



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Géoscience

Sciences de la Planète

Yves Bréchet

Le rôle de l'énergie nucléaire dans la lutte contre le réchauffement climatique : atouts et faiblesses dans une approche intégrée

Volume 352, issue 4-5 (2020), p. 373-382

Published online: 4 November 2020

Issue date: 12 January 2021

<https://doi.org/10.5802/crgeos.21>

Part of Special Issue: Facing climate change, the range of possibilities



This article is licensed under the
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Géoscience — Sciences de la Planète sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*

www.centre-mersenne.org

e-ISSN : 1778-7025



Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

Le rôle de l'énergie nucléaire dans la lutte contre le réchauffement climatique : atouts et faiblesses dans une approche intégrée

The rôle of Nuclear energy for fighting climate change : assets and weaknesses in a global perspective

Yves Bréchet^a

^a Membre de l'Académie des sciences, ancien Haut Commissaire à l'énergie atomique, France

Courriel: yves.brechet@saint-gobain.com

Résumé. L'énergie nucléaire de fission est une source d'électricité décarbonée qui fait un usage particulièrement économe de la matière et de l'espace, et qui a fait de la France la « bonne élève » de la lutte contre les gaz à effet de serre. Elle est largement déployée dans notre pays, ce qui est un atout quand on se pose sérieusement la question de la trajectoire à construire et non simplement celle de l'objectif à atteindre. En tant que telle, elle a pleinement sa place dans les stratégies énergétiques à mettre en œuvre face au réchauffement climatique. Mais l'analyse de ses atouts et de ses faiblesses demande une approche intégrant la question des ressources en uranium, la question de la sûreté et celle du vieillissement des équipements, les problèmes associés au démantèlement des centrales en fin de vie, et enfin la gestion des déchets produits par cette source d'énergie. Aucun de ces aspects ne peut être abordé indépendamment des autres, aucune de ces questions ne peut faire l'économie d'une réflexion sur les échelles de temps impliquées. Enfin la question de la coexistence de l'énergie nucléaire et des autres sources d'électricité impose une réflexion sur la nature des réseaux, les capacités de stockage et la flexibilité du *mix* énergétique. La question du coût du nucléaire ne peut être rationnellement posée que dans le cadre de cette approche globale.

Abstract. Nuclear fission energy is a carbon-free source of electricity which makes particularly economical use of matter and space, and which has made France the "good student" in the fight against greenhouse gases. It is widely deployed in our country, which is an asset when we seriously ask ourselves the question of the trajectory to be constructed and not simply that of the objective to be achieved. As such, it fully has its place in the energy strategies to be implemented in the face of global warming. But the analysis of its strengths and weaknesses requires an approach integrating the issue of uranium resources, the issue of safety and that of aging of equipment, the problems associated with the dismantling of plants at the end of their life, and finally management of the waste produced by this energy source. None of these aspects can be tackled in isolation from the others, none of these issues can be addressed without thinking about the timescales involved. Finally, the question of the coexistence of nuclear energy and other sources of electricity requires reflection on the nature of the

networks, storage capacities and the flexibility of the energy mix. The question of the cost of nuclear power can be addressed within the framework of this global approach only.

Mots-clés. Énergie nucléaire, Climat, Cycle du combustible, Démantèlement, Irradiation, Déchets nucléaires, Empreinte CO₂.

Keywords. Nuclear energy, Climate, Nuclear fuel cycle, Decommissioning, Irradiation, Nuclear waste, CO₂ footprint.

1. Introduction

Le Groupement international d'experts sur le climat (le GIEC est une émanation de l'Organisation des Nations unies) confirme dans son nouveau rapport du 6 octobre 2018 (le fameux « résumé pour les décideurs ») que le nucléaire fait partie de la solution pour limiter le réchauffement climatique. Il l'avait déjà écrit dans son précédent rapport présenté le 27 septembre 2014.

La prévalence dans le *mix* électrique français de l'énergie nucléaire nous positionne comme un excellent élève en termes d'électricité décarbonée (Tableau 1).

Pourtant, 69% des Français croient que les centrales nucléaires émettent du CO₂. Un état responsable doit commencer par informer les citoyens, et devrait corriger cette perception erronée. Jamais le Ministère de l'environnement n'a dit que le nucléaire n'émettait pratiquement pas de CO₂, et, récemment encore, la Ministre de l'environnement annonçait que l'état luttait contre le réchauffement climatique en fermant une centrale à Charbon, ... et la centrale nucléaire de Fessenheim! Pourtant les chiffres sont là, ils sont têtus, ils sont connus : l'intensité CO₂ des différentes sources d'électricité (Tableau 2) est pour le nucléaire de 16g/kWh, comparable à l'éolien (15) et à la biomasse (18), inférieur au solaire (22 à 48), et très inférieur au gaz (491), au pétrole (840) et au charbon (1024).

Il n'est pas nécessaire d'être grand clerc pour comprendre que, pour ce qui est de la diminution des émissions de CO₂, cela n'a aucun sens de remplacer l'électricité nucléaire par une électricité issue du photovoltaïque ou éolienne, et que le recours au gaz ou au charbon tel qu'on le fait en Allemagne pour stabiliser les réseaux électriques mis en péril par l'intermittence, est une cause d'augmentation des émissions de CO₂.

On ne construit jamais solidement sur le mensonge. On peut décider de « sortir du nucléaire » pour diverses raisons, essentiellement d'ordre politique, mais on ne peut pas dire qu'on le fait au nom de la lutte contre le réchauffement climatique.

TABLEAU 1. Emissions de CO₂ par habitant, toutes activités confondues pour les pays du G7 et la Chine

Pays	CO ₂ /hab (en tonnes)
France	4,32
Italie	5,29
UK	6
Allemagne	8,82
Japon	9,35
USA	15,57
Canada	15,7
Chine	6,59

Dans une première partie, nous nous attacherons à rétablir quelques faits scientifiques que des décennies de propagande antinucléaire ont contribué à occulter dans le grand public, dans les media, et dans la classe politique. Nous commencerons par rappeler le principe de fonctionnement des centrales électro-nucléaires, les risques qu'elles comportent, la question du cycle du combustible qui est essentielle dans la gestion des ressources et des déchets, et la question du démantèlement des centrales. Dans chacune de ces questions circulent des contrevérités qu'il importe de dénoncer, pour que les choix à faire le soient en connaissance de cause.

Dans une seconde partie, nous aborderons les questions « systémiques » d'emprise au sol, de bilan matière, de coexistence entre les différentes sources d'électricité, et la question du coût intégré.

2. Rétablir la vérité scientifique

2.1. Le fonctionnement des centrales nucléaires et les risques associés

Le principe de génération de l'énergie nucléaire est simple : un élément radioactif fissile naturel (l'isotope 235 de l'Uranium dans les centrales de la filière Uranium) peut se scinder en deux fragments de masse atomique plus faible et en émettant deux

TABLEAU 2. Emissions de CO₂ selon la technologie de production d'électricité. Résultats obtenus dans le cadre du programme Externe de l'UE (Berger A. *et al.*, Int. J. Global Energy Issues, Vol. 40, Nos. 1/2, 2017)

Technique	Charbon	Gaz	Hydro	Eolien	Solaire	Nucléaire
gCO ₂ /kWh	1024	491	6	15	45	16

TABLEAU 3. Nombre de décès calculé pour la production de 1000 TWh (deux fois la consommation annuelle française) à partir des données observées pour différentes techniques de production d'électricité (Berger A. *et al.*, Int. J. Global Energy Issues, Vol. 40, Nos. 1/2, 2017)

Technique	Charbon	Pétrole	Gaz	Biomasse	PV	éolien	hydro	Nucléaire
Décès/1000TWh	170000	36000	4000	24000	440	150	1400	90

à trois neutrons, qui a leur tour peuvent fissionner d'autres atomes : c'est le principe de la réaction en chaîne. La somme des masses atomiques des produits de fission est plus faible que celle du noyau fissile initial, et le « défaut de masse » est transformé en énergie, principalement en chaleur. Cette chaleur chauffe un fluide « caloporteur » qui va permettre de produire de la vapeur et de faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité. Pour que ces réactions « en chaîne » puissent s'entretenir, il faut à la fois augmenter la quantité de noyaux fissiles par unité de volume (« enrichir l'uranium ») et contrôler la vitesse et la quantité de neutrons susceptibles de propager la fission (c'est le rôle respectivement du « modérateur » et des « barres de contrôle »). La variété des combustibles, des modérateurs et des fluides caloporteurs conduit à différentes « filières » qui chacune ont leurs inconvénients et leurs avantages, et chacune correspondent à des options technologiques adaptées. Pour cette raison, on ne peut pas penser séparément une filière de réacteurs et une filière de fabrication des combustibles.

La filière de très loin la plus répandue à la surface du globe est la filière dite REP (Réacteurs à Eau Pressurisée) : l'eau sert à la fois de modérateur et de caloporteur. Elle est sous pression, de façon à avoir une température de l'eau liquide aux alentours de 350 °C qui permet, à travers des générateurs de vapeur, de faire tourner les turbines électrogènes avec un meilleur rendement énergétique. Cette filière permet aussi de séparer le circuit primaire dont l'eau passe au cœur du réacteur, du circuit secondaire qui alimentera les turbines.

Le fantasme classiquement entretenu est qu'un réacteur nucléaire peut se transformer en bombe

atomique. C'est tout simplement faux : un cœur de réacteur nucléaire de 900 MW tel que ceux que nous avons en France contient 74 tonnes d'Uranium faiblement enrichi (3%) en Uranium 235. On est très loin de la masse critique pouvant conduire à un emballement de la réaction en chaîne : un atome d'Uranium ne peut entraîner la fission que d'un atome d'uranium, pas de plusieurs (ce qui est lié au nombre d'interactions possibles des neutrons avec les atomes avant leur élimination aux surfaces). Toute la simplicité réside dans cette « économie de neutrons ». Parfois, un atome d'Uranium absorbe un neutron pour donner un atome de Plutonium, mais cela ne se produit que dans 1% des cas de collisions neutron-atome d'Uranium 235. En cas d'accident grave, on ne peut tout simplement pas « concentrer les espèces fissiles » (Uranium 235 et Plutonium) et la transformation d'une centrale nucléaire en bombe nucléaire est une pure absurdité.

Si un tel risque est impossible, il n'en reste pas moins vrai que le nucléaire est une technologie exigeante et que les accidents sont possibles. Les accidents de Windscale (UK), Tchernobyl, Fukushima ont conduit à des explosions et à des incendies, mais ce sont des causes thermochimiques et non une explosion atomique. La gravité de ces accidents se mesure en fonction de l'émission de radionucléides dans l'atmosphère. C'est pour cela que les réacteurs actuels prévoient des enceintes de confinement pour éviter la dispersion des produits radioactifs.

Le goût du sensationnel, avec une bonne dose de mauvaise foi, a conduit à afficher des nombres de morts pharamineux. Là encore, les faits sont têtus et avérés, validés par l'Agence Internationale de l'Energie (qui a un fonctionnement semblable à ce-

lui du GIEC) et par l'OMS. L'accident de Windscale au Royaume-Uni a fait zéro mort, l'accident de Three Mile Island aux USA zéro mort, l'accident de Tchernobyl en Russie 4000 morts et l'accident de Fukushima zéro mort. Comme cela ne convenait pas à l'idéologie antinucléaire dominante, on a progressivement attribué à l'accident de Fukushima les morts du Tsunami (20 000) et on a gonflé au-delà de toute vraisemblance les morts induites par irradiation.

Même en supposant valide la « loi linéaire sans seuil » d'effet de la radioactivité sur l'homme, qui attribue un nombre de morts proportionnel à la dose d'irradiation reçue, et qui est probablement une sur-estimation, le nombre de morts par TWh d'électricité produite reste très faible, comparé au gaz, au pétrole et au charbon (Tableau 3). Si on prend comme indicateur le nombre de maladies graves induites (voir par exemple A. Markandy, P. Wilkinson, *The Lancet*, (2007), 370, 9591, pp. 979–990 « electricity generation and Health ») on a des résultats tout à fait similaires.

Les déboires de l'industrie électronucléaire française ont défrayé la chronique (les problèmes de mal-façonnage aux forges du Creusot, des soudures sur le site de Flamanville, des ségrégations carbone, etc.). Il ne faut pas minimiser ces problèmes : ils sont le signe d'une réelle perte de compétence en France tout simplement liée au fait qu'on n'a pas construit de centrales pendant 20 ans. Aucune industrie ne sortirait indemne d'une telle cure d'austérité. Aucune industrie ne pourrait vivre avec l'évolution constante et sans justification technique des réglementations, dans la durée même d'un grand projet. Il faut sérieusement se poser la question de la viabilité industrielle d'une activité qu'on soumet à un tel traitement, la encore pour des raisons essentiellement politiques. Mais il est important de savoir qu'aucune des erreurs de fabrication n'a conduit à un véritable problème de sûreté (autre que ce qu'on peut appeler la « sûreté administrative »), tout simplement parce que les marges de sécurité sont confortables. Et c'est l'existence de ces marges qui conduit aussi les États-Unis à prolonger leurs centrales au-delà de 60 ans voire 80 ans, alors que nous arrêtons les nôtres à 40 ans. Tout cela n'a absolument rien à voir avec la sûreté.

2.2. Le cycle du combustible : ressources et déchets (Figure 1)

C'est une erreur classique de disjoindre la question des réacteurs électrogènes et celle du combustible.

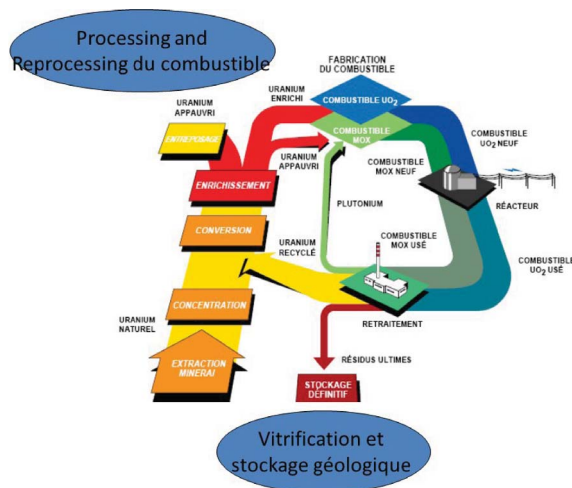


FIGURE 1. Le cycle du combustible en France.

Le choix par la France de la filière REP sous licence Westinghouse, en lieu et place de la filière graphite gaz était lié à la capacité de fabriquer de l'uranium enrichi. Et de même la filière MOX a été développée après l'abandon du surrégénérateur SUPERPHENIX, encore une fois pour des raisons politiques, afin de gérer en partie le Plutonium produit et d'optimiser l'utilisation de la matière fissile.

La compréhension de la filière électronucléaire française suppose, d'une part la prise en compte de l'ensemble du parc réacteur (ceux qui peuvent ou non accepter le combustible MOX), mais aussi les usines de fabrication du combustible, de recyclage du Plutonium dans le combustible MOX, de vitrification des déchets ultimes (Usine de La Hague). Si on arrête les réacteurs, en commençant par les plus anciens, on arrête *de facto* la filière de combustible MOX, sauf à faire des investissements lourds sur les réacteurs récents pour les rendre capable d'utiliser du MOX.

On entend souvent dire que le problème non résolu de l'énergie nucléaire est celui des déchets. A force de le répéter on a fini par en faire une chose admise. A part que, une fois encore, c'est inexact. Les déchets nucléaires sont caractérisés par leur radioactivité et leur temps de vie (c'est-à-dire le temps caractéristique pour transmuter la moitié des atomes radioactifs). Les matériaux fortement radioactifs ont un temps de vie court, les matériaux plus faiblement radioactifs ont un temps de vie long.

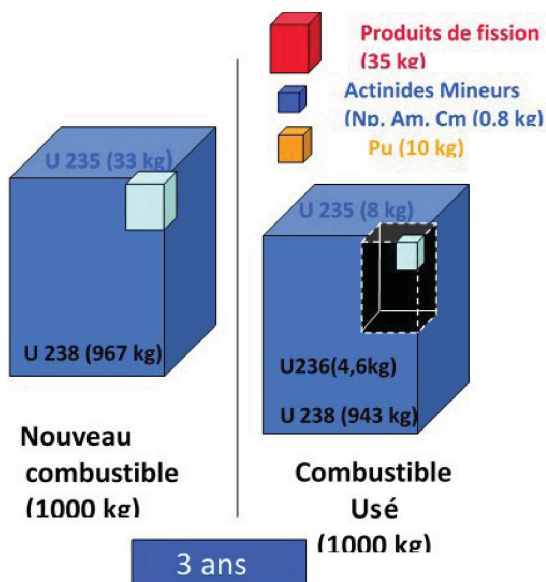


FIGURE 2. Déchets à vie longue générés dans une tonne de combustible après trois ans de fonctionnement.

La Figure 2 donne la proportion des différents types de déchets après l'utilisation de 1 tonne de combustible (dire de quel combustible, UO₂, enrichi à 3%) pendant 3 ans. Les éléments vraiment problématiques dans la durée sont les actinides (Plutonium et Actinides mineurs).

Le problème des déchets revient à les confiner efficacement de telle façon qu'ils ne puissent être en contact avec l'être humain avant d'avoir considérablement décliné leur radioactivité. Avant de traiter les combustibles usés, qui sont encore « chauds », on les entrepose (par exemple à l'usine de La Hague, ou à Marcoule) pendant quelques dizaines d'années. Ensuite on les « traite » pour en faire des déchets « stockables » sur des durées beaucoup plus longues, de quelques centaines à quelques dizaines de milliers d'années. La solution technique existe : elle consiste à vitrifier les déchets, les colis de déchets ainsi vitrifiés confinant sans problème les produits de fission qui ont une demi-vie de quelques centaines d'années. Les actinides (Plutonium, Américium, Neptunium, Curium ... produits par l'absorption de neutrons par les noyaux d'Uranium) peuvent être vitrifiés ou séparés pour recyclage, ils ont une vie plus longue (de l'ordre de la centaine de milliers d'années). Cette durée correspond à 20 fois la durée de la plus vieille

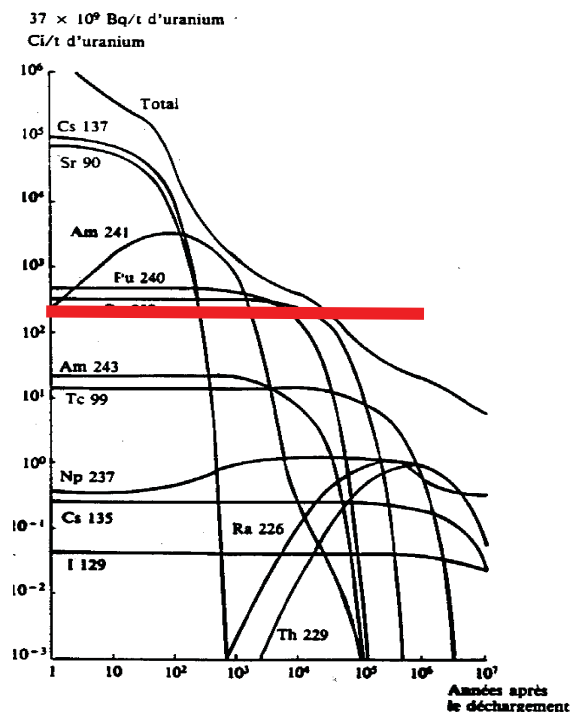


FIGURE 3. Décroissance de la radioactivité en Curie par tonne de déchet entreposé en fonction du temps après déchargement. Le niveau de la radioactivité naturelle est indiqué par la ligne horizontale. Ce qui signifie qu'on doit assurer le confinement des déchets sur des durées de l'ordre de 100 000 ans.

civilisation humaine sur terre. Il est donc difficile de penser à une structure d'ingénierie dont on puisse garantir l'intégrité sur de telles durées. C'est pour cela qu'on s'en remet à la géologie dans des zones non sismiques, pour assurer le confinement.

Le site de Bures en Meuse-Haute Marne, dans le bassin de Paris, avec sa couverture en argile (« calloxfordien ») a été sélectionné pour le stockage géologique profond. Pour être libérés de leur « prison » de verre, les actinides doivent tout d'abord diffuser hors du verre, mais surtout quand ils entrent dans la zone argileuse, ils précipitent c'est-à-dire qu'ils sont piégés en petits agrégats, ou se « collent » par sorption sur les argiles. Leur migration est alors très lente de telle sorte que le temps nécessaire pour qu'ils « sortent de leur piège », c'est-à-dire de la formation argileuse, est tel que la radioactivité est tombée en dessous de sa valeur « naturelle » (Figure 3).

Du point de vue de la santé publique, il est faux de dire que le problème des déchets est non résolu. Du point de vue de l'économie, il est faux de dire qu'il est exorbitant. Pour un volume de déchets HAVL (haute activité, vie longue) correspondant à un parc de 58 centrales sur 40 ans, le coût du stockage des déchets est de quelques centimes d'Euros par MWh.

Reste que le déchet principal est le Plutonium. Il constitue à lui seul 90% de la radioactivité des déchets à vie longue. Et les centrales nucléaires « classiques » ne cessent d'en générer. Il existe une solution à ce problème permettant de « stabiliser l'inventaire Plutonium » : ce sont les réacteurs à neutrons rapides. Ils conduisent à « fermer le cycle du combustible » en brûlant du Plutonium (qui de déchet devient ressource) avec de l'Uranium appauvri qui est autrement inutilisable. Le Plutonium produit est brûlé avec l'Uranium appauvri et est régénéré dans le processus. Les réserves de combustibles sont ainsi multipliées par 1000, ce qui est important en termes de sécurité d'approvisionnement. Le volume des déchets est divisé par 10, ce qui est important pour la gestion de l'aval du cycle. La nécessité de disposer de neutrons « rapides » (à haute énergie) pour les réacteurs à neutrons rapides impose de renoncer à l'eau comme fluide caloporteur et a conduit à utiliser le sodium liquide, ce qui n'est pas une technologie facile (notamment en terme de contrôle non destructif des équipements), mais qui est à un degré de maturité avancé (les Russes ont deux tels réacteurs, les Chinois ont lancé le leur en même temps que nous arrêtons le nôtre, Superphénix en 1998).

La France avait une avance technologique claire sur ce sujet, reconnue au niveau international, avance qui a été sabordée par deux fois, par l'arrêt de Superphénix en 1998, et par l'arrêt du programme Astrid en 2018. Là encore, la raison est purement politique. Celle qui est officiellement avancée est que les réacteurs à neutrons rapides sont plus chers et ne seront rentables que si le prix de l'Uranium est multiplié par trois. Ce calcul fait abstraction des coûts de stockage du Plutonium et de l'Uranium appauvri qui demandera de développer des sites de stockage beaucoup plus importants. Ce choix fait aussi l'impasse sur la raréfaction de l'Uranium que le développement du parc chinois laisse prévoir. La raison qui n'est pas avouable est la volonté de sortir à terme du nucléaire en limitant la ressource et en multipliant les déchets. Cela sans

avoir aucune certitude que l'on pourra se passer du nucléaire.

Nous nous sommes focalisés dans cette section sur le cycle basé sur l'Uranium, qui est celui qui a été développé en France et de par le monde. Il existe d'autres cycles, basés sur le Thorium, qui ne sont pas à ce degré de maturité, mais qui présentent des avantages potentiels, méritant qu'on s'y intéresse à titre exploratoire.

2.3. *Le démantèlement des centrales*

Un autre aspect du nucléaire répété *ad nauseam* est l'incapacité où nous serions de démanteler les installations nucléaires en fin de vie. Là encore cette assertion est tout simplement fautive. Fin 2013, il y avait de par le monde 149 réacteurs nucléaires définitivement arrêtés, 119 en cours de démantèlement, 6 dont le démantèlement était achevé avec « retour au vert » (c'est-à-dire au niveau de radioactivité naturelle du sol). En France, le réacteur de Brennilis (de la filière eau-lourde) n'a toujours pas achevé son démantèlement, mais pour des raisons juridiques et un acharnement procédurier des associations antinucléaires qui n'a rien à voir avec la technique. Par contre, le réacteur de Superphénix a pu être démantelé sans problème entre 1998 et 2010. Et le démantèlement des réacteurs d'étude de Grenoble a pu être mené à bien sans encombre, en une dizaine d'années.

La question du démantèlement doit être déclinée suivant trois cas. Le démantèlement des installations « standard » (généralement des centrales électrogènes) qui ne pose aucun problème technique sérieux (hormis peut être la gestion du graphite dans les anciennes centrales graphite-gaz) et nécessite surtout de la rigueur et de la méthode. Le démantèlement des installations « uniques » (généralement des équipements de recherche) qui nécessite des solutions au coup par coup, coûteuses et demandant des innovations techniques. Le démantèlement des installations en situations accidentelles (Tchernobyl, Fukushima) pour lesquelles nous n'avons, à ce jour, que des solutions de confinement et non de démantèlement.

Un autre mythe entretenu est que le démantèlement créerait des emplois. Cela relève de la naïveté ou du mensonge que de penser qu'on va créer des emplois avec une activité de démantèlement qui emploie pour des durées au moins deux fois moindres,

dix fois moins de personnes que celles qui travaillent pour faire fonctionner une centrale. Quant à penser que cette compétence de démantèlement se vendra à l'exportation, cela revient à supposer que ceux de nos concurrents industriels qui ont construit les centrales seront moins capables que nous de les démanteler!

Les conclusions intermédiaires de cet article, consécutives à ce rappel des faits, sont les suivantes. L'énergie nucléaire fournit une électricité essentiellement décarbonée, et pilotable. Cette électricité est sûre du point de vue de la santé publique comme en témoigne le nombre de morts par TWh produits. Les déchets qu'elle génère sont maîtrisés et les technologies pour les traiter sont opérationnelles. Le stockage géologique profond permet de gérer le problème des déchets à vie longue. Le démantèlement des centrales nucléaires en fin de vie n'est pas un problème technique, c'est un problème de réglementation.

3. Pour une approche systémique

La lutte contre le réchauffement climatique est un problème de nature globale et de nature systémique. Globale car les actions qui sont menées en un endroit du globe contribuent à un comportement du climat sur toute la planète. Cette constatation triviale implique à la fois que le problème ne peut être traité que dans une dimension internationale, et que l'on peut aisément s'en dédouaner en prétendant que le peu qu'un pays comme la France puisse faire est négligeable vis-à-vis du problème d'ensemble. Notons que c'est faire peu de cas de l'apport potentiel des technologies françaises dans d'autres pays du monde pour les questions énergétiques.

Il n'en reste pas moins vrai que chaque pays, individuellement, doit faire sa part de l'effort. En France où un tiers des émissions des gaz à effet de serre vient des transports, un tiers de la gestion des bâtiments et un tiers de l'industrie (production d'électricité comprise), prétendre décarboner une électricité essentiellement décarbonée ne fait pas grand sens.

De plus, prétendre décarboner cette électricité déjà décarbonée en développant les énergies renouvelables, par nature intermittentes, crée des problèmes de stabilité des réseaux qui imposent, soit de renforcer les réseaux, soit de recourir au stockage massif de l'électricité, soit de développer une gestion

TABLEAU 4. Compositions des coûts du kWh pour les particuliers

Composants des coûts	2006	2018
Part énergie (coût de production et de commercialisation)	43%	36%
Part réseaux (péages ATR transport et distribution)	39%	30%
Part taxes (y compris les taxes pour développer les renouvelables)	18%	34%
Total	100%	100%

du vecteur électrique plus délocalisée, soit de développer un autre vecteur que le vecteur électrique, par exemple le vecteur hydrogène. Dans tous les cas, ces solutions pour résoudre un problème que nous nous créons nous-mêmes en refusant une solution que nous avons déjà en place, ont un coût.

La structure du prix de l'électricité en France donnée dans le Tableau 4 montre que ces questions ne sont pas négligeables et que le développement de réseaux renforcés n'est pas une mince affaire.

Les aspects techniques sont eux aussi loin d'être négligeables. Actuellement, les seules solutions de stockage passif de l'électricité sont la remontée de l'eau dans les barrages hydrauliques, qui sont limités par l'existence des sites adaptés. Le stockage électrochimique a fait des progrès considérables, mais semble encore à ce jour mieux adapté à l'électrification des transports qu'au stockage de masse. Il existe des études en cours sur la capacité des véhicules électriques sur le réseau à lisser les pics de consommation, mais cela demande un développement massif du véhicule hybride. Les solutions de stockage de masse par des processus électrochimiques autres que les batteries ne sont pas encore développées de façon industrielle. L'hydrogène qu'on nous présente depuis des décennies comme la solution miracle, se heurte à un double défi : comment le produire à un tarif compétitif avec le reformage du méthane (mais il reste alors d'origine fossile et donc sa production émet du CO₂, comment le transporter sans pertes excessives. Si on va vers l'électrolyse à chaud à partir des sources intermittentes comment gère-t-on la fatigue thermique des dispositifs d'électrolyse?

Aucune de ces questions ne se heurte à une im-

TABLEAU 5. Quelques tarifs pour l'électricité produite par différentes technologies en Euros par MWh. (Source Cap Gemini, 2018)

Mode de production	Prix
Nucléaire ancien	45–80
Eolien terrestre	50–110
Solaire (PV)	55–160
Charbon	60–105
Eolien offshore	100–160
Nucléaire nouveau	100–170
Hydroélectricité	40–120

possibilité physique, mais certainement à des difficultés techniques qui demandent du temps pour les résoudre, et à des défis économiques majeurs. Se lancer dans des transformations profondes de notre *mix* énergétique sans avoir résolu ces problèmes est aventureux. On sent bien que la seule invocation des baisses de coûts de production de telle ou telle source d'énergie est une vision très partielle de la question. Sans même parler du fait qu'on continue à subventionner largement des énergies qu'on dit compétitives...

Le Tableau 5 donne quelques estimations (Cap Gemini) des coûts actuels de l'électricité produite par différentes technologies. Là encore, ces données ne sont qu'indicatives tant est grande la complexité du problème. Par exemple, il semble probable que le prix du solaire photovoltaïque descende à 25 Euros par MWh, mais ni les coûts de stockage ni les coûts de réseaux ne sont inclus. Le prix du nouveau nucléaire ne prend pas en compte les effets de série et dépend très fortement du taux d'actualisation choisi.

Mais si la dimension économique est essentielle, il est d'autres aspects qui méritent de retenir notre attention. Depuis longtemps, Vaclav Smil dans une série de livres sur les transitions énergétiques insiste sur le « contenu implicite » des différentes sources d'énergie. A la différence des estimations économiques, qui ont un certain degré d'arbitraire, les besoins en termes de surface, de matière et d'énergie nécessaire pour produire un kWh d'électricité sont des grandeurs physiques qu'on peut estimer avec une certaine fiabilité, soit par retour d'expérience, soit à partir de leurs principes de fonctionnement. La physique interdit de resserrer

trop les éoliennes pour la simple raison de la conservation de la quantité de mouvement portée par le vent (c'était d'ailleurs une règle bien connue des Hollandais au XVIII^e siècle, qu'il ne fallait pas mettre un moulin à une distance trop proche d'un autre moulin). Le contenu énergétique des panneaux photovoltaïques est facile à estimer et le retour d'expérience donne leur durée de vie. Il est facile de connaître la quantité d'acier nécessaire pour une centrale nucléaire et pour un mât d'éolienne. Et ces grandeurs doivent être rapportées à la quantité d'électricité produite par le dispositif au cours de sa durée de vie. A titre d'illustration, le Tableau 6 montre les besoins en surface pour différentes sources d'énergie pour produire 500TWh, ce qui est la consommation annuelle française.

On constate, et ce n'est pas une surprise pour le physicien, que l'énergie nucléaire est économe en surface. Cela traduit simplement, malgré le gigantisme des équipements, que l'énergie libérée provient de l'interaction entre nucléons qui, en densité énergétique, est sans commune mesure avec les énergies chimiques, électro-magnétiques ou gravitationnelles qui gouvernent les autres moyens de production d'électricité. Cette concentration de l'énergie a aussi une conséquence : elle permet de répondre à des besoins concentrés (comme ceux des villes et de l'industrie lourde) sans être contrainte à des réseaux de distributions trop étendus. La même raison explique que la quantité de matière (acier, aluminium, cuivre, béton etc ...) nécessaire pour produire un kWh est, pour le nucléaire, plus faible d'un facteur 10 par rapport au photovoltaïque (200 t par MW électrique) et d'un facteur 35 par rapport au solaire à concentration. Et quand on évalue le EROI (« Energy Return on Investment », c'est-à-dire l'énergie produite rapportée à l'énergie nécessaire pour la produire), celui de l'énergie nucléaire est d'un facteur 30 supérieur à celui du photovoltaïque.

Ces quelques remarques pour simplement remettre en avant que les arguments simplistes sur le coût « nu » des énergies, indépendamment des systèmes dans lesquels elles doivent s'insérer, sans prendre en compte les besoins en termes d'espace et de matière, peuvent être des arguments de vente, ce ne sont pas des arguments de réflexion qui suffisent à guider les choix.

TABLEAU 6. Besoins en surface pour différentes sources d'énergie

Technique	Nucléaire	Fossiles	Solaire	Eolien	Biomasse
Empreinte km ²	4	10	200	1200	5000

4. Conclusions

Le problème du réchauffement climatique est global, les leviers d'action sont locaux. Les solutions les mieux adaptées peuvent varier d'un pays à l'autre, d'un besoin à l'autre.

L'urgence du problème nécessite à la fois de déployer des solutions déjà disponibles, et de lancer des programmes de recherche cohérents pour les solutions à venir.

L'objectif de la dé-carbonation de l'économie est un passage obligé dans la lutte contre le réchauffement climatique. Il faut bien entendu mettre en place les mesures de sobriété énergétique (dans les habitations par exemple, ou dans les transports). Une stratégie efficace est l'électrification de l'économie à partir d'une électricité décarbonée.

L'énergie Nucléaire fournit déjà en France une électricité essentiellement décarbonée. C'est une forme d'énergie peu consommatrice de ressources, de matière, d'espace et d'énergie grise pour sa production. Elle répond aux besoins en énergie des secteurs industriels nécessitant des ressources énergétiques denses et stables. La coexistence des ENR (énergies naturelles renouvelables) et du nucléaire soulève des questions de « flexibilité du parc » qui impliquent des adaptations de réseaux, de moyens de stockage, de gestion des centrales.

L'énergie nucléaire nécessite pour se développer de manière durable une stratégie dans le long terme des investisseurs publics, l'échelle de temps n'étant pas celle des marchés financiers. Et cela ne sera possible qu'en sortant du procès instruit, par idéologie, contre toutes les évidences scientifiques, et qui privent notre pays d'un atout essentiel face à un des défis majeurs de notre époque.

Quelques repères bibliographiques

La littérature sur les sujets abordés dans cet article est gigantesque. Nous nous contenterons de

donner ici quelques références permettant de comprendre et d'approfondir le sujet. Dans chaque section, les livres sont classés par ordre de complexité croissante.

Sur l'énergie nucléaire en général

Bellal A, (2020) « Environnement, climat et energie ». Editions Cassini

Woessner, G. (2019). Faut il sortir du Nucleaire? First edition.

Partanen, R. and Korhonen, J. (2015). Climate Gamble. Create Space.

Barré, B. (2017). Pourquoi le nucléaire? DeBro.ek

Nifenecker, H. (2011). Le nucléaire, un choix raisonnable? Ed.Physique.

Sur les différents types de réacteurs et de combustibles

Greneche, D. (2016). Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles. Ed.de Physique.

Guidéz, J. and Pre, G. (2016)le, « Superphénix » (2016) Atlantis Press.

Tarride, B. (2013). Physique, Fonctionnement et Sureté des REPEDP Sciences.

Sur les déchets nucléaires

Gin, S. (2006). Les déchets Nucléaires.Dunod.

Turlay, R. (1997) Les déchets Nucléaires, un dossier scientifique.

Sur le démantèlement

Dautray, R. and Bréchet Y. (2015). Sciences du démantèlement des installations nucléaires. Ed.Physique.

Sur les approches systémiques de la transition énergétique

- Dautray, R. (2004). *Quelles énergies pour demain?* Odile Jacob.
- McKay D. (2009). *Sustainable energies without the Hot air.* Cambridge University Press
- Smil, V. (2017). *Energy Transitions.* Praeger.
- Smil, V. (2016). *Power density.* MIT Press.
- Hansen, J. P. and Percebois, J. (2017). *Transitions électriques.* Odile Jacob.
- Pietro, P. and Hall, C. (2013) *Spain's photovoltaic revolution, The energy Return on Investment.* Springer.
- Vidal, O. (2018). *Matières premières et énergie : les enjeux de demain.* ISTE.