

Énergie nucléaire et captage et stockage du carbone par la bioénergie, une solution pour limiter l'augmentation de la température moyenne de surface à 1,5 °C

Le scénario Efficiency-N

Berger, A., Bles, T., Bréon, F.-M., Brook, B.W., Deffrennes, M., Durand, B., Hansen, P., Huffer, E., Grover, R.B., Guet, C., Liu, W., Livet, F., Nifenecker, H., Petit, M., Pierre, G., Prévot, H., Richet, S., Safa, H., Salvatores, M., Schneeberger, M. et Zhou, S. (2017)

Article traduit de l'original anglais "*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, Nos. 3/4, 2017. Traduction due à Elisabeth Huffer.

Résumé

Un développement rapide de la production d'énergie nucléaire, pour atteindre 173 EJ/an¹ en 2060 puis 605 EJ/an en 2110 permet de limiter l'élévation de la température globale moyenne de surface (GMST²) à 1,5 °C par rapport à sa valeur préindustrielle, tout en réduisant la quantité de CO₂ à stocker des 800 Gt envisagées dans le scénario MESSAGE-Efficiency originel à 275 Gt dans celui-ci, et en multipliant par 2,5 l'énergie primaire³ totale disponible entre 2015 et 2110.

Remerciements

Nous remercions le Dr Lixia Ren pour ses renseignements sur les réacteurs sur-générateurs.

Introduction

Pour limiter l'augmentation de la température globale moyenne de surface (GMST) à 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle, comme le stipule le GIEC à la suite de la conférence de Paris COP21, le budget CO₂ est limité à 600 Gt de CO₂ (Figueres, C et al. (2017), IPCC COP19 (2013)) Figueres, C et al (2017) proposent un profil d'émissions qui atteint 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 (2012) (Global Energy Assessment) qui satisfait le RCP 2,6 défini par le GIEC pour limiter l'élévation de la GMST à 2 °C.

Le scénario MESSAGE-Efficiency

Le système MESSAGE développé par l'IIASA4 de Vienne (IIASA 2012)⁵ comprend 3 scénarios qui respectent le forçage radiatif de 2,6 W/m² (Representative Concentration Pathway - RCP 2,6) tel que défini par le GIEC - IPCC (2014) dans son cinquième rapport (AR5). Il s'agit du scénario

¹ 1EJ=277TWh=24Mtep

² Global Mean Surface Temperature

³ Il existe plusieurs définitions de l'énergie primaire. L'énergie finale est celle payée par le consommateur. L'énergie primaire est celle qui doit être utilisée pour fournir l'énergie finale. Elle est supérieure à l'énergie finale du fait des rendements limités (rendement de Carnot, par exemple) de pertes de transport, etc. L'énergie primaire est proportionnelle à l'énergie finale avec un facteur de proportionnalité appelé facteur de conversion. Le facteur de conversion peut être utilisé en fonction des objectifs que se fixe la société. Si on cherche à minimiser les émissions de CO₂ liées à la combustion des combustibles fossiles, il est d'usage d'utiliser l'énergie primaire par substitution, c'est-à-dire la quantité d'énergie fossile (essentiellement du charbon) qu'il faudrait utiliser pour obtenir la même énergie finale. Le facteur de conversion pour les énergies renouvelables et nucléaire est ainsi pris égal à 2,7. Dans la définition "directe" de l'énergie primaire, le facteur de conversion est pris égal à l'unité.

⁴ International Institute for Applied Systems Analysis

⁵ Les scénarios MESSAGE couvraient la période de 2005 à 2100. Dans cet article, nous avons modifié la période considérée, pour couvrir de 2015 à 2110 du fait que l'évolution entre 2005 et 2015 a été faible.

"Supply" à forte consommation d'énergie, du scénario "Efficiency" qui suppose la fin de l'énergie nucléaire au prix d'une baisse de 45 % de la consommation d'énergie par rapport au scénario "Supply", et du scénario intermédiaire "MIX". Tous ces scénarios supposent une utilisation intensive du captage et stockage du carbone (CSC) pour atteindre 24 Gt CO₂/an en 2100 dans le scénario Supply et 15 Gt CO₂/an dans le scénario Efficiency. La réussite de la technologie CSC étant loin d'être assurée à ce stade, nous avons proposé une alternative en supposant un développement rapide et substantiel de l'électricité nucléaire, dans les scénarios Supply-N et Mix-N, qui satisfont le RCP 2,6 sans recourir au CSC. Ce travail a été publié dans IJEGEI (Berger et al 2017). L'article a été publié avant la conférence de Paris COP21. La condition RCP 2,6 conduisait à une limitation à 2°C de l'augmentation de la température globale moyenne de surface (GMST) par rapport aux conditions préindustrielles. A la suite de la COP21, le GIEC a décidé de réduire l'augmentation de la GMST à un maximum de 1,5 °C (RCP 1,9 environ). Par manque de temps, nous avons opté pour la confrontation de notre approche "nucléaire intensif" au scénario MESSAGE Efficiency en transformant celui-ci d'un scénario sans nucléaire en un scénario à forte contribution nucléaire. La raison principale de ce choix paradoxal est que Efficiency étant le scénario le plus sobre, il augmentait les chances d'obtenir un scénario en accord avec les nouvelles recommandations du GIEC.

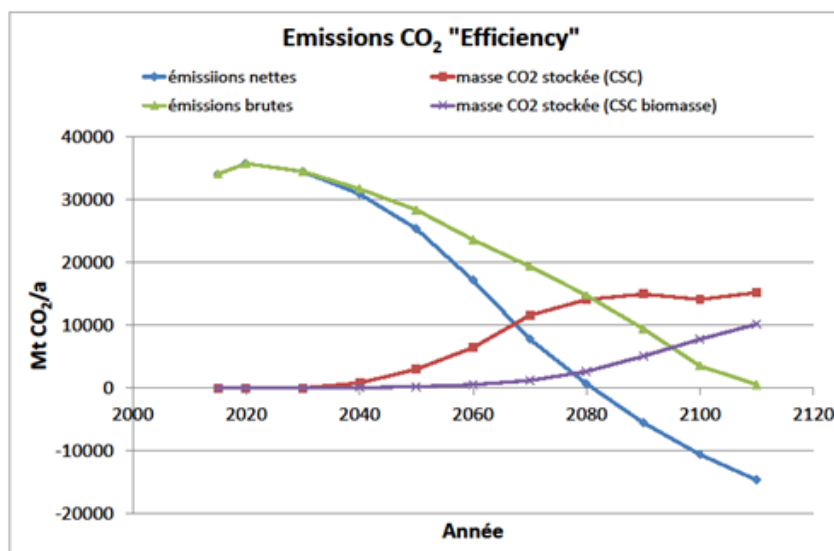


Figure 1

Émissions de CO₂ (brutes et nettes) et masse de CO₂ stockée par CSC (totale et par traitement de la biomasse) du scénario Efficiency. Nous avons décalé la référence temporelle de 10 ans par rapport au scénario originel.

La figure 1, montre que les émissions brutes de CO₂ (courbe verte - somme des émissions nettes et de la masse de CO₂ stockée par CSC) devraient s'annuler aux environs de 2110. Le captage et stockage de gaz carbonique joue un rôle important dans la décroissance de la quantité de CO₂ restant dans l'atmosphère. Sur la Figure 1, on voit également l'évolution de la masse de CO₂ séquestrée chaque année (courbe rose) proposée dans le scénario "Efficiency". Ce stockage s'élève à 15 Gt/an à la fin du siècle, avec une croissance rapide aux environs de 2050. En 2100, le CO₂ stocké par CSC est dû principalement à la production de bioénergie (BECSC - courbe mauve). La quantité cumulée de CO₂ stocké atteint 800 Gt à la fin du siècle. Reste à savoir si la séquestration d'une masse aussi énorme de CO₂ sera possible. Même au cas où la technologie serait effective, la quantité de CO₂ présent dans l'atmosphère augmenterait de 1100 Gt en 2100 alors que, si la

technologie CSC ne se développait pas, cette quantité serait de 1900 Gt, trois fois plus que le budget CO₂ autorisé. Berger, A. et al. (2017) ont montré qu'un développement rapide et substantiel de la production nucléaire serait efficace pour réduire l'usage des combustibles fossiles ainsi que les émissions de CO₂ associées. Dans la suite de cet article, nous conservons le taux de croissance de la puissance nucléaire décrit par Berger, A. et al. (2017).

Nous nommons le présent scénario "Efficiency-N". La figure 2 montre la croissance de la production nucléaire avec le temps. De 2030 à 2050, la puissance nucléaire nouvellement construite atteindrait 4350 GWe, soit une croissance annuelle moyenne de la puissance installée de 217,5 GWe/an (environ 5% de croissance annuelle - figure 2). 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 43 réacteurs, soit un rythme d'environ 4 GWe par an (10%/an). En 2050, la production d'électricité du scénario Efficiency atteindrait 150 EJ. La production d'électricité en France en 1990 atteignait environ 400 TWh. En admettant que le rythme de construction de réacteurs pourrait être proportionnel à la production, on voit que pour une production 100 fois supérieure à celle que la France avait en 1990 le rythme de construction en 2050 pourrait atteindre 400 GWe/an, très au-delà de la croissance de 217 GWe/an du scénario "Efficiency-N".

Nous avons fait l'hypothèse initiale que chaque MWh de production nucléaire remplace 2,7 MWh de production fossile, suivant en cela la règle de substitution primaire donnée par le programme GEA. La substitution est obtenue en premier lieu en remplaçant la production d'électricité fossile par une production nucléaire, puis par le remplacement de la production fossile de chaleur (surtout par le gaz naturel) par de l'électricité et, finalement, par le remplacement de la mobilité fossile (essence, diesel, gaz naturel) par une mobilité électrique.

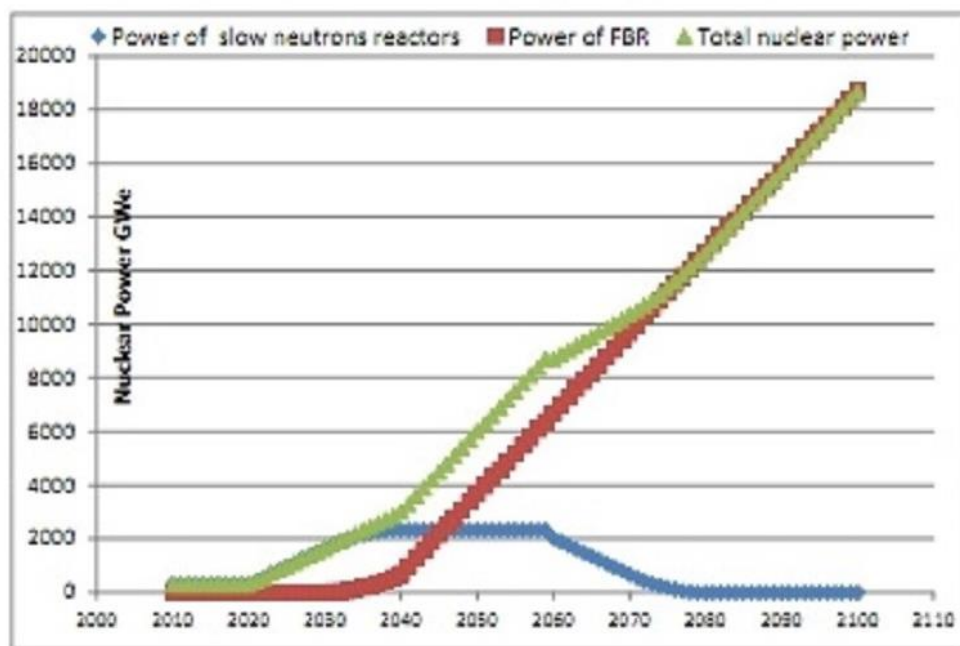


Figure 2 - La puissance nucléaire commune aux scénarios MESSAGE Supply-N, Mix-N et Efficiency-N.

Avec ces hypothèses, nous obtenons la disparition rapide de la composante fossile comme le montre la figure 3. L'utilisation des fossiles dans le secteur énergie cesserait dès 2060.

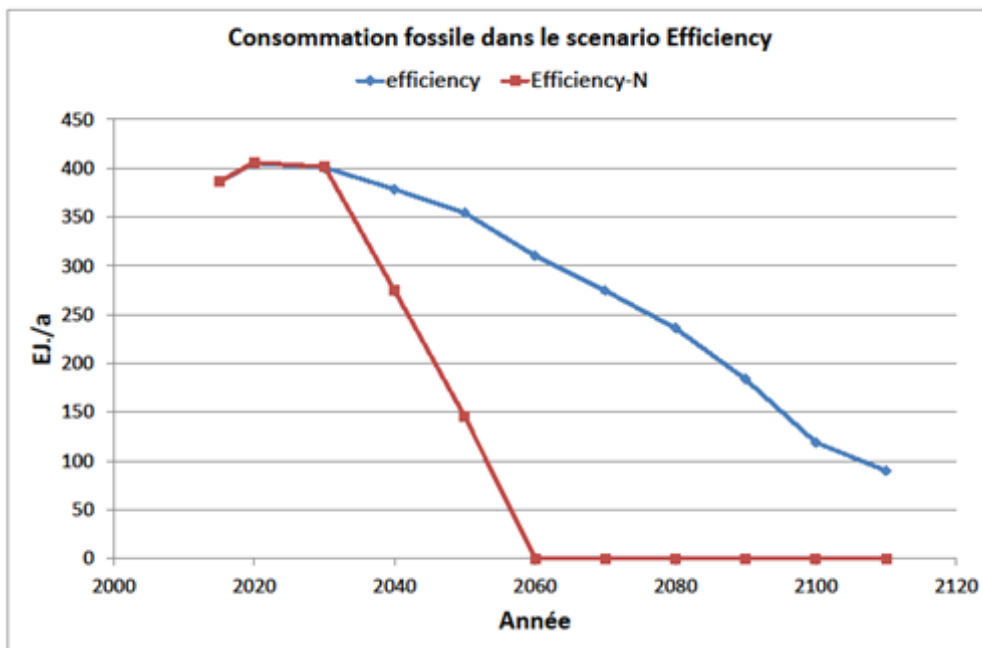


Figure 3 - Consommation de fossiles dans les scénarios Efficiency et Efficiency-N.
 1 EJ = 10^{12} Joules = 277 TWh = 24 Mtep

On s'attend, avec la disparition de la contribution des fossiles dans le secteur énergétique, à un comportement semblable des émissions de CO₂, comme le montre la figure 4. Dans la figure, on montre les émissions du scénario Efficiency standard avec et sans CSC. Pour le scénario Efficiency-N, les émissions de CO₂ sont montrées sans CSC, et aussi avec du CSC quand celui-ci est obtenu au seul moyen de l'énergie extraite de la biomasse énergie (bioénergie).

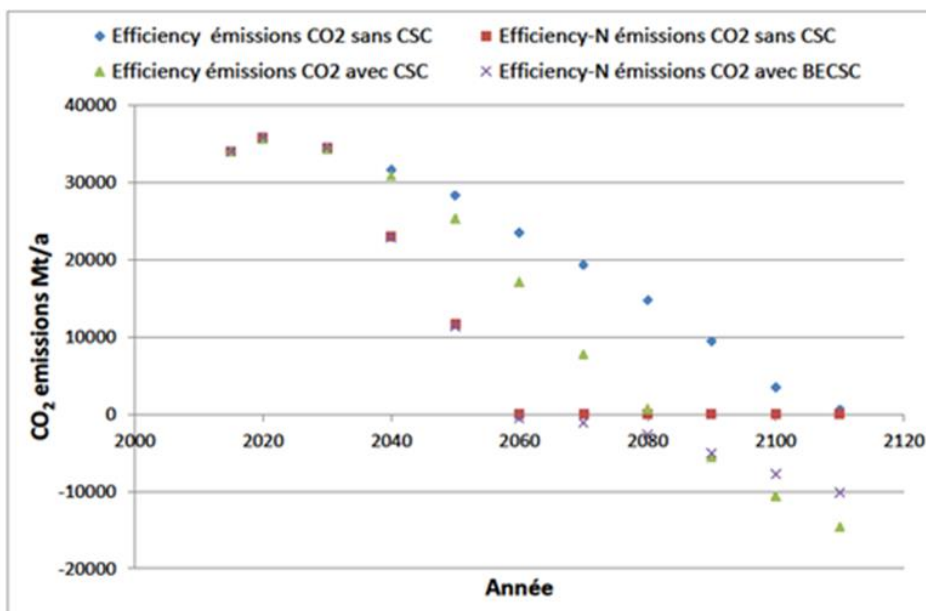


Figure 4 - Émissions annuelles de CO₂ dans le scénario Efficiency d'origine avec et sans CSC, et dans le scénario Efficiency-N sans et avec CSC appliquée à la production de bioénergie. Noter que les quatre scénarios atteignent un maximum voisin de 37 Gt/an, soit une valeur inférieure à la recommandation de Figueres, C. et al.

Dans la figure 4, les émissions négatives résultent du solde des émissions fossiles et du CSC des

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 CO₂ capté à partir de la combustion de biomasse est soustrait au contenu CO₂ de l'atmosphère.

La figure 5 montre les émissions cumulées résultant des émissions annuelles de la figure 4.

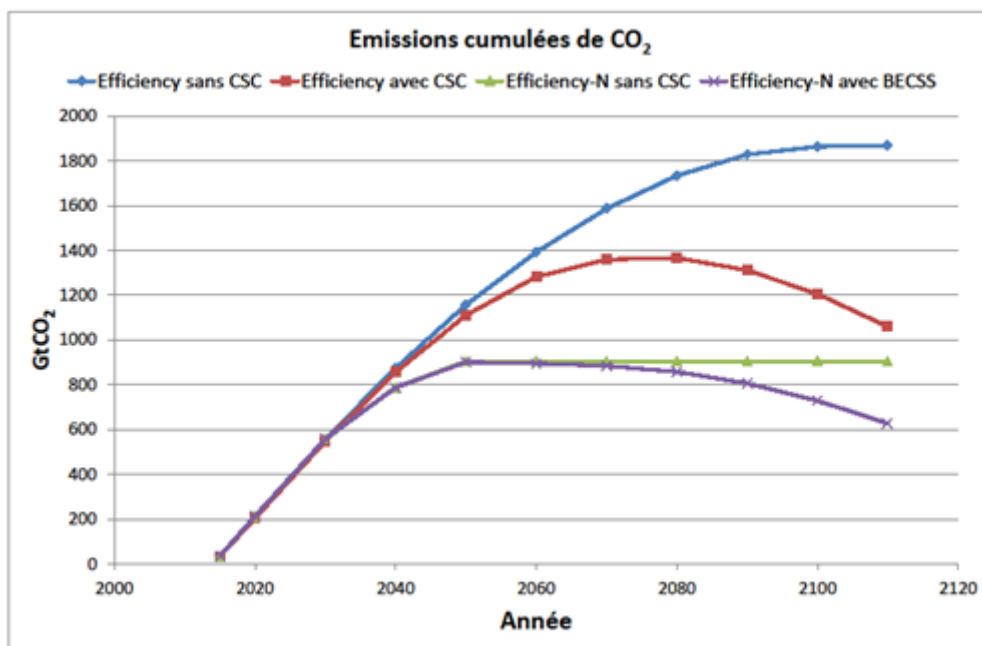


Figure 5 - Émissions de CO₂ cumulées avec et sans CSC

Le scénario nucléaire Efficiency-N conduit à une stabilisation du CO₂ contenu dans l'atmosphère sans nécessiter de CSC. Il limite l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère 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. Dans la mesure où le CO₂ de l'atmosphère sera stabilisé (zéro émissions anthropiques) pendant quelque temps, il commencera à décroître du fait d'un accroissement de l'absorption par les océans et par la biomasse terrestre. On peut supposer que le niveau préindustriel de concentration de CO₂ dans l'atmosphère pourra être de nouveau atteint à la fin du 22^e siècle. Ce "retour à la normale" pourrait être obtenu plus rapidement au moyen d'une bonne gestion de la biomasse.

Captage-stockage du CO₂ de la biomasse pour rafraîchir l'atmosphère

Dans le scénario MESSAGE Efficiency, la biomasse produit 220 EJ/an en 2100, surtout dans le secteur des transports. Presque la moitié du CO₂ produit est supposée captée et stockée. Si on considère que la combustion de biomasse émet 80 Mt de CO₂ par EJ, on obtient l'évolution de la masse de dioxyde de carbone emmagasinée dans l'atmosphère chaque année du fait de la combustion de biomasse de la figure 6. Cette masse doit être soustraite des émissions anthropiques de CO₂. Le résultat de cette opération est montré dans la figure 5 (courbe mauve). La condition qui correspond à la limitation à 1,5 °C de l'augmentation de la température globale moyenne de surface (GMST) par rapport à la période préindustrielle est satisfaite à 600 Gt, sur une tendance décroissante. Le CO₂ stocké s'élève à 280 Gt si le CSC n'est appliqué qu'à la bioénergie, comparé aux 800 Gt du scénario MESSAGE Efficiency originel.

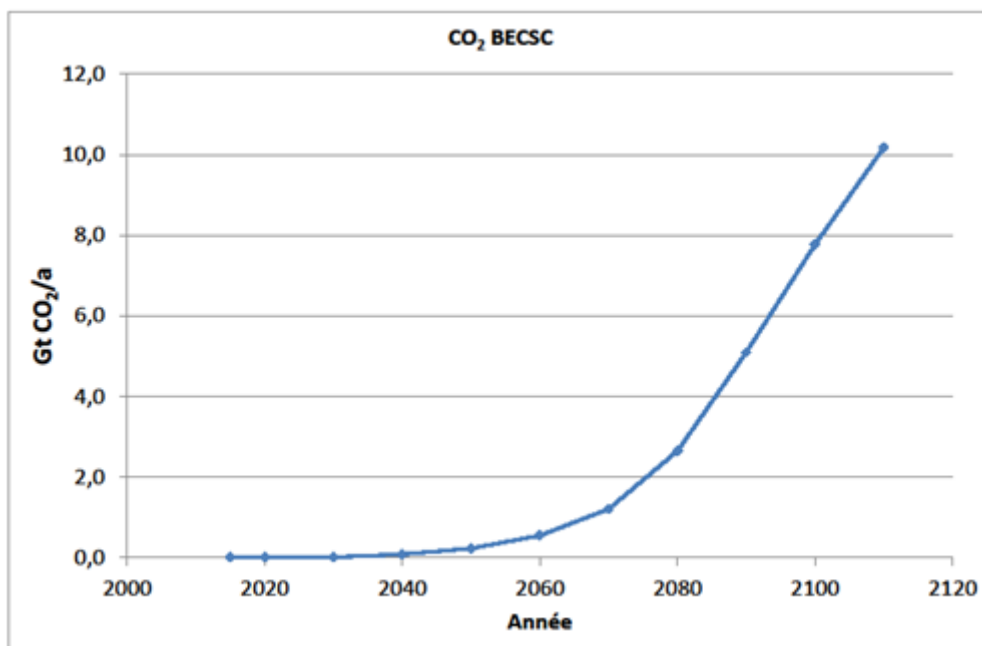


Figure 6 - Évolution de la masse de CO₂ stockée annuellement avec le CSC appliqué à la bioénergie dans le scénario MESSAGE Efficiency

Utilisation du surplus nucléaire

Comme le montre la figure 3, les combustibles fossiles ne sont plus utilisés dans le secteur énergie à partir de 2060 environ. Il n'est alors plus strictement nécessaire de continuer la croissance de la production nucléaire au-delà de cette date pour réduire les émissions de CO₂. Les deux possibilités, limiter ou non la production nucléaire, sont montrées dans la figure 7.

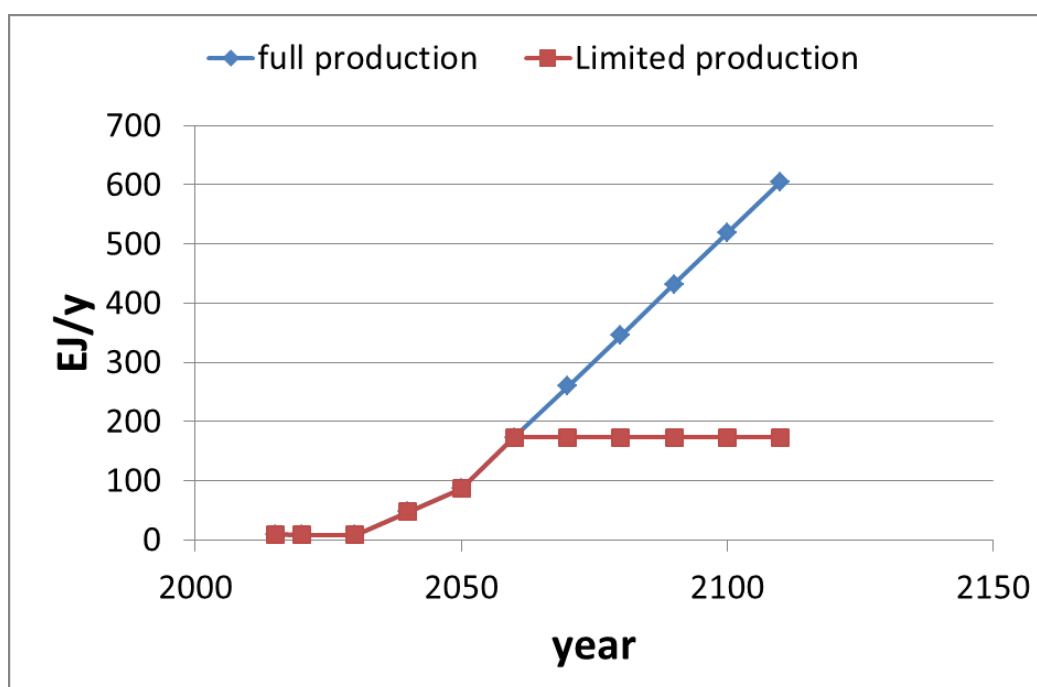


Figure 7 - Développements possibles de la production nucléaire dans le scénario Efficiency-N. Le développement limité satisfait la limite de 1,5 °C dans le scénario MESSAGE Efficiency-N. La production accrue permet la production de plus d'énergie par rapport au scénario MESSAGE Efficiency d'origine,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

Les deux options conduisent aux mêmes schémas d'émissions de CO₂. Il peut y avoir des différences dans les consommations globales d'énergie, comme le montre la figure 8. Celle-ci montre l'évolution de la fourniture totale d'énergie primaire (TPES - Total Primary Energy Supply) dans le cas où la production nucléaire est plafonnée à 173 EJ/an et dans le cas où elle n'est pas limitée. Dans ce dernier cas, le TPES est presque le double de ce qu'il est lors du plafonnement de la production nucléaire à 173 EJ/an. Noter que, avec le plafonnement, le TPES est pratiquement égal à celui de la version sans nucléaire du scénario Efficiency. Ceci est dû à ce que nous avons appliqué la convention de substitution selon laquelle 1 MWh de production nucléaire est l'équivalent de 2,7 MWh d'énergie primaire fossile.

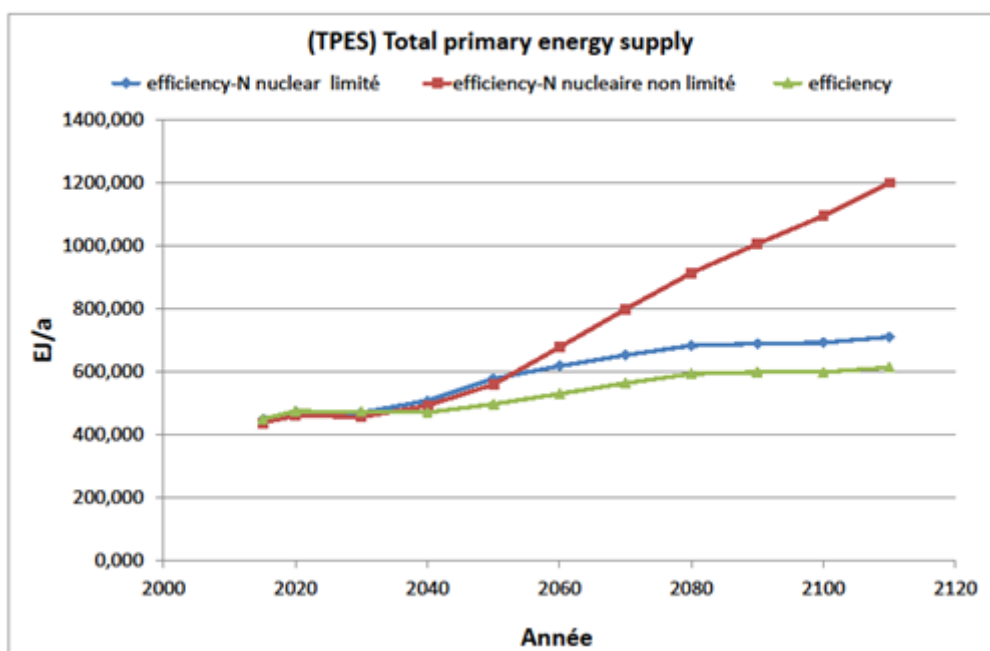


Figure 8 - Énergie primaire totale (définition de l'énergie primaire selon la convention « directe » du GEA) dans le scénario Efficiency originel et dans les scénarios Efficiency-N avec et sans limitation de la puissance nucléaire.

Le surplus de chaleur issu de la production nucléaire pourrait être utilisé pour carboniser la biomasse et stocker le carbone ainsi formé dans d'anciennes mines de charbon, par exemple. Sur le plan économique, il faudrait probablement fixer un prix à ce carbone séquestré afin que l'opération soit rentable. Noter qu'après l'obtention d'une stabilisation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère en 2060 (figure 5), son rythme de décroissance n'est probablement pas un facteur essentiel, à condition que le niveau de 2000 soit atteint avant 2200.

Une autre utilisation possible de l'énergie nucléaire supplémentaire serait de diminuer la part des énergies renouvelables, dans l'éventualité où leur développement intensif rencontrerait des difficultés.

Conclusion

Le remplacement de l'énergie fossile par l'énergie nucléaire dans le scénario MESSAGE-Efficiency permet la fin de l'utilisation des fossiles en 2060 plutôt qu'en 2100. Avec un stockage de 800 Gt de CO₂, le scénario Efficiency originel conduit quand même à l'injection cumulée d'une masse de 1100 Gt de CO₂ dans l'atmosphère, alors qu'avec la séquestration de seulement 275 Gt de CO₂, dans le scénario MESSAGE Efficiency-N la masse cumulée de CO₂ injectée dans l'atmosphère se limite à 600 Gt, ce qui est compatible avec le prérequis pour les 1,5 °C. La production nucléaire nécessaire pour l'obtention de ce résultat atteint 173 EJ en 2060 (47 921 TWh), produits au moyen d'une puissance nucléaire installée de 6065 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 en 2110. Ceci permettrait une augmentation de la fourniture d'énergie primaire (selon la convention de l'énergie primaire « directe » du GEA) des 617 EJ/an du scénario Efficiency originel à 1132 EJ/an dans le scénario Efficiency-N. Dans le Tableau 1, nous résumons les résultats obtenus dans le scénario Efficiency-N et nous les comparons aux résultats du scénario MESSAGE Efficiency originel.

	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 ₂ /an net Gt	34	-0,5	-10,2	-14
CO ₂ /an séquestré Gt	0	0,5	10,2	15,2
CO ₂ cumulé séquestré Gt	0	8	276	801
CO ₂ cumulé injecté dans l'atmosphère Gt	34	896	627	1270

Tableau 1 - Synthèse du mix énergétique et des émissions de CO₂ dans le scénario Efficiency-N en 2015, 2060 et 2110 avec deux possibilités de production nucléaire ; les nombres entre () correspondent à une production nucléaire constante après 2060.

Les auteurs

André Berger¹, Tom Blees², Francois-Marie Breon³, Barry W. Brook⁴, Philippe Hansen⁵, Ravi.B.Grover⁶, Claude Guet⁷, Weiping Liu⁸, Frédéric Livet⁹, Hervé Nifenecker¹⁰, Michel Petit¹¹, Gérard Pierre¹², Henri Prévot¹³, Sébastien Richet¹⁴, Henri Safa¹⁵, Massimo Salvatores¹⁶, Michael Schneeberger¹⁷, Suyan Zhou¹⁸

Save the Climate (Sauvons Le Climat)

¹André Berger, Professor Université catholique de Louvain
Earth and Life Institute Georges Lemaître, Center for Earth and Climate Research

- andre.berger@uclouvain.be
- ²Tom Bles President of The Science Council for Global Initiatives. Author and energy consultant
tomsciencecouncil@gmail.com
- ³François-Marie Breon, Save The Climate (Sauvons Le Climat), "Lead author of IPCC-2013"
breon@lsce.ipsl.fr
- ⁴Barry W. Brook, Private Bag 55, School of Biological Sciences, University of Tasmania, 7001, Australia
Barry.Brook@utas.edu.au
- ⁵Philippe Hansen, dipl. Ecole Normale Supérieure de Lyon, editor of www.energie-crise.fr,
Save The Climate (Sauvons Le Climat)
hansenph@wanadoo.fr
- ⁶Ravi Grover, Homi Bhabha Chair, Homi Bhabha National Institute
rbgrover@hbni.ac.in
- ⁷Claude Guet; Visiting Professor, Programme Director, Students/Research,
Energy Research Institute Nanyang Technological University, Singapore
claudio.guet@gmail.com
- ⁸Weiping Liu, Head of CARIF project at CIAE
wpliu@ciae.ac.cn
- ⁹Frédéric Livet, Research Director at Univ. Grenoble-Alpes, SIMAP, Grenoble, France
et: CNRS, SIMAP, F-3800 Grenoble, France CNRS, Save The Climate
(Sauvons Le Climat)
frederic.livet@simap.grenoble-inp.fr
- ¹⁰Hervé Nifenecker, Professor UIAD (Universite Interage du Dauphine),
Founder chairman of Save The Climate (Sauvons Le Climat)
herve.nifenecker@free.fr
- ¹¹Michel Petit, Chairman of the Scientific Council of "Save the Climate",
former member of the IPCC governing body, former chairman of the French Meteorological Society.
michel.petit@m4x.org
- ¹²Gérard Pierre, Honorary Physics Professor at Bourgogne University, Dijon France,
Save The Climate (Sauvons Le Climat)
gerard.pierre18@wanadoo.fr
- ¹³Henri Prévot, Save The Climate (Sauvons Le Climat)
henri.prevot@wanadoo.fr
- ¹⁴Sebastien Richet Save The Climate (Sauvons Le Climat)
S.Richet@iaea.org
- ¹⁵Henri Safa, Deputy Director of the International Institute of Nuclear Energy, Scientific Direction of the
Nuclear Energy Division at CEA, member of ANCRE, France.
Henri.safa@cea.fr
- ¹⁶Massimo Salvatores, Consultant in Reactor and Fuel Cycle Physics and Senior Scientific Advisor at the Idaho
National Laboratory.
salvatoresmassimo@orange.fr
Former Head of the Reactor and Fuel Cycle Physics Division at CEA-Cadarache (France)
- ¹⁷Michael Schneeberger, Dipl.Ing. Dr.Tech., Austrian Nuclear Society Honorary Member, Save The
Climate (Sauvons Le Climat)
m.schneeberger@nosuchhost.net
- ¹⁸Mrs.Suyan Zhou, Director of Institutional Delegation of EDF to Chine;
suyan.zhou@edf.fr