



L'ENERGIE NUCLEAIRE PEUT ELLE STABILISER LA CONCENTRATION DES GAZ A EFFET DE SERRE

H.Nifenecker¹, D.Heuer¹, E.Huffer¹, S.David¹, J.M.Loiseaux¹, J.M.Martin², O.Meplan¹, A.Nuttin¹

¹Institut des Sciences Nucléaires (IN2P3,UJF) 53 ave. Des Martyrs F38026 Grenoble France
<http://isnwww.in2p3.fr/reacteurs-hybrides/french/reacteurs-hybrides.html>

²Institut d'Economie et de Politique de l'Energie, BP47, F38040 Grenoble Cedex 09 France

Résumé

La stabilisation de la température exige la limitation des émissions de CO₂ à moins de 3Gt d'équivalent carbone alors que les émissions actuelles dépassent 6Gt. Tout en prévoyant une augmentation de la demande d'énergie primaire de 250% en 2050, nous montrons qu'une stratégie de contribution intensive du nucléaire, impliquant la mise en service d'un ensemble de réacteurs REP fournissant 3000 GWe dès 2030 et un ensemble supplémentaire de réacteurs U-Pu ou Th-U fournissant 6000 GWe conduirait à une stabilisation de la température à une valeur de 2 degrés au dessus de la température pré-industrielle.

Mots clés : stratégie de développement énergétique, énergie nucléaire, générateurs de plutonium, générateurs d'U3, réacteurs à sels fondus.

1-INTRODUCTION

Un rapport récent du Groupe International d'Etudes du Climat¹(GIEC, en anglais IPCC) met en évidence et résume les signes d'un réchauffement global déjà en cours. D'après les modèles climatiques, le niveau de concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et, donc, de la température, ne pourrait se stabiliser que si les émissions anthropiques annuelles étaient réduites de leur valeur actuelle de 6Gt² à 3Gt d'équivalent carbone. Sur la figure 1, on peut voir que, plus le niveau d'émissions tarde à être réduit, plus le niveau de concentration de CO₂ résultant est élevé et, par conséquent, plus la température moyenne mondiale à l'équilibre sera élevée.

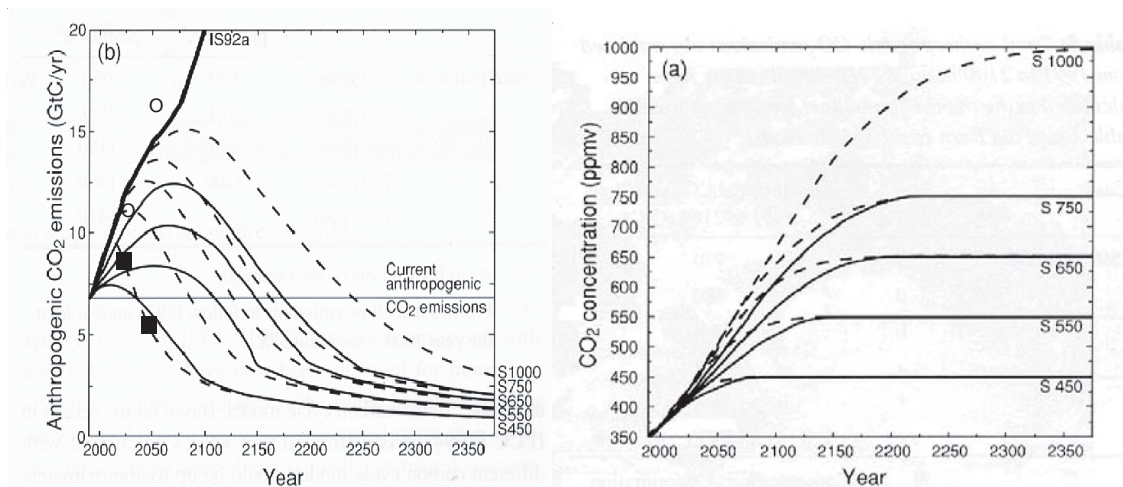


Figure 1: Exemples de modélisations d'émissions anthropiques de CO₂ (à gauche, b). Les valeurs à l'extrémité des courbes indiquent les niveaux de concentration asymptotique obtenus. Les lignes continues et en pointillés représentent des taux différents d'émissions conduisant à la même concentration asymptotique. On obtient la même concentration asymptotique si la surface sous la courbe est la même. Les carrés pleins représentent les valeurs d'émissions dans notre modèle, les cercles celles du scénario A2 de l'IIASA³. Les concentrations de CO₂ en fonction du temps sont représentées par les courbes de droite (a); Ces courbes sont tirées de la ref. 2

D'après les prévisions, la population de 2050 devrait se situer entre 9 et 11 milliards d'individus, à comparer aux 6 milliards actuels. Ainsi, pour stabiliser les concentrations de gaz carbonique, il faudrait réduire d'un facteur au moins trois les émissions moyennes par habitant. Le niveau moyen d'émission de CO₂ par habitant devrait ainsi passer d'une tonne équivalent carbone actuellement à 0,3 tonnes. Le facteur de réduction réel dépendra du niveau d'émission dans chacun des pays. Par exemple, aux Etats-Unis, on émet en moyenne 6 tonnes par habitant, soit 20 fois plus que la valeur à atteindre! Les projections du rapport³ conjoint de l'IIASA(International Institute for Applied Systems Analysis) et du Conseil Mondial de l'Energie(CME, en

anglais WEC) montrent bien que nous n'allons pas dans la bonne direction : les émissions envisagées pour 2050 vont de 5 Gt dans le scénario le plus « écologique » à 17 Gt dans le plus industriel.

Des mesures énergiques devraient être prises dès que possible pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Du fait de la satisfaction de besoins légitimes dans les pays en voie de développement, la demande d'énergie ne peut qu'augmenter. Une diminution significative de l'utilisation des combustibles fossiles pour les transports sera difficile à réaliser ; il n'y a pas, à l'échelle industrielle, de solution alternative au moteur à explosion. La production d'électricité, qui correspond à 40% de l'offre d'énergie primaire, repose essentiellement sur les combustibles fossiles. Des pays comme la France et la Suède montrent qu'il est possible de faire autrement. Grâce à l'hydroélectricité et au nucléaire, ces pays produisent leur électricité en n'émettant pratiquement pas de CO₂. On peut évaluer l'efficacité d'une telle politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre en comparant le Danemark et la France, deux pays au développement économique équivalent. Pour chaque Tep d'énergie primaire consommée, le Danemark émet 3,2 tonnes d'oxyde de carbone dans l'atmosphère, et la France 1,6 tonnes. Une véritable diminution de la part des combustibles fossiles dans la production d'électricité est probablement la façon la plus efficace et la plus facile de commencer à réduire les émissions de CO₂. Les nouvelles énergies renouvelables (éolienne et solaire) sont encore loin d'être économiquement compétitives. Les ressources hydro-électriques sont limitées dans les pays industriels. Elles sont abondantes en Asie, en Afrique, en Amérique Latine mais il y a des obstacles environnementaux à leur mise en oeuvre. De plus, elles exigent une intensité capitaliste qui peut en limiter l'extension dans des pays en voie de développement. Une étude⁴ récente du Commissariat au Plan montre que l'énergie nucléaire est économiquement compétitive avec les combustibles fossiles si les coûts sont calculés sur toute la durée de vie des centrales.¹

Pour le Monde, les scénarios de fourniture d'énergie n'envisagent en général qu'une contribution modeste de l'énergie nucléaire. Par exemple, dans son scénario le plus « nucléaire », le Conseil Mondial de l'Energie évalue à 15%ⁱⁱ la contribution de l'énergie nucléaire en 2050, à comparer aux 5% actuels. Par ailleurs, les scénarios les plus écologiques envisagent une augmentation de la part des énergies renouvelables s'élevant jusqu'à 37%ⁱⁱⁱ en 2050, à comparer aux 18% actuels. Cette augmentation est largement due au développement des énergies éolienne et solaire dont la part est actuellement très faible. De même que l'énergie nucléaire, ces énergies contribueraient à atténuer le réchauffement climatique, et à repousser l'épuisement des réserves fossiles. Cependant, leur intensité capitaliste et leur coût sont aujourd'hui encore bien plus élevés que ceux du nucléaire. De plus, elles requièrent des dispositifs de stockage pratiques et économiques qui ne sont pas, à ce jour, disponibles. Il n'y a aucune base rationnelle pour s'interdire l'exploration d'une contribution du nucléaire plus grande qu'habituellement envisagée. Ce texte propose une première approche d'une stratégie à forte contribution du nucléaire. Il ne vise pas à définir le scénario le plus désirable. Il a seulement pour ambition de décrire ce que pourrait être le scénario faisant le plus possible appel au nucléaire tout en restant dans le domaine du possible. Il donne ainsi une limite supérieure à ce qu'un scénario fortement nucléaire pourrait apporter à la lutte contre l'effet de serre. Dans ce qui suit, les limites au recours au nucléaire ne sont déterminées que par :

- Les ressources en Uranium 235, ou, dans le cas de réacteurs surrégénérateurs, du taux maximum de croissance du parc de réacteurs
- Les capacités technologiques des différents pays à développer l'énergie nucléaire
- A un degré moindre, par les contraintes financières.

Des facteurs, qui pourraient être décisifs, comme l'acceptabilité sociale où l'opportunité politique ne sont pas pris en compte. Il faut remarquer que les scénarios les plus économes en énergie du Conseil Mondial de l'Energie souffrent de la même restriction.

Nous examinons d'abord un scénario conduisant jusqu'à 2030. En effet, étant donnée l'inertie des systèmes de production d'énergie, il semble que des innovations technologiques importantes ne pourraient être mises en oeuvre à l'échelle requise avant cette date. Notre but est de réduire les émissions de gaz à effet de serre autant que faire se peut et nous sommes convaincus que, pour l'instant, la seule alternative consiste à remplacer les centrales électriques à combustibles fossiles par des centrales nucléaires. Cependant, il est clair que, dans notre esprit, les énergies renouvelables pourraient, progressivement, remplacer le nucléaire au fur et à mesure qu'elles

ⁱ A cause de son intensité capitaliste (situation semblable à celle des énergies renouvelables) et à cause d'un retour sur investissements tardif, l'énergie nucléaire est désavantagée à court terme, surtout par rapport aux turbines à gaz à cycle combiné.

ⁱⁱ Scénario B du rapport IIASA/CME sur les perspectives énergétiques globales de 1998.

ⁱⁱⁱ Scénario C2 du rapport IIASA/CME sur les perspectives énergétiques globales de 1998.

deviennent compétitive. Le but à atteindre est la réduction des émissions de CO₂, pas l'augmentation de la part du nucléaire !

Nous montrons que l'objectif de 3Gt ne peut être atteint dès 2030. Il est possible qu'entre 2030 et 2050 de nouvelles technologies se développent à l'échelle industrielle, en particulier pour les transports, avec, par exemple, des véhicules électriques ou à hydrogène. Ces nouvelles technologies créeront de nouveaux besoins en électricité. Pour la production d'électricité, on devrait pouvoir exclure presque complètement le recours aux combustibles fossiles, pour s'appuyer soit sur le nucléaire, soit sur les énergies renouvelables. Nous allons examiner dans quelle mesure les émissions de CO₂ pourraient être encore réduites entre 2030 et 2050. Par ce que, dès aujourd'hui, le nucléaire a la capacité d'être un acteur déterminant dans cette réduction, nous allons nous attacher à sa contribution, soulignant une fois encore que son rôle pourrait être réduit grâce à l'extension des énergies renouvelables. Nous allons examiner les limitations physiques éventuelles qui feraient obstacle à l'augmentation du nucléaire envisagée, en considérant à la fois les réserves, et le développement éventuel de nouveaux types de réacteurs.

2-PROJECTIONS A 2030

Nous avons pris pour référence le scénario A2 de l'IIASA³. Ce scénario correspond à une croissance élevée et à une utilisation intensive du charbon. Il maximalise les émissions de CO₂ mais, à cause de ressources en pétrole et gaz limitées, d'une part, et de la richesse en charbon des principaux émetteurs que sont les USA, la Chine et l'Inde, on peut le considérer comme le scénario le plus probable en l'absence de mesures énergiques pour diminuer les émissions de CO₂. Il est proche d'un scénario du genre « business as usual » et est régi par les conditions de marché. Les scénarios de l'IIASA suivent l'évolution de l'économie et de l'énergie dans 11 régions. Pour simplifier, nous avons regroupé ces régions en 4 agrégats :

- A) pays de l'OCDE
- B) économies en voie de transition (pays de l'ex-Union Soviétique)
- C) Asie en voie de développement (Chine, Inde, Asie du Sud-Est)
- D) Le reste du monde (Amérique latine, Afrique, Moyen Orient).

Dans le scénario de référence, la part des énergies nucléaire et renouvelables dans la production d'électricité est faible. Nous l'avons beaucoup augmenté avec des valeurs différentes selon l'agrégat. Toutefois, nous avons maintenu ces parts dans des limites qui nous paraissent raisonnablement réalisables en 2030, compte tenu des possibilités de l'industrie nucléaire et du niveau de développement technologique des différents pays. Nous avons remplacé les parts de référence du nucléaire dans la production d'électricité par :

- 85% au lieu de 14% pour A. La proportion du nucléaire a été choisie de manière à rendre marginale la part des combustibles fossiles dans la production d'électricité.
- 50% au lieu de 6% pour B. Ce chiffre plutôt grand se justifie par le niveau de développement technologique des pays en transition.
- 30% au lieu de 3% pour C. La Chine et l'Inde possèdent déjà une forte compétence nucléaire.
- 30% au lieu de 0,1% pour D. L'agrégat D est très inhomogène, avec des pays comme l'Afrique du Sud, le Brésil, l'Argentine, le Mexique, le Chili qui pourraient atteindre de bons niveaux de nucléarisation et la plupart des pays d'Afrique qui devraient rester peu nucléaires. Le Moyen Orient pourrait atteindre un niveau significatif de nucléarisation.

Nous n'avons pas changé la contribution des énergies renouvelables, qui représente 18% de la production d'électricité. Si leur compétitivité devait s'améliorer, elles pourraient remplacer partiellement le nucléaire. On trouvera, dans le Tableau 1, une comparaison de la structure de la production d'énergie et des émissions de CO₂ dans le cas du scénario de référence et dans celui à forte contribution du nucléaire.

On voit qu'avec la construction de 3000 réacteurs en plus de ceux que prévoit le scénario de référence, les émissions de CO₂ seraient réduites de 27%, avec une contribution du nucléaire à la production d'électricité de 61%. Bien qu'il soit appréciable, ce résultat est encore insuffisant. Comme on l'a indiqué plus haut, une stabilisation de la température exige des émissions inférieures à 3 Gt d'équivalent carbone, soit 4 fois moins que dans le scénario de référence, 3 fois moins que dans le scénario modifié que nous venons de présenter.

Ligne 18 du Tableau 1, nous avons porté les émissions de CO₂ de l'OCDE. On remarquera que, dans le scénario à forte contribution du nucléaire, les émissions sont ramenées de 3150 tonnes en 2000 à 1650 tonnes en 2030. Ainsi, les objectifs de Kyoto seraient faciles à atteindre dans un tel scénario.

3-EXTRAPOLATIONS A 2050

Après 2030, il faudrait de nouvelles réductions :

- Suppression progressive de l'utilisation des combustibles fossiles pour produire de l'électricité, avec remplacement par le nucléaire ou les énergies renouvelables.
- Augmentation de la part de l'électricité dans l'énergie globale : suppression progressive des combustibles fossiles dans le chauffage individuel, augmentation de la part de l'électricité dans les transports publics, voitures électriques, piles à combustible à hydrogène, etc.

Un premier scénario à forte contribution du nucléaire en 2050 est chiffré dans la colonne 6 du Tableau 1. Il s'agit d'une simple extrapolation du scénario à forte contribution du nucléaire en 2030 de la colonne 4. La part importante du nucléaire à la production d'électricité est étendue à tous les agrégats, avec :

- 80% de nucléaire et 15% de renouvelables pour A.
- 80% de nucléaire et 17% de renouvelables pour B.
- 60% de nucléaire et 36% de renouvelables pour C.
- 40% de nucléaire et 53% de renouvelables pour D.

Total Monde								
	1	2	3	4	5	6	7	8
	IIASA(A2)	IIASA(A2)	Nucléaire intensif	IIASA(A2)	Nucléaire intensif	Hydrogène	IIASA(C2)	
1 Année	2000	2030	2030	2050	2050	2050	2050	2050
2 Population(Millions)	6168	8751	8751	10056	10056	10056	10056	10056
3 PIB(G\$)	27436	61597	61597	101519	101519	101519	101519	75050
4 PIB/tête k\$	4,4	7	7	10,1	10,1	10,1	10,1	7
5 <u>Energie Primaire(Mtep)</u>	<u>10710</u>	<u>18408</u>	<u>18408</u>	<u>24840</u>	<u>24840</u>	<u>24840</u>	<u>24840</u>	<u>14250</u>
6 <u>Electricité primaire(Mtep)</u>	<u>4107</u>	<u>8060</u>	<u>8021</u>	<u>10231</u>	<u>10231</u>	<u>10231</u>	<u>20154</u>	<u>6524</u>
7 <u>Nucléaire(Mtep)</u>	<u>493</u>	<u>684</u>	<u>4902</u>	<u>1092</u>	<u>7034</u>	<u>16047</u>	<u>2163</u>	<u>2163</u>
8 Electricité par fossiles	3008	5894	1638	6409	467	1378		952
9 Nucleaire+renouvelable	1099	2165	6383	3822	9764	18776		5573
10 <u>% Electricité</u>	<u>38,35</u>	<u>43,78</u>	<u>43,78</u>	<u>41,19</u>	<u>41,19</u>	<u>81,14</u>		<u>45,79</u>
11 Nucléaire %El.	12	8,49	61,12	10,68	68,75	79,62		33,15
12 Renouvelable% El.	14,75	18,38	18,38	26,68	26,68	13,54		<u>52,26</u>
13 <u>Fossiles % El.</u>	<u>73,25</u>	<u>73,13</u>	<u>20,42</u>	<u>62,64</u>	<u>4,57</u>	<u>6,84</u>		<u>14,58</u>
14 <u>Nucléaire(Gwe)</u>	<u>275</u>	<u>376</u>	<u>3387</u>	<u>607</u>	<u>4466</u>	<u>8915</u>		<u>1202</u>
15 Nucleaire(% du total)	4,6	3,72	26,63	4,4	28,32	64,6		15,18
16 <u>CO2(Mt C)</u>	<u>6976</u>	<u>11693</u>	<u>8465</u>	<u>16838</u>	<u>12695</u>	<u>5106</u>		<u>5114</u>
17 CO2 évité %			27,61		24,61	69,68		69,63
18 CO2(Mt C) <u>OCDE</u>	3146	3973	1648	4266	2040	746		
19 Unat tonnes/an	31690	43983	315142	62414	401957	916951		115360
20 Unat Cumulatif tonnes		1.39E+06	4.10E+06	2.45E+06	1.13E+07	1.64E+07		4.31E+06

TABLE 1

La part de l'électricité représente 41% de l'énergie primaire. On remarque que, même dans le scénario de référence, la part relativement élevée des énergies renouvelables (27%) permet déjà une réduction des émissions de CO2. Bien que, dans le cas du scénario « nucléaire », les émissions de CO2 soient encore réduites de 16 Gt à 12 Gt, ce qui est significatif, cette réduction est loin de permettre d'atteindre le but fixé de 3 Gt. Toute réduction supplémentaire exige une forte réduction de l'utilisation des combustibles fossiles dans les secteurs des transports et du chauffage individuel. Nous avons supposé que, dans les pays les plus développés, les piles à combustibles à hydrogène seraient largement utilisées dans l'automobile individuelle, et pour la co-génération de chaleur et d'électricité. Des réacteurs à haute température permettraient de meilleurs rendements thermodynamiques et la co-génération. Nous avons supposé que ces gains en efficacité compenseraient l'efficacité médiocre de la production d'hydrogène, et nous avons conservé les besoins en énergie primaire constants. Les parts de l'électricité dans les agrégats deviennent :

- 90% pour A.
- 85% pour B.
- 80% pour C.
- 70% pour D.

Dans ces conditions, on arrive à des émissions de CO2 inférieures à celles de l'an 2000 alors que la fourniture en énergie primaire est multipliée par un facteur 2,5. Moyennant une part supplémentaire accordée à l'électricité, on parvient à réduire les émissions de CO2 à moins de 3 Gt avant 2070. Dans ces conditions, la concentration de CO2 pourrait être limitée à 450 ppmv (deux fois la concentration pré-industrielle), comme on le voit sur la figure 1 où les croix correspondent aux émissions dans le scénario à forte intensité nucléaire en 2030 et au scénario avec l'hydrogène en 2050. Cette concentration conduirait à une augmentation de la température d'environ 2° C en 2100.

Les aspects principaux du scénario à émissions de CO2 minimales sont représentés sur la figure 2.

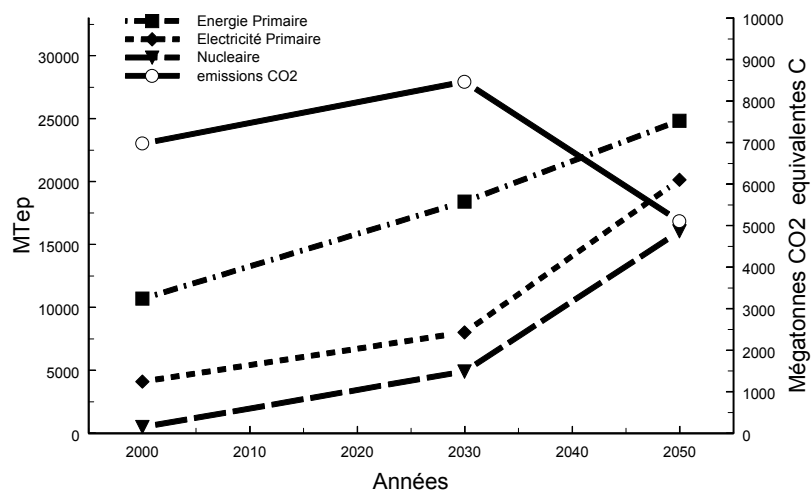


Figure 2 Scénario à émission de CO2 minimale : Energie primaire, production totale d'électricité, production d'électricité nucléaire (échelle de gauche, Mtep). Emissions de CO2 (échelle de droite, en Mégatonnes d'équivalent carbone)

Les résultats du scénario C2 de l'IASA sont reportés dans le tableau 1, colonne 8, pour permettre la comparaison. Des 6 scénarios de l'IASA, c'est celui qui réduit le plus les émissions de CO2. Ses aspects principaux sont :

- Un PIB modeste, de 25% inférieur à celui du scénario A2.
- Une intensité énergétique très faible, telle que les besoins en énergie primaire sont 42% inférieurs à ceux du scénario A2.
- Une contribution des combustibles fossiles à la production d'électricité inférieure à 15%. Ceci s'obtient grâce à une part élevée des énergies renouvelables (52%) et du nucléaire (33%). Ainsi, la philosophie de ce scénario est proche de celle de notre scénario à forte contribution du nucléaire en cela qu'elle minimise la contribution des combustibles fossiles à la production d'électricité. Comme nous l'avons déjà souligné, les parts relatives du nucléaire et des énergies renouvelables ne sont pas l'enjeu, elles devront être déterminées par leur compétitivité relative.

Si les deux stratégies, de diminution de la demande en énergie primaire d'une part, et d'augmentation de la part de l'électricité d'autre part, devaient être compatibles, l'objectif de 3 Gt pourrait être atteint dès 2050.

4-CONDITIONS REQUISES POUR LE SYSTEME NUCLEAIRE

La puissance annuelle produite par le nucléaire dans les différents scénarios est donnée ligne 7 du Tableau 1. Dans le scénario à forte contribution du nucléaire, la production du nucléaire en 2030 est 4902 Mtep, et dans le scénario avec production d'hydrogène, la production du nucléaire en 2050 est 16 047 Mtep. La puissance nominale nécessaire dépend du rapport de la puissance moyenne produite à la puissance crête. En général, ce rapport décroît avec la part du nucléaire dont l'efficacité est d'autant meilleure que les centrales fonctionnent en régime de base. Pour cela, nous avons pris des rapports de puissance moyenne sur puissance crête assez bas, compris entre 0,6 et 0,8. Dans le scénario à hydrogène, les réacteurs peuvent être utilisés à la production d'hydrogène en dehors des périodes de forte demande sur le réseau, ce qui donne un meilleur rapport puissance moyenne sur puissance crête. Notons qu'il en serait de même avec les énergies renouvelables. Compte tenu de ce qui précède, les besoins en puissance nucléaire installée seraient de 3387 GWe en 2030 pour le scénario à

forte contribution du nucléaire et 8915 GWe en 2050 pour le scénario à hydrogène. Ceci impliquerait qu'il y ait, en moyenne, 150 divergences de réacteurs^{iv} de 1 Gwe par an entre 2010 et 2030, puis 300 entre 2030 et 2050.

4-1 Réserves d'uranium naturel

Si ce déploiement de puissance nucléaire devait être réalisé avec des réacteurs de type REP^v ou REB^{vi}, il y aurait une forte tension sur les ressources d'uranium. En effet, ces ressources sont estimées à 20 millions de tonnes, alors que les besoins cumulés en 2050, si ce déploiement nucléaire devait reposer sur des centrales REP ou REB, pourraient s'élever à 16 millions de tonnes. Ainsi un tel déploiement ne peut se faire qu'avec des réacteurs surrégénérateurs, ou, autre solution, coûteuse, grâce à l'extraction de l'uranium de l'eau de mer^{vii}.

4-2 Stratégie de surrégénération

Nous envisageons deux cycles de surrégénération

- Le cycle U-Pu avec des neutrons rapides.
- Le cycle Th-U avec des neutrons thermiques.

Dans l'un et l'autre cas, le combustible initial est l'élément fertile (U ou Th) mélangé avec du plutonium issu de combustible usé des réacteurs REP et REB. Il est important de vérifier que les quantités de plutonium disponibles suffiraient à alimenter tous les réacteurs surrégénérateurs jusqu'en 2050.

4-2-1 Le Cycle U-Pu.

L'expérience acquise avec les surrégénérateurs à neutrons rapides montre que, pour un réacteur typique⁵ de 1,2 GWe, il faut un inventaire initial de 5 tonnes de plutonium. Un réacteur de 1200 MWe produit environ 0,25 tonnes de plutonium par an, ce qui correspond à un temps de doublement de 20 ans. Cependant, ce temps de doublement ne tient pas compte de la phase de retraitement. Plus grand est le temps de refroidissement du combustible usé avant le retraitement, plus grand est le temps de doublement effectif. Par exemple, avec une présence du plutonium dans le réacteur de 4 ans et un temps de refroidissement également de 4 ans, l'inventaire de plutonium est deux fois plus grand, ainsi que le temps de doublement.

Nous étudions la transition d'un parc reposant sur les REP (et REB) vers un parc de réacteurs à neutrons rapides. Nous supposons le démarrage en 2010 d'un programme intensif de REP, les premiers surrégénérateurs démarrant progressivement en 2020. A partir de 2030, il n'y a pas de divergence de nouveaux REP, laissant le champ libre aux réacteurs à neutrons rapides. Sur la figure 3 est représentée l'évolution du parc de réacteurs correspondant à une production de plutonium de 250 kg/GWe par les REP et de 200 kg/GWe par les surrégénérateurs à neutrons rapides. Nous avons fixé le temps de refroidissement à 1 an. L'objectif de 9000 GWe à 2050 peut être atteint. Pour des temps de refroidissement plus longs, on vérifie que l'objectif ne peut être atteint. Des temps de refroidissement aussi courts qu'un an ne sont probablement pas réalisables avec un retraitement aqueux standard, il faudrait passer à un retraitement pyrochimique. Après 2050, les REP seraient progressivement arrêtés et le temps de doublement des réacteurs à neutrons rapides pourrait être ajusté en fonction de l'évolution du parc de réacteurs souhaitée. Dans la figure, la croissance du parc de réacteurs nucléaires est de 1,5 % par an.

^{iv} Nombre de réacteurs nouveaux couplés au réseau.

^v REP - Réacteur à Eau Pressurisée

^{vi} REB - Réacteur à Eau Bouillante.

^{vii} Les réserves d'Uranium de l'Océan sont estimées à 3 milliards de tonnes. Selon des expériences japonaises et britanniques, l'utilisation de cet Uranium se traduirait par une augmentation de 50% du kWh nucléaire.

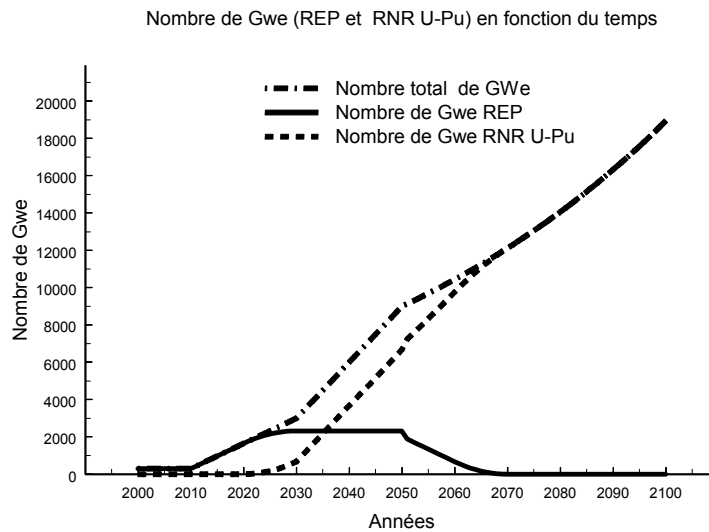


Figure 3 Nombre de GWe produits par le cycle U-Pu en fonction du temps.

La figure 4 montre l'évolution du stock de plutonium en dehors des réacteurs. On y distingue trois phases :

- Une augmentation progressive jusqu'à 2030 due à la production de plutonium par un parc de REP (REB) croissant.
- Une décroissance entre 2030 et 2050 due à une forte croissance des réacteurs à neutrons rapides.
- Une croissance après 2050 due à une moindre croissance des réacteurs à neutrons rapides.

Plutôt que d'accumuler une telle quantité de plutonium, les neutrons en excès pourraient servir à la transmutation des fragments de fission, ou bien les réacteurs pourraient être de plus petite taille, ce qui donnerait une plus grande flexibilité au système de production de puissance.

Dans notre scénario, les derniers réacteurs REP seront arrêtés en 2070. A cette date, la quantité totale d'uranium naturel utilisé atteindrait 12 million de tonnes, ce qui est proche des réserves estimées. Cela signifie que la taille et la durée de vie du parc de REP ne peuvent être traités comme des variables facilement ajustables en vue d'une croissance forte de la puissance produite par le nucléaire entre 2030 et 2050. Cette croissance sera difficilement réalisable et nécessite le développement rapide de surrégénérateurs ainsi que la disponibilité d'autant de plutonium retraité que possible. La généralisation de l'incinération du MOX devra être mise en rapport avec ce besoin. De la même façon, l'incinération du plutonium dans les HTR pourra se révéler néfaste, si leur combustible usé ne peut être retraité. En attendant la mise au point des réacteurs surrégénérateurs, la meilleure utilisation des usines de retraitement pourrait être la confection de combustibles Th-Pu pour les REP, qui produiraient de ^{233}U utilisable comme nous l'envisageons au paragraphe 4-2-2.

Bien entendu, le fait d'abaisser l'objectif pour 2050 faciliterait les choses. Par exemple, un objectif de 7000 GWe serait atteint avec un temps de doublement de 32,5 ans. Une autre possibilité serait d'augmenter la part de réacteurs meilleurs producteurs de plutonium, tels les réacteurs CANDU^{viii}.

^{viii} CANDU : CANada -Deuterium-Uranium, réacteurs à neutrons thermiques dont le caloporteur est l'eau lourde.

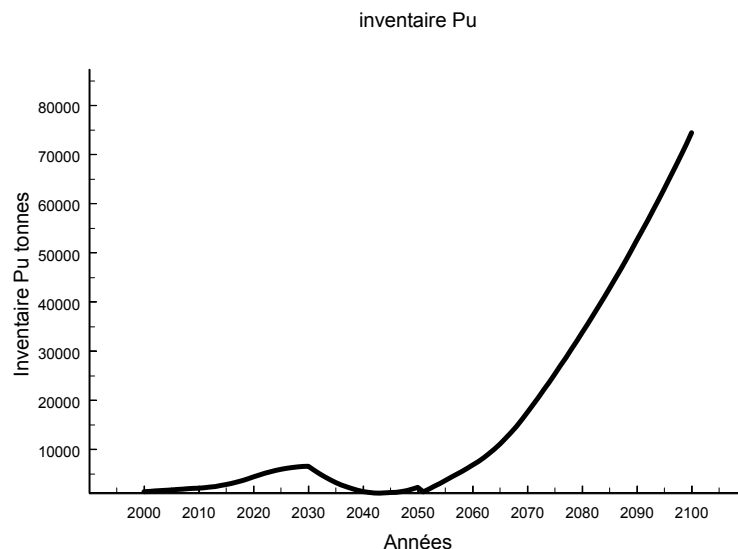


Figure 4 Evolution de l'inventaire de plutonium.

4-2-2 Le cycle Th-U

L'expérience MSRE^{ix} a confirmé que la surrégénération d' ^{233}U à partir du thorium est faisable. Le projet MSBR^x a conçu de façon assez détaillée un grand réacteur à sels fondus aux possibilités de surrégénération intéressantes. Comme solution alternative au surrégénérateurs à combustible solide basé sur le cycle U-Pu, nous avons étudié les possibilités qu'offriraient des réacteurs à sels fondus basés sur le cycle Th-U. Les premiers chargement en matière fissile des réacteurs de 1 GWe à sels fondus sont constitués de plutonium industriel issu du retraitement de combustible usé des REP. A cause des propriétés neutroniques médiocres de ce plutonium, nos simulations indiquent qu'il en faut 4 tonnes/GWe pour assurer la criticité^{xi}. Le chargement initial en plutonium est progressivement remplacé par de l' ^{233}U . Chaque année, tout le plutonium vieux de 5 ans disponible est utilisé dans les nouveaux réacteurs à sels fondus. Ceci ne suffit pas à assurer le taux de croissance requis. La matière fissile complémentaire est obtenue du surplus d' ^{233}U produit dans les réacteurs à sels fondus déjà en fonctionnement, elle est utilisée au démarrage de réacteurs Th-U3. Il ne faut qu'une tonne/GWe de ^{233}U pour assurer la criticité d'un réacteur à sels fondus. Le temps de doublement est de 25 ans, en supposant un recyclage du sel de 10 jours. Le traitement chimique consiste à extraire les produits de fission et le protactinium. De l' ^{233}U est réinjecté après la décroissance du protactinium. La figure 5, équivalente de la figure 3 pour le cycle U-Pu, montre l'évolution du parc de réacteurs. Nous avons distingué les réacteurs Th-Pu et Th-U3 en fonction de leur chargement initial. La durée de vie des réacteurs a été fixée à 40 ans, ce qui explique la décroissance des réacteurs « Th-Pu » après 2070.

^{ix} MSRE - Molten Salt Reactor Experiment. Expérience réalisée aux Etats-Unis à l'Oak Ridge National Laboratory à la fin des années 1960. Il s'agit d'un réacteur à sels fondus qui a fonctionné d'abord avec de l' ^{235}U , puis avec de l' ^{233}U .

^x MSBR - Molten Salt Breeder Reactor - Etude, dans le même laboratoire (Oak Ridge National Laboratory), d'un réacteur surrégénérateur avec production d' ^{233}U à partir de thorium. Le réacteur n'a pas été construit, les choix s'étant orientés, à l'époque (fin des années 1970) vers la filière U-Pu à neutrons rapides.

^{xi} L'égalité de ce nombre avec l'inventaire des surrégénérateurs U-Pu est fortuite;

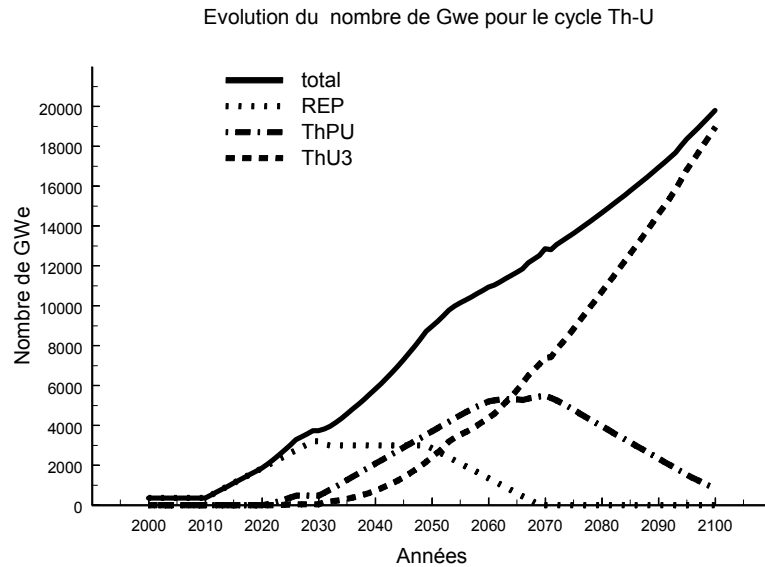


Figure 5 Nombre de GWe pour le cycle Th-U en fonction du temps

La figure 6 montre l'évolution de l'inventaire d' ^{233}U en dehors des réacteurs. Le stock de plutonium n'y figure pas puisque, après 5 ans de refroidissement, tout le plutonium est utilisé pour les nouveaux réacteurs Th-Pu. Comme dans le cas du cycle U-Pu, la quantité d' ^{233}U disponible reflète la flexibilité du système et indique la possibilité de l'utiliser pour la transmutation des produits de fission et(ou) pour des unités de production plus petites. Il est intéressant de remarquer que l'inventaire final d' ^{233}U n'est que de 16 000 tonnes, alors que celui de plutonium de la figure 4 est bien supérieur, puisqu'il s'élève à 80 000 tonnes. Cependant, du fait de la différence d'inventaire nécessaire (1 tonne comparée à 4 tonnes), le nombre de réacteurs nouveaux qui pourraient être alimentés avec ce stock est le même, soit 16 000 GWe. Ceci illustre le fait que la valeur de η^{xii} (2,9 pour le Pu et 2,3 pour l' ^{233}U) n'est pas la seule quantité de référence pour l'évaluation d'un potentiel de surrégénération.

Dans l'optique où il n'y aurait plus de croissance du nombre de GWe produits, on peut transformer les surrégénérateurs en régénérateurs et éviter ainsi une augmentation des stocks d' ^{233}U .

^{xii} η est le *facteur de reproduction* du combustible - c'est le nombre de neutrons obtenus en moyenne lorsqu'un neutron est absorbé dans le combustible. C'est la *probabilité* que l'absorption produise une fission multipliée par le *nombre moyen* ν de neutrons émis lors de cette fission.

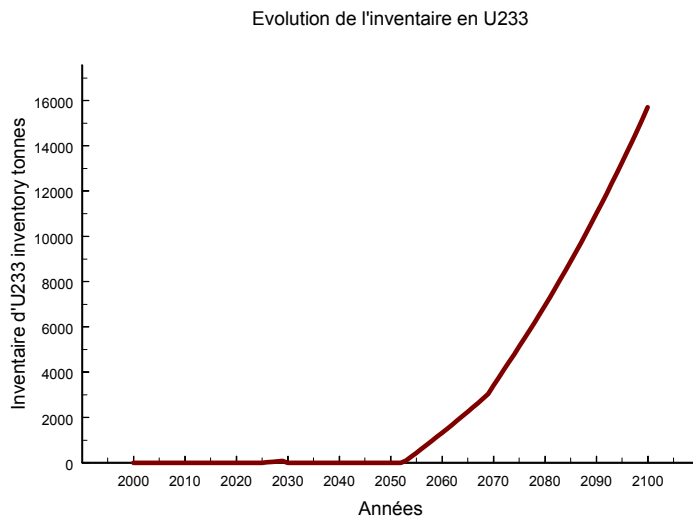


Figure 6 Evolution du stock d'U3 dans le scénario Th-U

4-3 Exigences de sûreté

La probabilité d'une libération importante de radioactivité à la suite de la fusion du cœur d'un REP est actuellement estimée à 10^{-6} . Avec le parc de réacteurs existants aujourd'hui, un tel accident pourrait avoir lieu une fois en 3000 ans, ou, autrement dit, avec une probabilité de 3% en un siècle. Pour un parc de réacteur de 9000 GWe, et sans amélioration de la sécurité, un tel accident pourrait se produire une fois par siècle. Ceci serait, de toute évidence, inacceptable. L'EPR^{xiii} est un premier pas vers une amélioration de la sûreté, il pourrait être compatible avec un élargissement du parc. Les réacteurs surrégénérateurs aussi devront avoir des standards de sûreté très exigeants. De ce point de vue, les réacteurs à gaz à haute température, les réacteurs à sels fondus, les réacteurs sous-critiques associés à un accélérateur (ADS) semblent prometteurs, surtout en ce qui concerne les petites unités.

Afin de faire respecter les standards de sûreté qui seront nécessaires, il serait peut-être souhaitable d'ériger une autorité mondiale de sûreté nucléaire chargée d'attribuer des autorisations de mise en service et ayant le pouvoir d'interrompre le fonctionnement des installations jugées dangereuses.

4-4 Besoins en retraitement

Il y a lieu de faire la différence entre le retraitement du combustible des REP et celui des surrégénérateurs. Le parc de REP atteindra 3000 GWe. Ceci produira 90 000 tonnes par an de combustible usé à retraiter, vraisemblablement dans des usines centralisées, comme celles de La Hague, ou de Sellafield.

Le retraitement est une nécessité pour les surrégénérateurs, ainsi que pour les régénérateurs. Très probablement, le retraitement sera réalisé au voisinage des réacteurs, au moyen de techniques pyrochimiques.

Il est envisagé que les combustibles céramiques à haute résistance, tels ceux utilisés dans les réacteurs à gaz à haute température ne subissent pas de retraitement. Dans ce cas, le combustible usé doit être remplacé par du combustible nouveau, produit dans un réacteur de type différent, ou par de l'uranium enrichi. Ainsi, sans retraitement, la surrégénération à partir de la matière fertile n'est pas possible.

^{xiii} EPR: European Pressurized Reactor - réacteur à eau pressurisée conçu en collaboration par Framatome et Siemens, pour être le remplaçant des REP qui arriveront en fin de vie dans les années qui viennent. Ils sont de conception plus simple et leur sûreté est améliorée par rapport à celle des REP.

4-5 La production de déchets

Bien que l'augmentation considérable du parc de réacteurs conduise à une forte production de produits de fission, les caractéristiques du parc surrégénérateur ont plusieurs conséquences intéressantes :

- Le plutonium devient un combustible. De plus, il semble que la majeure partie des actinides mineurs pourra être incinérée. Les pertes au retraitement seraient sans doute inférieures à 100 tonnes par an pour l'ensemble des actinides, probablement plus proches de 10 tonnes par an
- En 2050, environ 10 million de tonnes d'uranium appauvri seront disponibles. Celles-ci pourraient alimenter en combustible un parc de 10 000 GWe de réacteurs surrégénérateurs basés sur le cycle U-Pu pendant 1000 ans. Et, dans le cas du cycle Th-U, une petite quantité de thorium, 10 000 tonnes par an, suffirait à alimenter le parc de réacteurs.
- Les déchets technologiques (déchets B) mis à part, les produits de fission seraient produits à raison de 10 000 tonnes par an, dont 600 tonnes de produits de fission à vie longue, les seuls justifiant d'un stockage géologique. Une fois le parc de surrégénérateurs établi, il deviendrait possible d'utiliser les neutrons disponibles pour transmuter, au moins en partie, les produits de fission de grande durée de vie.
- Dans l'hypothèse où les produits de fission à vie longue ne seraient pas transmutés, on voit que les besoins de stockage géologique, hors déchets technologiques, seraient de l'ordre de 1000 tonnes annuelles, à comparer à la capacité de stockage de 70 000 tonnes de combustibles irradiés prévus pour le site américain de Yucca Mountain.

4-6 Les besoins en capitaux

En estimant le coût d'une installation nucléaire de 1 GWe à une valeur comprise entre 1 milliard et 1,5 milliards de dollars, l'investissement cumulé se situerait entre 10.000 et 15.000 milliards de dollars dans la période de 2010 à 2050. Ce chiffre est à comparer à l'estimation de l'investissement cumulé du scénario A2 qui s'élève à 18.000 milliards de dollars entre 2020 et 2050.

5-CONCLUSION

Seules les grandes installations hydroélectriques et les centrales nucléaires s'avèrent capables de remplacer les combustibles fossiles dans la production d'électricité, tant du point de vue économique que du point de vue technologique. Le développement de l'hydroélectricité est limité par des contraintes environnementales sévères. Ainsi, le nucléaire est, aujourd'hui, la seule option réaliste pour la réduction des émissions de CO₂ tout en permettant un meilleur approvisionnement énergétique pour les pays en voie de développement. Dans un avenir probablement lointain, de nouvelles formes d'énergies renouvelables pourraient contribuer de manière importante à la réduction des émissions de CO₂. Dans l'intervalle, il paraît sage de pousser la contribution du nucléaire à ses limites. Nous montrons que, même dans les scénarios à forte intensité énergétique, l'utilisation intensive du nucléaire permettrait une réduction des émissions de CO₂ en dessous de 3 Gt d'équivalent carbone dès 2070, ce qui limiterait l'augmentation de température à environ 2° C en 2100. Le scénario qui permettrait d'atteindre cet objectif, suppose la construction de 150 nouveaux REP de 1 GWe par an à partir de 2010, la puissance totale de REP se stabilisant entre 2500 et 3000 GWe en 2030. Un parc de réacteurs surrégénérateurs à neutrons rapides basés sur le cycle U-Pu, ou à neutrons thermiques basés sur le cycle Th-U serait mis en marche à partir de 2020, pour atteindre 6000 GWe en 2050. Un tel déploiement permettrait d'éliminer les combustibles fossiles de la production d'électricité, avec une part de l'électricité dans l'énergie primaire atteignant 80%, à comparer aux 40% actuels. Cet accroissement de la part de l'électricité pourrait être obtenu grâce à l'utilisation généralisée de l'hydrogène, et de la co-génération de chaleur.

Dans ce scénario à forte contribution du nucléaire, une part importante des réserves prouvées d'uranium naturel sera utilisée. La croissance du parc surrégénérateur semble être la plus rapide possible et exercera une tension sur la gestion des stocks de plutonium et sur la taille des réacteurs. Un assouplissement du calendrier, une augmentation de la part des énergies renouvelables, ou une diminution de la demande en énergie permettraient, bien entendu, de diminuer la tension.

REFERENCES

¹ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 3ième rapport d'évaluation 2000. site internet :

<http://www.IPCC.ch>

² Climate Change, the science of climate change, IPCC 1995, technical summary B.9.2.

3 IIASA-WEC (International Institute for Applied Systems Analysis - World Energy Council) Global Energy Perspectives rapport 1998. Site internet: <http://iiasa.ac.at>

⁴ M.Charpin, B.Dessus, R.Pellat, “Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire”, Commissariat au Plan. Paris. 2000.

⁵ J.Bussac et P.Reuss, Traité de Neutronique Ed.Hermann 1985

⁶ P.N.Haubenreich et al., Experience with the Molten Salt Reactor Experiment, Nuclear Applications and Technology, vol.8(1970)118

⁷ M.W.Rosenthal et al., Molten-Salt Reactors history, status, and potential, Nuclear Applications and Technology, vol.8(1970)107