



De la rationalité en matière environnementale et énergétique

Jean-Pierre Demailly

Professeur à l'Université Grenoble-Alpes,
Mathématicien, membre de l'Académie des sciences

L'accès à l'énergie est un élément essentiel de prospérité de l'humanité. Si l'on parvient aujourd'hui à nourrir 7,6 milliards d'êtres humains, c'est en grande partie grâce à l'accroissement considérable des rendements agricoles depuis le milieu du XX^e siècle, dans un facteur 5 à 8, permis par la mécanisation et l'emploi d'engrais chimiques, et donc par l'énergie. Même si des politiques de sobriété sont mises en place, le développement des pays du Sud, tout comme les besoins accrus de recyclage des ressources dans les pays développés, nécessiteront de disposer de davantage d'énergie. Sinon, la régression économique pourrait mener à un effondrement, à la famine et à la guerre. Le remarquable rapport Meadows, *les Limites à la croissance*, publié en 1972, soulignait déjà avec force les limites naturelles de la planète, par exemple sur le plan des ressources minérales ou alimentaires. En même temps, la lutte contre le réchauffement climatique réclame de se tourner vers des sources d'énergie décarbonées. Ce n'est malheureusement pas l'évolution constatée aujourd'hui dans le monde. Nombre d'autres scientifiques – voir par exemple les analyses de Jean-Marc Jancovici – considèrent que la politique énergétique menée par la plupart des pays est déficiente sous de nombreux aspects. En Europe, la France ne tire son épingle du jeu que par un héritage nucléaire qu'elle s'évertue, hélas, à dilapider, faute de le maintenir à niveau et d'investir dans les technologies les plus prometteuses.

Pour des décisions fondées sur la science et sur le calcul

Les décisions en matière énergétique devraient être fondées de manière rationnelle sur la science et le calcul, à partir des données physiques fondamentales. Le recours historique aux combustibles fossiles tient au fait qu'il s'agit d'énergies facilement accessibles, bon marché, ayant une densité énergétique importante. Ceci explique l'usage massif des hydrocarbures dans les transports.

Fissile, vous avez dit « fissile » ?

En physique nucléaire et en chimie, on appelle isotopes (d'un élément chimique donné) les noyaux d'atomes partageant le même nombre de protons (caractéristique de cet élément chimique) mais possédant un nombre de neutrons différent. Un isotope est fissile si son noyau peut subir une fission nucléaire sous l'effet d'un bombardement par des neutrons (désintégration enclenchant une réaction en chaîne).

Le seul isotope fissile présent en quantité non négligeable sur Terre est l'uranium 235. D'autres isotopes fissiles peuvent être produits artificiellement.

De son côté, l'énergie nucléaire est, de très loin, la championne de la densité énergétique : 1 kg de combustible fissile comme l'uranium 235 (^{235}U) peut fournir théoriquement la même quantité d'énergie que deux mille quatre cents tonnes de charbon, ou que mille six cents tonnes de pétrole, soit un gain massique d'environ 2×10^6 par rapport à l'énergie chimique. On pourrait ainsi tenir dans la main les quelques centaines de grammes nécessaires pour assurer l'approvisionnement énergétique d'un Européen pendant toute sa vie ! Une consommation annuelle de cinquante tonnes d'éléments fissiles par un parc de soixante réacteurs nucléaires de $1,35 \times 10^9$ W (avec un facteur de charge typique de 80%) suffit à assurer la totalité de la production électrique de la France, soit 550×10^{12} Wh par an. Un autre fait important est que les réactions nucléaires n'émettent pas de CO_2 , et ne participent donc pas au réchauffement climatique.



Uranium ou thorium :
l'énergie de toute une vie
dans une main !

© Flibe Energy

Puissance (W) et énergie dépensée (Wh)

La puissance électrique (mesurée en watts, ou W) indique, à un instant donné, la consommation en énergie. C'est en fait une énergie par seconde. Une consommation ou une production annuelle est ainsi souvent exprimée en watt-heures (Wh), qui correspondent à l'énergie dépensée (à savoir 1 W pendant une heure). Cette dernière se mesure également en joules (J), avec l'équivalence $1 \text{ Wh} = 3,6 \text{ kJ}$.

Le solaire photovoltaïque et l'éolien ne sont pas la solution

Les nouvelles énergies renouvelables comme le solaire photovoltaïque et l'éolien ont évidemment leur place, par exemple pour des installations autonomes ou dans des lieux reculés. Cependant, si elles devaient prendre une part importante de la production électrique, leur intermittence exigerait des capacités de stockage actuellement hors de portée, et leur faible densité énergétique se traduirait par un impact environnemental exorbitant.

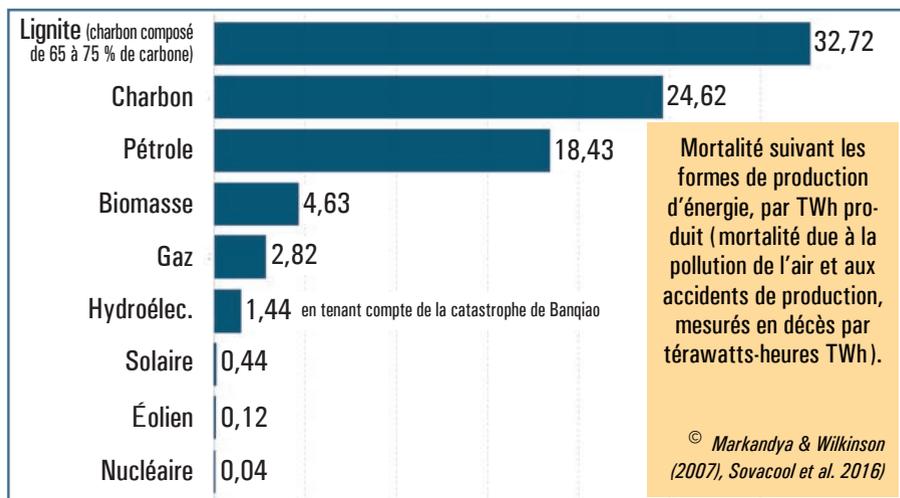
Sachant qu'un panneau photovoltaïque de puissance de crête égale à 300 W (pour 1,5 m² et 18 kg) a un facteur de charge de l'ordre de 15 % en moyenne, on calcule que la production de 550×10^{12} Wh photovoltaïques demanderait $550 \times 10^{12} / (300 \times 0,15 \times 24 \times 365)$, soit plus de $1,39 \times 10^9$ panneaux. Cela représente une masse totale de $2,5 \times 10^7$ tonnes de matériaux de haute technologie, requérant des traitements physico-chimiques élaborés et polluants, pour une quantité de matériaux bruts au moins dix fois supérieure, à renouveler tous les trente ans environ. Ces estimations ne tiennent pas compte des dispositifs de stockage à ajouter, ni de l'énergie considérable nécessaire pour la production des panneaux et leur recyclage, qui devrait idéalement être renouvelable, elle aussi ! Elle est à comparer aux mille cinq cents tonnes d'éléments fissiles nécessaires pendant les mêmes trente années, ce qui, au moyen de réacteurs surgénérateurs (voir plus loin), nécessiterait de brasser « seulement » deux cent mille tonnes de minerai, même pour des minerais pauvres dont la teneur avoisine 0,75 %.

Le nucléaire actuel ne sera pas soutenable très longtemps !

Les reproches faits à l'énergie nucléaire, telle qu'elle existe aujourd'hui, tiennent à son caractère non renouvelable et à une production significative de déchets radioactifs, bien que ceux-ci représentent *in fine* des volumes relativement faibles pouvant faire l'objet d'un stockage géologique. Il y a également une sûreté perçue comme insuffisante, les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ayant beaucoup frappé les esprits. Si l'on s'en tient aux estimations « objectives » (factuelles) du nombre de décès par TWh produit (1 T = un téra = 10^{12}), on constate que l'énergie nucléaire est tout de même la plus sûre des énergies actuellement disponibles.

Mais il convient de se demander si le nucléaire reste une option viable dans l'hypothèse où l'on passerait d'un parc mondial de quatre cent cinquante réacteurs à une flotte de dix mille à vingt mille réacteurs de puissance – la fourchette haute permettant de couvrir la plus grande part des besoins énergétiques mondiaux. Ceci inclurait, par exemple, la production d'hydrogène

par électrolyse, dans le but de remplacer les combustibles fossiles. Dans ce cas, la technologie actuelle des réacteurs à eau pressurisée (REP) n'est plus soutenable, car l'horizon des ressources en uranium ne serait plus que de l'ordre de cinq à dix ans : les REP ne consomment en gros que la fraction ^{235}U de l'uranium naturel, qui comporte 99,3 % de ^{238}U (qui n'est pas fissile) et seulement 0,7 % de ^{235}U fissile.



La bonne nouvelle est que les physiciens ont dans leurs cartons des *réacteurs à neutrons rapides* (RNR), qui peuvent, par capture neutronique, fertiliser ^{238}U en plutonium ^{239}Pu fissile, et également le thorium ^{232}Th , élément naturel assez abondant, lequel se trouve transmuté en un autre isotope fissile de l'uranium, à savoir ^{233}U . Lorsque les pertes de neutrons sont suffisamment faibles, ce qui impose de ne pas les ralentir dans un milieu modérateur comme l'eau, on obtient ainsi des réacteurs qui peuvent exploiter la totalité des éléments fertiles ^{238}U et ^{232}Th , et produisent même un peu plus d'éléments fissiles qu'ils n'en consomment, d'où le nom de « surgénérateurs ».

Ainsi, deux cycles de réactions en chaîne sont possibles : le cycle $^{238}\text{U} - ^{239}\text{Pu}$ et le cycle $^{232}\text{Th} - ^{233}\text{U}$. Dans cette situation, le combustible disponible devient de trois cents à quatre cents fois plus abondant que le seul ^{235}U présent dans la nature, et l'horizon des ressources repasse à plusieurs milliers d'années. Un gros réacteur électrogène d'une puissance électrique de $1,5 \times 10^9 \text{ W}$ pourrait ainsi ne consommer annuellement qu'à peine plus d'une tonne d'uranium naturel ou de thorium. Avec un stock de trois cent cinquante mille tonnes d'uranium appauvri et de dix mille tonnes de thorium, cela permettrait à la France d'attendre des milliers d'années avant de reprendre toute extraction minière !

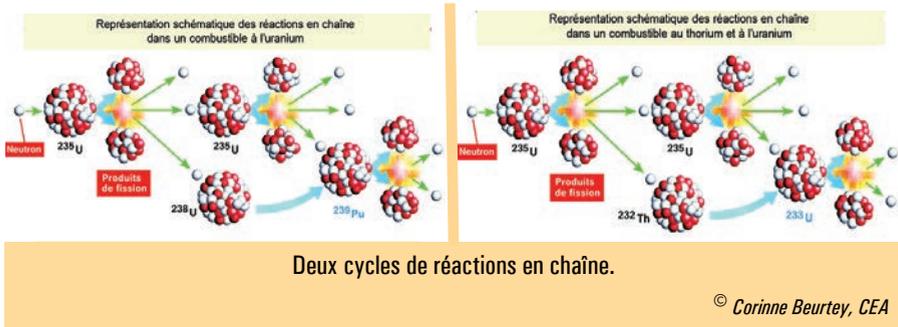
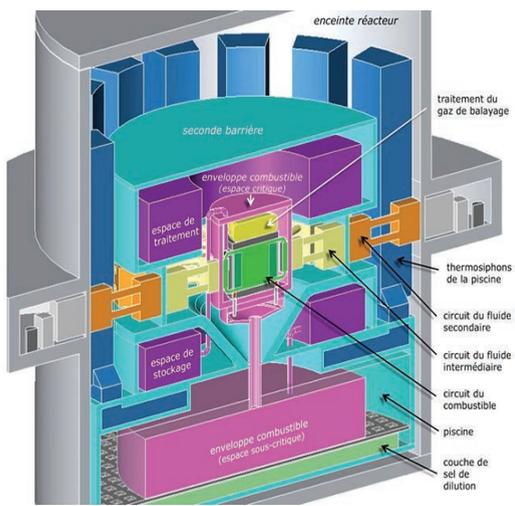


Schéma conceptuel du MSFR.
 Seules les fonctions sont représentées, les détails techniques n'étant pas définis, et les proportions relatives ne sont que spéculatives.

© CNRS/LPSC, Grenoble



Initiatives et prototypes en Russie, en Chine et en France

En réalité, les ressources disponibles sont encore bien plus grandes, car l'efficacité supérieure des RNR permettrait d'exploiter des minerais de basse teneur, voire l'uranium dissous dans l'eau de mer, dont la masse totale est estimée à plus de 4×10^9 tonnes.

La filière la mieux testée est celle des RNR caloportés au sodium, avec les réacteurs BN-600, BN-800 (en cours d'exploitation en Russie) et CFR-600 (en Chine). Dans cette direction, la France avait construit les prototypes Phenix et Superphenix dans les années 1973–2010, et le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) a récemment achevé le projet d'études Astrid pour la réalisation d'un réacteur industriel d'une puissance électrique d'environ 600 MW.

À Grenoble (Isère), le Centre national de la recherche scientifique étudie de son côté un modèle de réacteur rapide à sels fondus, le Molten Salt Fast Reactor (MSFR), qui, à échéance d'une vingtaine d'années, pourrait offrir des performances encore supérieures, et une sûreté optimale. L'usage d'un combustible liquide, sous forme de chlorures ou de fluorures portés à 750° C, permet en effet de procéder au retraitement pyrochimique en ligne du combustible. Le réacteur est rechargé en continu, sans qu'il y ait besoin de procéder à des plans de chargement tous les quatre ou cinq ans. Le coefficient de contre-réaction thermique, très négatif en raison de la dilatation des sels, rend la réaction en chaîne parfaitement stable, même en l'absence de barres de contrôle, tandis que la cuve est à l'abri des accidents de fusion grâce à un refroidissement passif par simple convection. Enfin, on peut atteindre des puissances électriques élevées, de l'ordre de $1,35 \times 10^9$ W, pour seulement 18 m³ de sels fondus, et un combustible (Th ou U) qui n'a plus besoin d'être enrichi. Cerise sur le gâteau, de tels réacteurs produisent peu de déchets, la durée de vie de ceux-ci n'excédant pas quelques siècles, et ils peuvent même incinérer la partie gênante des déchets des réacteurs actuels, à savoir les actinides mineurs à longue vie.

La simplicité de conception et le fonctionnement du MSFR à basse pression devraient, selon certains experts, le rendre à terme très compétitif avec les énergies fossiles. Toutes ces promesses nécessiteront encore beaucoup d'efforts, notamment sous forme de modélisations mathématiques et numériques, avant d'aboutir à un premier démonstrateur. Comme la Chine ou l'Amérique du Nord, il est à souhaiter que la France reprenne en toute première priorité le financement inconsidérément interrompu de la recherche et développement sur les réacteurs de quatrième génération, tels que les RNR-sodium et le MSFR.

J.-P. D.

Pour en savoir (un peu) plus :

« *Le MSFR.* » Daniel Heuer, université d'été « *Sauvons le climat* », 23 septembre 2016, document de présentation disponible en ligne.

The limits to growth. (Les limites à la croissance). Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William Behrens, Universe books, 1972.

« Vers quoi l'Allemagne transite-t-elle exactement ? » Jean-Marc Jancovici, 2013, chronique disponible en ligne.

Fermeture de Fessenheim : une forfaiture. Yves Brechet, Progressistes, 2020, disponible en ligne.

Thorium: energy cheaper than coal. Robert Hargraves, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.