Agency/Agence européenne du nucléaire.

(17) Temps au bout duquel le plutonium produit en excès par un réacteur permet l'entrée en fonction d'un second réacteur.

Nous nommons "Efficiency-N" le scénario Efficiency modifié pour inclure cette production nucléaire importante. Entre 2030 et 2050, la puissance nucléaire nouvellement construite atteindrait 4 350 GWe, soit une croissance moyenne de la puissance installée de 217 GWe/an (environ 5 % de croissance annuelle), comme on peut l'observer sur la Figure 2 ci-après. Ce chiffre qui paraît très élevé est comparable au taux de croissance réalisé en France dans les années 1980. Entre 1980 et 1990, la France a mis en service quarante-trois réacteurs, soit un rythme d'environ 4 GWe par an. En 2050, la production d'électricité du scénario Efficiency atteindrait 150 EJ (41 550 TWh). En 1990, la production d'électricité en France avoisinait les 400 TWh. En admettant que le rythme de construction de réacteurs pourrait être proportionnel à la production, on comprend que pour une production cent fois supérieure à celle que la France avait en 1990, le rythme de construction en 2050 devrait atteindre 400 GWe/an, soit bien plus que la croissance de 217 GWe/an du scénario "Efficiency-N".

La convention de « conversion directe » du programme GEA<sup>(18)</sup> nous conduit à considérer que chaque MWh de production nucléaire remplace 2,7 MWh d'énergie primaire fossile. La substitution se fait dans une première étape en remplaçant la production d'électricité fossile par une production nucléaire, puis en remplaçant la production fossile de chaleur (surtout par le gaz naturel) par de l'électricité et, finalement, en remplaçant la mobilité fossile (essence, diesel et gaz naturel) par une mobilité électrique.

Sur la base de ces hypothèses, nous obtenons une disparition rapide de la composante fossile prévue par le scénario comme le montre la Figure 3 de la page suivante. L'utilisation des fossiles dans le secteur énergie cesserait dès 2060.

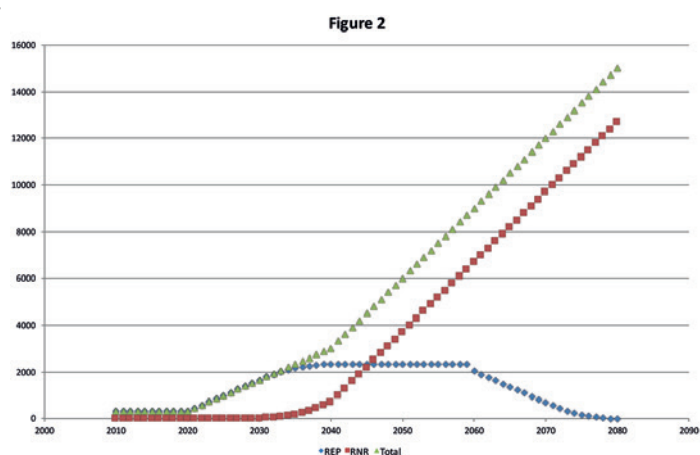


Figure 2 : La puissance nucléaire telle que prévue dans le scénario MESSAGE-Efficiency-N.

En supprimant la contribution des énergies fossiles au secteur énergétique, on obtient une diminution équivalente des émissions de CO<sub>2</sub>, comme illustré dans la Figure 4 de la page suivante.

(18) <http://www.globalenergyassessment.org/>

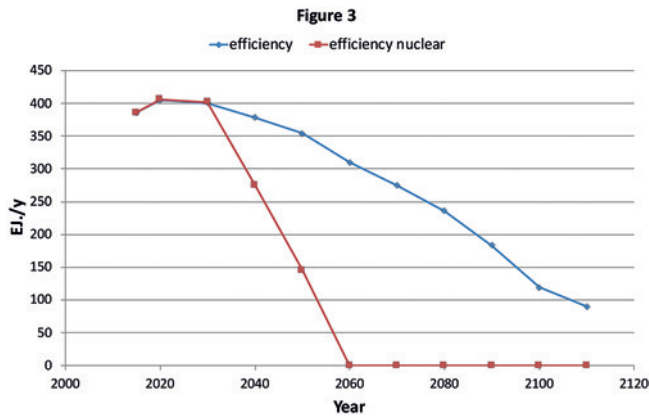


Figure 3 : Évolution de la consommation des énergies fossiles dans les scénarios Efficiency et Efficiency-N.  
1 EJ = 1012 Joules = 277 TWh = 24 Mtep.

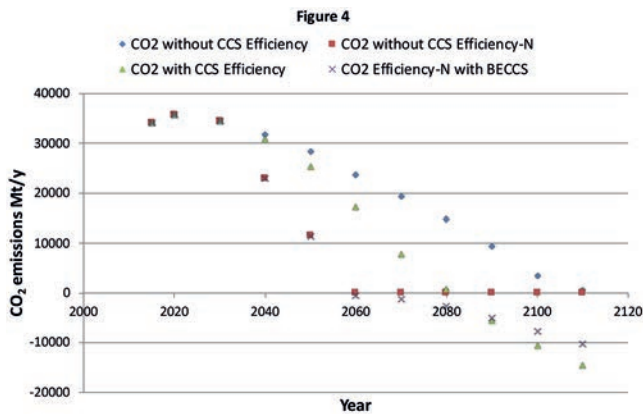


Figure 4 : Émissions annuelles de CO<sub>2</sub> dans le scénario Efficiency d'origine avec et sans CSC, et dans le scénario Efficiency-N sans et avec CSC appliqué à la seule production de bioénergie. Les quatre scénarios atteignent un maximum voisin de 37 Gt/an en 2020 environ, soit une valeur inférieure à la recommandation faite par Figueres *et al.*

Dans la Figure 4, les émissions négatives résultent du solde entre les émissions fossiles et le CSC appliqué aux biocarburants. En effet, la combustion de biocarburants est considérée comme non émettrice dès lors que la biomasse consommée est compensée par une croissance égale de biomasse. Ainsi, le CO<sub>2</sub> capté lors de la combustion de biomasse est soustrait au contenu CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

La Figure 5 ci-contre montre les émissions cumulées résultant des émissions annuelles de la Figure 4.

Le scénario nucléaire Efficiency-N conduit à une stabilisation du CO<sub>2</sub> contenu dans l'atmosphère sans qu'un recours au CSC soit nécessaire. Il en limite l'augmentation à 800 Gt, seulement 200 Gt de plus que les 600 Gt qui permettraient, selon les climatologues, de limiter l'augmentation de la GMST à 1,5°C. La concentration de CO<sub>2</sub>, une fois stabilisée par l'obtention de la neutralité carbone, décroîtra du fait de l'absorption de ce gaz par l'océan et la biomasse. On peut donc supposer que le niveau de concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pourrait à la fin du XXII<sup>e</sup> siècle revenir à son niveau préindustriel ; son rythme de décroissance n'est probablement pas un facteur essentiel à condition que celui-ci retrouve son niveau de concentration de 2000 avant 2200. Cependant,

ce « retour à la normale » pourrait être obtenu plus rapidement grâce à une bonne gestion de la biomasse.

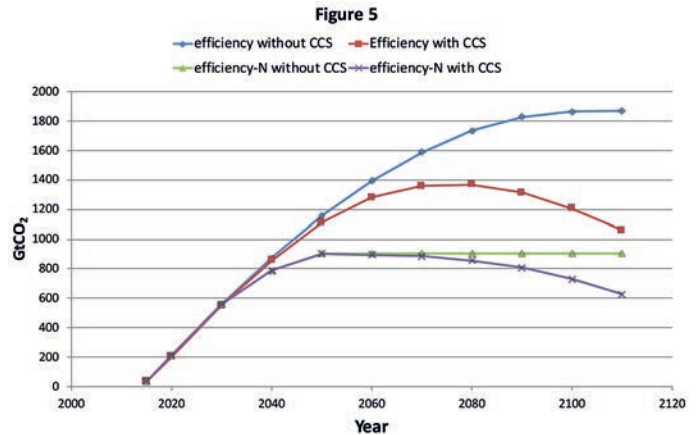


Figure 5 : Émissions de CO<sub>2</sub> cumulées avec et sans CSC dans chacun des scénarios Efficiency et Efficiency-N avec BECCS (CSC sur la biomasse).

## Le captage-stockage du CO<sub>2</sub> de la biomasse, un moyen de rafraîchir l'atmosphère

Afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles, le scénario MESSAGE-Efficiency prévoit un développement de l'utilisation énergétique de la biomasse qui atteindra 220 EJ en 2100. Elle est utilisée surtout dans le secteur des transports, et la moitié environ du CO<sub>2</sub> produit est supposée bénéficier du CSC. La combustion de biomasse émettant 80 Mt de CO<sub>2</sub> par EJ, on peut calculer la masse de CO<sub>2</sub> à stocker chaque année (voir la Figure 6 ci-après) à partir de la combustion de biomasse bénéficiant de CSC dans le cadre du scénario précité. En reportant le résultat obtenu sur la Figure 5, on obtient la courbe mauve (x). Ainsi, dans le scénario Efficiency-N, en appliquant le CSC à la combustion de la seule biomasse, on arrive à satisfaire la condition correspondant à la limitation à 1,5°C de l'augmentation de la GMST par rapport à la période préindustrielle, soit des émissions cumulées de 600 Gt, cela sur une tendance décroissante. Le CO<sub>2</sub> stocké s'élève à 275 Gt, à comparer aux 800 Gt du scénario MESSAGE-Efficiency d'origine.

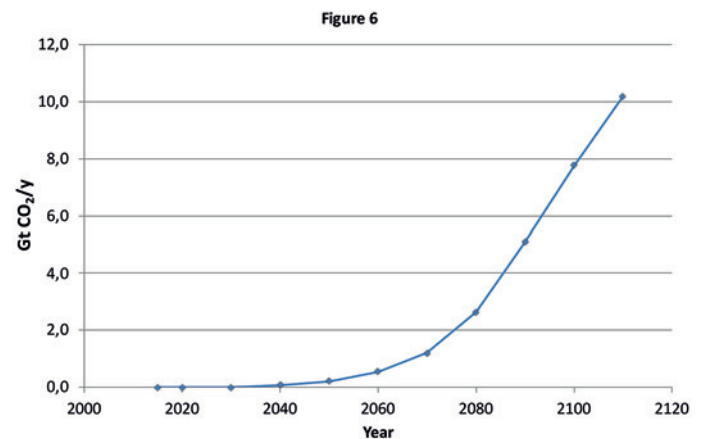


Figure 6 : Évolution de la masse de CO<sub>2</sub> stockée annuellement en appliquant le CSC à la seule bioénergie dans le scénario MESSAGE-Efficiency.

## Utilisation du surplus nucléaire

Comme le montre la Figure 3 de la page précédente, les combustibles fossiles ne sont plus utilisés dans le secteur énergie à partir de 2060 environ. La croissance de la production nucléaire n'est alors plus nécessaire si le seul but poursuivi est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette croissance peut dès lors être utilisée soit pour augmenter la consommation d'énergie, soit pour diminuer la part des énergies renouvelables. Ces deux possibilités, limiter ou non la production nucléaire, sont représentées dans la Figure 7 ci-après.

Les deux options conduisent aux mêmes schémas d'émissions de CO<sub>2</sub>. Il peut néanmoins y avoir des différences dans les consommations globales d'énergie, comme le montre la Figure 8 ci-contre. Celle-ci présente l'évolution de la fourniture totale d'énergie primaire (TPES – Total Primary Energy Supply), en distinguant le cas où la production nucléaire est plafonnée à 173 EJ/an de celui où elle n'est pas limitée. Dans ce dernier cas, le TPES est presque le double de ce qu'il serait si la production nucléaire était plafonnée à 173 EJ/an. À noter qu'en cas de plafonnement, le TPES serait pratiquement égal à celui de la version sans nucléaire du scénario Efficiency. Cela s'explique par le fait que nous avons appliqué la convention de substitution selon laquelle 1 MWh de

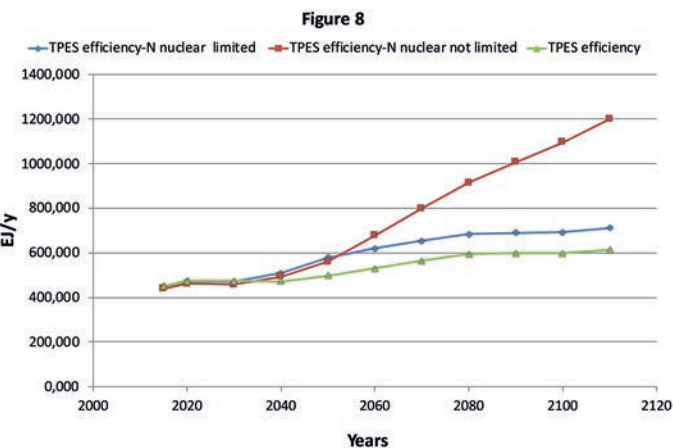


Figure 8 : Énergie primaire totale (définition de l'énergie primaire selon la convention « directe » du GEA) dans le scénario Efficiency originel et dans les scénarios Efficiency-N avec et sans limitation de la puissance nucléaire.

production nucléaire est équivalent à 2,7 MWh d'énergie primaire fossile.

## Déclinaison française

Le scénario Negatep<sup>(19)</sup> développé par le collectif « Sauvons le Climat » obéit à la même philosophie que le présent scénario mondial Efficiency-N.

Entre 2015 et 2050, dans le scénario Negatep (voir le Tableau 1 ci-après), la consommation d'énergie finale baisse de 20 %. Le recours aux énergies fossiles est réduit de 75 %. La production d'électricité augmente de 49 %, la part de l'électricité nucléaire reste très élevée, à 81 %. La part des électricités renouvelables intermittentes augmente légèrement, de 7 %. Alors que la part du nucléaire dans l'électricité est de 81 %, sa part dans l'énergie totale en 2050 sera de  $59/125 = 0,48$ , à comparer au scénario Efficiency-N, où (tableau 1 de l'article en anglais précité<sup>(20)</sup>), pour 2060, on aura  $173/388 = 0,44$  et pour 2100,  $605/1132 = 0,53$ .

(19) [http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf\\_files/climat-energie/Negatep\\_V-2017.pdf](http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/climat-energie/Negatep_V-2017.pdf)

(20) "Nuclear energy and bio energy carbon capture and storage, keys for obtaining 1.5°C mean surface temperature limit", *Int. J. Global Energy Issues*, vol. 40, n°3/4, 2017.

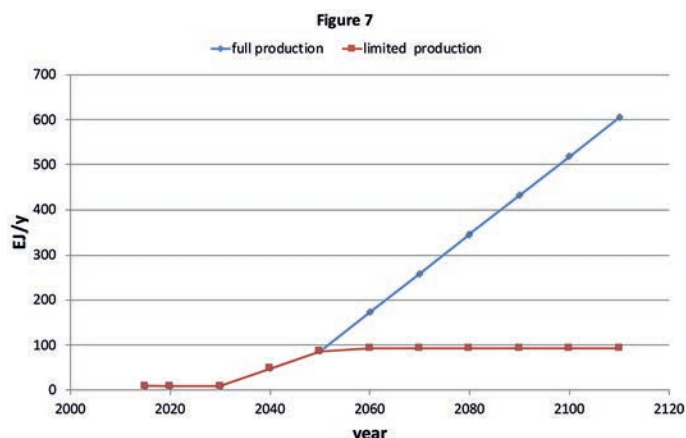


Figure 7 : Développements possibles de la production nucléaire dans le scénario Efficiency-N. Le développement limité de cette production satisfait à la limite de 1,5°C dans le scénario MESSAGE-Efficiency-N. Une production nucléaire accrue permet de générer plus d'énergie par rapport au scénario MESSAGE-Efficiency d'origine et (ou) de diminuer la contribution des énergies renouvelables.

	Emploi Direct Mtep		Électricité TWh	
	2015	2050	2015	2050
Consommation d'énergie finale totale	149	119,5		
Charbon	6,4	5	8,7	0
Pétrole	64,2	6	3,2	0
Gaz	31,2	14	22	20
Nucléaire	37,5	59	437	688
Renouvelables (éolien+PV)	2,45	4,81	28,5	56
Renouvelables total	17,4	36,5	97,4	137
Total	156,7	120,5	568	845
Total fossiles	101,8	25	33,9 (6,8 Mtep)	20 (4,4 Mtep)
CO <sub>2</sub> Mt	344	91	41	0,94

Tableau 1 : Ressources primaires 2015/2050 par source d'énergie, scénario Negatep.

## Conclusion

Le remplacement de l'énergie fossile par l'énergie nucléaire dans le scénario MESSAGE-Efficiency (Scénario Efficiency-N) doit permettre la fin de l'utilisation des fossiles en 2060 plutôt qu'en 2100. Avec un stockage de 800 Gt de CO<sub>2</sub>, le scénario Efficiency originel conduit quand même à l'injection cumulée d'une masse de 1 100 Gt de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, alors qu'avec une séquestration de seulement 275 Gt de CO<sub>2</sub>, dans le scénario Efficiency-N, la masse cumulée de CO<sub>2</sub> injectée dans l'atmosphère se limite à 600 Gt, ce qui est compatible avec le prérequis énoncé par le GIEC pour limiter l'augmentation de la température à 1,5°C. La production nucléaire nécessaire pour atteindre ce résultat se situerait à 173 EJ en 2060 (47 921 TWh), obtenus au moyen d'une puissance nucléaire installée de 6 065 GWe. Il devrait être possible, sans conséquences négatives sur le climat, de poursuivre le développement de la production nucléaire et d'atteindre une production de 605 EJ/an (167 585 TWh) en 2110. Cela permettrait une augmentation de la fourniture d'énergie primaire (selon la convention de l'énergie primaire « directe » du GEA), qui de 617 EJ/an dans le scénario Efficiency originel passerait à 1 132 EJ/an dans le scénario Efficiency-N. Dans le Tableau 2 ci-contre, nous

	Efficiency	Efficiency-N	Efficiency-N	Efficiency
	2015	2060	2110	2100
Fossiles EJ	386	0	0	90
Éolien+solaire EJ	0,717	96	283	283
Hydraulique EJ	10	21	23	23
Biomasse EJ	42	98	221	221
Nucléaire EJ	9	173	605 (173)	0
Énergie primaire EJ Convention GEA directe	448	388	1132 (700)	617
CO <sub>2</sub> /an net Gt	34	-0,5	-10,2	-14
CO <sub>2</sub> /an séquestré Gt	0	0,5	10,2	15,2
CO <sub>2</sub> cumulé séquestré Gt	0	8	276	801
CO <sub>2</sub> cumulé injecté dans l'atmosphère Gt	34	896	627	1270

Tableau 2 : Synthèse du mix énergétique et des émissions de CO<sub>2</sub> en 2015, dans le scénario Efficiency originel en 2100 et dans le scénario Efficiency-N en 2060 et 2110, en distinguant deux options en matière de production nucléaire.

NB : les nombres entre parenthèses correspondent à une production nucléaire constante après 2060.

résumons les résultats obtenus dans le scénario Efficiency-N et nous les comparons à ceux du scénario MESSAGE-Efficiency originel.

### Encadré 3 – Effets du nucléaire sur le plan environnemental et sanitaire

#### - Les émissions de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh pour diverses techniques de production d'électricité sont reportées dans le Tableau 3 ci-dessous. Les calculs sont réalisés en cycle de vie.

Technique	Charbon	Gaz CCG	Hydro	Éolien	Solaire PV	Nucléaire
Émission (gCO <sub>2</sub> /kWh)	1024	491	6	15	45	16

Tableau 3 : Émissions de CO<sub>2</sub> en gCO<sub>2</sub>/kWh pour différentes techniques de production d'électricité <sup>(21)</sup>.

#### - L'empreinte au sol

La surface au sol nécessaire pour produire la même quantité annuelle d'énergie électrique en distinguant l'empreinte au sol de l'EPR de celles des autres techniques est indiquée dans le Tableau 4 ci-dessous. Seules les surfaces impactées par les installations de production sont estimées, à l'exception des installations minières. Cette empreinte peut être considérée comme impactant directement la biodiversité. Sur ce point, la compacité des installations nucléaires apparaît clairement comme un avantage.

	Nucléaire	Fossiles	PV	Éolien	Biomasse
Empreinte (km <sup>2</sup> )	4	10	200	1 200	5 000

Tableau 4 : Empreinte au sol (surface sur laquelle la biodiversité est gravement atteinte) de diverses techniques assurant une production d'électricité de 14 TWh/a (EPR de 1,6 GWe).

#### - Besoins en matériaux

À titre d'exemple, l'EPR (1 650 MWe) requiert environ 500 000 m<sup>3</sup> de béton et 110 000 tonnes d'acier <sup>(22)</sup>. Les émissions de CO<sub>2</sub> estimées lors de la construction de l'EPR ont été évaluées à environ 1 million de tonnes. Pendant soixante ans,

(21) <http://www.sfen.org/fr/nuclear-for-climate> and [http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf\\_files/ec\\_2008/Hirschberg.pdf](http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/ec_2008/Hirschberg.pdf) (slide 12).

(22) <https://www.bouygues-construction.com/realisations/epr-de-flamanville>

un EPR produira environ 720 TWh. On arrive alors à des émissions de CO<sub>2</sub> associées aux matériaux de construction de 0,5 g CO<sub>2</sub>/kWh. À production équivalente, les éoliennes requièrent 8 fois plus de béton et 12 fois plus d'acier que l'EPR<sup>(23)</sup>.

#### - Effets sanitaires du nucléaire

Bien sûr, depuis le temps que l'on répète sur tous les tons qu'il représente le pire danger qui menace l'humanité, le nucléaire fait peur. Mais si l'on se limite à ses applications civiles, cette réputation ne se justifie pas du tout. Pour s'en convaincre, il suffit de lire le Tableau 5 ci-après (les valeurs qui y figurent ont été publiées par la revue *Forbes*, elles donnent le nombre moyen des décès observés pour produire deux fois les besoins électriques annuels de la France). De l'observation de ce tableau, il ressort que 100 000 décès sont causés par le charbon, 24 000 par la biomasse, 4 000 par le gaz naturel, 150 par l'éolien et... seulement 90 par le nucléaire, y compris les victimes de Tchernobyl et Fukushima. La faiblesse surprenante de la létalité du nucléaire est due à l'extrême concentration de la puissance nucléaire, ce qui limite l'importance des travaux de génie civil. Ainsi, pour produire la même quantité d'énergie annuelle qu'un réacteur de 1 000 MW, il faut 5 000 éoliennes de 1 MW. Par ailleurs, l'Autorité de Sécurité nucléaire surveille rigoureusement toutes les étapes de la construction d'un réacteur, y compris les travaux de génie civil et de construction, ce qui rend les accidents de chantier exceptionnels.

La production d'électricité nucléaire depuis 1960 a été d'environ 100 000 TWh, ce qui, si l'on se réfère au Tableau 5, aurait conduit à 90 000 décès. Or, le nombre de décès dus à la catastrophe de Tchernobyl a été estimé par l'OMS à environ 4 000, un calcul réalisé essentiellement en appliquant une relation linéaire entre la dose de radiation reçue par les personnes irradiées et la probabilité de développer un cancer mortel (0,04 par Sievert). On a déploré dans le mois suivant la catastrophe environ 50 décès d'intervenants ayant reçu au moment de la catastrophe de très fortes doses de radiation.

Technique	Décès pour 1 000 TWh
Charbon (monde)	170 000
Charbon (Chine)	280 000
Charbon(USA)	15 000
Fioul	36 000
Gaz naturel	4 000
Biomasse	24 000
Solaire (PV)	440
Éolien au sol	150
Hydroélectricité	1 400
Nucléaire	90

Tableau 5 : Nombre moyen de décès déplorés pour la production de 1 000 TWh d'électricité pour différentes techniques de production. Pour le nucléaire, les victimes de Tchernobyl et Fukushima ont été prises en compte. *FORBES* a utilisé les données du programme européen ExternE<sup>(24)</sup>.

(23) <http://www.economiematin.fr/news-eoliennes-beton-artificialisation-sol-biodiversite>

(24) *Forbes Magazine*, <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#6071e5ed709b>

Données du programme européen ExternE ([http://www.externe.info/externe\\_d7/?q=node/40](http://www.externe.info/externe_d7/?q=node/40)) et RABL A. & SPADARO J. (2005), « Les coûts externes de l'énergie », p. 583, in *L'Énergie de demain – Techniques, Environnement, Économie*, éd. BOBIN J.-L., HUFFER É. & NIFENECKER H., EDP Sciences.