

Elsa MERLE-LUCOTTE

LPSC-IN2P3-CNRS/ENSPG-INPG, Grenoble

merle@lpsc.in2p3.fr

Résumé

L'énergie nucléaire peut jouer un rôle important dans un futur proche pour la production massive d'énergie au niveau mondial. Pour cela, elle devra satisfaire un certain nombre de critères généraux qui ont été définis par les organismes internationaux (IAEA, le Forum International Génération IV), et qui sont : une sûreté accrue, la durabilité par l'utilisation des noyaux fertiles, une bonne gestion des déchets, un champ élargi d'utilisations, une rentabilité économique acceptable et la résistance à la prolifération. Plusieurs concepts sont à l'étude voire en développement pour essayer de répondre à ces critères au sein de collaborations internationales plus ou moins larges. Après une présentation du contexte énergétique et de son futur au niveau mondial, ce papier exposera les arguments en faveur d'un futur du nucléaire en détaillant les avantages de cette forme de production d'énergie, avant une présentation des principaux systèmes en cours d'étude pour le nucléaire du futur.

1.1 Futur énergétique mondial et futur du nucléaire

1.1.1 Le contexte énergétique et son avenir au niveau mondial

Quels que soient les scénarios considérés à horizon 2050, les besoins en énergie vont croître compte tenu de la croissance démographique et des besoins de développement des pays émergents. Une part importante de cette augmentation va se faire en Asie, principalement la Chine et l'Inde mais, même si les pays développés déploient des efforts d'efficacité énergétique et de maîtrise de l'énergie, ces pays devront modifier leur type de consommation, basée à l'heure actuelle essentiellement sur les énergies fossiles.

Les projections énergétiques à l'horizon 2050 peuvent être évaluées grâce à un calcul assez simple et à quelques hypothèses, notamment une stabilisation des énergies fossiles [1]. Pour quantifier l'évolution de la demande énergétique mondiale, ré-écrivons la comme :

$$E = E/PIB * PIB/N * N$$

- avec - N : population mondiale
- PIB/N : PIB par habitant
- E/PIB : intensité énergétique

En un demi-siècle, d'après des estimations démographiques, la population mondiale devrait passer de 6 milliards en 2000 à environ 9 milliards d'habitants en 2050 (facteur 3/2). La croissance annuelle (augmentation du PIB/habitant) est estimée selon divers scénarios de 1,5 % pour un scénario pessimiste à 3 % pour un scénario plus optimiste. Le terme $\frac{PIB}{N}$ est donc multiplié par un facteur 2,1 à 4,4. L'intensité énergétique, qui prend en compte en particulier les économies d'énergie, pourrait induire un facteur 0,5 dans la formule précédente. Au total, on voit alors la demande énergétique mondiale augmenter d'un facteur 1,6 à 3,3. Pour la suite, nous prendrons une valeur intermédiaire basse : une augmentation d'un facteur 2.

Cette croissance devra de plus s'accompagner d'un transfert entre modes de production d'énergie, des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz, qui satisfont actuellement 87 % de la demande en énergie primaire) vers les énergies non émettrices de gaz à effet de serre. S'il est manifeste que toutes les sources d'énergie devront être mises à contribution, un enjeu essentiel est de développer le "bouquet énergétique" optimal en termes de disponibilité et de préservation des ressources, de coût, d'accès de tous à l'énergie et de maîtrise des impacts environnementaux.

Nous pouvons alors estimer la part du nucléaire dans la future production énergétique mondiale.

Energie primaire en Gtep	2000	2050
Fossiles (charbon, gaz, pétrole)	7,5	7,5
Biomasse traditionnelle	1,2	1,2
Hydraulique	0,7	1,0
Nouveaux Renouvelables (éolien, solaire, biocarburants)	0,02	5,1
Nucléaire	0,6	5,1
Total	10,2	20,4

TAB. 1.1 – Contribution des différentes sources commerciales d'énergie primaire en 2000 et en 2050.

Certaines nouvelles hypothèses sont nécessaires :

- Une stabilisation de l'utilisation des énergies fossiles au niveau actuel (hypothèse minimale car non-suffisante pour permettre une stabilisation des gaz à effet de serre).
- Une équi-répartition finale entre les nouvelles énergies renouvelables et le nucléaire.

La répartition des apports des différentes sources commerciales d'énergie ainsi obtenues est résumée dans le tableau 1.1. De ces chiffres, il est aisé de voir que le nucléaire voit sa part croître environ d'un facteur 10 d'ici à 2050, tandis que les nouvelles énergies renouvelables doivent croître elles d'un facteur 300! Il est à noter qu'un tel scénario, très optimiste notamment en terme d'économies d'énergie et de la part des nouvelles énergies renouvelables, ne permet pas de contenir l'augmentation des gaz à effet de serre, puisque l'on a simplement stabilisé les énergies fossiles, même si des solutions telle que la séquestration du CO₂ sont à l'étude pour réduire les émissions massives de CO₂ industriel. Il s'agit donc probablement d'un scénario minimal pour l'énergie nucléaire. D'autres études[2][3] ont abouti à des projections énergétiques équivalentes.

1.1.2 Atouts du nucléaire

Dans un tel contexte, le nucléaire connaît partout dans le monde un regain d'intérêt, qui a été bien illustré par la conférence ministérielle internationale de l'AIEA qui s'est tenue à Paris en mars 2005. Il semble évident alors que l'énergie nucléaire peut apporter une contribution majeure à la satisfaction énergétique d'un grand nombre de pays du fait de nombreux atouts :

- la quasi-absence d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution atmosphérique (cf. figure 1.1) ;

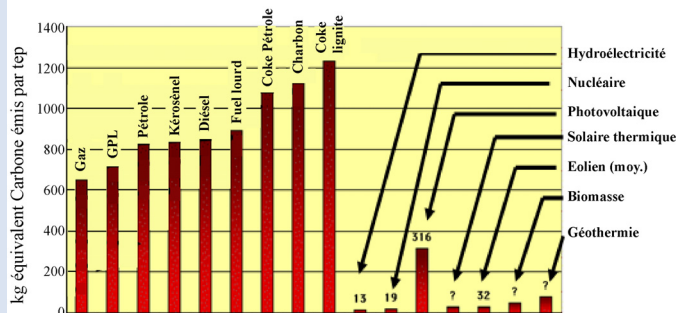


FIG. 1.1 – Kg-équivalent carbone émis par tep pour diverses énergies [5]. Pour les énergies produisant de l'électricité, la conversion a été le taux physique (1 tep = 42 GJ = 11,6 MWh).

- la concentration d'énergie : la production d'1 kWh nécessite 0,4 gramme d'uranium ou 860 kg de gaz ;
- la compétitivité et stabilité des coûts de production électrique, dans lesquels le combustible compte pour moins de 10% (gestion des déchets intégrée notamment) ;

- le potentiel d'utilisations non électrogènes de la production nucléaire : production de chaleur pour l'industrie, d'eau potable, d'hydrogène.

1.2 Le nucléaire du futur : les réacteurs de 4^{ème} génération

Les réacteurs utilisés dans le monde pour produire de l'électricité ont connu des améliorations constantes et des ruptures technologiques depuis l'origine du nucléaire civil, dans les années 1950. On désigne ces ruptures en termes de "générations" de réacteurs : les installations aujourd'hui en exploitation sont des réacteurs de "deuxième génération". Ce sont principalement des réacteurs à eau légère pressurisée (REP-PWR) ou bouillante (BWR) aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, des VVER (analogues au REP) et des RBMK (graphite comme modérateur et eau bouillante comme colporteur) dans les pays de l'Est, et des CANDU (eau lourde comme colporteur et modérateur) au Canada et en Inde. Une troisième génération de réacteurs est prête à prendre le relais d'ici 2015, voire avant pour certains (l'EPR franco-allemand, l'AP1000 et ESBWR américains...). La quatrième génération est celle des "systèmes du futur", qui restent à concevoir et visent un déploiement d'ici 2040. Les objectifs visés pour les systèmes du futur, de même que le choix des technologies clef pour les atteindre, font l'objet d'échanges actifs à l'international, notamment dans le cadre du Forum International Generation IV (GIF). Son principe fondateur est la reconnaissance, par les dix pays qui en sont membres, des atouts de l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins croissants en énergie dans le monde, dans une perspective de développement durable et de prévention des risques de changements climatiques. Quatre objectifs principaux ("goal areas") ont été définis pour caractériser les systèmes du futur. Ils doivent être caractérisés par un niveau de sûreté accrue, une meilleure compétitivité économique, une aptitude à recycler tout le combustible afin de valoriser les matières fissiles (uranium, plutonium) et de minimiser la production de déchets à vie longue (actinides mineurs), et enfin une résistance à la prolifération accrue.

1.2.1 Régénération, cycles du combustible et déchets nucléaires

L'utilisation actuelle du nucléaire de fission repose presque entièrement sur le seul noyau fissile naturel, l'²³⁵U (0.7% de l'uranium naturel). Les ressources exploitables d'uranium naturel sont classées en catégories de coût. Les ressources déjà exploitées sont estimées à 2 millions de tonnes d'uranium (MtU) [4]. Les ressources assurées sont de 1,6 MtU pour la catégorie à 40 \$/kgU et de 2,6 MtU à 80 \$/kgU, ce qui représente 40 ans de

consommation au niveau actuel du parc mondial. Les estimations des ressources totales en uranium naturel sont fonction des possibilités techniques et des coûts d'extraction. Actuellement, le coût moyen d'exploitation de l'uranium est de 30 \$/kgU; en prenant un coût de 400 \$/kgU, les ressources en uranium naturel peuvent être extrapolées au maximum à 23 MtU [4]. Cela représente 250 ans de consommation au niveau actuel du parc mondial, et seulement 50 ans [1] si la part de la production d'énergie nucléaire croît d'un facteur 5 seulement.

Les deux seuls autres noyaux fissiles pouvant être utilisés pour une production nucléaire massive, le ^{239}Pu et l' ^{233}U , n'existent pas à l'état naturel et doivent être produits à partir des noyaux fertiles correspondants, l' ^{238}U et le ^{232}Th respectivement. On appelle noyau fertile un noyau produisant un noyau fissile après capture d'un neutron. Il existe ainsi ce que l'on nomme deux "cycles du combustibles" ou "filiales", le cycle $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ (dit cycle Thorium) et le cycle $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ (dit cycle Uranium). Les ressources naturelles en ^{238}U sont importantes (99,3% de l'uranium naturel), celles en thorium davantage encore, puisque estimées deux à trois fois plus importantes que celles de l'uranium. L'utilisation de réacteurs du futur au moins régénérateurs, c'est-à-dire produisant au moins autant de combustible qu'ils en consomment, permettrait alors de ne plus se poser la question des ressources avant plusieurs millénaires.

La filière Uranium a été mise en œuvre dans le réacteur Superphénix. Elle est aussi en partie utilisée dans les réacteurs actuels basés sur l' ^{235}U , ce dernier étant mélangé à de l' ^{238}U dans ces réacteurs. Cependant, la quantité de ^{239}Pu ainsi produite est largement trop faible à l'heure actuelle pour un déploiement massif français de réacteurs basés sur ce noyau fissile, la France étant pourtant un des rares pays (avec les USA et le Japon, pays ayant un nombre de réacteurs conséquents) ayant les plus grandes capacités de production de Plutonium.

La filière Thorium a d'emblée deux avantages :

- le faible numéro atomique du noyau de départ (232) en comparaison du cycle Uranium (238). Six captures de neutron de plus sont nécessaires pour produire le premier actinide mineur, cela permettant de produire moins de déchets nucléaires très radiotoxiques qu'en cycle Uranium.
- La possibilité d'obtenir la régénération quel que soit le spectre neutronique, d'où davantage de souplesse quant au réacteur pouvant utiliser ce cycle.

Cette filière Thorium a donné lieu à quelques essais (CANDU, AVR) et a surtout été étudiée à Oak Ridge avec des réacteurs à sels fondus. Un tel réacteur, le

Molten Salt Reactor Experiment (MSRE - 8 MWth), a fonctionné pendant 5 ans avec de l' ^{235}U puis de l' ^{233}U .

1.2.2 Réacteurs candidats pour le nucléaire du futur

La sélection des candidats les plus prometteurs pour les systèmes du futur a été finalisée lors d'une réunion du Forum International Generation 4 (GIF) en mai 2002, à Paris. Six systèmes nucléaires ont été sélectionnés. En effet, la diversité des besoins à couvrir et des contextes internationaux explique que l'on n'aboutisse pas à un unique système Generation 4, mais à un éventail de solutions sur lesquelles se concentrent désormais les efforts de R&D des pays membres du GIF. Ces six systèmes sélectionnés sont :

- VHTR (very high temperature reactor system) - Réacteur à très haute température (1000°C/1200°C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité;
- SCWR (Supercritical water-cooled reactor system) - Réacteur à eau supercritique;
- GFR (Gas-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur helium;
- SFR (Sodium-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur sodium;
- LFR (Lead-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur alliage de plomb;
- MSR (Molten salt reactor system) - Réacteur à sels fondus.

Les deux premiers systèmes (VHTR et SCWR) sont considérés comme "intermédiaires" car ils ne répondent pas à toutes les exigences de réacteurs 4ème génération, n'étant pas régénérateurs.

En France, au niveau du CEA, la priorité est très clairement donnée aux systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé, plus particulièrement au SFR. Ce réacteur bénéficie en effet d'un retour d'expérience industriel important (Phénix, Superphénix). Des recherches d'innovations sont menées pour résoudre les difficultés technologiques résiduelles des réacteurs rapides à caloporteur sodium, comme les aspects de sûreté déterministe, de rentabilité économique, d'inspection du réacteur en fonctionnement...

Au niveau du CNRS et de ses partenaires (CEA, EdF...), de nombreuses études sont tournées vers les réacteurs à sels fondus et le cycle Thorium, au niveau français (Programme sur l'Aval du Cycle Electro-Nucléaire PACEN, groupement de recherche GEDE-

PEON, Programme Commun de Recherche RSF du CNRS), comme européen (programme Alisia...).

1.2.3 Réacteurs à sels fondus (RSF)

Comme déjà indiqué en section 1.2.1, un réacteur à sels fondus, le MSRE, a fonctionné pendant 5 ans à Oak-Ridge (USA) et ce travail a servi de base à un projet de réacteur surgénérateur thorium thermique le MSBR. Ce concept a été réévalué dans le cadre du réseau européen MOST (MOlten Salt Technologies) pour arriver au concept de réacteur à sels fondus en cycle Thorium nommé Thorium Molten Salt Reactor (TMSR), développé par le CNRS (LPSC Grenoble) et détaillé dans les références [6][7][8][9][10]. Le cœur du réacteur est de forme cylindrique, cylindre dans lequel circule un sel fluorure fondu (cf. figure 1.2). Ce sel fondu sert à la fois de combustible et de caloporteur : il évacue la chaleur hors du cœur et il contient le thorium et la matière fissile nécessaires à la réaction en chaîne. Les réacteurs modélisés produisent une puissance thermique de 2500 MW, soit une puissance électrique de 1000 MW (1 GW) : à la température de fonctionnement choisie, autour de 600°C afin que le sel soit liquide, on obtient un rendement thermodynamique de 40%. Mains avantages de ces réacteurs à sels fondus proviennent de la forme de leur combustible : aucun risque de fonte du cœur bien sûr, les questions de fabrication, de tenue aux radiations et de confinement du combustible ne se posent pas, le système fonctionne sous pression atmosphérique...

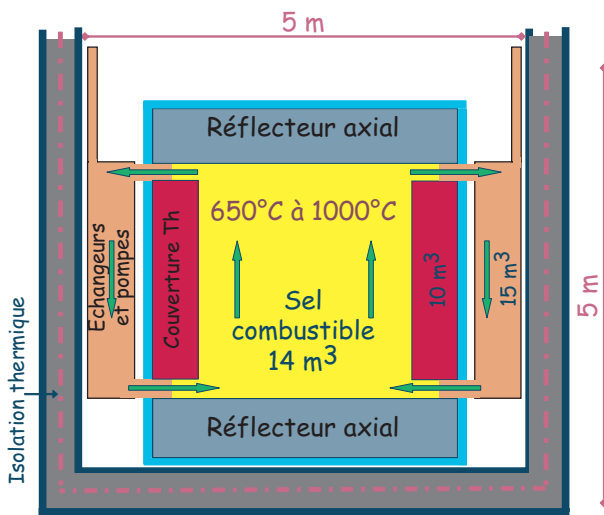


FIG. 1.2 – Coupe schématique d'un TMSR. Les éléments du réacteur représentés sont le cœur (au centre le sel liquide, avec autour une couverture radiale de Thorium pour protéger les structures externes des neutrons de fuite et améliorer la régénération du combustible), puis autour les échangeurs de chaleur et les pompes.

Ce TMSR est le seul parmi les réacteurs régénéra-

teurs de 4^{ème} génération permettant d'obtenir un haut niveau de sûreté passive grâce à des coefficients de contre-réaction fortement négatifs. En jouant sur la composition du sel (proportion de noyaux lourds, ajout d'un second fluorure de noyau léger d'alcalin...), il est possible de diminuer la température de fusion du sel, de changer le rapport de modération pour les neutrons et donc de varier l'inventaire initial en matière fissile, le taux de régénération et les contraintes de retraitement. De plus, de tels réacteurs pourraient être démarrés directement avec un mélange de thorium, de plutonium et des actinides mineurs produits par les réacteurs actuels, fermant ainsi le cycle du combustible actuel tout en produisant de l'²³³U pour développer la filière Thorium.

En lien étroit avec les études de neutronique, des recherches et des développements technologiques sont en cours concernant le retraitement pyrochimique, la tenue des matériaux, les aspects de sûreté et de thermo-hydraulique...

1.3 Conclusion

L'énergie est devenue en quelques années un sujet largement discuté dans divers médias, et a donné lieu récemment à un débat national [11], provoquant souvent certaines angoisses devant l'ampleur de l'enjeu. Il apparaît clairement que l'énergie nucléaire de fission est la seule source d'énergie massive disponible dès aujourd'hui pour combler la demande énergétique future au niveau mondial. Comblent seulement la moitié de cette demande en stabilisant l'utilisation des énergies fossiles d'ici à 2050 reviendrait à produire au moins 5 Gtep à partir de la fission, c'est-à-dire multiplier par 10 environ la puissance nucléaire en cinquante ans. Voilà qui illustre l'ampleur du problème énergétique du futur, les ordres de grandeur mis en jeu, et la nécessité de développer en parallèle toutes les sources possibles d'énergies non-émittrices de gaz à effet de serre, du nucléaire aux nouvelles sources d'énergie renouvelables.

A l'heure où la construction d'un nouveau réacteur en France est en discussion, les déchets focalisent les craintes du public et les attaques des antinucléaires. Cette question de la gestion des déchets actuels est indissociable de la problématique plus générale du nucléaire du futur. Dans ce domaine, les physiciens du CNRS notamment ont rapidement élargi leur recherche à la production d'énergie, dans un contexte largement européen voire à présent mondial. Les études ainsi menées proposent des alternatives innovantes, permettant de répondre aux nombreuses contraintes que doivent remplir les réacteurs du futur, contraintes synthétisées par le forum international Génération IV :

réduction de la quantité des déchets actuels et à venir, sûreté accrue, optimisation de la gestion des ressources, potentialité de déploiement massif, faisabilité... Les recherches du CNRS portent plus particulièrement sur les grandes potentialités des réacteurs à sel fondu et du cycle du Thorium.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier tout le groupe Physique des Réacteurs du LPSC Grenoble, et tout particulièrement bien sûr Daniel Heuer, ainsi que Christian Le Brun et Jean-Marie Loiseaux. Un grand merci aussi à Ludovic Mathieu, pionnier du Thorium Molten Salt Reactor ! Je n'oublie pas ici les participant(e)s des RJC2006 qui nous ont captivés début janvier avec des présentations d'une qualité vraiment remarquable. Enfin, merci à tous les collègues de l'équipe d'organisation, qui ont mis une super ambiance dans ces Rencontres pour en faire un excellent cru 2006, et qui m'ont donné envie de m'investir et de continuer ensemble !

Références

- [1] "Scenarios for a Worldwide Deployment of Nuclear Power", E. Merle-Lucotte, D. Heuer, C. Le Brun et J.-M. Loiseaux, International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology, Volume 1, Issue 2 (2006).
- [2] "Scenarios with an Intensive Contribution of Nuclear Energy to the World Energy Supply", H. Nifenecker, D. Heuer, J.M. Loiseaux, O. Méplan and A. Nuttin, Int. J. Global Energy Issues, Vol. 19, No. 1(2003), 63-77.
- [3] "Modèle POLES du LEPII-EPE : résultats préliminaires à l'horizon 2050", P. Criqui, Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale (LEPII), département Energie et Politiques de l'Environnement (EPE), Grenoble, communication privée (2004).
- [4] "Les ressources d'uranium fissile permettent-elles de répondre à une forte croissance de l'énergie nucléaire mondiale?", J.F. Luciani et A. Simon, rapport CEA HC/AS/em/2002-192, octobre 2002.
- [5] Site internet de J.-M. Jancovici, <http://www.manicore.com/>
- [6] "Concept de réacteurs 'a sels fondus en cycle thorium sans modérateur", D. Heuer, E. Merle-Lucotte et L. Mathieu, Revue Générale du Nucléaire N° 5/2006, p 92-99 (2006).
- [7] "Fast Thorium Molten Salt Reactors started with Plutonium", E. Merle-Lucotte, D. Heuer C. Le Brun, L. Mathieu, R. Brissot, E. Liatard, O. Meplan, A. Nuttin, Proceedings of the International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP), Reno, USA (2006).
- [8] "The Thorium Molten Salt Reactor : Moving on from the MSBR", L. Mathieu, D. Heuer, R. Brissot, C. Le Brun, E. Liatard, J.M. Loiseaux, O. Méplan, E. Merle-Lucotte, A. Nuttin, J. Wilson, C. Garzenne, D. Lecarpentier, Prog. in Nucl. En., vol 48, pp. 664-679 (doi:10.1016/j.pnucene.2006.07.005) (2006).
- [9] "Cycle Thorium et Réacteurs à Sel Fondu : Exploration du champ des Paramètres et des Contraintes définissant le Thorium Molten Salt Reactor", L. Mathieu, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France (2005).
- [10] "Potential of Thorium Molten Salt Reactors", A. Nuttin et al, Prog. in Nucl. En., vol 46, p. 77-99 (2005).
- [11] <http://www.debat-energie.gouv.fr/>