

Le nucléaire dans les scénarios mondiaux de transition énergétique

Sandra Bouneau, physicienne, Université Paris Sud

Les études de prospective sur la transition énergétique destinée notamment à réduire les émissions de gaz à effet de serre, reposent sur le développement de scénarios.

Conçus pour évaluer quantitativement les impacts d'une politique énergétique sur le climat, ils représentent de réels outils d'aide à la décision. Cependant, les scénarios sont à manier avec prudence car ils sont construits sur des modèles complexes et utilisent un grand nombre d'hypothèses peu explicitées, qui relèvent parfois davantage de considérations politiques que techniques ou scientifiques.

Pour endiguer le dérèglement climatique, la consommation des combustibles fossiles, qui représentent aujourd'hui 80% de l'énergie consommée dans le monde, devra décroître drastiquement. L'outil scientifique utilisé pour analyser la production et la consommation d'énergie dans le futur est le scénario. Alors que la plupart des scénarios mondiaux^(a) considèrent un déploiement massif des énergies renouvelables, la production d'énergie nucléaire peut s'arrêter d'ici 2050 ou bien être multipliée par un facteur 10 par rapport à aujourd'hui. Il s'agit donc de comprendre les raisons de la grande variabilité de la part du nucléaire dans les études prospectives.

Construction des scénarios mondiaux de transition énergétique

L'objectif d'un scénario est d'explorer les futurs énergétiques possibles en fournissant notamment une trajectoire de consommation et de production d'énergie jusqu'en 2050 ou au-delà. Le scénario se base sur un ensemble d'hypothèses et de grandeurs pour modéliser l'évolution socio-économique du monde (population, urbanisation, PIB, consommation...), elle-même couplée à des modèles décrivant l'évolution de la disponibilité des sources d'énergie, du coût des technologies et de leurs performances. De plus, une grandeur donnée – par

exemple l'évolution du PIB – est tantôt une hypothèse, tantôt un résultat de la modélisation.

Dans la plupart des scénarios, le système de production énergétique est optimisé pour satisfaire à tout instant la demande d'énergie au coût le plus bas. Le coût d'une technologie est donc une donnée d'entrée dont la valeur au cours du temps détermine sa part dans le mix énergétique. Un scénario visant un fort déploiement des nouvelles sources renouvelables électriques (éolien, photovoltaïque) fait l'hypothèse d'une réduction des coûts par rapport à aujourd'hui pouvant aller jusqu'à un facteur 10. À l'inverse, une technologie considérée comme peu souhaitable pour satisfaire la demande future, d'un point de vue sociétal ou climatique, a un coût artificiellement augmenté afin de ne pas émerger significativement dans le mix énergétique futur.

Sans objectif quantitatif préalablement fixé, les scénarios sont dits « tendanciels ». Selon les hypothèses et les paramètres choisis, la consommation d'énergie en 2050 peut être augmentée de 20% ou multipliée par un facteur 3 par rapport à celle d'aujourd'hui. Lorsqu'un objectif est fixé à un horizon donné, par exemple la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'un facteur 2 dans le monde d'ici 2050, le scénario s'emploie à décrire une trajectoire pour l'atteindre sous l'effet de contraintes et d'hypothèses supplémentaires.

Il existe une multitude de scénarios dans la littérature scientifique, complexes à appréhender, ce qui rend leur analyse comparative difficile voire impossible. Un scénario n'a pas vocation à être prédictif mais à transcrire, au travers d'un ensemble d'hypothèses et de valeurs attribuées aux grandeurs économiques et technologiques, une trajectoire énergétique. S'il sert parfois à éclairer le débat et à alimenter la réflexion en amont des décisions, il est souvent relégué au statut d'instrument destiné à asseoir et avaliser des choix déjà définis.

Prise en compte de la contrainte climatique dans les scénarios mondiaux

En intégrant des modélisations du climat, certains scénarios peuvent également fournir des évolutions de concentration de GES jusqu'en 2100. Sur la base de plusieurs centaines de ces scénarios, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a défini quatre profils de référence d'évolution de concentration de GES (*Representative Concentration Pathway*, ou RCP). Ces profils donnent lieu à quatre valeurs de flux d'énergie supplémentaire reçu en moyenne par m² de surface de la Terre et causant son réchauffement (« forçage radiatif »). La valeur la plus basse, 2,6 W/m², induit



une augmentation moyenne de la température d'ici 2100 qui ne dépasse pas 2°C ; la plus haute, 8,5 W/m², conduit à une augmentation supérieure à 4°C. Ces profils fixent un cadre commun pour élaborer de nouveaux scénarios, dits « climatiques », visant à évaluer l'impact d'une politique énergétique sur le climat par rapport à des scénarios tendanciels.

Dans la plupart des scénarios tendanciels, les énergies fossiles restent la principale source d'énergie et les émissions de CO₂ associées donnent des forçages radiatifs supérieurs à 2,6 W/m². L'augmentation des besoins en énergie, qu'elle soit modérée ou forte, provient des populations d'Asie et, dans une moindre mesure, d'Afrique. Selon les hypothèses des scénarios sur la capacité des pays à maîtriser leur

consommation d'énergie dans l'avenir, et le niveau de développement des pays émergents et pauvres, la consommation d'énergie mondiale en 2050 varie du simple au triple (fig. 1, en bleu).

Sur la base des scénarios tendanciels utilisés comme référence, des hypothèses supplémentaires sur la consommation d'énergie et les progrès technologiques des sources non émettrices de CO₂ sont introduites. Ces hypothèses simulent des politiques plus volontaristes qu'elles ne le sont aujourd'hui pour réduire les émissions de GES, permettant ainsi d'atteindre des objectifs quantitatifs compatibles par exemple avec un RCP de 2,6 W/m². Dans la plupart des scénarios, fixer des objectifs ambitieux pour le climat s'accompagne d'une réduction significative

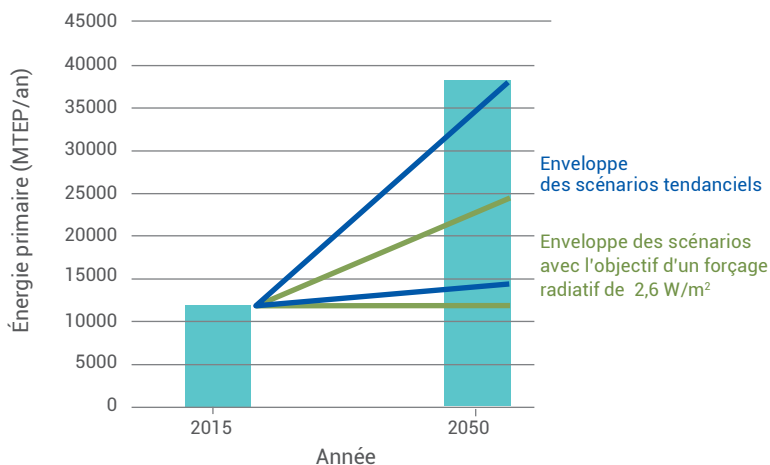
de la consommation d'énergie d'ici 2050 par rapport aux scénarios tendanciels (fig. 1, en vert).

Dans certains scénarios, cette sobriété est présentée comme souhaitée et reste compatible avec une croissance économique soutenue moyennant, par exemple, des hypothèses ambitieuses sur la capacité des sociétés à changer leurs modes de vie et à améliorer les performances des installations. Dans d'autres, la réduction de la consommation d'énergie est subie, puisqu'elle résulte d'une politique de réduction des émissions de GES très contraignante, comme la mise en place d'une taxe carbone élevée, et induit un ralentissement de la croissance économique.

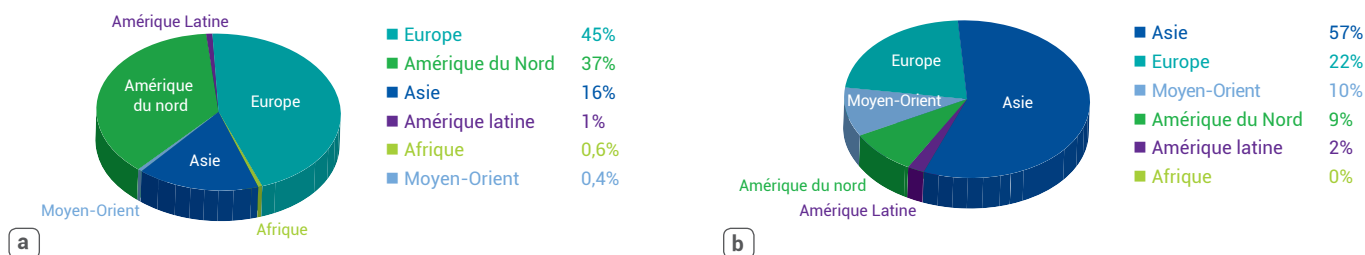
Les conditions d'une production d'énergie décarbonée

Selon les hypothèses des scénarios, la transition vers un monde décarboné est plus ou moins rapide et peut s'opérer selon plusieurs options : maintien de l'utilisation des combustibles fossiles en privilégiant la substitution du charbon et du pétrole par le gaz naturel avec un recours massif à la technologie de Capture et de Séquestration du CO₂ (en anglais, CCS), déploiement des énergies renouvelables incluant la biomasse (bois et biocarburants) ou du nucléaire.

Dans la plupart des scénarios mis en avant, la production d'électricité ou de



1. Consommation mondiale d'énergie, en mégatonnes d'équivalent pétrole par an, estimée dans les scénarios tendanciels (en bleu) ou climatiques (en vert).



2. Part des réacteurs nucléaires (a) actuels et (b) en construction dans le monde.

>>>

chaleur d'origine nucléaire, bien que compétitive, ne ressort pas comme un moyen efficace de fournir au monde l'énergie dont il a besoin sans émettre de CO₂. Les arguments sous-jacents sont rarement explicités. Parfois, est invoquée la difficulté de maîtriser cette technologie complexe tout en respectant les standards de sûreté occidentaux ; ou bien le fait que cette technologie ne serait pas acceptée par les sociétés futures. Ces arguments se traduisent par un surcoût artificiel attribué au nucléaire, qui la classe au dernier rang des énergies non émettrices de CO₂ dans le mix énergétique. La limitation du déploiement du nucléaire à l'échelle mondiale est donc souvent une hypothèse d'entrée du scénario plutôt qu'un résultat.

En revanche, dans les scénarios qui lèvent ces contraintes, la production nucléaire en 2050 est multipliée par un facteur variant de 2 à 10 par rapport à aujourd'hui, selon la demande d'énergie future.

Actuellement, on compte plus de 400 réacteurs nucléaires dans le monde, en majorité à eau sous pression, produisant 2,4 millions de GWh par an d'électricité pour une puissance installée de 350 GW, ce qui représente 10% de la production électrique totale, et dont la répartition géographique dans le monde est donnée dans la figure 2a. En outre, 68 réacteurs sont en cours de construction, dont plus de la moitié se situent en Asie, le reste étant réparti entre l'Europe, l'Amérique du Nord et le Moyen-Orient (fig. 2b).

Dans les années 2000, le nucléaire semblait connaître un renouveau mais l'accident de Fukushima lui a porté un coup d'arrêt, rendant hasardeux tout pronostic d'évolution vers un déploiement ou un déclin. Néanmoins, quelle que soit la décision des pays d'Europe vis-à-vis du nucléaire, son déploiement semble se poursuivre dans le reste du monde et se déroule aujourd'hui principalement en Asie.

Dans un scénario à forte croissance du nucléaire, la production nucléaire mondiale peut atteindre 20 millions de GWh par an en 2050. Avec l'hypothèse que les principales populations concernées se situeraient dans les villes (besoins concentrés) des pays déjà nucléarisés, plus particulièrement dans les pays d'Asie comme la Chine et l'Inde, environ 5 milliards d'humains en bénéficieraient. Sur la base de réacteurs de 1 GW fonctionnant à pleine puissance 85% du temps, le nombre total de réacteurs correspondant est d'environ 2300, soit environ 450 réacteurs pour un milliard d'habitants. Comparativement au cas de la France, qui a construit 60 réacteurs en 25 ans pour 60 millions d'habitants, ce type de déploiement mondial ne semble pas si irréaliste. Même si la capacité de l'industrie nucléaire occidentale à s'engager dans des programmes ambitieux de construction de réacteurs est remise en cause actuellement, l'Asie pourrait en avoir rapidement les moyens.

L'augmentation de la production nucléaire d'un facteur 10 sur le siècle à venir se heurterait à la question des ressources en uranium. Estimées aujourd'hui à environ 15 millions de tonnes, ces ressources sont incapables d'assurer une telle augmentation avec les filières actuelles qui consomment de 150 à 200 tonnes d'uranium pour une puissance de 1 GW délivrée pendant 1 an. De plus, la capacité de l'industrie minière à mettre à disposition ces ressources reste à démontrer. Enfin, les océans contiennent plusieurs milliards de tonnes d'uranium, mais les concentrations sont si faibles que le rendement énergétique lié à l'extraction et l'impact environnemental associé rendent l'exploitation de cette ressource difficilement envisageable aujourd'hui. Un tel scénario de déploiement ne semblerait donc possible que *via* une transition vers des filières régénératrices, permettant de réduire d'un facteur 200 la consommation d'uranium. La maîtrise et la mise en œuvre de centaines de réacteurs de 4^e génération dans le monde, répondant aux normes de

sûreté les plus élevées, représenteraient un défi technologique et industriel majeur.

Pour conclure, les scénarios misant sur une croissance soutenue du nucléaire pour répondre aux enjeux climatiques manquent de visibilité dans les sphères politique, technico-économique et médiatique. Un déploiement important au niveau mondial nécessiterait de faire des choix politiques forts engageant les générations futures et faisant du nucléaire un réel pari sur l'avenir. Mais l'analyse des scénarios montre que se passer du nucléaire est également un pari sur l'avenir. En effet, les scénarios correspondants misent sur la capacité des sociétés à réduire leur consommation d'énergie et à améliorer très fortement l'efficacité énergétique, et reposent sur des hypothèses très optimistes sur la technologie CCS ainsi que sur les moyens de gérer une production importante d'électricité intermittente. Si nous échouons à atteindre ces objectifs ambitieux, les combustibles fossiles resteront encore très longtemps la principale source d'énergie et nous aurons engagé le monde, de façon irréversible, sur une trajectoire de dérèglement climatique majeur. ■

En savoir plus

- Ce document s'appuie principalement sur les scénarios de l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) réalisés dans le cadre des travaux du GIEC : <https://secure.iiasa.ac.at/web-apps/ene/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>
- Les chiffres sur la production nucléaire sont issus de la base de données ENERDATA : www.enerdata.net/
- "Building future nuclear power fleets: The available uranium resources constraint", *Resources Policy* 38 (2013) 458-469.
- "The representative concentration Pathways: an overview", *Climatic Change* 109 (2011) 5-31.

a. Pour une étude de scénarios à l'échelle française, voir dans ce dossier l'article de N. Maïzi et F. Briens (p. 49).