

Oser le nucléaire pour trouver la solution au problème climatique !

Hervé Nifenecker

Les scénarios retenus par le Giec (Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) qui permettent de limiter l'augmentation de température globale de la planète à 2° d'ici 2100 induisent un stockage massif de CO₂ après captage, pouvant atteindre 50 milliards de tonnes par an en 2100. Pour atteindre cet objectif climatique, il serait préférable de développer l'énergie nucléaire et d'amorcer son expansion dès 2020. Ce qui aurait pour avantage également de réduire, voire de réduire fortement, les besoins de stockage de CO₂ et de supprimer le recours aux combustibles fossiles quelques décennies avant la fin de ce XXI^e siècle.

Plusieurs scénarios ont été proposés par le Giec pour limiter l'augmentation de la température à 2° par rapport aux valeurs préindustrielles. D'une façon générale, ces scénarios reflètent une méfiance vis-à-vis de l'énergie nucléaire. Cette méfiance repose, explicitement ou non, sur des considérations sociétales, morales ou idéologiques. Ces préoccupations sont, bien entendu, légitimes, mais elles ne doivent pas occulter les données techniques et économiques concernant cette énergie. Ceci est d'autant plus nécessaire que les réserves vis-à-vis de l'énergie nucléaire s'expriment surtout en Europe, mais sont beaucoup plus discrètes dans des pays comme la Chine et l'Inde qui détermineront l'évolution du climat pendant ce siècle. Les États-Unis en ont une approche largement économique et le nucléaire a peu de chances de s'y développer aussi longtemps que le boom du gaz de schiste durera. Les anciens pays de la CEI sont favorables à l'énergie nucléaire. L'Afrique, le Moyen-Orient et l'Amérique latine semblent en avoir une approche plus pragmatique qu'idéologique.

Du reste, une considération objective des chiffres montre que non seulement les craintes

suscitées par le nucléaire sont largement fantasmagiques, mais que le nucléaire est une, sinon la, technique de production d'électricité responsable du moins de décès par unité d'électricité produite (voir Annexe I). Elle minimise également l'impact écologique par une mobilisation très faible des surfaces nécessaires et un impact pratiquement nul sur la biodiversité.

Un état de la construction de réacteurs dans le monde (Annexe II) confirme que c'est en Asie et en Russie que le nucléaire se développe le plus rapidement. Selon l'IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*), le nucléaire devrait se développer essentiellement dans les pays émergents ou en développement.

La prise en considération de scénarios basés sur des technologies matures et sans tabou idéologique est une nécessité si l'on prend au sérieux les questions du réchauffement climatique et de la limitation des réserves de combustibles fossiles.

C'est dans cet esprit que se situe cet article qui a l'ambition de déterminer la contribution que pourrait apporter la production d'électricité nucléaire à la satisfaction des besoins énergétiques de l'humanité avec, pour seules

limitations, celles qui relèvent de la physique, de la technique et de l'économie. Contrairement au stockage massif du CO₂ et à la généralisation de la production d'électricité solaire, par exemple, le nucléaire n'a pas à démontrer sa faisabilité technique et économique¹. Par contre, l'ampleur de son développement, indépendamment des questions d'acceptabilité publique, peut être limité par la disponibilité de la ressource. Par prudence, on ne prendra en compte que les technologies éprouvées comme celles des réacteurs refroidis à l'eau (REP, REB, CANDU) et celles des réacteurs sur-générateurs refroidis au sodium².

1. Les trajectoires RCP du Giec

Pour pouvoir mener en parallèle des études de scénarios d'émission et, donc, de scénarios énergétiques et des simulations de l'évolution du climat, le Giec a défini une approche en terme de « *Representative Concentration Pathway* » (RCP). Ces évolutions des concentrations sont considérées comme représentatives du possible, allant d'émissions maîtrisées à un accroissement débridé avec deux niveaux de maîtrise intermédiaires. Chacun des 4 RCP est référencé par la valeur calculée par le modèle intégré³ dont il est issu pour le forçage radiatif

1. La faisabilité du nucléaire est, bien sûr, démontrée pour les réacteurs refroidis à l'eau (réacteurs à eau pressurisée REP, à eau bouillante REB et à eau lourde CANDU), mais aussi pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium de type Phénix, Super Phénix dont des exemplaire continuent à fonctionner en Russie (BN600) et sont en construction en Inde (PFBR Kalpakkam 500 MW), en Russie (BN800) avec 2 BN800 commandés par la Chine.

2. En particulier, nous ne prenons pas en compte la possibilité d'extraire l'uranium de l'eau de mer, alors que les océans en contiennent 4 milliards de tonnes. En effet, les expériences d'extraction de l'uranium de l'eau de mer ne concernent encore que quelques kilogrammes. De même, aucun réacteur ne fonctionne actuellement sur la base du cycle thorium-uranium 233, et aucun réacteur à combustible liquide n'est opérationnel.

3. Les modèles retenus par le Giec sont issus de travaux des groupes IMAGE piloté par le « *Netherlands Environmental Assessment Agency* », MiniCAM piloté par le « *Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute* » (JGCR), AIM piloté par le « *National Institute for Environmental Studies* » (NIES, Japon) et MESSAGE piloté par le « *International Institute for Applied Systems Analysis* » (IIASA, Autriche).

dû aux émissions de gaz à effet de serre en 2100. La Figure 1 montre l'évolution temporelle des forçages radiatifs calculés par les modèles intégrés choisis par le Giec. À chaque RCP, correspond une évolution de la concentration (additionnelle par rapport aux valeurs préindustrielles) des gaz à effet de serre, comme on peut le voir sur la Figure 2. Ce sont ces évolutions des concentrations des divers gaz qu'il est recommandé aux modélisateurs du climat d'utiliser pour faciliter la comparaison de leurs résultats.

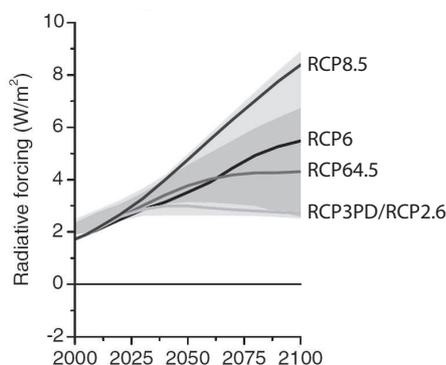


Figure 1. Évolution du forçage radiatif pour les 4 trajectoires retenues par le Giec : RCP 2.6, 4.5, 6 et 8.5.

Seul le scénario RCP 2.6 permet une stabilisation au cours de ce siècle (http://fr.wikipedia.org/wiki/Sc%C3%A9nario_RCP)

On constate sur les deux figures que seul le RCP 2.6 présente une stabilisation au cours de ce siècle. La décroissance de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère de cette trajectoire est obtenue grâce à une augmentation du stockage de ce dernier, soit sous forme d'accroissement de la biomasse, soit sous forme de captage stockage du CO₂ résultant de la combustion de cette dernière.

2. Les scénarios de l'IIASA

Nous utilisons, ici, les données accessibles sur le site de l'IIASA⁴. La discussion qui suit ne porte que sur les émissions de CO₂. Deux catégories de scénarios permettent d'atteindre

4. <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/ene/geadb/dsd?Action=htmlpage&page=regions>

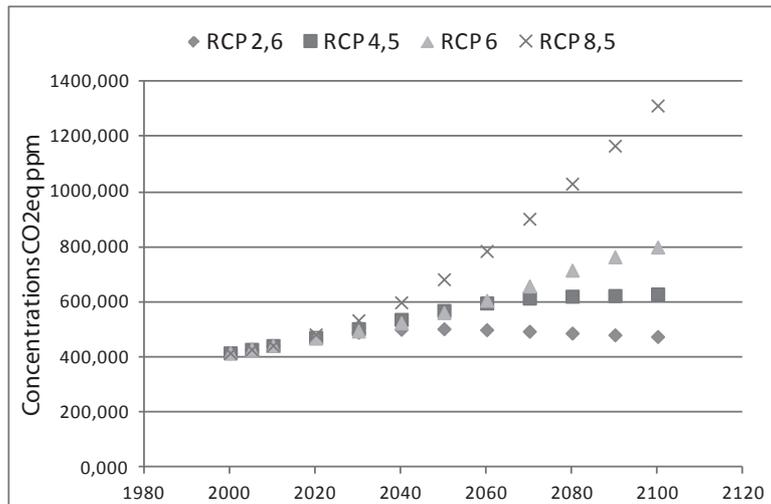


Figure 2. Évolution des concentrations des GES en ppm de CO₂ équivalent pour les 4 RCP choisis par le Giec
 (<http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=compare>)

un RCP de 2.6 : les catégories dénommées IMAGE et MESSAGE. Ces deux catégories sont elles-mêmes subdivisées en trois scénarios : Supply, Mix et Efficiency qui se distinguent par un ordre décroissant de consommation énergétique. Tous ces scénarios impliquent la capture et le stockage de quantités importantes de CO₂.

Le tableau 1 montre que les besoins de stockage de la catégorie IMAGE sont beaucoup plus importants que ceux de la catégorie MESSAGE car la catégorie IMAGE fait beaucoup plus appel aux combustibles fossiles que la catégorie MESSAGE, comme on peut le voir sur la Figure 3. Le scénario IMAGE ne tient d'ailleurs pas compte de la disponibilité de la ressource fossile.

Tableau 1			
Masse de CO₂ stockée annuellement en 2100 (millions de tonnes)			
	Supply	Mix	Efficiency
MESSAGE CO ₂ storage Gt	23 915	15 176	15 199
MESSAGE Final energy EJ	755	616	427
IMAGE CO ₂ storage Gt	50 033	43 223	26 563
IMAGE Final energy EJ	733	570	397

Rappelons que les émissions mondiales actuelles de CO₂ atteignent 37 milliards de tonnes par an (23 dues au charbon, 10 au pétrole, 7 au gaz). Les expériences de captage stockage de CO₂ portent sur quelques millions de tonnes par an. Les valeurs des énergies finales des différents scénarios sont également indiquées.

Notre objectif étant de réduire le plus rapidement possible l'utilisation des combustibles fossiles pour réduire aussi les émissions de CO₂, nous ne prendrons en considération que la catégorie MESSAGE et ses trois scénarios. Ajoutons qu'il est probable que les scénarios IMAGE sont incompatibles avec la disponibilité effective des combustibles fossiles.

Les principales variables sur lesquelles jouent ces trois scénarios sont : la consommation énergétique, le captage du CO₂ et le mix énergétique. Le tableau 2 donne les valeurs des paramètres globaux prévus pour 2100, le tableau 3 (a) donne une image du mix énergétique mondial correspondant à ces trois scénarios en 2100 et le tableau 3 (b) précise le cumul de la consommation des combustibles fossiles en 2100 ainsi qu'une estimation des ressources demeurant exploitables à cette date. On remarque que les ressources exploitables en 2100 dépendent (faiblement) des scénarios.

Les scénarios ont tous l'ambition de résorber les différences de consommation individuelle

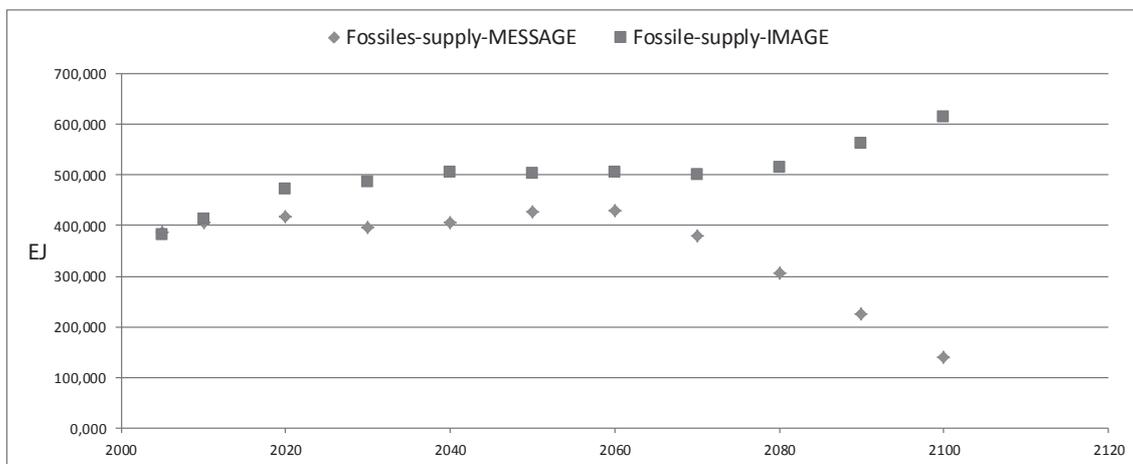


Figure 3. Recours aux combustibles fossiles (énergie primaire) pour les scénarios Supply des catégories IMAGE et MESSAGE

Tableau 2								
Principaux paramètres des scénarios RCP 2.6 de l'IIASA								
	Énergie finale EJ/an	Énergie primaire EJ/an	Capture CO ₂ Mt	Electricité EJ/an Énergie secondaire*	CO ₂ émissions nettes Mt	CO ₂ émissions brutes Mt	PIB G\$	Population (millions)
2010	343	475	0	73	36 000	36 000	45 237	6 900
Supply	755	1 051	23 900	677	-18 350	5 550	366 139	9 500
Mix	616	850	15 175	487	-13 288	1 887	366 139	9 500
Efficiency	427	614	15 198	297	-14 630	548	366 139	9 500

Les émissions nettes de CO₂ sont égales aux émissions brutes, essentiellement dues à la combustion des fossiles, diminuées du CO₂ stocké. Les valeurs affichées correspondent à 2100.

* Comptée en énergie secondaire, l'électricité inclue la consommation de la branche énergie (transmission, consommation des réacteurs, etc.) et surtout la production d'hydrogène.

Tableau 3 (a)								
Mix énergétique mondial en 2100 pour les trois scénarios (énergies primaires, EJ)								
	Charbon	Gaz	Pétrole	Nucléaire	Biomasse	Hydro	Vent	Soleil
2010	136	100	165	10	45	12	1,2	1
Supply EJ	75	64	1,7	251	221	33	89	321 (289)
Supply GWe				8 600			9 750	81 300
Mix EJ	18	100	3,8	138	221	33	70	272 (235)
Efficiency EJ	41	46	3,3	0	221	23	34	249 (220)

On indique également les puissances installées pour le nucléaire, l'éolien et le solaire. Pour le soleil, les chiffres entre parenthèses correspondent à la production d'électricité ; le complément correspond à une utilisation directe de la chaleur solaire.

Tableau 3 (b)

Cumul des consommations de combustibles fossiles et ressources exploitables en 2100 pour les trois scénarios de l'IIASA			
	Coal ZJ	Gaz ZJ	Pétrole ZJ
Cumulative consumption 2100 Supply	13,6	14,9	12
Remaining 2010 Supply	92	15	8
Cumul consommation 2100 MIX	10,4	15,0	11,9
Reste 2100 exploitable MIX	85	3,5	0,95
Cumul consommation 2100 Efficiency	10,08	11,0	12,0
Reste 2100 exploitable Efficiency	85	6,5	0,8

1ZJ = 1 000 et EJ = 24 Gtep*

* En 2010, l'ASPO donne des réserves de 21 ZJ pour le charbon, 8 ZJ pour le pétrole et autant pour le gaz. Estimations beaucoup plus pessimistes, surtout pour le charbon, que celles des scénarios MESSAGE de l'IIASA. Par ailleurs l'IIASA elle-même, dans le chapitre 7 de son livre GEA, 2012: Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future (Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria) donne des réserves maximales de 21 ZJ pour le charbon, 7,6 pour le pétrole et 7,1 pour le gaz. Il est vrai que les « réserves non conventionnelles » atteignent 5,6 ZJ pour le pétrole et 67,1 pour le gaz, tandis que les ressources dépassent 300 ZJ pour le charbon (http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA_Chapter7_resources_lowres.pdf).

entre les différents pays, comme on peut le voir dans l'Annexe « Régions »

On remarque l'importance de la production solaire en 2100. Les 289 EJ envisagés pour le scénario Supply correspondent à 90 000 TWh, soit, pour un facteur de charge de 1 000 h/an, une puissance de 90 000 GW et une surface au sol d'environ 3 millions de km². La question du réalisme d'une telle production solaire est posée⁵. De son côté, la production de 221 EJ de biomasse⁶ correspondrait à l'exploitation d'environ 2 millions de km².

Parmi les combustibles fossiles, les ressources exploitables de gaz et, surtout, de pétrole disparaissent pratiquement au cours du siècle actuel, le charbon gardant une marge

confortable. La contrainte climatique seule limitant sa consommation dans les trois scénarios RCP 2.6.

Le scénario Efficiency est affiché comme un scénario de sortie du nucléaire. De ce fait, c'est un scénario de limitation drastique de la consommation énergétique puisque la consommation mondiale par tête est réduite à 1 tep/hab, soit près de 4 fois moins que la consommation actuelle dans les pays de l'OCDE. Par rapport au scénario Supply, la baisse de consommation d'énergie finale atteint 40 %, soit 328 EJ. La production nucléaire représente, à elle seule, 76 % de cette différence.

Même moins importants que dans le scénario IMAGE, les tonnages de CO₂ qui doivent être captés et stockés pour atteindre l'objectif RCP 2.6 sont considérables, donc un objectif difficilement accessible. En fin de période, l'essentiel de ce captage porte sur le CO₂ produit par la combustion de la biomasse, d'où des émissions nettes de CO₂ négatives.

3. Le scénario Supply de l'IIASA

Le scénario dit Supply de forte consommation énergétique envisage 251 EJ de production

5. La production d'hydrogène est importante. En 2100, dans le scénario Supply, elle correspond à 245 EJ, dont 157 produite par l'électricité (sans doute préférentiellement par le solaire), 37 par la biomasse et 51 par les combustibles fossiles, qui passerait par un maximum de 120 TWh en 2080. L'hydrogène serait la principale source d'énergie pour les transports, atteignant 131 TWh pour un total de 222 TWh (seulement 26 TWh pour les transports électriques). La production de chaleur solaire atteindrait 37 TWh.

6. La biomasse contribue à la production de biocarburants à hauteur de 56 TWh dont 49 avec CSC, d'hydrogène à hauteur de 37 TWh tous avec CSC.

d'électricité nucléaire, soit 69 000 TWh⁷, soit encore la production de 8 600 réacteurs de 1 GWe. L'évolution proposée de la production nucléaire dans ce scénario est représentée dans la Figure 4. On constate que la quasi-totalité du parc nucléaire serait construite entre 2050 et 2090, soit une période de 40 ans⁸. Pendant cette période, la production augmenterait de 200 EJ, soit celle de près de 7 000 réacteurs de 1 GWe. La France a mis en service 50 GWe en une dizaine d'années. Au niveau mondial, le rythme retenu par l'IIASA est comparable à celui que la France a mis en œuvre dans les

années 1980 : 50 réacteurs en 10 ans, soit un rythme de 200 en 40 ans et 20 000 pour un rapport 100 des populations (6 milliards d'humains *vs.* 60 millions de Français).

Une caractéristique du scénario Supply est la part très importante de l'électricité dans la consommation finale, qui passe de 21 % en 2010 à 89 % en 2100. Une des raisons de cette augmentation est que les besoins de transport en 2100 seraient essentiellement satisfaits par l'électricité et l'hydrogène, lui-même produit à partir d'électricité.

La Figure 5 montre l'évolution de la production fossile. On constate qu'elle plonge au moment où la production nucléaire augmente rapidement : elle est divisée par 4 entre 2050 et 2100.

7. À noter qu'il n'est pas prévu d'utiliser la cogénération nucléaire.

8. De 2010 à 2050, la puissance des réacteurs est multipliée par 4.

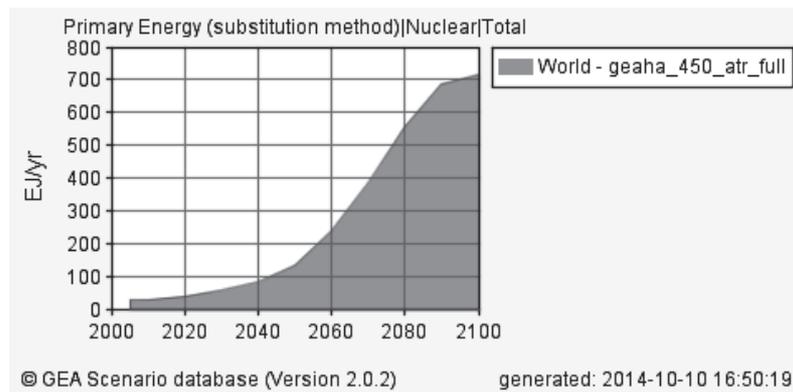


Figure 4. Évolution du parc nucléaire dans le scénario Supply (mesure en énergie primaire par substitution)

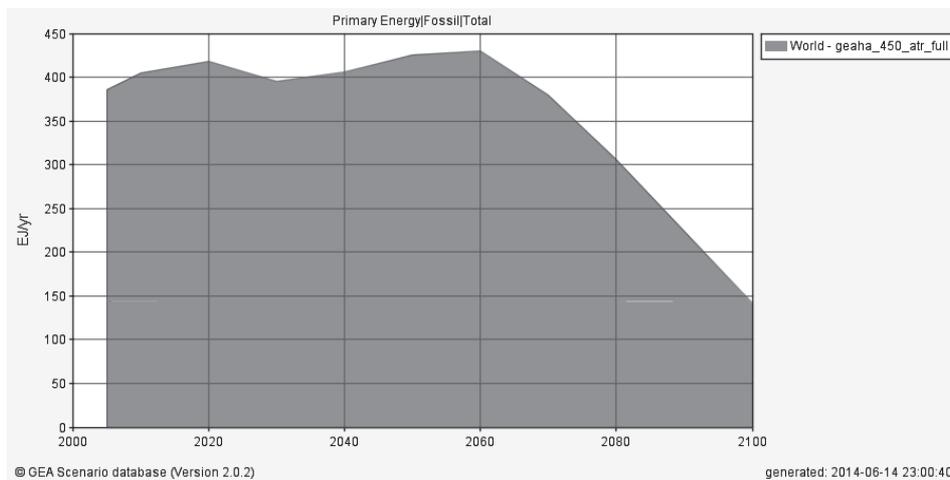


Figure 5. Évolution de la production fossile dans le scénario Supply

La question est de savoir s'il ne serait pas possible de gagner quelques dizaines d'années dans l'accélération de la production nucléaire, entraînant par là une baisse plus rapide des émissions qui pourrait se produire entre 2020 et 2060 au lieu de 2060 et 2100. La quantité de CO₂ injectée dans l'atmosphère serait alors considérablement réduite, ce qui diminuerait fortement les besoins de CSC (capture et séquestration du CO₂) – une technologie encore mal maîtrisée et coûteuse – et une contribution plus raisonnable du solaire et de la biomasse. L'objet de la présente étude est de déterminer si, effectivement, une telle accélération du déploiement du nucléaire serait physiquement et techniquement réalisable. Nous nous concentrerons d'abord sur le scénario Supply, mais nous étudierons aussi, sommairement, le scénario Mix et nous ferons la comparaison entre le scénario Efficiency sans et avec nucléaire.

4. Un scénario Supply nucléaire

Physiquement, un fort développement de la production nucléaire dépend, d'une part, des réserves d'uranium et, d'autre part, du choix ou non du développement de la surgénération. Le rythme de développement d'un parc de surgénérateur dépend, lui, du coefficient de surgénération et de la quantité de plutonium présente dans le cycle. Pour le taux de surgénération, nous utilisons les valeurs mesurées sur Super Phénix : ramenées à un réacteur de 1 GWe, ces données conduisent à un inventaire de 4 tonnes de plutonium dans le cœur et une production annuelle de 0,2 tonne de plutonium. Nous avons supposé 1,3 tonne de plutonium dans le cycle⁹ (soit une durée entre la sortie de réacteur et le rechargement de 1,3 an), notablement moins que ce qui est habituellement supposé et qui nécessite un travail de R & D sur le retraitement¹⁰. Nous supposons

9. Le cycle du combustible comporte l'extraction du combustible irradié, son refroidissement, son retraitement pour en extraire le plutonium et l'uranium, la fabrication d'un combustible neuf (mélange de plutonium et d'uranium) et la réinsertion du combustible dans le réacteur.

10. Une piste pour ce faire serait d'utiliser des techniques pyro-métallurgiques, comme proposé et expérimenté par les chercheurs américains d'Argonne (http://en.wikipedia.org/wiki/Integral_fast_reactor#Onsite_reprocessing_using_pyroprocessing).

aussi que les réserves d'uranium naturel sont de l'ordre de 20 millions de tonnes¹¹. Le stock initial de plutonium provient d'un parc de réacteur à eau (REP, EPR ou CANDU) produisant 0,25 (REP) ou 0,6 (CANDU¹²) tonne de plutonium par an et GWe. Les paramètres à faire éventuellement varier dans l'étude sont : les réserves d'uranium¹³, les taux d'utilisation de l'uranium dans les réacteurs (CANDU *vs.* EPR) et le taux de surgénération. Une comparaison entre les deux systèmes EPR-RNR et CANDU-RNR est faite dans l'Annexe III.

Sur la Figure 6, la puissance nucléaire totale passe de 300 GWe en 2020 à 9 000 en 2060, soit légèrement plus que ce que l'IIASA projette entre 2050 et 2090.

La Figure 7 montre une évolution possible de la production énergétique nucléaire. Dans la perspective de la limitation des émissions de CO₂, nous faisons l'hypothèse que l'accroissement de la production nucléaire par rapport au scénario de l'IIASA sert en priorité à diminuer la production fossile. La Figure 8 illustre l'évolution de la consommation cumulée d'uranium. On constate qu'elle sature aux environs de 12 millions de tonnes. L'Agence de l'énergie nucléaire estime que les réserves « classiques » d'uranium sont de l'ordre de 16 millions de tonnes¹⁴.

La Figure 9 compare les consommations d'énergie fossiles dans le cas du scénario Supply et dans le cas d'une accélération du développement du nucléaire (Supply nucléaire). Le décalage de 40 ans entre les deux courbes conduit à une stabilisation plus précoce de la quantité cumulée de CO₂ injectée dans l'atmosphère, comme on peut le voir sur la Figure 10.

<http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2010/6891-uranium-2009.pdf>.

11. Dans la perspective de la surgénération, la valeur d'usage de l'uranium naturel est tellement augmentée que l'exploitation des minerais d'uranium de faible teneur comme les phosphates et l'eau de mer devient rentable.

12. Les réacteurs CANDU, refroidis à l'eau lourde peuvent produire jusqu'à 600 kg de plutonium par an et par GWe.

13. En particulier, on sait extraire l'uranium de l'eau de mer. L'océan contient 4 milliards de tonnes d'uranium renouvelées au rythme de 200 000 tonnes par an.

14. <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2010/6891-uranium-2009.pdf>.

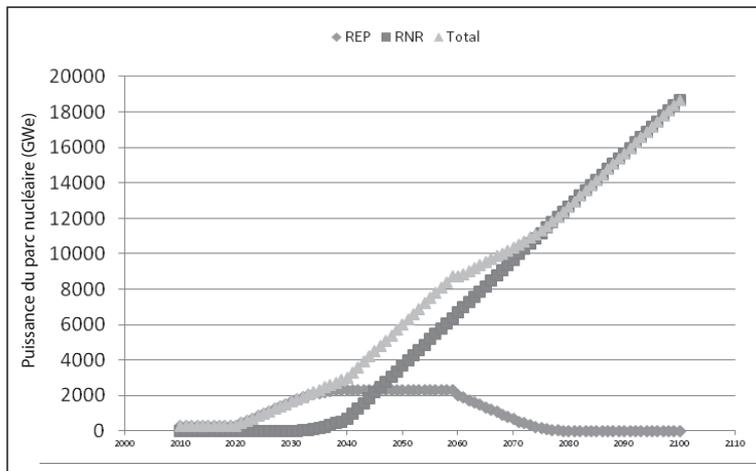


Figure 6. Évolution possible du parc mondial de réacteurs

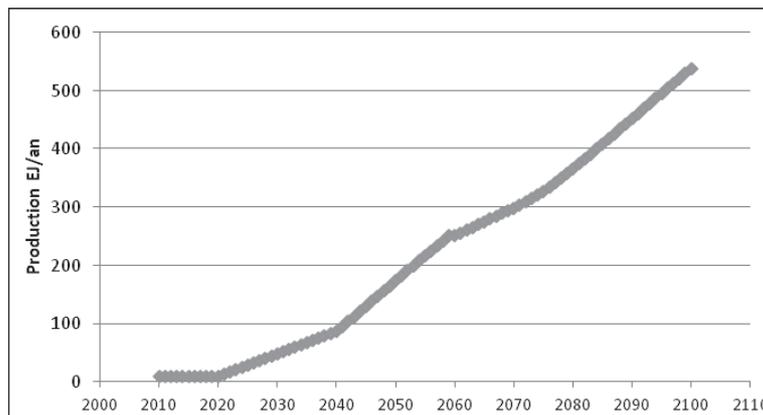


Figure 7. Évolution de la production annuelle par le parc nucléaire

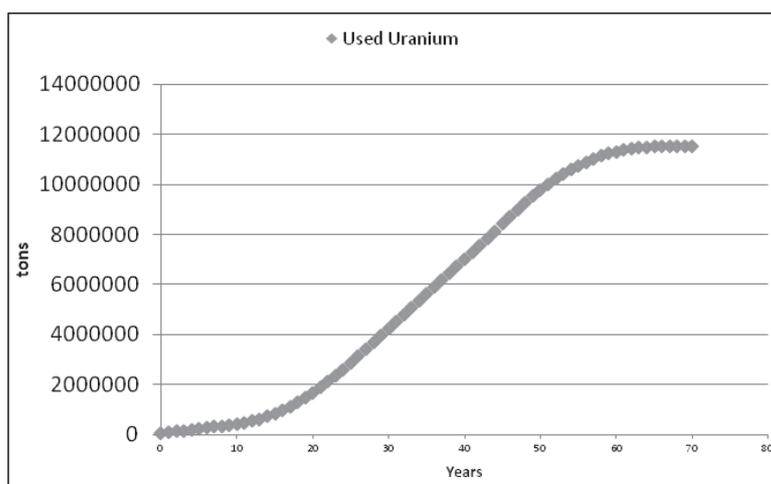


Figure 8. Consommation cumulée d'uranium pour le scénario Supply nucléaire dans le cas d'un parc ERP-RNR

POINT DE VUE Le nucléaire, solution au problème climatique

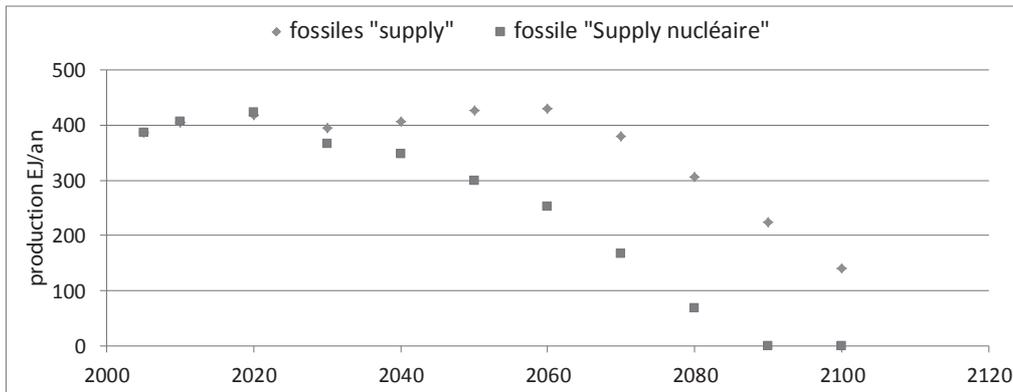


Figure 9. Évolution de la consommation énergétique d'origine fossile dans le scénario Supply et dans le scénario Supply nucléaire

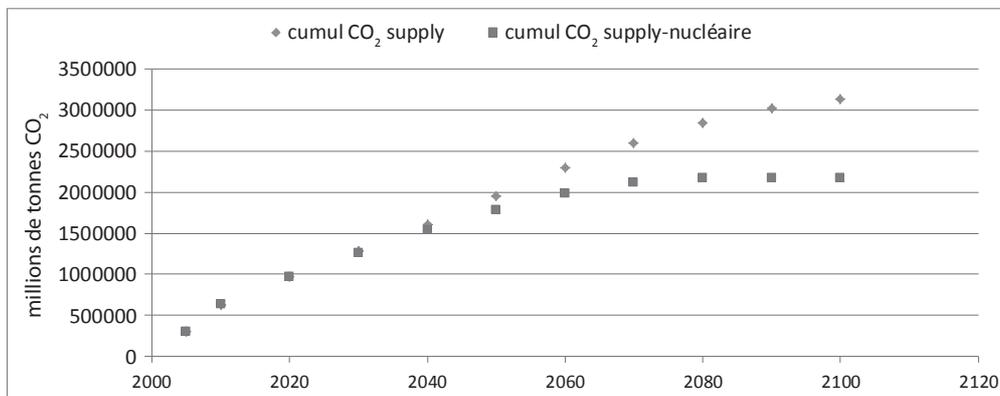


Figure 10. Tonnage cumulé de CO₂ injecté dans l'atmosphère

La masse totale du CO₂ atmosphérique était d'environ 3 000 000 Mtonnes en 2010, correspondant à la concentration de 400 ppm. En admettant que la moitié seulement du CO₂ émis serait stockée dans l'atmosphère, on voit que le scénario Supply dépasserait une concentration de 600 ppmV tandis que le scénario Supply nucléaire atteint une saturation pour une concentration de 540 ppmV. Alternativement, dans le cas du maintien d'un grand effort de captage-stockage du CO₂, le scénario nucléaire est beaucoup moins exigeant en matière de captage-stockage que le scénario IASA original (Figure 11), le besoin de stockage passant de 25 Gt de CO₂ à 10 Gt.

Au-delà de 2090, la production nucléaire peut se substituer à des productions renouvelables, sans doute trop optimistes dans le scénario Supply, comme on peut le voir pour

la production solaire sur le tableau 4. Nous n'avons pas indiqué de réduction de la production de biomasse car sa combustion permet d'extraire du CO₂ de l'atmosphère en le captant et le stockant.

La diminution de la consommation fossile peut se décliner par type de combustible.

Le tableau 5 montre que le scénario Supply nucléaire est proche de la compatibilité avec les estimations des disponibilités fossiles de l'ASPO¹⁵. Si ces estimations s'avèrent exactes il pourrait être nécessaire de diminuer la consommation de gaz au bénéfice de celle de charbon. La situation du simple scénario Supply semble plus critique. Comme signalé plus haut les scénarios de la catégorie IMAGE semblent irréalistes.

15. Association for the Study of Peak Oil.

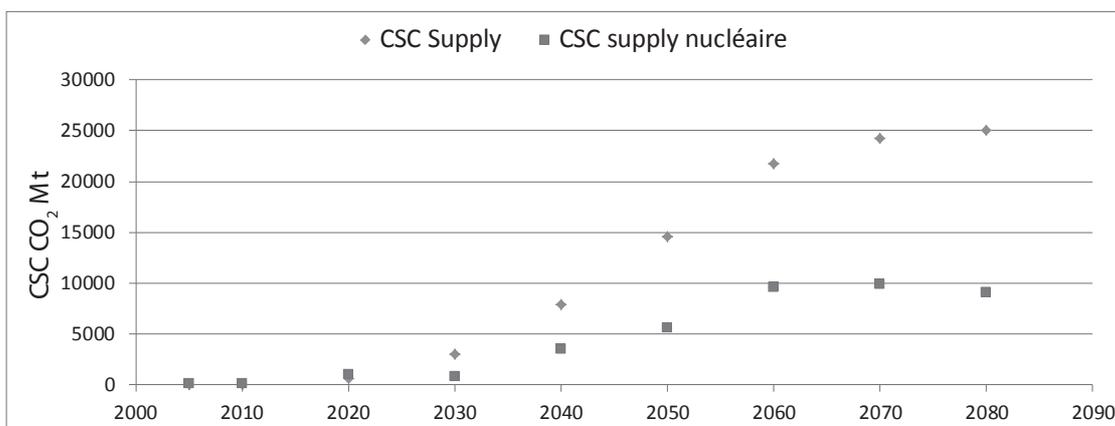


Figure 11. Évolution des besoins de stockage de CO₂

Tableau 4								
Mix énergétique mondial en 2100 pour les scénarios Supply et Supply nucléaire								
	Total	Électricité	Fossiles	Nucléaire	Biomasse	Hydro	Vent	Soleil
2010 (EJ)	470	65	401	10	45	12	1,2	1
Supply (EJ)	1 072	677	141	251	221	33	89	289
Supply (EJ) nucléaire	1 072	851	0	600	221	33	89	129

Tableau 5				
Consommation cumulée des combustibles fossiles jusqu'à 2100 et comparaison avec les réserves disponibles estimées par l'ASPO				
	Charbon ZJ	Pétrole ZJ	Gaz ZJ	Total
Supply	13,6	12,12	14,9	40,6
Supply nucléaire	4,2	9,4	13,5	27,1
ASPO	21	8	8	37

5. Le scénario Mix

Ce scénario, de consommation énergétique intermédiaire, envisage 137 EJ de production d'électricité nucléaire, soit 38 000 TWh, soit encore la production de 4 700 réacteurs de 1 GWe. L'évolution proposée de la production nucléaire est représentée dans la Figure 12. On constate que, comme dans le scénario Supply, la quasi-totalité du parc nucléaire serait

construite entre 2040 et 2100, soit une période de 60 ans. Pendant cette période, la production augmenterait de 120 EJ, soit celle de près de 4 200 réacteurs de 1 GWe. Cet objectif est moins ambitieux que celui du scénario Supply, mais encore considérable. De la même façon que pour le scénario Supply, nous proposons de lancer le développement du nucléaire dès 2020. Nous examinerons les avantages que pourrait avoir une accélération du nucléaire semblable à celle du scénario Supply nucléaire.

6. Le scénario Mix nucléaire

Nous faisons l'hypothèse d'une croissance de la puissance nucléaire aussi rapide que présentée dans les Figures 6 et 7. Dans ces conditions, la production fossile s'annule plus rapidement, comme on peut le voir sur la Figure 14. Au-delà de l'année 2080, la croissance de la production nucléaire n'est plus nécessaire. Si elle est maintenue, elle peut servir à limiter les besoins de production d'électricité solaire, comme on peut le voir sur le tableau 6.

POINT DE VUE Le nucléaire, solution au problème climatique

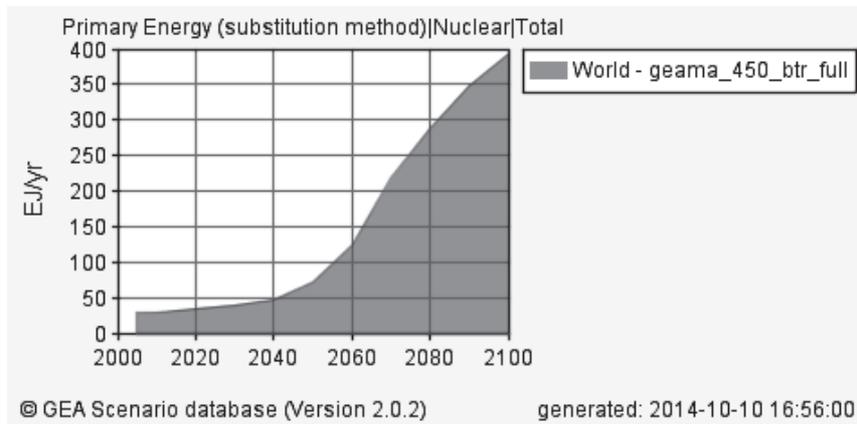


Figure 12. Évolution de la production nucléaire dans le scénario Mix

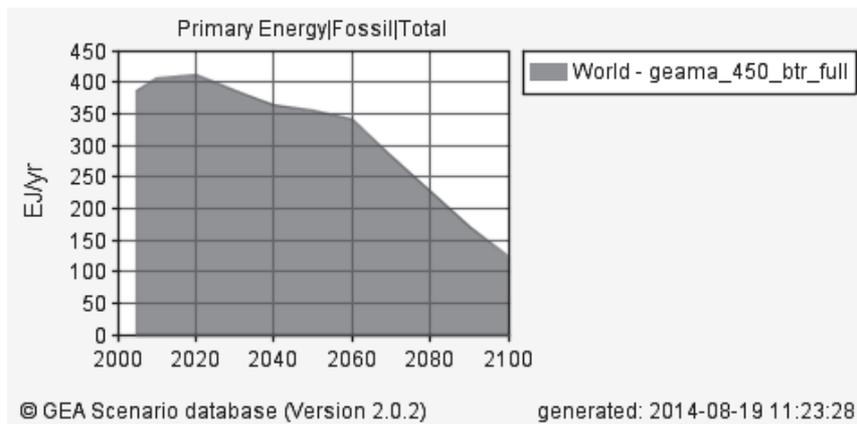


Figure 13. Évolution de la production primaire fossile dans le scénario Mix

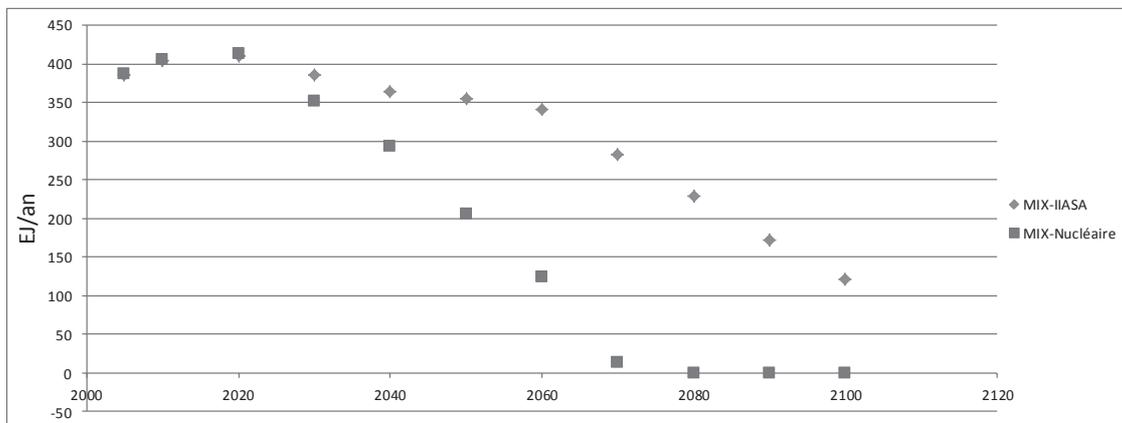


Figure 14. Évolution de la consommation énergétique d'origine fossile dans le scénario Mix et dans le scénario Mix nucléaire

Tableau 6							
Mix énergétique mondial en 2100 pour les scénarios Mix et Mix nucléaire							
	Total	Fossiles	Nucléaire	Biomasse	Hydro	Vent	Soleil
2010 (EJ)	470	401	10	45	12	1,2	1
Mix (EJ)	850	0	137	221	33	70	272
Mix (EJ) nucléaire	850	0	500	217	33	40	60

7. Le scénario Efficiency de l'IIASA

C'est un scénario de sortie du nucléaire, comme on peut le voir sur la Figure 15, avec une disparition progressive de la production fossile.

8. Le scénario Efficiency nucléaire

Contrairement à l'objectif du scénario, nous supposons une croissance de la production nucléaire aussi rapide que présentée dans les Figures 6 et 7. Dans ces conditions, la production fossile s'annule plus rapidement, comme on peut le voir sur la Figure 16. Au-delà de l'année 2080, la croissance de la production nucléaire n'est plus nécessaire. Si elle est maintenue, elle peut servir à limiter les besoins de production d'électricité solaire, comme on peut le voir sur le tableau 7.

Le surcroît d'énergie nucléaire peut servir à augmenter la consommation en 2100 et à diminuer la production d'électricité solaire qui reste

très élevée, comme on le voit sur le tableau 7. Toutes choses égales par ailleurs, il est clair que le refus du nucléaire imposerait de lourds sacrifices aux populations en diminuant la consommation d'énergie de 40 %.

9. Les cumuls d'émission de CO₂

La Figure 17 résume les considérations précédentes en ce qui concerne les émissions cumulées de gaz carbonique entre 2010 et 2100. Ces émissions cumulées représentent le facteur principal de l'évolution climatique. Dans cette Figure, les émissions de CO₂ ont été calculées à partir de la consommation de combustibles fossiles, avec une émission moyenne de 317 kg de CO₂ par MWh.

Dans ces conditions, on constate que les scénarios MESSAGE ne parviennent pas à une stabilisation des émissions cumulées au cours du XXI^e siècle. Au contraire, tous les scénarios basés sur une contribution importante (maximale) du nucléaire obtiennent une saturation

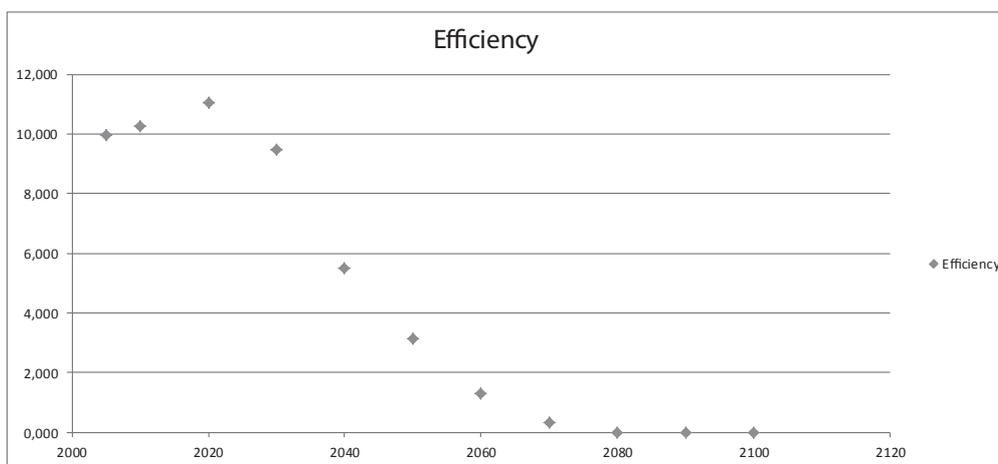


Figure 15. Évolution de la production nucléaire dans le scénario Efficiency (production mesurée en EJ/an)

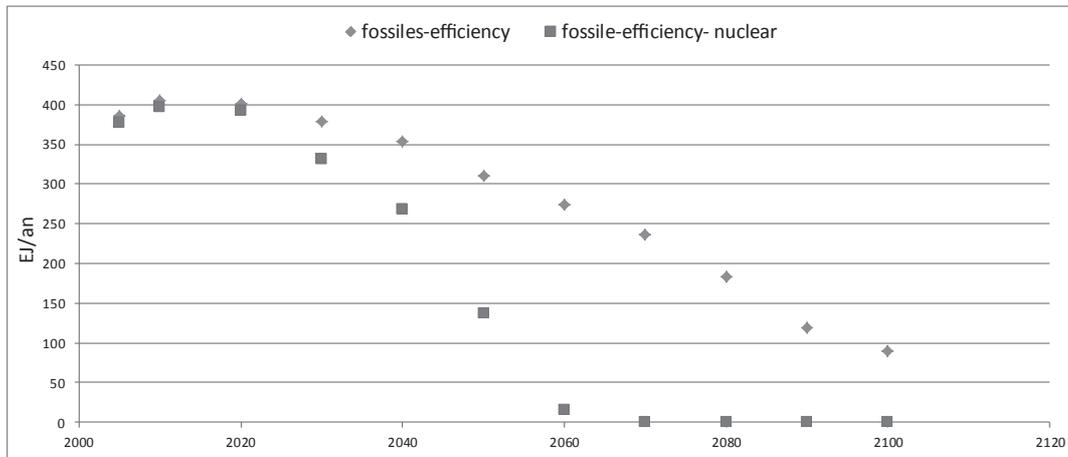


Figure 16. Évolution de la consommation énergétique d'origine fossile dans le scénario Efficiency et dans le scénario Efficiency nucléaire

Tableau 7

Mix énergétique mondial en 2100 pour les scénarios Efficiency et Efficiency nucléaire

	Total	Fossiles	Nucléaire	Biomasse	Hydro	Vent	Soleil
2010 (EJ)	470	401	10	45	12	1,2	1
Efficiency (EJ)	617	90	0	221	23	34	249
Efficiency (EJ) nucléaire	1 003	0	605	221	23	34	120

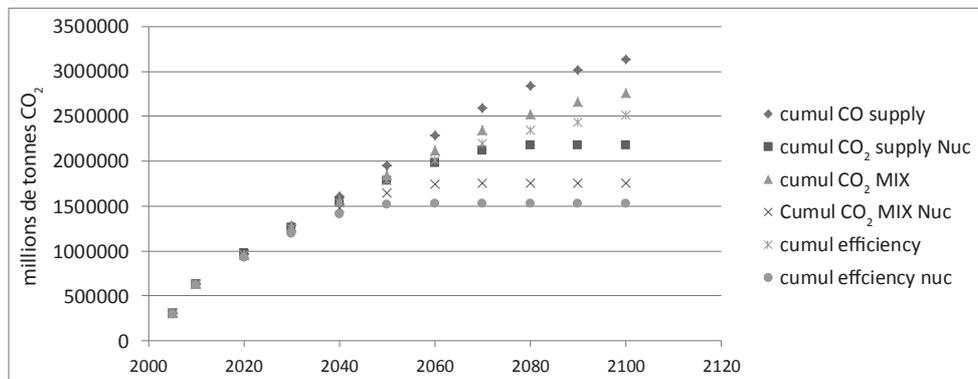


Figure 17. Évolution des cumuls de quantités de CO₂ émises pour les scénarios Supply, Mix et Efficiency entre 2010 et 2100, avec ou sans développement important de la production nucléaire
La réabsorption du CO₂ par l'océan n'est pas prise en compte

des émissions cumulées entre 1,5 et 2,1 milliards de Gt de CO₂¹⁶. Les scénarios MESSAGE ne peuvent respecter la trajectoire RCP 2.6 (voir tableau 1) qu'en faisant appel à des

programmes massifs de captage et stockage du CO₂. En particulier, cette technique appliquée à la combustion de la biomasse permet de diminuer la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Cette pratique, si elle est réalisable, peut être aussi appliquée aux scénarios à forte composante nucléaire.

16. On estime que la moitié de ces émissions pourrait être absorbée dans l'océan et la biomasse.

Sur la Figure 18, on constate que l'effet de cette CSC est assez modeste. On voit que la quantité cumulée des émissions de CO₂ se situerait aux environs de 1 000 et 1 500 milliards de tonnes. Si l'on admet que l'océan absorbe le quart des émissions, on voit que la masse de CO₂ dans l'atmosphère augmenterait de 750 à 1 125 milliards de tonnes, ce qui correspondrait à une augmentation de 150 à 225 ppm de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, qui atteindrait donc entre 550 et 625 ppm.

Le tableau 8 donne les conséquences climatiques des différents scénarios. Les scénarios ne font pas appel à la CSC sauf, en fin de période, en ce qui concerne la combustion de la biomasse. Seuls les scénarios avec forte composante nucléaire sont susceptibles de répondre à la trajectoire RCP 2.6.

10. Aspects économiques

Le programme de construction de réacteurs proposé représente environ 300 réacteurs de 1 Gwe mis en chantier dans le monde chaque année. L'Annexe II montre que le coût de construction de réacteurs est 3 fois plus important en Europe et aux USA qu'en Chine. Or c'est en Chine que le plus grand nombre de réacteurs est et sera construit, comme on peut le voir dans l'Annexe « Régions ». De plus, comme cela s'est passé pour les panneaux photovoltaïques, il est probable que la Chine exportera ses réacteurs. La référence de coût réaliste est donc celle de la Chine. Nous estimons (voir Annexe II) un coût de 4 000 \$/kWe pour les RNR. L'investissement annuel serait donc de 1 200 G\$/an. Cet investissement est à mettre en relation avec le PIB mondial. Dans les scénarios MESSAGE, celui-ci varie entre 118 022 \$ en 2040 et 366 139 \$ en 2100. L'investissement en réacteurs RNR varierait donc entre 1 et 0,3 % de la valeur du PIB. Un tel effort ne paraît pas insupportable.

Il est aussi intéressant de rapprocher cet effort d'investissement du chiffre d'affaires représenté par la vente de l'électricité. Nous supposons un prix de vente de l'électricité de 100 \$/MWh¹⁷.

17. Ce prix résulte de l'addition du prix en sortie de centrale à celui de la distribution.

L'investissement dans les nouveaux réacteurs représenterait alors 30 % du chiffre d'affaire en 2040 et 11 % en 2100. Les opérateurs devront donc, sans doute, s'endetter au démarrage du programme pour commencer à rembourser au bout d'une vingtaine d'années¹⁸. Aux prix chinois (voir Annexe II), on peut estimer le coût du MWh obtenu grâce à des centrales à charbon équipées de CSC à environ 60 \$/MWh et celui fourni par des RNR à environ 80 \$/MWh. La différence de coût serait de l'ordre de 20 \$/MWh. Il s'agit donc au maximum d'un surcoût de l'électricité de 20 % pour éviter d'avoir à capter et stocker des milliards de tonnes de CO₂ chaque année.

11. Conclusion

Un développement rapide de la production nucléaire engagé dès à présent permettrait de relâcher très significativement les contraintes permettant de stabiliser la croissance de la température au cours du siècle. La quantité de CO₂ à capter et à stocker serait divisée au moins par 2,5, sinon annulée, et l'objectif de développement des coûteuses ENR intermittentes serait divisé par 2. Un développement du nucléaire conduisant à près de 20 000 GWe en 2100 est possible à condition de recourir à la surgénération tout en améliorant la technique de retraitement des combustibles irradiés et (ou) en développant les réacteurs à eau lourde du type CANDU. La production d'électricité nucléaire représenterait alors 60 % de la consommation énergétique totale. Le coût de cette évolution serait modeste. Comparés aux risques entraînés par le réchauffement climatique, ceux liés au nucléaire seraient faibles. Dès à présent, par unité d'énergie produite, même en tenant compte des catastrophes de Tchernobyl et Fukushima, leur létalité représente moins d'1/1 000^e de celle du charbon et d'1/20^e de celle de la biomasse énergie. Enfin, il faut remarquer que l'utilisation de la surgénération diviserait par un facteur 100 le volume des déchets nucléaires à stocker. ■

18. Comme l'a fait EDF lors de la réalisation du parc nucléaire français.

POINT DE VUE Le nucléaire, solution au problème climatique

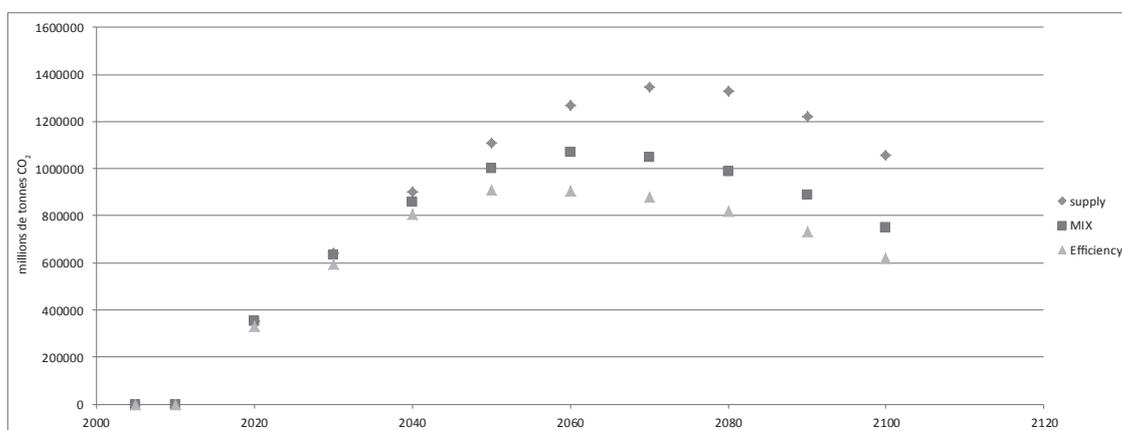


Figure 18. Évolution des cumuls de quantités de CO₂ émises entre 2010 et 2100 pour les scénarios Supply, Mix et Efficiency avec développement important de la production nucléaire et capture stockage du CO₂ produit par la combustion de la biomasse
On suppose que la combustion de la biomasse est neutre du point de vue du CO₂ (les émissions produites par la combustion sont compensées par l'accroissement de la biomasse)

Tableau 8				
Valeurs des RCP et du domaine d'augmentation des températures globales pour les différents scénarios				
Scénario	Émissions cumulées GtCO ₂	Forcing ppm eq. CO ₂	RCP	Augmentation de la température (°C)
Supply	2 500	580-650	4,0-5,0	3,2-4,0
Supply nucléaire	1 539	530-580	3,5-4,0	2,8-3,2
Supply nucléaire + CSS biomasse	1 055	480-530	3,0-3,5	2,4-2,8
Mix	2 129	580-650	4,0-5,0	3,2-4,0
Mix nucléaire	1 123	480-530	3,0-3,5	2,4-2,8
Mix nucléaire + CSS biomasse	751	430-480	2,5-3,0	2,0-2,4
Efficiency	1 892	530-580	3,5-4,0	2,8-3,2
Efficiency nucléaire	930	430-480	2,5-3,0	2,0-2,4
Efficiency nucléaire + CSS biomasse	618	430-480	2,5-3,0	2,0-2,4

Les correspondances entre concentrations, RCP et augmentation de température sont données dans le rapport du WGIII du rapport AR4 du Giec. La corrélation entre les émissions cumulées et le RCP est donnée dans le rapport du WGIII du rapport AR5 du Giec.

Annexe I

Le faux procès du nucléaire

L'a priori contre l'énergie nucléaire est illustré par cette citation du rapport du Groupe 3 du Giec (AR5) : « L'énergie nucléaire est une source mature pour la fourniture d'électricité en base, à faible émission de GES, mais sa part dans la génération mondiale d'électricité diminue (depuis 1993). L'énergie nucléaire pourrait faire une contribution croissante à la fourniture d'énergie à bas carbone, mais plusieurs barrières et risques s'opposant à cette évolution existent (évidence robuste, accord élevé). Ceux-ci comprennent : les risques opérationnels et les préoccupations associées, les risques de l'extraction minière de l'Uranium, les risques financiers et juridiques, l'absence de solution à la gestion des déchets, la question de la prolifération des armements nucléaires et l'hostilité de l'opinion publique (évidence robuste, accord élevé). De nouveaux cycles du combustible et de nouvelles technologies de réacteurs concernant certains de ces problèmes sont à l'étude et des progrès de R & D ont été faits concernant la sûreté et la gestion des déchets ».

Tableau 9	
Nombre de morts par 1 000 TWh de production d'énergie finale pour différentes techniques de production	
Technique	Death per 1 000 TWh
Coal (world)	170 000
Coal (China)	280 000
Coal (US)	15 000
Oil	36 000
Natural gas	4 000
Biomass	24 000
Solar PV	440
Wind	150
Hydroelectricity	1 400
Nuclear	90

Pour l'énergie nucléaire, on a tenu compte des victimes de Tchernobyl and Fukushima. Données d'après Forbes (<http://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/>)

À l'exception de l'allusion à l'hostilité du public qui est notoire dans certains pays, les allégations de risques sont soit fausses, soit exagérées. Par exemple, les risques d'exploitations minières uranifères sont complètement négligeables en comparaison de ceux associés à l'extraction du charbon. Plutôt que de discuter chacun des risques en détail, nous nous référons au tableau 9 qui les met en perspective. Jusqu'à présent, le développement des armements nucléaires n'a jamais été la conséquence d'un programme de production d'électricité, alors que le contraire s'est produit, les développements et objectifs militaires ayant précédé ceux concernant la production d'électricité.

Annexe II

Constructions et coûts des réacteurs dans le monde

Ces informations proviennent de la World Nuclear Association¹⁹. Il y a 71 réacteurs en construction dans le monde, dont 32 en Chine, 6 en Inde, 10 en Russie et 4 en Corée du Sud.

Le coût des nouveaux réacteurs varie énormément selon les pays. Par exemple, le réacteur EPR d'Olkiluoto a un coût de 7 200 \$/kW, celui de Flamanville de 6 500 \$/kW, Watts Bar 2 (fin de construction d'un réacteur commencée en 1985 aux USA) de 4 000 \$/kW, Hongshane 4 (CPR 1000) de 2 800 \$/kW. La Chine envisage un coût de 2 000 \$/kW qui devrait s'abaisser à 1 600 \$/kW dans le futur, 3 fois moins cher que pour le même réacteur (AP 1000) construit aux USA.

Nous retenons un coût de 2 500 \$/kWe pour des réacteurs de type REP. Pour les RNR, l'étude du « réacteur rapide européen » (EFR) avait conclu à un surcoût de 50 % par rapport aux REP. Nous retiendrons un coût de 4 000 \$/kWe.

L'OCDE a fait une étude du coût des moyens de production d'électricité dans l'OCDE et en Chine²⁰. Nous en extrayons le tableau 10.

L'OCDE n'indique pas le coût de centrales à charbon munies de CSC en Chine. On peut

19. <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Plans-For-New-Reactors-Worldwide/>

20. OECD/IEA-NEA 2010, Projected costs of Generating Electricity, Table 3.7.

toutefois appliquer le même surcoût proportionnel que celui observé pour l'OCDE, soit 54 \$/MWh, que nous reportons entre parenthèses sur le tableau 10. Le coût du nucléaire correspond à celui des réacteurs actuels, essentiellement des REP. Dans notre proposition, l'essentiel des réacteurs qui devront être mis en œuvre sont des RNR. Les chercheurs russes prévoient un coût d'investissement remarquablement bas pour le projet de RNR BN-1200²¹, soit de l'ordre de 1 000 \$/kWe produisant une électricité au coût de 22,3 \$/MWh. Des coûts aussi faibles sont surprenants. Par prudence, nous retenons un coût d'investissement de 4 000 \$/kWe et un coût de production de 80 \$/MWh.

Tableau 10		
Coûts actualisés du kWh de l'électricité pour les pays de l'OCDE et la Chine		
Techniques	OECD (US \$/MWh)	Chine (US \$/MWh)
Nucléaire	50-82	30-36
Charbon avec CSC	85	(54)
Charbon sans CSC	54	34
Éolien <i>onsbore</i>	90-146	51-86
Éolien <i>offshore</i>	138-188	
Photovoltaïque	287-410	123-186

Calcul fait avec un taux d'actualisation de 5 %. La taxation des rejets de CO₂ se traduit par un surcoût d'environ 23 \$/MWh, évidemment très réduit lorsque l'installation est équipée de CSC

Annexe III

Comparaison des potentialités des REP (EPR) et des CANDU pour le développement rapide d'un parc de RNR

La presque totalité des réacteurs en fonctionnement dans le monde utilise de l'eau pour ralentir les neutrons et extraire la chaleur produite dans les éléments combustibles. La majorité de ces réacteurs utilisent de l'eau légère (ou ordinaire) dans laquelle l'hydrogène est lui-même léger ¹H avec un noyau ne contenant qu'un proton. Cet isotope ralentit les neutrons, mais les

capture aussi. Il ne reste alors plus assez de neutrons pour entretenir la réaction en chaîne avec de l'uranium naturel dans lequel la proportion de l'isotope ²³⁵U, le seul fissile, ne dépasse pas 0,7 %. Il est donc nécessaire d'enrichir l'uranium dans cet isotope pour maintenir la réaction en chaîne. Le taux d'enrichissement nécessaire est compris entre 3 et 5 %, selon que l'on désire conserver le combustible plus ou moins longtemps (typiquement de 3 à 5 ans, pour un *Burn up* de 33 000 à 45 000 MWj par tonne de métal lourd²²).

Le deutérium ²H, le deuxième isotope stable (lourd) de l'hydrogène, capture beaucoup moins les neutrons ralentis que son homonyme léger. La probabilité d'absorption d'un neutron lent est, en effet, 600 fois plus faible par le deutérium que par l'hydrogène ordinaire ¹H²³. L'utilisation de l'eau lourde comme ralentisseur et caloporteur permet d'utiliser l'uranium naturel pour démarrer et entretenir la réaction en chaîne. Toutefois, du fait de l'empoisonnement neutronique par les produits de fission, la durée de séjour du combustible est limitée à quelques mois (7 000 MJ/t). C'est pourquoi les réacteurs industriels à eau lourde développés par les Canadiens, les CANDU, sont dotés de machines de chargement-déchargement en continu des éléments combustibles.

Dans les réacteurs CANDU, les neutrons de fission qui ne sont pas capturés dans l'uranium fissile ²³⁵U le sont essentiellement dans l'uranium 238 (²³⁸U). Ils produisent ainsi du plutonium 239 (²³⁹Pu). Cet isotope est fortement fissile, pratiquement au même titre que ²³⁵U. Dans un réacteur CANDU, environ 20 % des fissions proviennent du ²³⁹Pu. De plus, en fin d'irradiation, un stock de plutonium riche en ²³⁹Pu peut être récupéré par retraitement du combustible. C'est ainsi qu'un réacteur CANDU de 1 GWe produit

22. Quantité d'énergie produite par tonne de matière fissile. Le chargement d'un REP est d'environ 100 tonnes. 1 MWj vaut 24 MWh. Un taux de 33 000 MJ/i vaut donc 790 000 MWh et, pour 100 tonnes, on arrive à 79 TWh thermiques, soit 26 TWh électriques. Chaque année, le tiers du chargement est extrait et on voit que la quantité d'énergie produite vaut environ 8,7 TWh.

23. Il faut toutefois tenir compte du fait que la distance de ralentissement des neutrons qui est environ 2 fois plus longue dans l'eau lourde que dans l'eau ordinaire.

21. <http://nextbigfuture.com/2013/08/fast-reactor-status-and-two-step-closed.html>

environ 590 kg de plutonium chaque année²⁴. C'est plus de 2 fois la production d'un REP.

Un REP de 1 GWe produisant 0,25 tonne de plutonium par an et un RNR de 1 GWe nécessitant une charge initiale de 8 tonnes de plutonium (4 dans le cœur et 4 dans le circuit de retraitement²⁵), on voit qu'il faut 40 ans de fonctionnement du REP pour qu'il puisse être remplacé par un RNR. Un CANDU produisant 0,59 tonne de plutonium par an, on voit qu'il suffit de 13 ans pour qu'un réacteur CANDU donne naissance à un RNR. Au bout de 40 ans, chaque CANDU pourrait être remplacé par 3 RNR.

Ainsi, partant d'un parc de 2 000 réacteurs REP fonctionnant 40 ans, on pourrait démarrer 2 000 RNR. Si ces réacteurs ont un inventaire initial de 8 tonnes, avec une production nette de 0,2 tonne de plutonium par an, au bout de 40 ans de fonctionnement on aurait un nombre total de RNR de 4 000 RNR. Si l'on retient plutôt un inventaire de 5,5 tonnes (ce que nous avons supposé dans le texte principal), on arrive à un nombre total de RNR de 5 800 RNR.

Considérant un parc initial de 2 000 CANDU, au bout de 40 ans, on pourrait démarrer 4 700 RNR. Même en supposant un inventaire initial de 8 tonnes de plutonium, on voit qu'on pourrait obtenir 9 400 RNR au bout de 40 années supplémentaires. On voit tout l'avantage qu'il y aurait, du point de vue d'un développement

rapide du nucléaire, à construire des CANDU plutôt que des REP.

La Figure 19 compare la production de plutonium d'un parc de 2 000 REP de 1 GWe à celle de 2 000 CANDU de même puissance. L'extraction du plutonium sera, bien entendu, adaptée aux besoins de fabrication des combustibles pour éviter la présence de quantité importante de plutonium sur « étagère ». De plus, du fait de la très faible absorption des neutrons par l'eau lourde, les CANDU utilisent mieux l'uranium et permettent de réduire de 30 à 40 % les besoins en minerai. Pourquoi, alors, est-ce la solution REP qui l'a largement emporté sur la solution CANDU ?

La raison en est le caractère proliférant des CANDU. En effet, le plutonium produit par les CANDU est de bonne qualité pour fabriquer une bombe (celui des REP est de qualité médiocre à cause d'un séjour en réacteur plus long). De plus, le déchargement en continu ne permet pas la surveillance par les inspecteurs de l'AIEA, à moins d'en avoir un en permanence sur le site. Dans le cas des REP, il suffit qu'un inspecteur se présente lors des arrêts du réacteur (généralement un par an).

Les USA ont fortement agi pour empêcher la construction de CANDU et, surtout, contre la possibilité de retraitement des combustibles (Jimmy Carter), permettant d'extraire un plutonium de qualité militaire. L'Inde et le Pakistan ont, effectivement, utilisé des réacteurs de type CANDU pour réaliser leur arsenal.

Mais des évolutions récentes affaiblissent cette argumentation : l'enrichissement de l'uranium en isotope ²³⁵U par ultracentrifugation

24. Thèse de Perrine Guillemin : *Recherche de la haute conversion en cycle Thorium dans les réacteurs CANDU et REP*, Tab. 2.7

25. Valeur « classique » que nous avons divisée par 3 dans le corps de l'article.

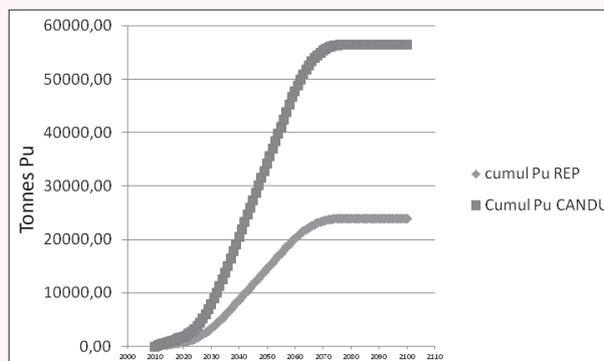


Figure 19. Comparaison des productions cumulées de plutonium par un parc de REP et par un parc de CANDU

POINT DE VUE Le nucléaire, solution au problème climatique

permet d'obtenir un enrichissement au niveau militaire de façon discrète. De plus, il est plus facile de réaliser une bombe à ^{235}U qu'à ^{239}Pu .

Les pays qui disposent déjà de l'armement nucléaire représentent désormais une grande part de l'humanité : Chine, Inde, USA, France, Royaume-Uni, Israël, Pakistan. Des réacteurs CANDU fonctionnent ou sont en construction au Canada, en Corée du Sud, en Inde, au Pakistan, en Chine, en Argentine et en Roumanie. On peut donc espérer que, si le besoin s'en fait sentir, les réticences vis-à-vis des réacteurs CANDU s'amourcissent, le plus tôt étant le mieux.

On voit sur le tableau 11 comment l'insertion d'une fraction de réacteurs CANDU permettrait de conserver les pratiques actuelles du retraitement en maintenant le taux de croissance du parc.

Tableau 11	
Équivalence entre l'inventaire total de plutonium nécessaire au démarrage d'un RNR de 1 GWe et le pourcentage de CANDU dans le parc thermique nécessaire pour revenir à la pratique habituelle de retraitement du combustible	
Inventaire Pu total/ réacteur tonnes	Fraction de CANDU dans le parc thermique (%)
5,5	50
6	37
7	14
8	0

Annexe « Conventions »

Les conventions utilisées par l'IIASA pour définir les différentes formes d'énergie sont les suivantes :

- *Énergie finale* : énergie achetée par l'utilisateur. Par exemple : gaz ou électricité. L'origine de l'électricité n'est pas précisée.
- *Énergie secondaire* : énergie sortant de l'usine de production. Par exemple : électricité, hydrogène, combustibles liquides. Les sources d'électricité sont alors précisées (charbon, nucléaire, éolien, etc.).
- *Énergie primaire* : énergie nécessaire pour produire l'énergie secondaire ou finale. Deux conventions sont utilisées :
 - L'énergie primaire par substitution qui correspond à la quantité de combustible fossile nécessaire pour fournir la même quantité d'énergie finale ou secondaire. Pour la production d'électricité par des centrales fossiles, le rapport entre l'énergie secondaire et l'énergie primaire reflète un rendement de l'ordre de 33 %. Il en est de même pour l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables.
 - L'énergie primaire directe, équivalente à la précédente pour les combustibles fossiles, considère que, pour le nucléaire et les ENR, l'énergie primaire et l'énergie secondaire sont égales. L'IIASA utilise généralement cette définition de l'énergie primaire et nous suivons cette convention

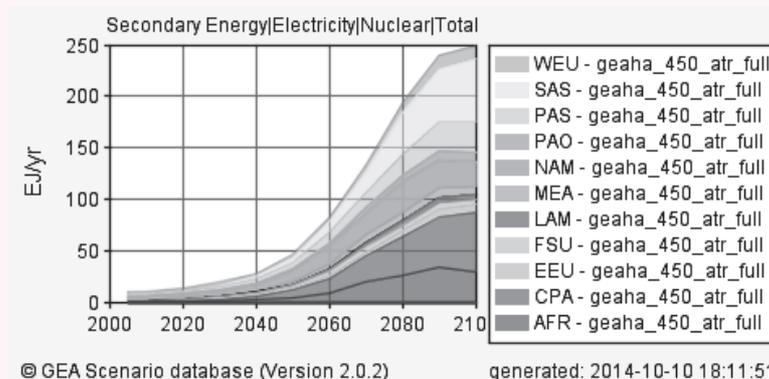


Figure 20. Évolution de la production d'électricité nucléaire dans les différentes régions pour le scénario Supply de la catégorie MESSAGE

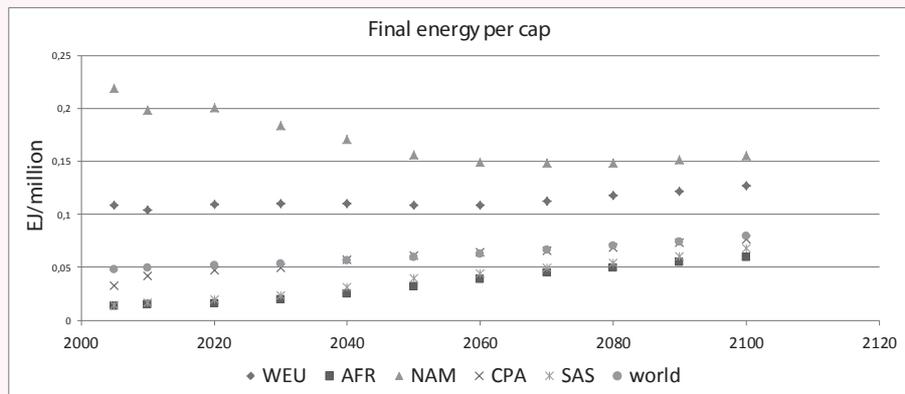


Figure 21. Évolution de l'énergie finale par tête pour différents agrégats régionaux dans le cas du scénario Supply – On note une tendance à l'égalisation entre régions, mais les pays développés restent les plus consommateurs

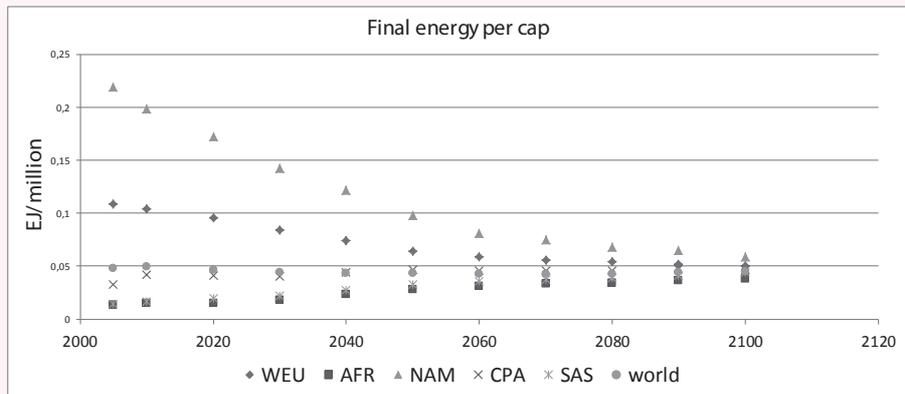


Figure 22. Évolution de l'énergie finale par tête pour différents agrégats régionaux dans le cas du scénario Efficiency – On note une tendance à l'égalisation entre régions et une très forte décroissance pour les pays développés (un facteur de plus de 4 pour les USA et de plus de 2 pour l'Europe occidentale)

Tableau 12

Comparaison entre les deux conventions de définition de l'énergie primaire utilisées par l'IIASA

Scénario Supply	Méthode par substitution		Méthode directe		Rapport Substitution/directe	Electricité	
	EJ		EJ			EJ	
	2005	2100	2005	2100		2005	2100
Fossiles	386	141	386	141	1	45	3
Biomasse	42	221	42	221	1	0,6	4,4
Nucléaire	28	715	10	251	2,8	10	250
Hydro	30	96	10	33	2,9	10	33
Eolien	1,1	255	0,38	89	2,9	0,38	89
Solaire	0,45	870	0,33	326	2,7	0,03	289
Total	488	2300	450	1051		65	677