

Les déterminants de l'évolution de la production d'énergie dans une perspective de soutenabilité

Par Marc JEDLICZKA

Hespul et négaWatt

et Yves MARIAGNAC

WISE-Paris et négaWatt

Entre inerties constatées et ruptures espérées, il serait présomptueux de prédire l'évolution du système énergétique à un horizon relativement lointain comme 2050. Il semble en revanche de plus en plus évident, entre impératif croissant des contraintes de long terme et progrès constants des solutions pour y répondre, de décrire vers quoi il devrait raisonnablement tendre pour devenir effectivement soutenable.

Le contexte

Il n'est plus possible de réfléchir à l'équilibre futur entre l'offre et la demande d'énergie sans replacer cette question dans le contexte de la crise majeure et globale à laquelle l'humanité est aujourd'hui confrontée sous l'effet de ses propres choix de développement.

Rétrospectivement, la crise pétrolière de 1973, première alerte sur notre addiction à l'énergie facile et sur les limites d'un « modèle » reposant sur une prédation sans limite des ressources naturelles et sur le mythe d'une énergie infinie dans un monde fini, n'a pas fondamentalement modifié ces choix. Quelques décennies plus tard, l'effet boomerang de cet aveuglement confortable conduit à un constat accablant : sans renoncer aux enjeux de l'approvisionnement énergétique d'une population humaine toujours plus nombreuse et de l'amélioration globale de ses conditions de vie, il est impératif de transformer le modèle qui prétend y répondre aujourd'hui. Les dégâts qu'il produit sont de plus en plus visibles et menaçants, d'abord du point de vue environnemental avec, en premier lieu, le changement climatique et l'effondrement de la biodiversité, mais également avec l'épuisement des ressources et la multiplication des risques technologiques et des pollutions. Ils le sont tout autant sur le plan humain, entre creusement des inégalités, déplacements de populations et augmentation des tensions et des conflits.

Cette tendance lourde atteint aujourd'hui un point critique : rien n'assure en effet que le monde évolue vers une résolution pacifique et maîtrisée de cette crise et, si des signaux positifs existent, les résistances au changement sont également très fortes. Dans ce contexte, le premier rôle des experts est d'éclairer les conditions dans lesquelles des solutions répondant aux enjeux de long

terme tout en étant acceptables à court terme peuvent être identifiées et mises en œuvre.

Il convient pour cela de se projeter dans un monde qui a effectivement pris cette orientation en s'inscrivant dans un objectif de neutralité climatique à l'horizon 2050 – ou, plus précisément, de bilan zéro émissions nettes pour tous les gaz à effet de serre (et pas seulement le CO₂) – tout en cherchant à limiter les émissions cumulées sur cette période par la mise en œuvre, le plus tôt possible, de solutions appropriées.

Cette option est nécessaire pour contenir les effets du réchauffement climatique à un niveau considéré comme supportable, c'est-à-dire se plaçant dans la perspective d'une trajectoire de + 1,5°C en 2100. Mais pour être acceptable, ce monde « bas carbone » doit être également économe en ressources non renouvelables, plus juste socialement, au sein de chaque pays comme au niveau mondial, et s'inscrire globalement dans l'ensemble des objectifs de soutenabilité tels qu'explicités par les 17 objectifs du développement durable (ODD) des Nations Unies⁽¹⁾.

Ainsi, l'avenir qu'il nous faut tracer ne se réduit pas au critère des émissions carbonées, aussi vital et prégnant soit-il : ce qui est en jeu, c'est une transformation intégrée non seulement du système énergétique, mais aussi de l'ensemble de nos modes d'organisation, de production et de consommation. À cet égard, la question de l'interaction énergie-biomasse, notamment autour des concurrences d'affectation des productions agricoles et sylvicoles et des usages des sols, donne un exemple parlant de l'approche systémique qui doit présider aux choix.

(1) <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

Plaidoyer pour un nouvel ordre de mérite

L'une des causes de l'incapacité de notre modèle énergétique à apporter une réponse systémique à la crise réside dans l'application mécanique d'un ordre de mérite fondé sur des critères tels que la rentabilité à court terme pour les investisseurs ou, plus encore, le coût marginal qui, en plus d'entretenir la confusion entre les notions de coût et de prix, ne prend pas, par construction, en compte l'essentiel des impacts de différentes natures et de différentes temporalités de la production, de l'acheminement et de la consommation des différentes ressources énergétiques qui nous alimentent.

Ce constat impose de réfléchir à la définition d'un nouvel ordre de mérite capable d'intégrer dans sa structure même l'ensemble de ces impacts, de donner la priorité aux solutions s'inscrivant dans la logique de long terme consubstantielle au concept de développement durable et de privilégier celles qui relèvent de choix « sans regret ».

L'approche méthodologique développée dans le cadre des travaux de scénarisation de l'Association négaWatt⁽²⁾

(2) <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050>

en propose une première étape. Son triptyque d'action sur la demande – sobriété dans les usages et efficacité sur l'ensemble de la chaîne énergétique – puis sur l'offre – priorité aux énergies de flux (renouvelables) sur les énergies de stock (fossiles et nucléaire) – constitue un *ordre de préséance*. Dans une vision reposant sur la raison d'être du système énergétique que sont les services qu'il rend, l'optimisation des usages précède logiquement celle des chaînes de transformation de l'énergie nécessaire à la fourniture de ces services à partir des ressources, optimisation qui elle-même précède les arbitrages sur la mobilisation des ressources. Cette logique qui ne préjuge pas du niveau d'action sur chacun de ces leviers est d'ailleurs inscrite depuis 2015, par le biais de l'article 1^{er} de la loi relative à la transition énergétique, dans le Code de l'énergie.

Pour définir des priorités de mise en œuvre au-delà de cet ordre logique et évaluer de manière aussi complète que possible la pertinence des différentes options, il est nécessaire d'intégrer trois autres dimensions :

- la soutenabilité (au sens du terme anglo-saxon *sustainability*, lequel est moins ambigu et plus large que celui de durabilité) ;
- l'extensibilité (*scalability*, en anglais), au sens de la capacité à être déployée à grande échelle, voire généralisée.

Objectifs du développement durable des Nations-Unies	Social				Social 2			Environmental				Economique				Score cumulé													
	1	2	3	4	5	10	16	17	6	12	14	15	7	8	9	11	13												
	Eradication de la pauvreté	Lutte contre la faim	Accès à la santé et bien-être	Accès à une éducation de qualité	Égalité entre les sexes	Réduction des inégalités	Pais, justice et institutions efficaces	Partenariats pour la réalisation des objectifs	Accès à l'eau salubre et à l'assainissement	Consommation et production responsables	Vie aquatique	Vie terrestre	Accès à une énergie propre à coût abordable	Accès à des emplois décents et croissance	Infrastructure résiliente, industrialisation durable	Villes et communautés durables	Lutte contre le changement climatique	Maximum	Total (valeur médiane)	Minimum									
Industrie	Accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique	+2		+2	+1		+1		+2	+2	-1	+1		+2	+1	+1	+2	n.d.	17	15,5	14								
	Substitution par des énergies bas carbone			+2	+1				+2	+2	-2	+2		+1	-1	+2	+2	+2	+2	n.d.	18	15	12						
	Décarbonation/CSC/CUC			-1					+2	+1	-1	+2		-1		+2	-2	+2	+2	n.d.	9	6	3						
Bâtiments	Action comportementale	+2		+2				+2		+2	+2			+2	+2	+2	+2	+2	n.d.	18	18	18							
	Accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique	+2	-1	+2	+2	+2	+1	+1	-1	+2	+2	+2	+1		+2	+2	+2	-1	+2	+2	n.d.	27	23	19					
	Accès à & substitution par des énergies bas carbone modernes	+2	0	-1	+2	+1	+1			+2	+2	+2	-1	+2	-1		+2	+2	+2	+3	n.d.	25	21,5	18					
Transports	Action comportementale	+2	-1	+2	+2	-1	+1	+1	+2	+1	-1	+2	+2	+2		+2	+2	-2	+2	-2	+2	n.d.	21	15	9				
	Accélération de l'amélioration de l'efficacité énergétique	+2	-1		+2				+2	+2	+2	+2	+2			+2	+2	-2	+2	-2	+2	n.d.	20	14,5	9				
	Accès à & substitution par des énergies bas carbone modernes	+2	-1	0	+2				+2	+1	-1	+2	+2	-1	+2		+2	+2	-2	+2	+2	n.d.	21	15	9				
Remplacement du charbon	Énergies renouvelables hors biomasse	+2		+2	+1	+1	+1	+1	+2	+2	0	+2	-2	+2	+2	-1	-1	+3	0	0	-1	+2	n.d.	21	16	11			
	Utilisation accrue de la biomasse	+2	-2	+2	-2	+2						+1	-2	+2		+1	-2	+3	+1	+1		n.d.	15	8	1				
	Nucléaire / nucléaire avancé			-1						-1		+2	-1			-1	+1	+1	-1		n.d.	0	-1,5	-3					
Charbon avancé	CSC à base de bio-énergie	+2	-2	+1	-2	+2	-1					+1	-2	+1		+1	-2	+2	+1	+1		n.d.	12	4	-4				
	CSC fossile			-1								+1	-2				+2	-1	+1		n.d.	2	0,5	-1					
	Régimes alimentaires durables et réduction des déchets alimentaires	0	-1	+2	+1				+1	-1	+1	-1	+2	-1	+2		+1	+1	+1	+1		n.d.	13	9	5				
Agriculture & élevage	Restauration des terres et séquestration du carbone dans le sol	+2	+2	+2	-2	+2	-2	+2	0	+1	0	0	-1	+2	+1	-1	+1		+1	-1	+1	+2	-1	+2	-2	n.d.	21	9,5	-2
	Amélioration de la gestion du bétail et du fumier	+2	+2	+2	-2		+2	0	+1	0	+1	+1	+2	+2	-1	+1		+1	+1	+1	+2		n.d.	20	15	10			
Forêt	Réduction de la déforestation, REDD+	+2	+1	-2		+1	+1	-1	+2	+2	+1	-1	+1	-1	+1		+1	+1	-1	+1	+1	-1		n.d.	16	9,5	3		
	Boisement et reboisement	+2	-2	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+2	+2	-1		+2	+2	+1	+2			+2		n.d.	18	14	10			
	Approvisionnement responsable					0	0	+1	+1	+2	-1	+1			+1	-1	+1	+2	+2	+2		n.d.	13	10,5	8				
Océans	Alcalinisation des océans		+1	-1										+1	-2							n.d.	2	-0,5	-3				
	Carbone bleu (capture de carbone par les océans)	+3	+3									+2		+2	0	+3						n.d.	13	12	11				
	Amélioration des conditions météorologiques													+2	-1	-1						n.d.	1	-0,5	-2				

Source : Association négaWatt, d'après GIEC, 2018.

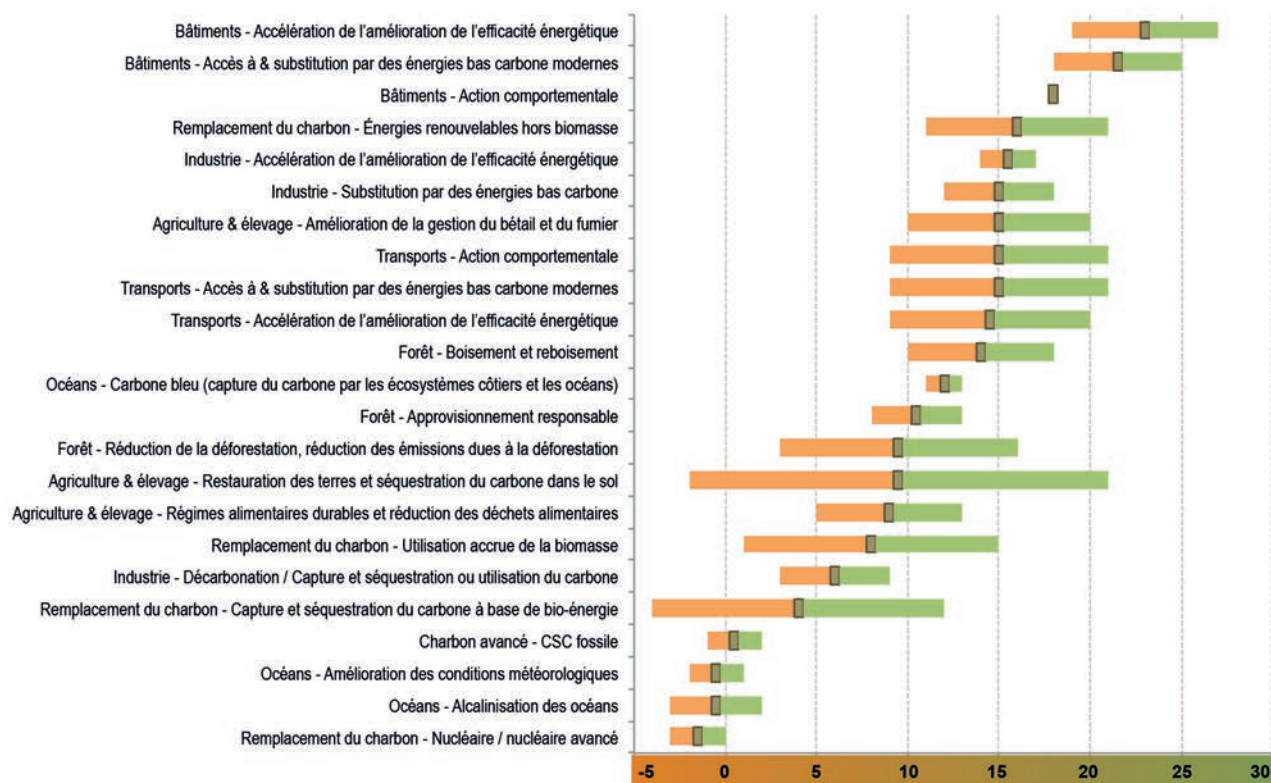


Figure 1 – Source : Association négaWatt, d'après GIEC, 2018.

- l'accessibilité économique (*affordability*, en anglais), du point de vue non seulement des acteurs concernés, mais aussi de la société dans son ensemble ;

Le critère de soutenabilité

Sur ce point, c'est le GIEC lui-même qui offre une solide base de réflexion dans son rapport spécial d'octobre 2018 sur la limitation du réchauffement à 1,5°C⁽³⁾. Celui-ci présente, à l'appui d'une analyse des trajectoires de réduction des émissions compatibles avec cet objectif, une évaluation croisée des impacts positifs ou négatifs de 23 actions de toute nature de réduction des émissions de gaz à effet de serre au regard des 16 autres ODD. Pour chaque interaction identifiée et renseignée par la littérature scientifique, le GIEC fournit un score, avec, si nécessaire, une fourchette reflétant des impacts potentiellement différents selon les conditions de mise en œuvre ou le contexte, par exemple selon qu'il s'agit de pays riches ou de pays pauvres.

Les résultats, compilés par négaWatt et complétés par un calcul du score cumulé de chaque option pour chacun des 16 ODD et de la fourchette associée, sont rassemblés dans le tableau de la page précédente.

Ces résultats doivent être interprétés prudemment. D'une part, le GIEC assortit ces scores d'indications sur le degré plus ou moins grand de confiance ou de consensus qu'apporte la littérature scientifique sur chacun des croi-

sements, sans compter l'absence de corpus scientifique pour évaluer certaines interactions pourtant bien réelles. D'autre part, le cumul sans pondération des scores obtenus sur les différents objectifs gomme toute notion de hiérarchisation de leur importance.

Tout en appelant au renforcement et à l'approfondissement de cette démarche, les résultats démontrent l'intérêt de celle-ci pour identifier le caractère plus ou moins soutenable des différentes options. Comme l'indique la Figure 1 ci-dessus, les options se différencient selon deux critères.

Le premier est leur score médian. Ainsi, les actions les plus bénéfiques concernent de manière générale l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'accès à des sources d'énergie non carbonées et les changements de comportements dans le bâtiment, l'industrie et les transports. Les changements de comportements alimentaires et ceux des pratiques agricoles et forestières sont également identifiés comme bénéfiques. À l'inverse, les solutions purement technologiques, comme la capture-séquestration de carbone fossile, le nucléaire (existant ou « avancé ») ou encore la géo-ingénierie océanique, ont des scores très bas, voire négatifs, ce qui, même avec les réserves d'usage évoquées plus haut, tend à les disqualifier en tant que « solutions soutenables ».

Le second est la sensibilité de l'impact des différentes options à leurs conditions de mise en œuvre qui appelle, dans certains cas, à une très grande attention, notamment autour des questions du recours à la biomasse et de l'usage des sols.

(3) https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf

Le critère de « scalabilité »

Anglicisme difficile à traduire, la scalabilité mesure le rythme et l'ampleur possible du déploiement des différentes options en fonction des déterminants plus ou moins nombreux et complexes de sa mise en œuvre effective. Ces questions recouvrent autant le niveau de développement technique et industriel que la disponibilité à court et à long terme des ressources matérielles et humaines, l'échelle envisageable pour leur mobilisation ou encore les limites liées à leur impact environnemental et à leur acceptabilité sociale, sans oublier bien entendu les aspects économiques et financiers.

Sur le premier point, les échelles complémentaires de maturité technologique TRL (*Technology Readiness Level*) et de maturité industrielle MRL (*Manufacturing Readiness Level*), couramment utilisées dans les mondes de la R&D et de l'industrie, fournissent, avec respectivement leurs 9 et 10 niveaux d'évaluation, une base méthodologique reconnue d'évaluation de la capacité d'une solution à être déployée à un horizon de temps donné. Dans la perspective d'une orientation soutenable, il est pertinent de compléter ces échelles par d'autres critères. Comme indiqué dans la Figure 2 ci-après, l'Association négaWatt a ainsi étendu le modèle développé par les Danois d'Innovationsfonden sous le nom de SRL (*Societal Readiness Level*)⁽⁴⁾ aux questions environnementale (ESRL), en ne retenant dans son scénario que des technologies d'un niveau supérieur à 7.

(4) https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2018-08/societal_readiness_levels_-_srl.pdf

Le critère d'accessibilité économique

Pour ce qui est des aspects économiques et financiers, l'enjeu ne doit pas être, conformément aux principes de soutenabilité énoncés plus haut, de donner la priorité aux actions les moins chères à court terme pour les acteurs économiques, mais à celles qui sont les moins chères à long terme pour la collectivité. Il faut alors améliorer l'accessibilité économique des options qui répondent à ce critère en renforçant la capacité et le consentement à payer des acteurs *via* les différents mécanismes de régulation disponibles que sont la réglementation, la tarification, les subventions ou la taxation. Comme la crise des Gilets Jaunes l'a brutalement rappelé, justifier cette régulation en la replaçant dans une vision de long terme et en compenser les effets négatifs immédiats sur les populations les plus fragiles sont des impératifs pour rendre la transition à la fois équitable et acceptable.

L'incontournable adéquation usages-vecteur-ressources

L'ordre de mérite défini par la combinaison sobriété – efficacité – énergies renouvelables – soutenabilité – scalabilité – accessibilité économique offre une bonne base de référence méthodologique pour le choix des solutions les plus appropriées, mais il serait incomplet s'il ne prenait pas en compte, au-delà des qualités intrinsèques de chacune des options, leur capacité à s'intégrer dans une trajectoire globale optimisée qui impose, pour être réellement pertinente, de s'assurer de la cohérence systémique de l'ensemble. Par exemple, le foisonnement actuel des travaux relatifs aux technologies émergentes telles que la gestion de la demande, les services-système évolués,

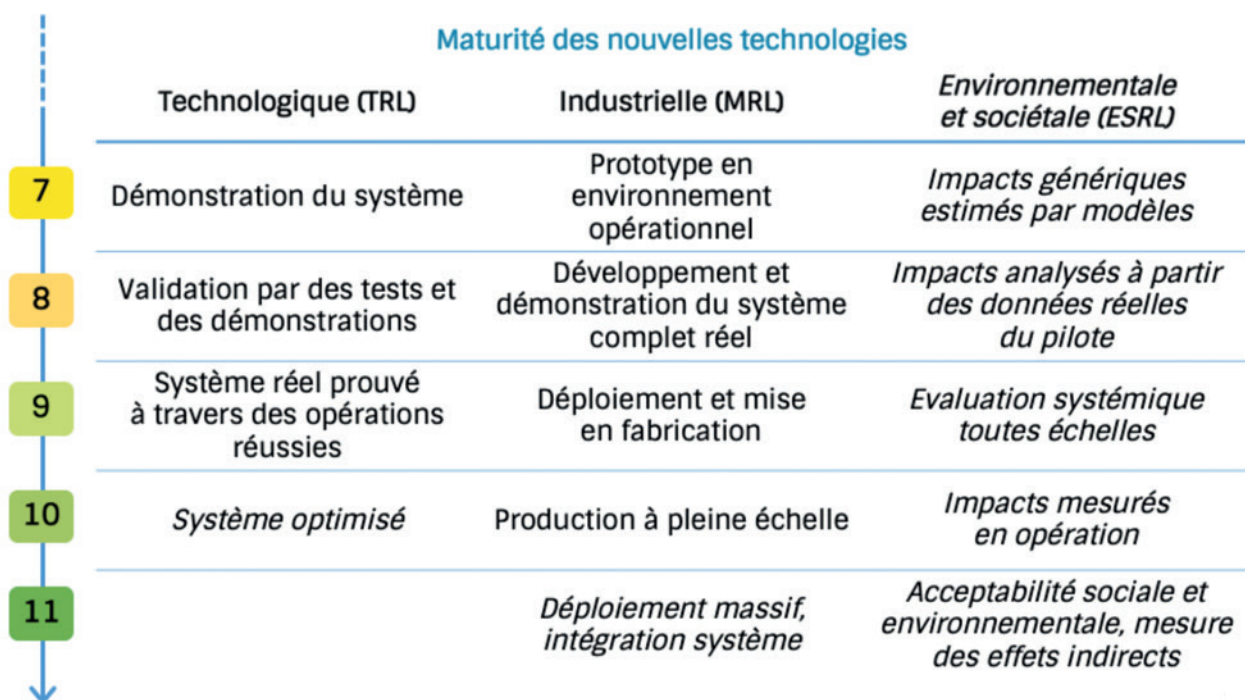


Figure 2 – Source : Association négaWatt, 2017.

l'inertie synthétique ou le *power-to-gas* et leurs résultats positifs confirment que le caractère non pilotables de certaines productions ne sont pas un obstacle à l'avènement d'un système électrique « tout renouvelable ».

De même, la question du choix des vecteurs énergétiques qui font le lien entre les ressources primaires et les usages finaux s'avère particulièrement cruciale pour atteindre l'ensemble des objectifs. Trop souvent abordé dans une logique de concurrence issue de l'organisation historiquement verticale de notre système énergétique, il devrait au contraire partir du postulat que la complémentarité entre les vecteurs est l'une des clés de voûte de l'optimisation systémique qu'exige la soutenabilité.

Dans cette optique, l'électrification des usages à laquelle certains poussent avec vigueur trouve toute sa pertinence dans certains cas, comme le chauffage des bâtiments bien isolés par des pompes à chaleur à haute performance. Toutefois, généralisée sans discernement, elle se heurterait à moyen terme à des limites physiques, économiques et géopolitiques liées au fonctionnement du réseau et à ses besoins de renforcement ainsi qu'à la disponibilité de matières critiques pour les batteries (lithium, cobalt...), voire pour les appareils et véhicules électriques eux-mêmes (cuivre, terres rares...).

Ainsi, appliquée aux transports, qui dépendent aujourd'hui à 95 % du pétrole, l'approche systémique esquissée dans cet article conclut que si le vecteur électrique est adapté aux petits trajets urbains effectués au moyen de véhicules légers optimisés, le gaz, dès lors qu'il est renouvelable, constitue, au vu de ses caractéristiques intrinsèques (densité massique, aptitude au stockage, flexibilité d'usage, existence d'infrastructures...), un excellent substitut aux carburants pétroliers pour le transport routier de marchandises et de voyageurs.

Pour autant, le recours incontournable à la biomasse pour la production de chaleur et de gaz renouvelable ne peut s'envisager que dans les limites fixées par les autres fonctions vitales qu'elle remplit, telles que l'alimentation humaine et animale ou la production de matériaux bio-sourcés, mais aussi le maintien de la fertilité des sols et de la biodiversité, toutes deux dangereusement mises à mal par les pratiques agricoles dominantes.

Quelle vision de long terme ?

L'application de cette approche systémique de l'ordre de mérite pointe clairement vers la priorité donnée à la mise

en œuvre d'actions de maîtrise de la demande d'énergie qui conditionnent elles-mêmes la possibilité de répondre à l'ensemble des besoins par un développement à un niveau adéquat des différentes sources d'énergies renouvelables. Même si la vitesse de leur déploiement reste aujourd'hui largement insuffisante, ces solutions complémentaires démontrent d'ores et déjà des capacités de mise en œuvre très supérieures en termes de rythme et de coût à celles d'autres solutions éventuellement disponibles, comme la construction de nouveaux réacteurs nucléaires, et *a fortiori* de solutions encore très incertaines comme les technologies de séquestration du carbone.

Des scénarios de plus en plus nombreux et d'origines variées attestent de la faisabilité de systèmes énergétiques « 100 % renouvelables » à l'échelle de territoires, de pays ou même de la planète tout entière. Ces scénarios retiennent parfois des options très différentes, et certains ne sont pas exempts de questionnements quant à leur degré de soutenabilité du fait d'une optimisation insuffisante du rôle des différents leviers (faiblesse des options de maîtrise de la consommation, absence d'articulation électricité-gaz-biomasse, etc.). Mais ils démontrent globalement que les énergies fossiles et le nucléaire n'ont, dans une perspective de soutenabilité, plus de raison de faire partie du paysage énergétique à l'horizon 2050.

Cette vision est techniquement et économiquement réaliste, mais elle ne pourra se concrétiser que si les décisions politiques s'inscrivent pleinement dans cette orientation. En regard de ces constats, les affirmations répétées sur la prétendue nécessité de s'appuyer encore sur les énergies fossiles et le nucléaire à cet horizon jouent un rôle délétère. Davantage liées à un attachement historique à ces filières et au refus de considérer pleinement le potentiel des nouvelles options qu'à une analyse objective des possibles et à une pleine reconnaissance des impératifs de long terme, elles témoignent de la résistance au changement tout autant qu'elles l'alimentent.

Autrement dit, s'il subsiste des sources non renouvelables dans le mix énergétique de 2050, c'est qu'on les aura gardées pour de mauvaises raisons, certainement pas pour répondre à la nécessité de contribuer à la neutralité carbone et à la soutenabilité qui doivent devenir les fondements de notre système énergétique.