

## Politique énergétique et biodiversité : éloge du concentré

Didier Beutier

@ 49643

***La biodiversité est menacée par l'expansion des activités humaines. Dans ce contexte, la filière nucléaire, concentrée par essence en termes de flux de matières et de sites industriels, présente quelques avantages en comparaison des énergies éolienne et solaire : consommations bien plus faibles de surfaces et de matières premières, aptitude au recyclage. Dans les scénarios d'énergie décarbonée, ces différences plaident pour le maintien d'une part significative de nucléaire plutôt qu'une production assurée à 100 % par les énergies renouvelables.***

La croissance de la population mondiale et de l'ensemble de ses besoins à satisfaire (habitats, consommations d'eau, d'énergie, de minéraux, végétaux, animaux...) menace de plus en plus la biodiversité sur notre planète. Beaucoup d'activités humaines, notamment l'agriculture, l'exploitation forestière, l'extraction minière, la consommation d'énergie, et simplement la présence de l'homme et son habitat, perturbent le monde naturel. Il devient donc urgent, pour une population tendant vers les 10 milliards d'êtres humains, de densifier ces activités afin qu'elles occupent le moins de surface possible et préservent ainsi des espaces suffisants à l'état sauvage. Coexister avec une nature sauvage suffisamment diverse et florissante est une condition impérative pour la survie et le bien-être de l'humanité. Cela implique de prendre en compte les conséquences à long terme de nos décisions, en particulier dans notre politique énergétique.

Certes, l'impératif de limiter le changement climatique a bien été pris en compte, avec le développement des énergies décarbonées pour la production d'électricité : hydraulique, nucléaire, solaire et éolien – même si beaucoup reste à faire pour réduire la consommation d'énergies carbonées dans les bâtiments et

les transports. Mais nos orientations actuelles dans la production d'électricité n'intègrent pas l'impératif de préserver la biodiversité. En effet, elles concourent plutôt à multiplier les surfaces et les quantités de matières nécessaires à la production d'un kilowattheure, en substituant éolien et solaire à l'énergie nucléaire.

Les surfaces nécessaires à l'éolien terrestre et au photovoltaïque représentent une menace pour la biodiversité en France et ailleurs, dès qu'on envisage une part dominante d'éolien et de solaire dans l'électricité. Selon l'ADEME, vers 2050 les parcs éoliens développeront en moyenne une puissance de 8 MW électriques par km<sup>2</sup> (puissance totale divisée par l'emprise totale au sol), dont 1 % artificialisé (tours d'éoliennes, transformateurs, chemins d'accès) et le photovoltaïque au sol jusqu'à 70 MW (crête) par km<sup>2</sup>. Or les centrales nucléaires développent 250 à 1 000 MW par km<sup>2</sup>, même en intégrant les surfaces nécessaires à la filière combustible depuis la mine jusqu'au stockage final des déchets. Si l'on tient compte maintenant des productions effectives d'électricité, en TWh par an, les écarts se creusent encore du fait de l'inconstance du vent et des variations d'ensoleillement. Il faudra 60 km<sup>2</sup> de ferme éolienne, ou 10 km<sup>2</sup> de panneaux solaires et

moins de 1 km<sup>2</sup> d'installations nucléaires pour produire 1 TWh par an. Rappelons qu'en France nous consommons environ 480 TWh par an. Pour produire autant que Fessenheim, il faut 720 km<sup>2</sup> de fermes éoliennes, soit 4 fois la surface du vignoble alsacien. Certes, entre les éoliennes et hors les chemins d'accès, la terre est cultivable et l'herbe peut pousser. Mais l'impact sur l'écosystème reste lié à la surface totale de la ferme et à sa localisation : menaces pour l'avifaune et les chauves-souris, perturbation de l'habitat et des déplacements de la faune locale. L'étude publiée par la Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) et l'ADEME en 2017 recense une moyenne annuelle de 7 oiseaux tués par éolienne et montre « la nécessité et l'urgence de disposer d'un protocole de suivi robuste applicable à tous les parcs éoliens ». La LPO recommande d'éviter l'implantation d'éoliennes dans mais aussi à proximité des Zones de Protection, classées Natura 2000 ou autres. Quant aux chauves-souris, le recensement reste assez incertain, « entre 0 et 60 » victimes annuelles par éolienne. Plus le programme éolien se veut ambitieux, plus la question des sites acceptables se posera, avec le souci d'éviter les chemins migratoires, mais aussi de ne pas fragmenter les habitats localement. En Espagne, le parc éolien de Tarifa entrave la voie de migration de millions d'oiseaux entre l'Europe et l'Afrique via le détroit de Gibraltar.

L'ADEME, dans sa vision d'une énergie 100 % renouvelable à l'horizon 2050, a examiné cette question (ADEME, « Mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations », octobre 2015). Dans cette vision, environ 50 000 éoliennes totalisant 96 GW produiraient 261 TWh par an et occuperaient au total 17 000 km<sup>2</sup> (soit l'équivalent du Limousin), rognant 8 % des surfaces encore à l'état naturel aujourd'hui. Si l'on extrapole le recensement de la LPO cité plus haut, ces 50 000 éoliennes pourraient tuer 350 000 oiseaux par an ; le programme national « Éolien Biodiversité » mis en place par la LPO et l'ADEME est précisément destiné à « éviter, réduire et compenser » ces impacts négatifs des éoliennes. Quant au photovoltaïque installé au sol, il produirait 51 TWh

avec 38 GW installés en occupant 500 km<sup>2</sup>. L'énergie nucléaire, pour la même production combinée de 312 TWh, demanderait 40 GW de capacités occupant moins de 200 km<sup>2</sup>.

### Concentration des flux à gérer

L'énergie nucléaire a pour avantage essentiel d'être une source concentrée. Ainsi, un assemblage de combustible nucléaire pesant 0,5 t produit autant d'électricité (0,15 TWh) que 50 000 t de charbon ou 20 000 t de gaz naturel. Cette caractéristique produit des avantages en limitant les flux de matière à toutes les étapes de la chaîne de production :

- Quantités de matières à extraire du sol (150 t d'uranium naturel par an pour un réacteur) ;
- Flux à transporter entre les mines, les usines et les centrales électriques ;
- Stocks stratégiques de combustible à constituer auprès des centrales : ils atteignent aisément deux ans de consommation sans représenter de volumes importants ;
- Quantités de déchets radioactifs ultimes à stocker : en France, environ 1 kg par an par habitant dont moins de 100 g destinés au stockage géologique et dont moins de 10 g de haute activité, alors que l'on génère 2 500 kg par an et par personne de déchets industriels ;
- Quantités très faibles de déchets non radioactifs : cf. le Tableau 1 établi par les analyses de cycle de vie de l'ADEME ;
- Développement du recyclage, à hauteur de 10 % des besoins avec le combustible MOX (oxyde mixte d'uranium et de plutonium) aujourd'hui en France, puis de 20 % quand le recyclage de l'uranium séparé au traitement sera repris, et beaucoup plus quand les réacteurs de génération 4 seront mis en œuvre.

Un flux faible de déchet toxique reconnu comme tel peut être géré de façon sûre, avec des conditionnements sophistiqués sans impact significatif sur le coût du kWh, et il n'engendrera finalement pas le même risque social qu'un flux important de déchet considéré comme peu dangereux et moins strictement confiné et surveillé. Depuis trois décennies, les

## Politique énergétique et biodiversité : éloge du concentré

	Photovoltaïque		Éolien	Nucléaire
	Sur toiture	Au sol		
Émissions de CO <sub>2</sub>	72 g CO <sub>2</sub> /kWh	78 g CO <sub>2</sub> /kWh	15 g CO <sub>2</sub> /kWh	13 g CO <sub>2</sub> /kWh
Quantités de déchets produites	53 g/kWh	49 g/kWh	26 g/kWh	17 g/kWh
Quantité de déchets radioactifs produites	0	0	0	0,2 g/kWh

**Tableau 1. Évaluation par analyse de cycle de vie des quantités rejetées par trois filières énergétiques**

Source : ADEME

déchets de haute activité vitrifiés issus du traitement des combustibles usés sont entreposés sur le site à La Hague et refroidissent tranquillement sous convection naturelle sans gêner personne. Leur stockage en profondeur sera lui aussi économe en surface et volume avec une emprise de l'ordre de 10 km<sup>2</sup>. Le principe appliqué tout au long du cycle du combustible est le confinement de la radioactivité contenue, évitant le plus possible tout impact régional ou global par dispersion dans l'environnement. Le traitement systématique sur site des effluents liquides et gazeux produit des déchets solides de faible activité conditionnés pour le stockage au centre ANDRA de Soullaines dans l'Aube. Si défaillance il y avait, l'impact resterait local. Ce principe de confinement maximal s'appliquera aussi au stockage final des déchets de haute activité ; comme il s'agit d'assurer un confinement à très longue échéance, le stockage en profondeur dans une couche géologique stable est la solution retenue universellement aujourd'hui. La Finlande et la Suède ont lancé la construction de leur stockage géologique. En France, le projet CIGEO a retenu une couche d'argile à 500 mètres sous terre, stable depuis plus de 100 millions d'années. En outre, le principe d'un stockage réversible a été posé et précisé par la loi de 2016, impliquant pendant au moins 100 ans la possibilité de modifier les conditions de stockage et de retirer des colis avant la fermeture définitive du site. Les nombreuses études réalisées dans le monde sur le stockage géologique soulignent que le risque résiduel à long terme de fuite de radioactivité vers la biosphère est extrêmement faible. Et là encore l'impact serait limité à un niveau très

local. Ce risque résiduel très hypothétique et local contraste avec les risques avérés d'ampleur mondiale ou régionale liés à l'utilisation des combustibles carbonés. Le gaz carbonique et le méthane contenus dans les effluents gazeux ne sont pas filtrés mais rejetés dans l'atmosphère, avec un impact mondial par leur contribution à l'effet de serre. Les rejets de fines poussières et d'oxydes d'azote ont des impacts d'ampleur régionale sur l'environnement et sur la santé, même si les normes dans ce domaine sont de plus en plus contraignantes (cf. les rapports de l'Agence européenne de l'environnement).

Le Tableau 1 présente les impacts environnementaux de trois filières pour la production d'un kWh, évalués par analyse de cycle de vie. Ces données sont issues de la base de données IMPACT tenue par l'ADEME.

Les quantités de déchets indiquées incluent l'ensemble du cycle de vie des installations, y compris leur démantèlement en fin de vie. Pour l'éolien c'est le démantèlement qui engendre la majeure partie des déchets : le béton des fondations des éoliennes principalement, mais aussi les pales en matériaux composites dont l'incinération soulève des difficultés. De même le défi à relever aujourd'hui pour la filière photovoltaïque est le traitement des panneaux solaires en fin de vie, pour recycler les différents matériaux contenus (verre, cuivre, aluminium) et éviter la mise en décharge de déchets contenant des éléments toxiques (plomb, cadmium et autres). Les procédés de recyclage en cours de développement devraient voir leur industrialisation progresser en Europe car de

gros volumes de panneaux solaires vont arriver en fin de vie à partir de 2030, dépassant un million de tonnes par an dans l'Union européenne. Dans la filière nucléaire en France, les déchets de démantèlement représenteront 25 % du volume total cumulé de déchets radioactifs en 2030 ; ils sont en majorité de très faible activité (TFA), expédiés après conditionnement au centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) de Morvilliers dans l'Aube.

### Concentration des sites de production

La part dominante de l'énergie nucléaire et de la grande hydraulique a conduit à concentrer la production d'électricité sur peu de sites : 19 centrales nucléaires en France notamment. Ceci apporte plusieurs avantages : effet de taille, avec notamment une faible consommation de matériaux par unité de capacité installée (kilowatt) et par unité d'électricité produite (kWh), faible nombre de lieux à surveiller et sécuriser, dimension collective d'infrastructure partagée, adaptation à l'alimentation de mégapoles. Ces sites, par l'importance de leur production, des effectifs employés, de leurs achats aux entreprises locales et de leur chiffre d'affaires, contribuent ainsi de façon significative à l'économie locale. En fin de vie, la concentration des sites de production implique aussi la limitation du nombre de sites à démanteler pour leur restitution vers toute autre activité humaine. Ce dernier point est surtout important pour la filière nucléaire, sachant qu'il faut vingt ans après l'arrêt d'un réacteur pour rendre le site restituable. Cependant la restitution de sites où sont implantées des éoliennes ne sera pas totalement simple ni immédiate à cause des fondations en béton qu'il faudra extraire des sols.

L'effet sur la consommation de matériaux est très marqué. Pour produire 13 TWh/an pendant 20 ans, il faut installer un EPR contenant 100 000 t d'acier soit 60 t/MW, et 1 Mt de béton (600 t/MW). Ou bien 2 000 éoliennes de 2 MW contenant  $240 \times 2\,000 = 480\,000$  t (soit 120 t/MW) d'acier et 1,6 Mt (400 t/MW) de béton.

Soit 4,8 fois plus d'acier et 1,6 fois plus de béton utilisés par TWh produit annuellement. Le solaire PV au sol demande entre 10 t/MW et 100 t/MW d'acier selon les sources (variabilité sans doute liée au fait que cet acier n'est pas contenu dans les panneaux solaires eux-mêmes mais dans le reste des installations). De même, il faut en cuivre environ 2 t/MW pour un EPR contre 4 t/MW pour du PV au sol. Comme 1 MW nucléaire produit chaque année 6 fois plus de kWh que 1 MW de PV, on voit qu'il faut finalement installer au moins autant d'acier et 12 fois plus de cuivre avec le PV pour produire la même quantité d'électricité chaque année. Le solaire installé sur les toits consomme moins de matériaux qu'au sol, néanmoins plus que le nucléaire. Au-delà, pour établir un bilan complet, se pose la question de la possibilité ou non de recycler l'acier et le cuivre après démantèlement.

Plus largement, la consommation de minéraux et métaux associée au développement mondial de l'éolien et du solaire est devenue une préoccupation majeure pour l'avenir : on se référera notamment au rapport de la Banque mondiale « The growing role of minerals and metals for a low carbon future », (juin 2017). Ce rapport montre l'augmentation des consommations projetée sur la période 2013-2050 quand on substitue un scénario décarboné, à faible augmentation de température (scénario 2DS du GIEC pour un objectif de + 2 °C), au scénario tendanciel actuel (6DS, soit + 6 °C). Cette augmentation serait bien supérieure à + 100 % pour plusieurs métaux rares (indium, néodyme, argent) mais aussi pour les métaux de base (aluminium, fer, cuivre). Pour atténuer cette croissance des besoins, le taux de recyclage des métaux de base devra être fortement augmenté, en particulier celui du cuivre, dont l'électricité à partir des renouvelables et les transports électriques sont gourmands. Mais surtout il faudra mettre au point et développer celui des métaux rares qui reste négligeable aujourd'hui (ne dépassant pas 1 %), pénalisé par la dilution de ces métaux dans les produits finaux. Les contributions dues à chaque technologie de production d'électricité sont recensées dans ce rapport, montrant

la faible consommation de métaux de base et de métaux rares de l'énergie nucléaire en kilos par mégawatt installé, en comparaison du solaire et de l'éolien. Une telle augmentation des consommations a des implications fortes en termes de besoins miniers avec les impacts qui en résultent, mais aussi de géopolitique, du fait notamment de la position dominante de la Chine sur l'approvisionnement de certains métaux comme les terres rares, le gallium, le germanium et l'indium (cf. Guillaume Pitron, *La guerre des métaux rares*, LLL, 2018). Le caractère dilué et intermittent des énergies renouvelables aurait donc des conséquences significatives dès lors qu'on voudrait leur confier un rôle prépondérant comme dans les scénarios « 100 % renouvelables ».

### Concentration des risques à maîtriser

Plusieurs évaluations internationales ont conclu au fait que l'énergie nucléaire a épargné bien des vies humaines et exercé des impacts très limités sur l'environnement en comparaison des énergies fossiles (cf. rapports EUR 21951 2005, ExternE « Externalities of Energy, Methodology Update » et OECD/NEA 2010 « Comparing Nuclear Accident Risks with Those from Other Energy Sources »). Cela même en tenant compte des deux accidents majeurs, Tchernobyl et Fukushima. Le fait de concentrer les risques à gérer sur un petit nombre d'installations, de même filière technologique (réacteurs à eau pressurisée, et concentrés en France sur 3 paliers homogènes) et sur des flux de matières concentrés offre des avantages, et cela pas seulement par le simple effet statistique. En effet le principal risque à maîtriser est celui d'une fusion du combustible avec rejets importants dans l'environnement ; et depuis plus de 50 ans les études de sûreté nucléaire, les contrôles, le retour d'expérience et les réexamens périodiques ont permis un progrès continu vers les très faibles probabilités de défaillance avec fusion de cœur et vers un risque très faible d'impact (en appliquant le principe des trois barrières à opposer à la dispersion de radioactivité en cas d'accident : gaine du combustible, circuit primaire,

enceinte de confinement). En France, le concept de « référentiel de sûreté » d'un réacteur condense dans son évolution tous ces acquis. Aux États-Unis, le retour d'expérience et les améliorations apportées ont abouti au fait que le « vieillissement » des réacteurs est plutôt synonyme de sûreté accrue que l'inverse, ce qui a conduit à autoriser des prolongations de licence jusqu'à 60 ans pour la majorité d'entre eux. Le traumatisme fort du déplacement brutal et définitif des populations locales, autour de Tchernobyl et de Fukushima, ne doit pas se reproduire, et les réacteurs de génération 3 (français, américain, russe, japonais, chinois...) ont été conçus pour garantir cela. On note au passage que les deux pays touchés, Ukraine et Japon, ont décidé de poursuivre l'utilisation de l'énergie nucléaire (respectivement au niveau de 50 % et 20 % de la production électrique), après avoir renforcé les conditions de sûreté imposées aux installations. Il semble d'autre part que la nature sauvage autour de Tchernobyl a retrouvé toute sa vitalité et sa diversité, l'absence de l'homme ayant un effet positif largement supérieur aux impacts de la radioactivité résiduelle dans le sol et la végétation (pour l'analyse des observations disponibles, cf. « Qu'avons-nous appris des études écologiques conduites à long terme sur la faune et la flore des territoires contaminés par les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ? », Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire – IRSN, mars 2016). Mais l'industrie nucléaire a bien compris qu'elle doit plus que jamais prémunir les réacteurs présents et futurs contre tout rejet accidentel important de radioactivité, et elle consacre à cet impératif une grande part de ses investissements (environ 50 % des investissements sur le parc nucléaire sont liés à la sûreté selon le plan industriel 2014-2025 de EDF).

### Concentration de la controverse

Pour conclure, on ne s'étonnera pas que la controverse énergétique se concentre sur le nucléaire aujourd'hui encore en France. Le nucléaire est l'arbre qui cache la forêt, au point de laisser au second plan les préoccupations pourtant plus lourdes relatives aux gaz

à effet de serre, exigeant l'évolution de nos modes de transport et de nos habitats pour minimiser nos émissions de gaz carbonique, et aussi les préoccupations relatives aux menaces sur la biodiversité, qu'un développement excessif de l'éolien et du solaire risque d'accroître. Quant aux matières premières nécessaires aux énergies renouvelables (acier, cuivre, cobalt, argent, terres rares...), nous les importons et elles induisent beaucoup d'extractions minières dans le monde, hors de notre contrôle. Notre préoccupation devrait être aussi de ne pas laisser à d'autres pays le soin (le fardeau) de certaines activités industrielles, sachant qu'ils n'accordent peut-être pas la même attention que nous à l'évolution du climat et à la protection de l'environnement. N'est-ce pas trop facile de polluer moins chez nous si c'est en consommant ce qui pollue ailleurs ? Là encore, le caractère concentré de l'énergie nucléaire est favorable, car notre approvisionnement en uranium peut s'appuyer sur un petit nombre de mines (Canada, Kazakhstan, Niger...) dans lesquelles nous sommes partie prenante et présents industriellement (Orano), et par conséquent coresponsables de leurs impacts locaux. Le propos n'est pas ici de nier le besoin de développer solaire et éolien, ni de contester le besoin de diversification des sources d'énergie, mais précisément dans cette diversification l'énergie nucléaire doit conserver une place significative, alors qu'une part excessive d'éolien ou de solaire conduirait à de nouveaux problèmes d'environnement et de menaces sur la biodiversité, en France et ailleurs, liés à l'importance des surfaces nécessaires et des quantités de matières premières consommées.