# Osons le nucléaire pour trouver la solution au problème climatique !

*Hervé Nifenecker*

## Résumé

L'étude commence par résumer les scénarios de référence du GIEC permettant de limiter l'augmentation de température globale à 2 degrés (RCP 2,6) et qui, pour ce faire, font appel à un stockage massif de $CO_2$ après capture pouvant atteindre 50 milliards de tonnes par an en 2100.

Deux catégories de scénarios permettraient de respecter, en principe, des trajectoires RCP 2,6, la catégorie IMAGE, pilotée par le « Netherlands Environmental Assessment Agency », et la catégorie MESSAGE pilotée par le « International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria ».

Seuls les scénarios de la catégorie MESSAGE limitent ce stockage à 20 milliards de tonnes grâce à un développement massif de la production d'électricité nucléaire entre 2060 et 2100, ou à une réduction drastique de la consommation énergétique. Chaque catégorie comporte trois scénarios : un scénario dénommé « Supply » autorisant une forte consommation d'énergie, un scénario dénommé « Efficiency » qui est aussi un scénario de sortie du nucléaire au prix d'une diminution de 45% de la consommation énergétique et un scénario intermédiaire dénommé « MIX ». Dans le scénario maximisant la consommation énergétique 7000 réacteurs de 1 GWe sont construits entre 2060 et 2100. En absence d'une description détaillée, par l'IIASA, de la manière dont un tel rythme de construction de centrales pourrait être réalisé, l'étude montre que seule l'utilisation massive de réacteurs surgénérateurs serait compatible avec ce scénario, et ce, à condition que soit diminuée la durée de retraitement ou (et) que soit augmentée la proportion de réacteurs à eau lourde dans le parc de réacteurs classiques.

Les conditions techniques d'un tel développement étant d'ores et déjà réunies – ce qui n'est pas le cas pour la mise en place du captage stockage - l'étude suggère de ne pas attendre 2050, comme le proposent les scénarios de l'IIASA, pour démarrer un développement rapide du parc mondial de réacteurs mais de le faire dès 2020.

L'étude propose des variantes « nucléarisées » des scénarios « Supply » et « MIX ». Il est alors possible de réduire considérablement l'inconnue actuellement représentée par stockage de $CO_2$, puisqu'il deviendrait possible de stabiliser la concentration de $CO_2$ dans l'atmosphère sans recourir à cette technique et qu'il serait également possible de contenir la puissance d'énergies renouvelables intermittentes dans le domaine du réalisme.

La renonciation au nucléaire (scénario Efficiency) se traduit par une réduction de la consommation d'énergie de plus de 40% sans supprimer la nécessité d'un stockage de 15 milliards de tonnes de $CO_2$, ni stabiliser la concentration de ce dernier dans l'atmosphère avant 2100.

Un fort développement du nucléaire permet de maintenir la consommation d'énergie à un niveau raisonnable, de stabiliser la concentration de CO2 dès 2060, de réduire considérablement sinon de supprimer les besoins de stockage de CO2, de supprimer complètement le recours aux combustibles fossiles plusieurs décades avant la fin du siècle.

## Introduction

De nombreux scénarios ont été proposés pour limiter l'augmentation de la température à 2 degrés 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 USA ont une approche largement économique de l'énergie nucléaire qui a peu de chances de s'y développer aussi longtemps que le boom sur le 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 fantasmatiques, 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).

Un état de la construction de réacteurs dans le Monde est donné dans l'Annexe II. Il confirme que c'est en Asie et en Russie qu'il se développe le plus rapidement.

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 le présent travail 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 $CO_2$ et à la généralisation de la production d'électricité solaire, par exemple, le nucléaire n'a pas à démontrer sa faisabilité technique et économique[1]. 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 surgénérateurs refroidis au Sodium.

[1] Le 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, en Russie (BN800) avec 2 BN800 commandés par la Chine.

## 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 intégré[2] dont il est issu pour le forçage radiatif 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. A 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.

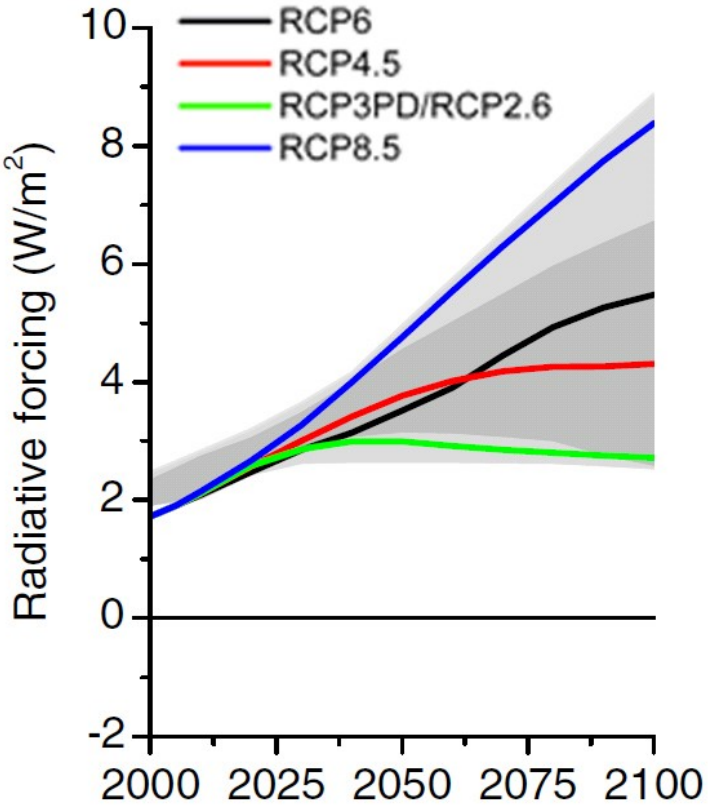


**Figure 1**

**Evolution 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).**

[2] 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 (JGCRI) », AIM piloté par le « National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan », et MESSAGE piloté par le « International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria ».

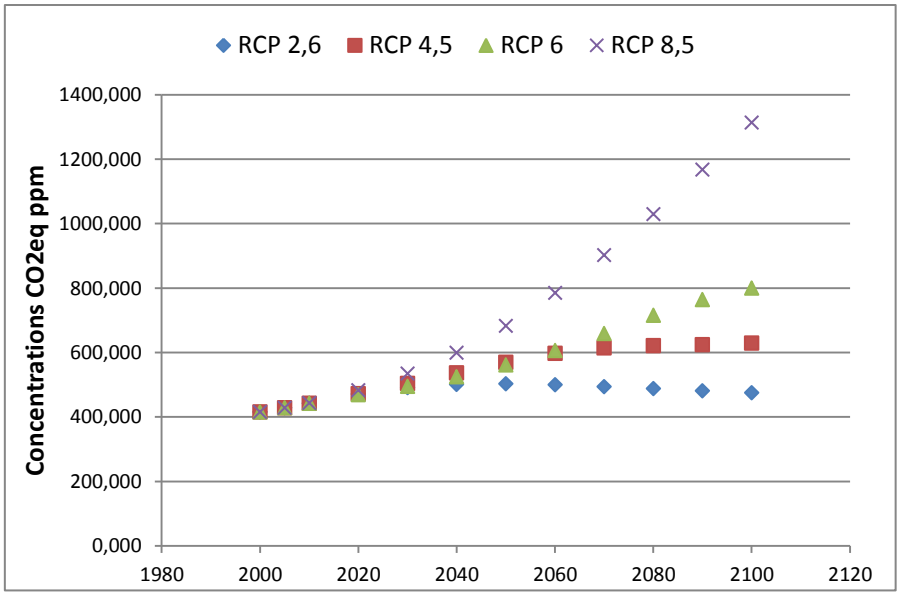


**Figure 2**

**Evolution des concentrations des GES en ppm de $CO_2$ équivalent pour les 4 RCP choisis par le GIEC (http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=compare)**

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 $CO_2$ dans l'atmosphère de cette trajectoire ne peut être obtenue que par une augmentation du stockage de ce dernier, soit sous forme d'accroissement de la biomasse, soit sous forme de captage stockage du $CO_2$ résultant de la combustion de cette dernière.

Le GIEC invite tous les scénaristes à fournir des scénarios permettant de réaliser les RCP 2.6, 4.5, 6 et 8.5. Une proposition de variante recourant davantage au nucléaire sera d'autant mieux reçue par le GIEC qu'elle se placera dans ce cadre.

## Les scénarios de l'IIASA.

Pour fixer les idées nous utiliserons les données accessibles sur le site WEB de l'IIASA[3]. Deux catégories de scénarios permettent d'atteindre un RCP de 2.6, les catégories dénommés IMAGE et MESSAGE. Ces deux catégories sont eux-mêmes subdivisées en trois scénarios « Supply », « Mix » et « Efficiency » qui se distinguent par un ordre décroissant de consommation énergétique. Tous ces scénarios reposent sur la capture et le stockage de quantités importantes de $CO_2$.

| | SUPPLY | MIX | EFFICIENCY |
|---|---|---|---|
| MESSAGE | 23915 | 15176 | 15199 |
| IMAGE | 50033 | 43223 | 26563 |

**Tableau 1**

**Masse de $CO_2$ stockée annuellement en 2100 (millions de tonnes). Rappelons que les émissions mondiales actuelles de $CO_2$ atteignent 50 milliards de tonnes par an (23 dues au charbon, 20 au pétrole, 7 au gaz). Les expériences de captage stockage de CO2 portent sur quelques millions de tonnes par an.**

Le Tableau 1 montre que les besoins de stockage de la catégorie IMAGE sont beaucoup plus importants que ceux de la catégorie MESSAGE. La raison en est que la catégorie IMAGE fait beaucoup

[3] http://www.iiasa.ac.at/web-apps/ene/geadb/dsd?Action=htmlpage&page=regions

plus appel aux combustibles fossiles que la catégorie MESSAGE, comme on peut le voir sur la Figure 3.

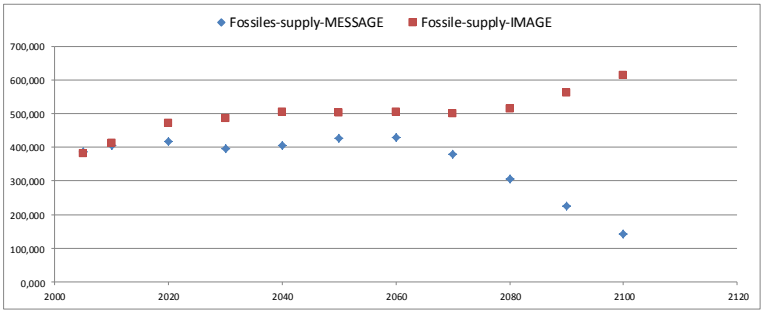


**Figure 3**

**Recours aux combustibles fossiles pour les scénarios « Supply » des catégories IMAGE et MESSAGE**

Notre objectif étant de réduire le plus rapidement possible l'utilisation des combustibles fossiles pour réduire aussi les émissions de $CO_2$, nous ne prendrons en considération que la catégorie MESSAGE et ses trois scénarios.

Les principales variables sur lesquelles jouent ces 3 scénarios sont : la consommation énergétique, la capture du $CO_2$, 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 2010 dépendent (faiblement) des scénarios.

| | Energie finale EJ/an | Energie primaire EJ/an | Capture $CO_2$ Mt | Electricité EJ/an | $CO_2$ émissions nettes Mt | $CO_2$ émissions brutes Mt | PIB G$ | Population millions |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 343 | 475 | 0 | 73 | 36000 | 36000 | 45237 | 6900 |
| Supply | 755 | 1051 | 23900 | 677 | -18350 | 5550 | 366139 | 9500 |
| Mix | 616 | 850 | 15175 | 487 | -13288 | 1887 | 366139 | 9500 |
| Efficiency | 427 | 614 | 15198 | 297 | -14630 | 548 | 366139 | 9500 |

**Tableau 2**

**Principaux paramètres des scénarios RCP 2.6 de l'IIASA. Les émissions nettes de $CO_2$ sont égales aux émissions brutes, essentiellement dues à la combustion des fossiles, diminuées du $CO_2$ stocké. Les valeurs affichées correspondent à 2100**

| | 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 | 326 |
| Supply GWe | | | | 8600 | | | 9750 | 90300 |
| Mix EJ | 18 | 100 | 3,8 | 138 | 221 | 33 | 70 | 272 |
| Efficiency EJ | 41 | 46 | 3,3 | 0 | 221 | 23 | 34 | 249 |

**Tableau 3 (a)**

**Mix énergétique mondial en 2100 pour les trois scénarios. (Energies primaires[4], EJ[5])**

[4] Pour les conventions de définition des énergies primaires, secondaires et finales voir l'Annexe « Conventions »

| | Charbon ZJ | Gaz ZJ | Pétrole ZJ |
|---|---|---|---|
| Cumul consommation 2100 Supply | 13,6 | 12,3 | 17,2 |
| Reste exploitable 2100 Supply | 85 | 5,9 | 0,94 |
| Cumul consommation 2100 MIX | 10,04 | 11,9 | 16,3 |
| Reste 2100 exploitable MIX | 87 | 6,6 | 1,2 |
| Cumul consommation 2100 Efficiency | 10,08 | 12,4 | 12,7 |
| Reste 2100 exploitable Efficiency | 87 | 8,3 | 1,0 |

**Tableau 3 (b)**

**Cumul des consommations de combustibles fossiles et ressources exploitables en 2100 pour les 3 scénarios de l'IIASA. 1ZJ=1000 EJ=24 Gtep**

On remarque l'importance de la production solaire en 2100. Les 326 EJ envisagés pour le scénario « Supply » correspondent à 90.000 TWh, soit, pour un facteur de charge de 1000h/an, une puissance de 90.000 GW, et une surface au sol d'environ 3 millions de $km^2$. La question du stockage de l'électricité n'est pas explicitement mentionnée dans les scénarios de l'IIASA. La question du réalisme d'une telle production solaire est posée. De son côté, la production de 221 EJ de biomasse correspondrait à l'exploitation d'environ 2 millions de $km^2$, soit 4 fois la superficie de la France.

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 3 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 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 $CO_2$ qui doivent être capturés et stockés pour atteindre l'objectif RCP 2.6 sont considérables ce qui en fait un objectif difficilement accessible. En fin de période, l'essentiel de cette capture porte sur le $CO_2$ produit par la combustion de la biomasse.

## Le scénario « Supply » de l'IIASA.

Le scénario dit « Supply » de forte consommation énergétique envisage 251 EJ de production d'électricité nucléaire, soit 69.000 TWh, soit encore, la production de 8600 réacteurs de 1 GWe. L'évolution proposée de la production nucléaire dans ce scénario est représentée sur la Figure 4. On constate que la quasi-totalité du parc nucléaire serait construite entre 2050 et 2090, soit 40 ans[6]. Pendant cette période la production augmenterait de 200 EJ soit celle de près de 7000 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 80 : 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 versus 60 millions de Français).

---

[5] Rappelons que 1 EJ= 1 exajoule=$10^{18}$Joules =277 TWh =24 Mtep

[6] De 2010 à 2050 la puissance des réacteurs est multipliée par 4.

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 s'explique par le fait que les besoins de transport en 2100 seraient essentiellement satisfaits par l'électricité et l'hydrogène, lui-même produit à partir d'électricité.

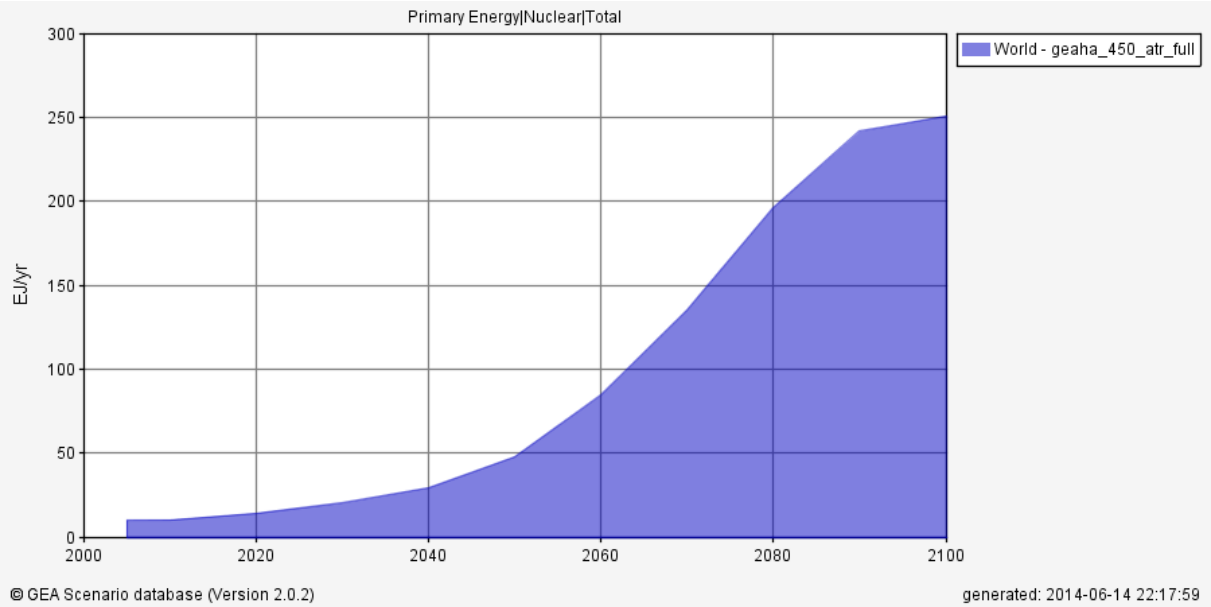


**Figure 4**

**Evolution du parc nucléaire dans le scénario Supply**

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

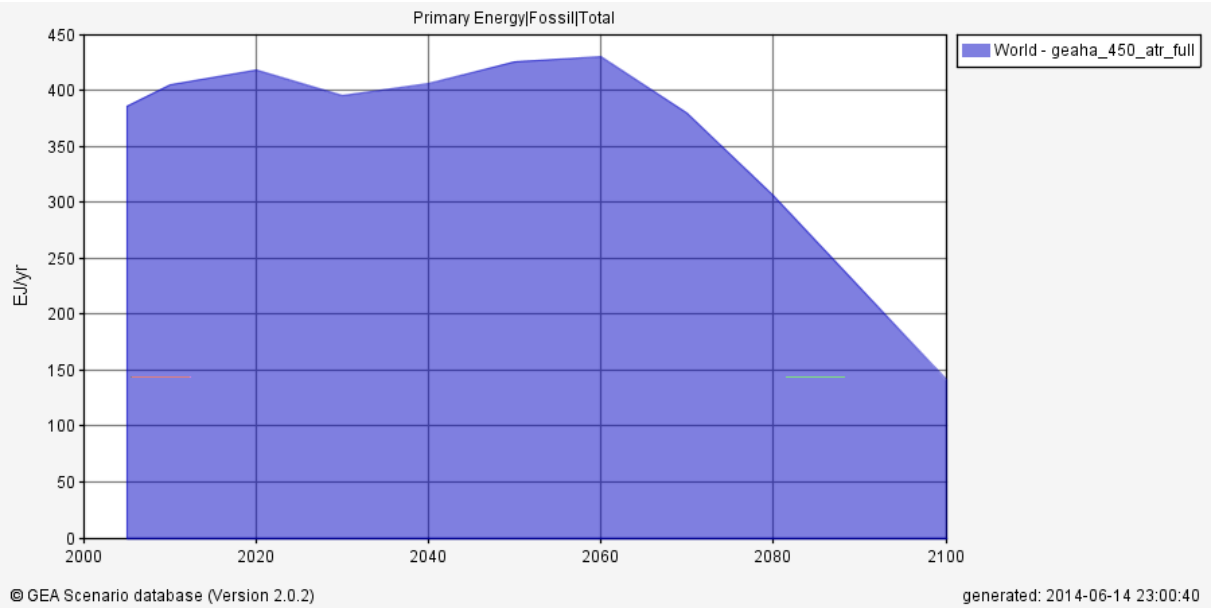


**Figure 5**

**Evolution de la production fossile dans le scénario Supply.**

La question qui se pose 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 $CO_2$ injectée dans l'atmosphère serait alors considérablement réduite, ce qui diminuerait fortement les besoins de CSC – une technologie encore mal maitrisée et coûteuse – et une contribution plus raisonnable du solaire et de la biomasse. L'objet de la présente étude sera 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, ultérieurement, le scénario « Mix », et nous ferons la comparaison entre le scénario « Efficiency » sans et avec nucléaire .

## 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 cycle[7] (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 et D sur le retraitement[8]. Nous supposons aussi que les réserves d'uranium naturel sont de l'ordre de 20 millions de tonnes[9]. Le stock initial de plutonium provient d'un parc de réacteur à eau (REP, EPR) produisant 0,25 tonne de plutonium par an et GWe. Les paramètres à faire éventuellement varier dans l'étude sont : les réserves d'uranium[10], les taux d'utilisation de l'uranium dans les réacteurs (CANDU[11] vs EPR), le taux de surgénération. Une comparaison entre les deux systèmes EPR-RNR et CANDU-RNR est faite dans l'Annexe III.

---

[7] 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.

[8] 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)².

[9] 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.

[10] 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 20000 tonnes par an.

[11] Les réacteurs CANDU, refroidis à l'eau lourde peuvent produire jusqu'à 600 kg de Plutonium par an et par GWe

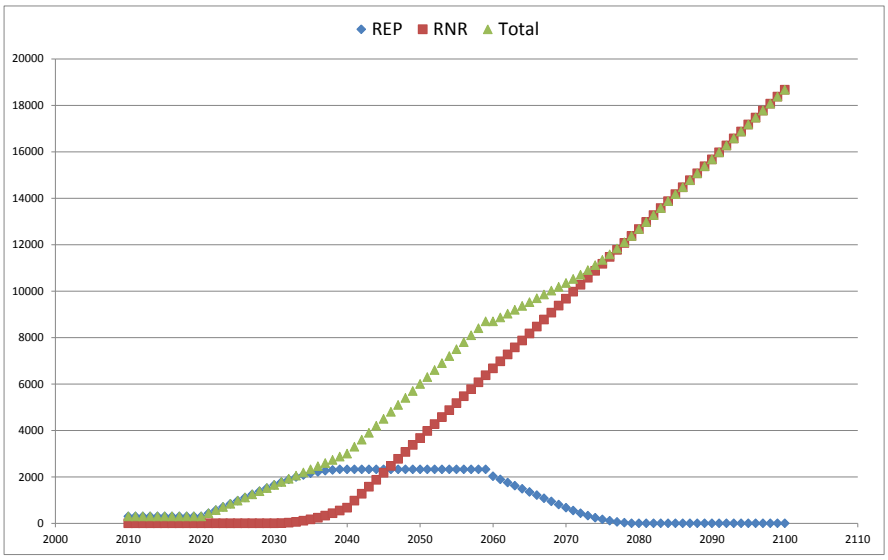


**Figure 6**

**Evolution possible du parc mondial de réacteurs**

Sur la Figure 6 la puissance nucléaire totale passe de 300 GWe en 2020 à 9000 en 2060, soit légèrement plus que ce que l'IIASA projette entre 2050 et 2090.

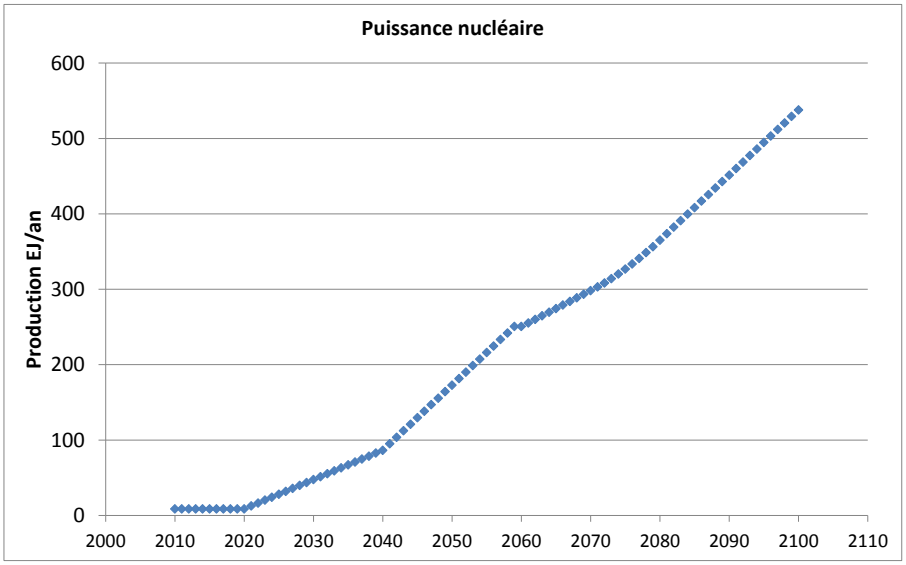


**Figure 7**

**Evolution de la production annuelle par le parc nucléaire**

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 de 12 millions de tonnes. L'Agence de l'Energie Nucléaire estime que les réserves « classiques » d'uranium sont de l'ordre de 16 millions de tonnes[12].

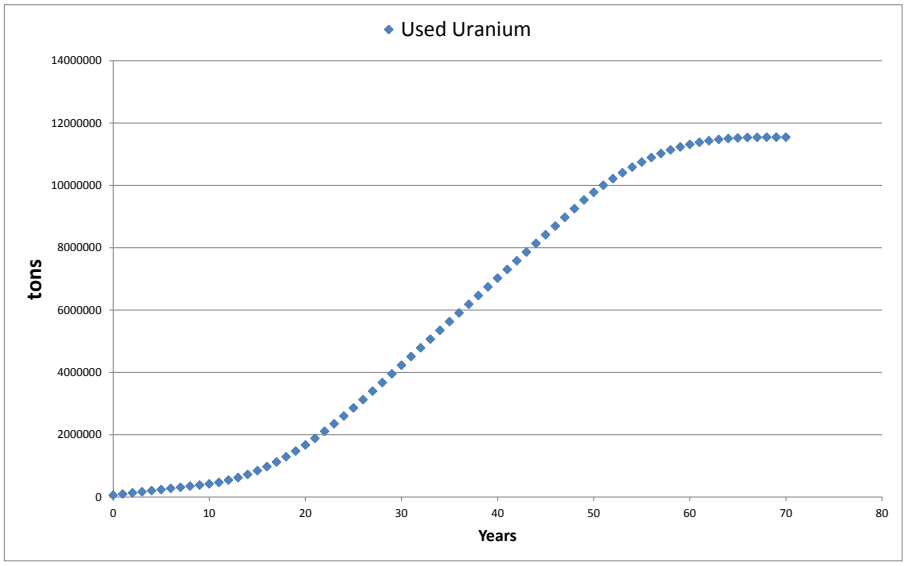


**Figure 8**

**Consommation cumulée d'uranium pour le scenario "Supply nucléaire" dans le cas d'un parc ERP-RNR**

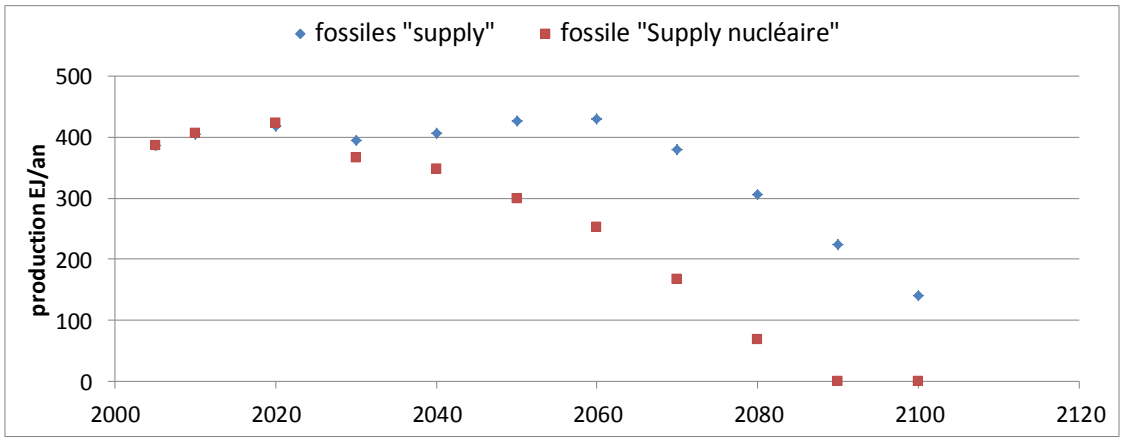


**Figure 9**

**Evolution de la consommation énergétique d'origine fossile dans le scénario « Supply » et dans le scénario « Supply nucléaire »**

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.

[12] http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2010/6891-uranium-2009.pdf

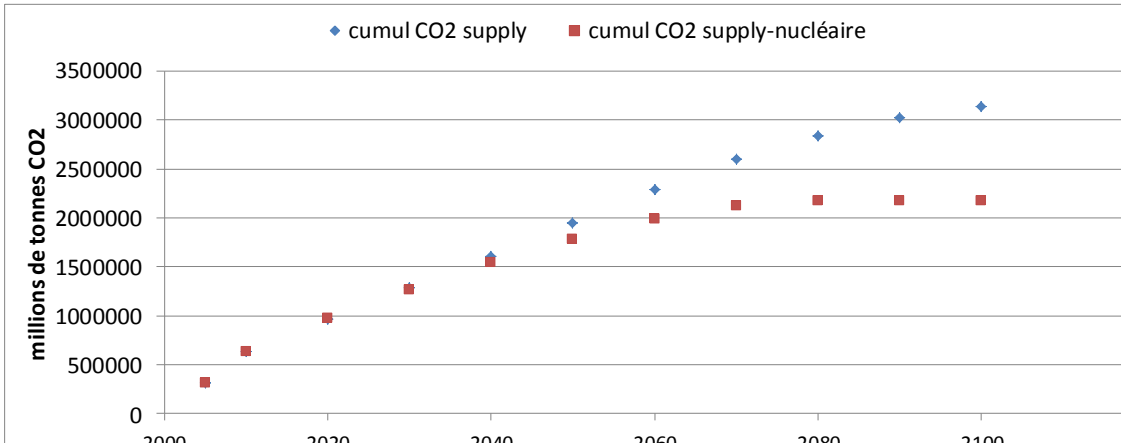


Figure 10

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 « nucléaire » atteint une saturation pour une concentration de 540 ppmV. Alternativement, dans le cas du maintien d'un grand effort de capture-stockage du CO2 le scénario nucléaire est beaucoup moins exigeant en matière de captage stockage que le scénario IIASA originel, comme on peut le voir sur la Figure 11, le besoin de stockage passant de 25 Gt de CO2 à 10 Gt.

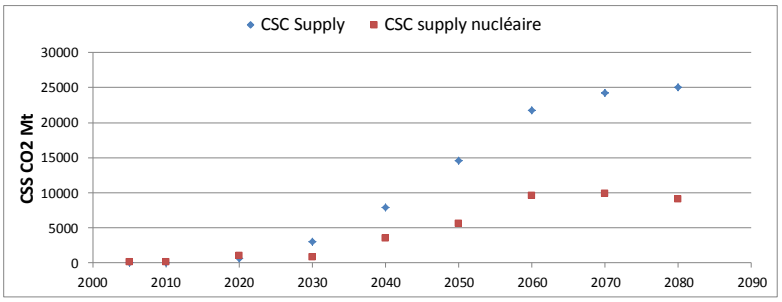


Figure 11

Evolution des besoins de stockage de $CO_2$.

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 capturant et le stockant.

| | Total | Electricité | fossiles | Nucléaire | Biomasse | Hydro | Vent | soleil |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 470 | 65 | 401 | 10 | 45 | 12 | 1,2 | 1 |
| Supply | 1072 | 677 | 141 | 251 | 221 | 33 | 89 | 289 |
| Suply nucléaire | 1072 | 851 | 0 | 600 | 221 | 33 | 89 | 129 |

Tableau 4

Mix énergétique mondial en 2100 pour les scénarios « Supply » et « Supply nucléaire »

## Le Scénario Mix

Le scénario dit « MIX», de consommation énergétique intermédiaire, envisage 137 EJ de production d'électricité nucléaire, soit 38000 TWh, soit encore, la production de 4700 réacteurs de 1 GWe. L'évolution proposée de la production nucléaire dans ce scénario est représentée sur la Figure 12. On constate que, comme dans le scénario « Supply », la quasi-totalité du parc nucléaire serait construite entre 2040 et 2100, soit 60 ans. Pendant cette période la production augmenterait de 120 EJ soit celle de près de 4200 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 ».

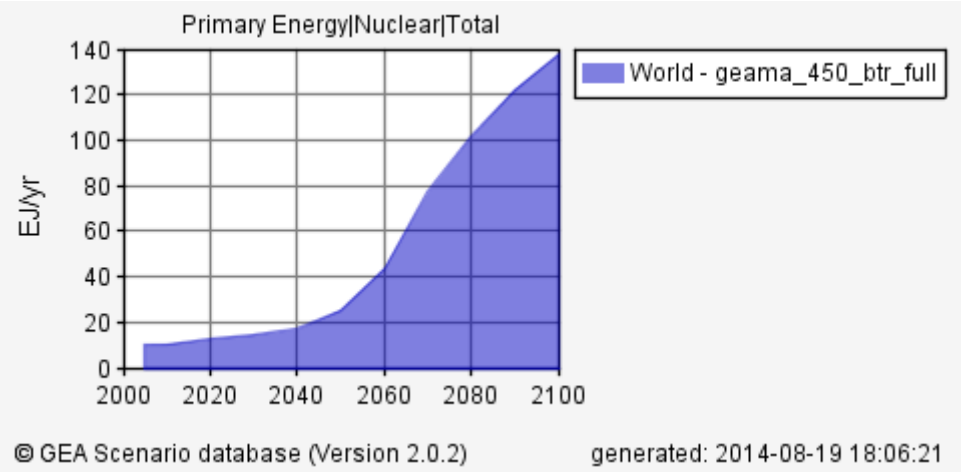


Figure 12

Evolution de la production nucléaire dans le scenario MIX

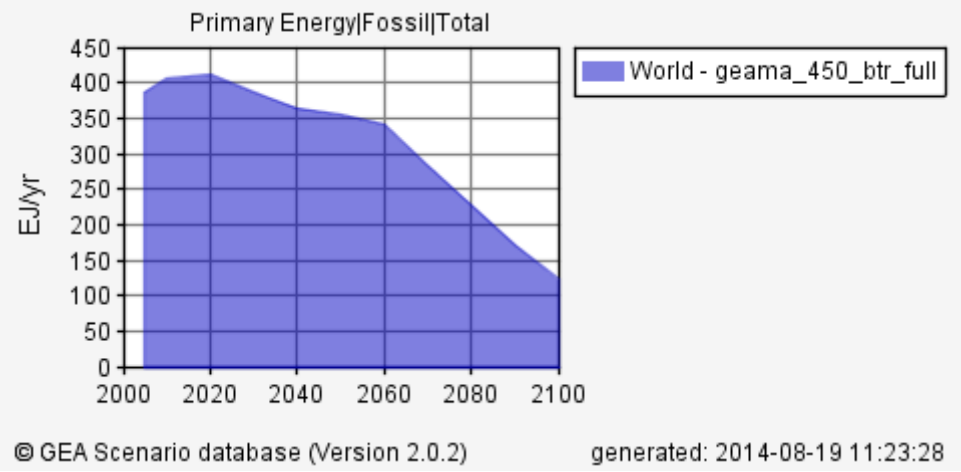


Figure 13

Evolution de la production primaire fossile dans le scenario MIX

## Le Scénario « Mix Nucléaire »

Nous faisons l'hypothèse d'une croissance de la puissance nucléaire aussi rapide que présentée sur la Figure 6 et sur la Figure 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 5.

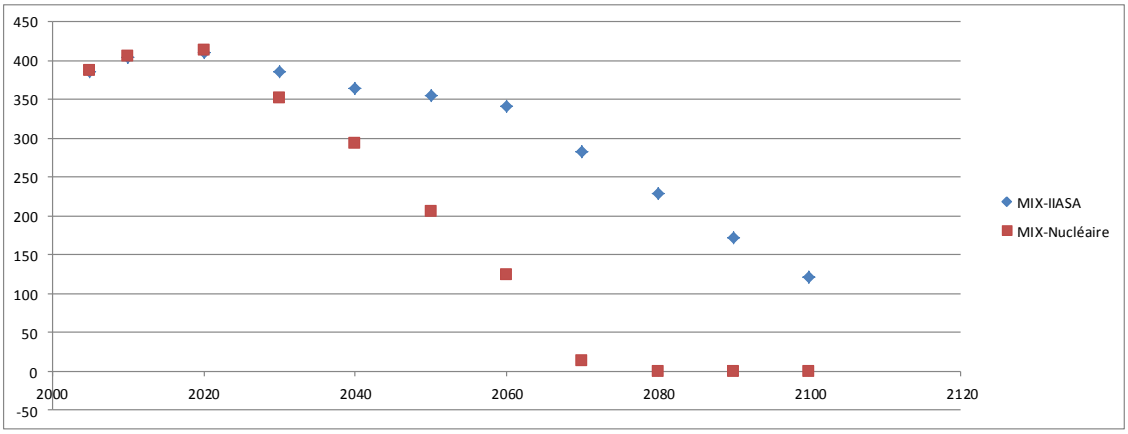


**Figure 14**

**Evolution de la consommation énergétique d'origine fossile dans le scénario « MIX » et dans le scénario « MIX-nucléaire ».**

| | Total | fossiles | Nucléaire | Biomasse | Hydro | Vent | soleil |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 470 | 401 | 10 | 45 | 12 | 1,2 | 1 |
| MIX | 850 | 0 | 137 | 221 | 33 | 70 | 272 |
| MIX nucléaire | 850 | 0 | 500 | 217 | 33 | 40 | 60 |

**Tableau 5**

**Mix énergétique mondial en 2100 pour les scénarios « MIX » et « MIX nucléaire »**

## Le Scénario « Efficiency » de l'IIASA.

Le scénario « Efficiency» est un scénario de sortie du nucléaire comme on peut le voir sur la Figure 15

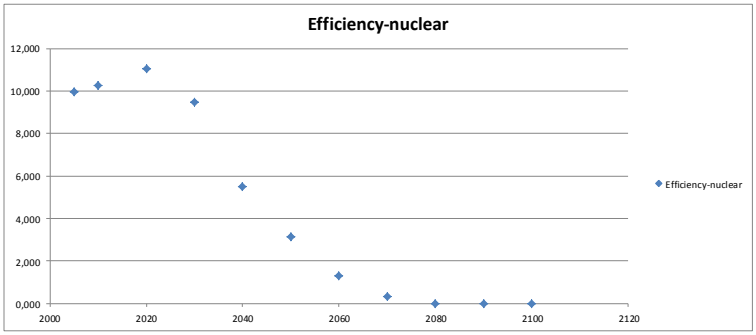


**Figure 15**

**Evolution de la production nucléaire dans le scenario Efficiency**

Ce scénario voit aussi une disparition progressive de la production fossile.

## Le Scénario « Efficiency Nucléaire »

Contrairement à l'objectif du scénario nous supposons une croissance de la production nucléaire aussi rapide que présentée sur la Figure 6 et sur la Figure 7. Dans ces conditions la production fossile s'annule plus rapidement comme on peut le voir sur la Figure 16. Comme précité, 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 5.

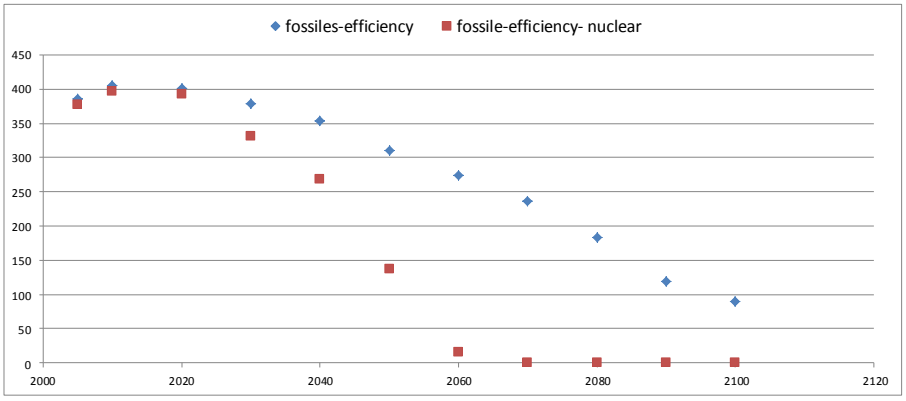


**Figure 16**

**Evolution de la consommation énergétique d'origine fossile dans le scénario « Efficiency » et dans le scénario « Efficiency-nucléaire ».**

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 6. Toutes choses égales par ailleurs, il est clair que refus du nucléaire imposerait de lourds sacrifices aux populations en diminuant la consommation d'énergie de 40%.

| | Total | fossiles | Nucléaire | Biomasse | Hydro | Vent | soleil |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 470 | 401 | 10 | 45 | 12 | 1,2 | 1 |
| Efficiency | 617 | 90 | 0 | 221 | 23 | 34 | 249 |
| Efficiency nucléaire | 1003 | 0 | 605 | 221 | 23 | 34 | 120 |

**Tableau 6**

**Mix énergétique mondial en 2100 pour les scénarios « Efficiency » et « Efficiency nucléaire »**

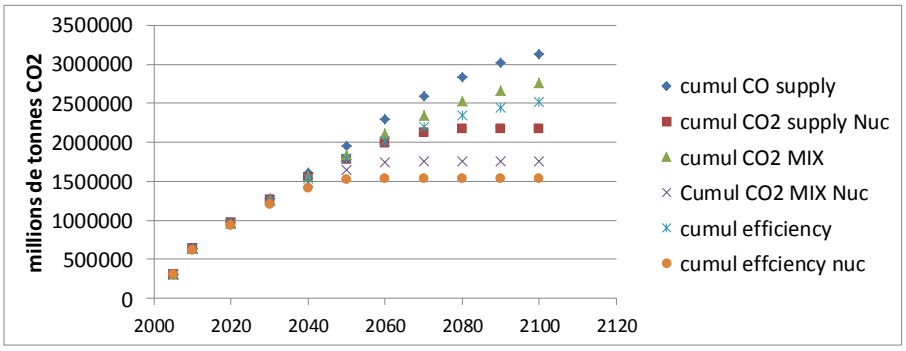


**Figure 17**

**Evolution des cumuls de quantités de CO2 émises pour les scénarios Supply, Mix, et Efficiency avec ou sans développement important de la production nucléaire. La réabsorption du CO2 par la biosphère n'est pas prise en compte.**

La Figure 17 résume les considérations précédentes en ce qui concerne les émissions cumulées de gaz carbonique entre 2005 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 $CO_2$ par MWh.

Dans ces conditions, on constate que les scénarios MESSAGE ne parviennent pas une stabilisation des émissions cumulées au cours du 21ème siècle. Au contraire, tous les scénarios basés sur une contribution importante (maximale) du nucléaire obtiennent une saturation des émissions cumulées entre 1,5 et 2,1 milliers de Gt de $CO_2$[13]. Les scénarios MESSAGE ne peuvent respecter la trajectoire RCP 2.6 (voir Tableau 1) qu'en faisant appel à des programmes massifs de capture et stockage du CO2. En particulier cette technique appliquée à la combustion de la biomasse permet de diminuer la concentration de $CO_2$ dans l'atmosphère. Cette pratique, si elle est réalisable, peut, bien sûr, être appliquée aux scénarios à forte composante nucléaire.

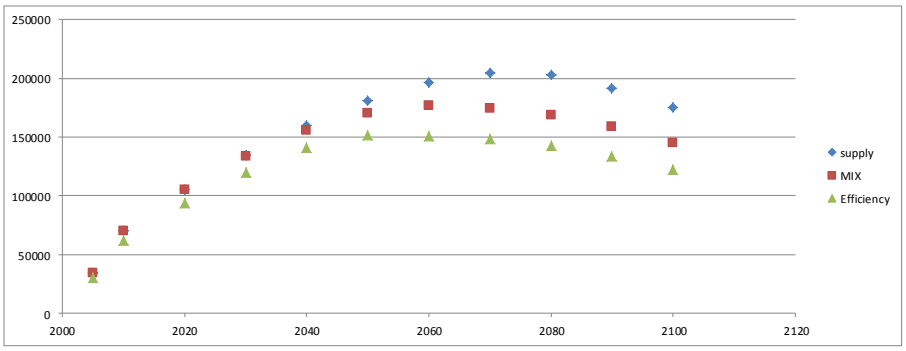


**Figure 18**

**Evolution des cumuls de quantités de $CO_2$ émises pour les scénarios Supply, Mix, et Efficiency avec développement important de la production nucléaire et capture stockage du $CO_2$ produit par la combustion de la biomasse. On suppose que la combustion de la biomasse est neutre du point de vue du $CO_2$ (les émissions produites par la combustion sont compensées par l'accroissement de 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 $CO_2$ se situerait aux environs de 1000 et 1500 milliards de tonnes. Si on admet que les océans et la biosphère absorbent la moitié des émissions on voit que la masse de CO2 dans l'atmosphère augmenterait de 500 à 750 milliards de tonnes, ce qui correspondrait à une augmentation de 100 à 150 ppm de la concentration de CO2 dans l'atmosphère, qui atteindrait donc entre 500 et 550 ppm.

## 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 trois 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. 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 4000 $/kWe pour les RNR. L'investissement annuel serait donc de 1200 G$/an. Cet investissement est à mettre en relation

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

avec le PIB mondial. Dans les scénarios MESSAGE celui-ci varie entre 118022 $ en 2040 et 366139 $ 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 $/MWh[14]. 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'années[15]. 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 donc 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 capturer et stocker des milliards de tonnes de $CO_2$ chaque année.

## 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 $CO_2$ à capturer et stocker serait divisée au moins par un facteur de 2,5, sinon annulée, et l'objectif de développement des coûteuses ENR intermittentes serait divisé par un facteur proche de 2. Un développement du nucléaire conduisant à près de 20000 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'un millième de celle du charbon et d'un vingtième de celle de la biomasse énergie. Enfin il faut remarquer que l'utilisation de la surgénération diviserait pas un facteur 100 le volume des déchets nucléaires à stocker.

[14] Ce prix résulte de l'addition du prix en sortie de centrale à celui de la distribution.
[15] Comme l'a fait EDF lors de la réalisation du parc nucléaire français.

# 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 et D ont été faits concernant la sûreté et la gestion des déchets."***

A 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 à la Tableau 7 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.

| Technique | Death per 1000 TWh |
|---|---|
| Coal (world) | 170000 |
| Coal (China) | 280000 |
| Coal (US) | 15000 |
| Oil | 36000 |
| Natural gas | 4000 |
| Biomass | 24000 |
| Solar PV | 440 |
| Wind | 150 |
| Hydroelectricity | 1400 |
| Nuclear | 90 |

**Tableau 7**

**Nombre de morts par 1000 TWh de production d'énergie finale pour différentes techniques de production. 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/)**

.

# Annexe II

## Constructions et coûts des réacteurs dans le monde.

Ces informations proviennent de la World Nuclear Association[16]. Il y a 71 réacteurs en construction dans le monde, dont 32 en Chine, 6 en Inde, 10 en Russie, 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 7200 $/kW, celui de Flamanville de 6500 $/kW, Watts Bar 2 (fin de construction d'un réacteur commencée en 1985 USA) de 4000 $/kW, Hongshane 4 (CPR 1000) de 2800 $/kW. La Chine envisage un coût de 2000 $/kW qui devrait s'abaisser à 1600 $/kW dans le futur, 3 fois moins cher que pour le même réacteur (AP1000) construit aux USA.

Nous retenons un coût de 2500 $/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 4000 $/kWe.

L'OCDE a fait une étude du coût des moyens de production d'électricité dans l'OCDE et en Chine[17]. Nous en extrayons le Tableau 8.

| Techniques | OECD | Chine |
|---|---|---|
| | US $/MWh | US $/MWh |
| Nucléaire | 50-82 | 30-36 |
| Charbon avec CSC | 85 | (54) |
| Charbon sans CSC | 54 | 34 |
| Eolien on shore | 90-146 | 51-86 |
| Eolien off shore | 138-188 | |
| Photovoltaïque | 287-410 | 123-186 |

**Tableau 8**

**Coûts actualisés du kWh de l'électricité pour les pays de l'OCDE et la Chine. Calcul fait avec un taux d'actualisation de 5%. La taxation des rejets de $CO_2$ se traduit par un surcoût d'environ 23 $/MWh, évidemment très réduit lorsque l'installation est équipée de CSC.**

L'OCDE n'indique pas le coût de centrales à charbon munies de CSC en Chine. On peut, toutefois, appliquer le même surcoût proportionnel que celui observé pour l'OCDE, soit 54 $/MWh, que nous reportons entre parenthèses sur la Tableau 8. 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-1200[18], soit de l'ordre de 1000 $/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 4000 $/kWe et un coût de production de 80 $/MWh.

[16] http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Plans-For-New-Reactors-Worldwide/
[17] OECD/IEA-NEA 2010, Projected costs of Generating Electricity, Table 3.7
[18] http://nextbigfuture.com/2013/08/fast-reactor-status-and-two-step-closed.html

# 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 utilisent de l'eau pour ralentir les neutrons et extraire la chaleur produite dans éléments combustibles. La majorité de ces réacteurs utilisent de l'eau légère (ou ordinaire) dans laquelle l'hydrogène est lui-même léger $^{1}H$ 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 $^{235}U$, 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 33000 à 45000 MWj par tonne de métal lourd[19]).

Le deutérium $^{2}H$, 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 $^{1}H$[20]. 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 (7000 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 $^{235}U$ le sont essentiellement dans l'uranium 238 ($^{238}U$). Ils produisent ainsi du Plutonium 239, ($^{239}Pu$). Cet isotope est fortement fissile, pratiquement au même titre que $^{235}U$. Dans un réacteur CANDU environ 20% des fissions proviennent du $^{239}Pu$. De plus, en fin d'irradiation, un stock de Plutonium riche en $^{239}Pu$ peut être récupéré par retraitement du combustible. C'est ainsi qu'un réacteur CANDU de 1 GWe produit environ 590 kilogrammes de Plutonium chaque année[21]. C'est près de 3 fois plus qu'un REP.

Une REP de 1 GWe produisant 0,2 tonnes 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 retraitement), 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 tonnes 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.

---

[19] 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 33000 MJ/i vaut donc 790000 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.

[20] Il faut toutefois tenir compte du fait que la distance de ralentissement des neutrons qui est environ deux fois plus longue dans l'eau lourde que dans l'eau ordinaire

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

Ainsi, partant d'un parc de 2000 réacteurs REP fonctionnant 40 ans on pourrait démarrer 40 RNR. Si ces réacteurs ont un inventaire initial de 8 tonnes, et une production nette de 0,25 tonnes de Plutonium par an, au bout de 40 ans de fonctionnement on aurait un nombre total de RNR de 4500 RNR. Si 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 5600 RNR.

Considérant un parc initial de 2000 CANDU, au bout de 40 ans on pourrait démarrer 6000 RNR. Même en supposant un inventaire initial de 8 tonnes de Plutonium, on voit qu'on pourrait obtenir 13500 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 2000 REP de 1 GWe à celle de 2000 CANDU de même puissance.

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.

Des évolutions récentes affaiblissent cette argumentation : l'enrichissement de l'uranium en isotope $^{235}U$ par ultracentrifugation 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'au $^{239}Pu$.

Les pays qui disposent déjà de l'armement nucléaire représentent désormais une grande part de l'humanité : Chine, Inde, USA, France, UK, Israel, Pakistan. Des réacteurs CANDU fonctionnent ou sont en construction au Canada, en Corée du Sud, en Inde, au Pakistan, en Chine, en Argentine, en Roumanie.

On peut donc espérer que, si le besoin s'en fait sentir, les réticences vis-à-vis des réacteurs CANDU s'amoindriront, le plus tôt étant le mieux.

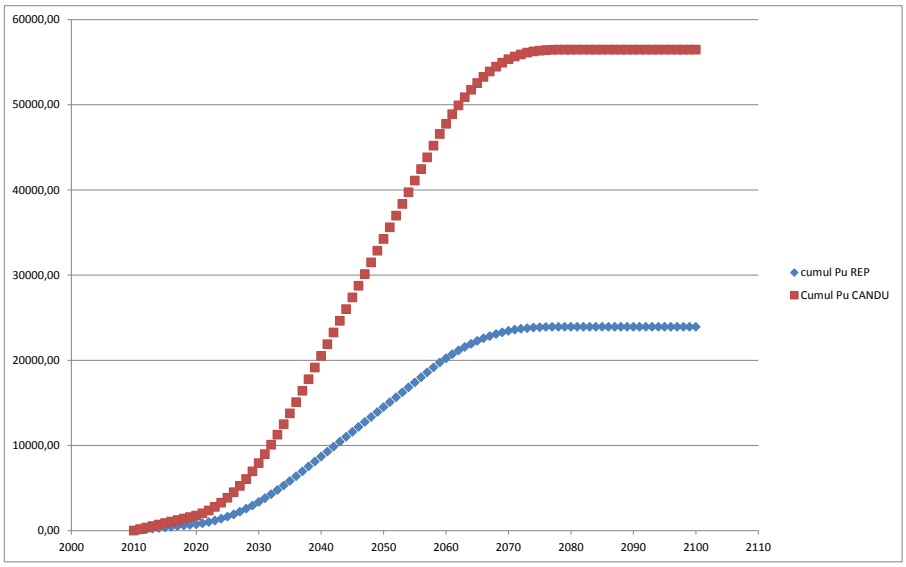


**Figure 19**

**Comparaison des productions cumulées de plutonium par un parc de REP et par un parc de CANDU**

# Annexe Conventions

Les conventions utilisées par l'IIASA pour définir les différentes formes d'énergie sont les suivantes :
**Energie finale** : énergie achetée par l'utilisateur. Par exemple gaz ou électricité. L'origine de l'électricité n'est pas précisée
**Energie secondaire** : énergie sortant de l'usine de production. Par exemple l'électricité, l'hydrogène, les combustibles liquides. Les sources d'électricité sont alors précisées (charbon, nucléaire, éolien etc.)
**Energie primaire** : Il s'agit de l'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 nécessaire pour fournir la même quantité d'énergie finale ou secondaire. Pour la production d'électricité par des centrales fossiles

La convention utilisée par l'IIASA pour définir les différentes formes d'énergie est la suivante :
Energie finale : énergie achetée par l'utilisateur. Par exemple gaz ou électricité. L'origine de l'électricité n'est pas précisée
Energie secondaire : énergie sortant de l'usine de production. Par exemple l'électricité, l'hydrogène, les combustibles liquides. Les sources d'électricité sont alors précisées (charbon, nucléaire, éolien etc.)
Energie primaire : Il s'agit de l'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 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

| 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 |

**Tableau 9**

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

| Scénario Supply EJ | 2005 | 2100 | 2100 Supply Nucléaire |
|---|---|---|---|
| électricité | 54 | 384 | |
| dérivés pétrole | 136 | 1,6 | 0 |
| biomasse | 64 | 6 | |
| charbon | 27 | 0 | 0 |
| gaz | 49 | 83 | 0 |
| biocarburants | 0,8 | 57 | |
| Thermique solaire | 0,3 | 37 | |
| Hydrogène | 0 | 174 | |
| Total | 315 | 755 | |

**Tableau 10**

**Répartition des consommations finales**

| Scénario Supply EJ | 2005 | 2100 | 2100 Supply Nucléaire |
|---|---|---|---|
| Electricité | 65 | 677 | 851 |
| Combustibles liquides | 162 | 64 | 0 |
| Hydrogène | 0 | 245 | 157 |

**Tableau 11**

**Répartition des énergies secondaires**

| Scénario Supply EJ | 2005 | 2100 | 2100 Supply Nucléaire |
|---|---|---|---|
| Charbon | 26,3 | 1,5 | 0 |
| Gaz | 13,2 | 1,6 | 0 |
| Nucléaire | 10 | 250 | 600 |
| Hydro | 10 | 33 | 33 |
| Eolien | 0,4 | 89 | 89 |
| Solaire | 0,03 | 289 | 129 |
| Biomasse | 0,6 | 4,4 | |
| Total | 65 | 677 | 851 |

**Tableau 12**

**Production d'électricité**