

A S S E M B L É E N A T I O N A L E

1 7 ^e L É G I S L A T U R E

Compte rendu

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

– **Examen** du rapport sur les aspects technologiques de
l'évolution du mix énergétique (*Joël Bruneau, député,*
Patrick Chaize, sénateur, rapporteurs)2

Jeudi 27 novembre 2025
Séance de 9 heures 30

Compte rendu n° 216

SESSION ORDINAIRE DE 2025-2026

**Présidence
de M. Stéphane
Piednoir,
*président***



Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Jeudi 27 novembre 2025

– Présidence de M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office –

La réunion est ouverte à 9 h 40.

Examen du rapport sur les aspects technologiques de l'évolution du mix énergétique (Joël Bruneau, député, Patrick Chaize, sénateur, rapporteurs)

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) examine ce matin un rapport attendu, résultant d'une saisine de la commission des affaires économiques de l'Assemblée nationale, qui s'intitule « Les impacts technologiques de l'évolution du mix énergétique et ses conséquences sur l'outil industriel et les réseaux ».

Les rapporteurs Joël Bruneau et Patrick Chaize vont nous présenter une synthèse de ce rapport de 163 pages, si j'ai bien compté hier.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Patrick Chaize et moi-même sommes très heureux de vous présenter aujourd'hui les conclusions de nos travaux, qui ont commencé en juin dernier, sur les impacts technologiques de l'évolution du mix énergétique.

Comme vous l'avez dit, Monsieur le Président, ce rapport fait suite à une saisine de la commission des affaires économiques de l'Assemblée nationale. Nous avons centré nos investigations sur les problématiques des réseaux ainsi que sur les conséquences touchant à notre outil industriel, en suivant, bien sûr, la démarche habituelle de l'Office, qui consiste à entendre un panel aussi large que possible d'acteurs de ce domaine, soit au total une cinquantaine de personnes.

Plutôt que de résumer notre rapport, nous avons choisi de vous présenter nos recommandations, qui sont au nombre de neuf.

En introduction, je vais évoquer la situation de notre système énergétique, que vous connaissez. La demande d'électricité dans notre pays ne progresse pas au rythme qui était anticipé dans les différents scénarios énergétiques publiés ces dernières années, scénarios qui ont guidé la politique énergétique, en particulier la programmation pluriannuelle de l'énergie. Début décembre, RTE, l'opérateur du réseau de transport métropolitain, également chargé d'assurer au quotidien l'équilibre du réseau électrique et d'évaluer ses perspectives d'évolution, publiera son bilan annuel, qui confirmera cette stagnation.

La consommation d'électricité en 2024 – un peu moins de 450 térawattheures (TWh) –, est revenue à son niveau d'il y a vingt ans, à la fois pour de bonnes et de mauvaises raisons. On peut supposer que RTE révisera à la baisse ses prévisions d'évolution de la consommation dans les années à venir. Cette situation est éminemment problématique, puisque la lutte contre le changement climatique impose de réduire notre dépendance aux importations d'hydrocarbures, avec l'impact économique et financier que cela représente.

Il s'agit de développer le plus vite possible l'électrification des usages, ce qui, évidemment, augmentera la consommation d'électricité. Paradoxalement, au moment même où notre consommation d'électricité stagne, la production, elle, augmente fortement, puisque le parc électronucléaire a retrouvé en quelque sorte un rythme de croisière, même s'il ne revient pas au niveau d'avant 2005, à savoir 430 TWh. Il se situera cette année entre 365 et 375 TWh, un niveau jamais atteint depuis 2019. En parallèle, les énergies renouvelables connaissent une croissance rapide, en particulier le parc solaire photovoltaïque qui augmente au rythme d'environ 5 gigawatts chaque année, soit presque l'équivalent de cinq réacteurs nucléaires. Nous pourrions, bien sûr, nous réjouir de cette abondance, qui nous permet d'ailleurs de réaliser des exportations d'électricité à hauteur de 89 TWh en 2024, en particulier vers l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni. Malheureusement, il faut être conscient du fait qu'elle peut aussi, si cette situation devait perdurer, avoir des conséquences délétères, à la fois pour notre système énergétique, son bon équilibre, et pour les finances de l'État. D'une part, la surproduction d'électricité, en particulier en journée, lorsque le parc photovoltaïque produit beaucoup – c'est la fameuse « courbe en canard », conduit à des périodes de plus en plus longues de prix négatifs. Ces périodes sont assez coûteuses pour nos finances, puisque la collectivité doit continuer – ce qui est d'ailleurs normal – à honorer les contrats qu'elle a passés avec un certain nombre d'opérateurs et de producteurs, selon le principe de la garantie de prix d'achat. D'autre part, cette surproduction impose à notre parc nucléaire une flexibilité de plus en plus marquée afin de garantir l'équilibre du réseau, indispensable à chaque instant, entre la demande et la production d'électricité. Nos réacteurs nucléaires sont effectivement, depuis quarante ans, optimisés pour moduler leur production. C'est d'ailleurs à l'origine une spécificité française, mais l'intensification de ces variations pourrait conduire à des problèmes techniques, par exemple un vieillissement prématuré de certains composants. Ce sont des éléments qui vont devoir être expertisés, comme l'a d'ailleurs annoncé le PDG d'EDF, Bernard Fontana, qui a annoncé récemment qu'une étude sur ce sujet serait finalisée d'ici à la mi-décembre. L'expertise est donc toujours en cours aujourd'hui. Nos premières recommandations ont justement pour objectif de trouver des remèdes efficaces à cette situation, qui n'est pas soutenable.

Bien sûr, ce n'est ni la faute des énergies renouvelables, ni celle de l'énergie nucléaire, mais encore une fois, la conséquence directe de l'insuffisance du rythme d'électrification, et donc de décarbonation de notre économie.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Joël Bruneau a bien résumé notre constat sur la situation actuelle.

Notre première recommandation découle directement de cette présentation : nous considérons que le Gouvernement doit orienter prioritairement la politique énergétique vers l'électrification de la demande pour les raisons qui viennent d'être exposées. Alors que la consommation finale d'électricité stagne, l'offre devient excédentaire du fait des investissements déjà engagés dans les moyens de production bas-carbone. Sans un développement suffisamment rapide de l'électrification des usages, il existe un réel risque que de nouveaux actifs de production soient sous-utilisés, voire deviennent échoués. Concrètement, la puissance injectée par le parc nucléaire ne pourra pas descendre en dessous d'un certain niveau que le Haut-commissaire à l'énergie atomique estime à environ 20 % de sa puissance nominale. Arrêter des réacteurs nucléaires est très pénalisant et ne permet pas de répondre à un regain brutal de demandes non satisfaites, tel qu'il s'en produit chaque jour à la tombée de la nuit. Une fois ce niveau atteint, il deviendrait nécessaire d'interrompre la production d'une partie du parc photovoltaïque pendant des périodes de plus en plus longues.

À cet égard, il faut saluer l'initiative prise par la Commission de régulation de l'énergie (CRE) pour améliorer la flexibilité de la demande. En effet, depuis le début de ce mois de novembre, deux ou trois heures creuses sont déplacées en journée, pour favoriser la consommation dans la période de plus forte production du parc photovoltaïque.

Notre deuxième recommandation va aussi dans le sens de la flexibilité. Le Gouvernement et la CRE doivent étudier les mécanismes de marché permettant la montée en puissance des capacités de stockage nécessaires à l'équilibre du système électrique. En priorité, les projets de stations de transfert d'énergie par pompage, ou STEP, essentiels pour renforcer la flexibilité du système électrique, doivent être relancés à la suite du récent accord avec la Commission européenne sur le régime des concessions hydroélectriques. Les systèmes de stockage par batterie ont aussi un rôle important à jouer, notamment pour les besoins de court terme.

Notre troisième recommandation est que RTE, sur un plan technique, la CRE et le Gouvernement, dans le cadre global de la politique énergétique, étudient la possibilité de faire contribuer les producteurs d'électricité non pilotables à l'équilibrage du réseau, *via* la flexibilité, le stockage ou l'effacement.

Une mesure similaire commence à être mise en œuvre outre-Rhin, non au détriment des producteurs, mais au contraire à leur bénéfice. Une dégradation du fonctionnement du réseau électrique n'est évidemment dans l'intérêt de personne ; une telle mesure devrait bien entendu être équitable et prévoir de justes compensations.

Notre quatrième recommandation porte sur les enseignements à tirer du *blackout* survenu au mois d'avril dans la péninsule ibérique. Depuis la note scientifique de nos collègues Jean-Luc Fugit et Daniel Salmon sur les réseaux électriques, l'ENTSO-E, le réseau européen des gestionnaires de réseaux de transport d'électricité, a publié un rapport provisoire non conclusif. Son rapport définitif est attendu au premier trimestre 2026, presque un an après les événements. Une fois que ce document sera publié, nous invitons RTE et le Gouvernement à tirer tous les enseignements de ce *blackout* et à en tenir compte dans la définition de la stratégie du gestionnaire de réseau et dans celle de la politique énergétique nationale.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Après ces premières recommandations, destinées à résoudre le déséquilibre actuel entre la consommation et la production d'électricité, j'en viens à deux recommandations qui concernent le sujet central de la décarbonation de nos industries. Comme vous le savez, notre économie a connu depuis les années 1980 une désindustrialisation profonde. Même si son poids a diminué, l'industrie représente pourtant encore une part majeure de nos besoins énergétiques : environ 20 % de la consommation finale d'énergie et 18 % des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc indispensable que notre industrie s'engage pleinement dans la décarbonation, comme le prévoit d'ailleurs la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC).

Certaines filières ont déjà largement électrifié leurs procédés, par exemple les industries électro-intensives, comme la production d'aluminium par électrolyse. Ces entreprises, qui sont pour la plupart fortement exposées à la concurrence internationale, dépendent de façon critique du prix de l'électricité. D'autres filières, en revanche, restent très dépendantes des combustibles fossiles, avec en toile de fond des prévisions de prix assez basses pour ces produits.

L'exemple des fours verriers illustre bien ce défi : pour fondre le sable siliceux, ils doivent atteindre des températures de l'ordre de 1 500 degrés. Ces fours sont conçus pour fonctionner de manière continue pendant dix ou quinze ans – c'est-à-dire qu'ils ne sont jamais arrêtés, sans possibilité de modification majeure une fois allumés. Leur durée de vie impose donc des cycles de renouvellement longs qui conditionnent tout changement technologique. Aujourd'hui, les procédés utilisés reposent principalement sur le gaz naturel. Nous pourrions considérer que le biogaz serait à même de constituer une solution transitoire, mais nous savons que les volumes produits aujourd'hui sont très insuffisants. Les industriels du verre s'orientent donc vers une électrification partielle ou totale des fours, au fur et à mesure de leur renouvellement.

Les premiers projets émergent, mais ils font face, d'une part, à des contraintes techniques – des durées de renouvellement incompressibles, comme je le disais –, d'autre part, à la nécessité d'un retour d'expérience. Nous n'avons pas encore une vision complète de l'utilisation durable de ces fours électriques. Ce constat, illustré par l'exemple des fours verriers, vaut pour de nombreuses industries qui doivent abandonner les énergies fossiles, même si elles sont compétitives sur le plan purement économique. L'électrification, qui permettrait de remplacer ces énergies fossiles, rencontre encore un certain nombre d'obstacles technologiques : l'industrialisation des prototypes est complexe et les cycles de vie des machines sont longs.

Les investissements très lourds, sans rentabilité immédiate sur le plan financier – je ne parle pas du plan environnemental – pèsent fortement sur la compétitivité de ces entreprises. En contrepartie, celles-ci ont besoin d'une garantie forte : pouvoir compter sur un approvisionnement électrique durable, stable, abondant et compétitif sur le long terme. C'est le sens de notre cinquième recommandation : créer les conditions permettant à l'industrie française de se décarboner sans perdre en compétitivité. Cela suppose un cadre contractuel durable entre l'État, EDF et les filières industrielles, ainsi qu'un soutien public aux technologies bas-carbone. Pour les besoins de chaleur industrielle autour de 600 à 800 degrés, l'électrification, là aussi, reste difficile sur le plan technique. Une promesse existe avec les réacteurs modulaires, les fameux SMR, *Small Modular Reactors*, et AMR, *Advanced Modular Reactors*, qui pourraient devenir une source de chaleur décarbonée adaptée grâce à leur implantation décentralisée et à leur flexibilité. Pour autant, les projets en cours restent encore incertains, même s'ils montrent un certain potentiel. Notre sixième recommandation propose donc d'intégrer ce potentiel dans la programmation énergétique, d'identifier les projets les plus prometteurs et de faciliter leur développement, notamment par un soutien du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Notre recommandation suivante touche aussi à l'industrie, puisqu'elle concerne la maîtrise, au niveau national ou européen, des approvisionnements critiques pour le système énergétique, que ce soit en équipements ou en matières premières, comme bien sûr les fameuses terres rares et les métaux stratégiques. En effet, la transition dépend de ces équipements, par exemple les onduleurs, qui sont absolument indispensables à la fiabilité du réseau. Or, ces onduleurs sont pour la plupart chinois ou dépendent de ressources sensibles comme les terres rares, là aussi souvent venues de Chine, alors même qu'il y avait une usine à La Rochelle – je crois qu'elle faisait partie du groupe Solvay – qui est restée longtemps le premier producteur mondial en matière de raffinage de ces terres rares. Renforcer l'autonomie industrielle, nationale ou européenne, sur ces maillons critiques, y compris pour l'accès aux matières premières, est indispensable si nous voulons protéger notre système énergétique,

avec la volonté de l'électrifier le plus possible, des tensions géopolitiques, des ruptures de chaînes d'approvisionnement et des hausses de coûts.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Nos deux dernières recommandations concernent directement le pilotage de la politique énergétique.

La première porte sur la visibilité indispensable sur l'évolution du parc nucléaire actuel, qui va devenir de plus en plus critique avec le vieillissement des centrales. Il nous semble qu'EDF et le Gouvernement doivent faire l'effort de présenter une stratégie d'exploitation et de prolongation du parc fondée sur une durée de vie des centrales structurée par tranches de vingt ans. En effet, l'échéance de dix ans, qui est celle des réexamens décennaux de sûreté menés par l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection, est insuffisante pour optimiser les investissements à répartir entre la prolongation du parc actuel et la mise en place d'autres moyens de production décarbonée et, en définitive, pour assurer une stabilité de production compatible avec les objectifs climatiques et industriels de la France. L'énergie est le domaine du temps long et les évolutions majeures nécessitent en général un demi-siècle plutôt que dix ans.

Notre dernière recommandation rejoint une préoccupation commune à beaucoup d'entre nous : le suivi de la politique énergétique. Comme je viens de le rappeler, cette politique porte sur le temps long, avec des projets tels que l'éolien en mer ou le renouvellement du parc nucléaire. Elle fait aussi face à la rapidité des évolutions géopolitiques et technologiques, qui imposent une réévaluation plus régulière des trajectoires énergétiques et de décarbonation. Nous estimons qu'un rendez-vous parlementaire annuel est la seule façon de garantir un réel contrôle démocratique de ce sujet stratégique et une meilleure cohérence des politiques menées.

Après cette présentation que nous avons voulue courte, nous sommes évidemment à votre disposition pour répondre à vos questions.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Merci pour cette présentation effectivement assez courte, qui nous laisse le temps pour des échanges.

Mme Florence Lassarade, sénatrice, vice-présidente de l'Office. – Je remercie nos deux rapporteurs pour ces recommandations simples, faciles à lire et à comprendre pour tous. Il est vrai que la pédagogie vis-à-vis de nos concitoyens serait certainement beaucoup plus efficace si des personnes comme vous pouvaient expliquer les choses.

J'ai une question simple. Nous produisons trop d'électricité. Des câbles qui devraient nous connecter à l'Espagne se font toujours attendre. C'est le cas depuis que je suis parlementaire. On parle toujours de ce câble qui traverserait le gouf de Capbreton pour arriver à Santander. Le projet a connu de nombreux échecs. Avez-vous du nouveau à ce sujet ? Comment peut-on enrichir la France en vendant de l'électricité ?

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – La construction d'ouvrages, notamment de transport, s'inscrit dans le temps long, tout comme la construction des unités de production. Pour ce faire, il faut anticiper et avoir une stratégie. Cette stratégie dépend des capacités de production et de la volonté de partager cette production avec les autres pays.

Concernant l'Espagne, le retour sur le blackout du printemps dernier devrait – nous l'espérons en tout cas – mettre l'accent sur certains points de fragilité de nos réseaux et

permettre, là aussi, de faciliter l'acceptabilité d'ouvrages qui créeront ces liens avec les autres pays.

Enfin, nous connaissons, au travers de l'actualité, la difficulté de construire un ouvrage, quel qu'il soit : électrique, ferroviaire ou routier.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – La grande vertu de notre système est l'interconnexion entre pays, qui nous a été particulièrement précieuse durant la crise énergétique. Elle nous a permis de traverser à la fois la crise de la corrosion sous contrainte de notre parc nucléaire et la réduction des livraisons de gaz russe, après l'entrée en guerre de la Russie contre l'Ukraine. Ces systèmes d'interconnexion sont donc, effectivement, à préserver.

Cela m'amène à mon deuxième point sur l'exportation d'électricité : ces interconnexions font qu'à certains moments, nous sommes globalement très excédentaires. Je parlais tout à l'heure de cette fameuse cloche de production en milieu de journée, avec une production photovoltaïque très importante dans des pays comme l'Espagne ou l'Allemagne, par exemple. Il est évidemment intéressant d'exporter de l'électricité quand les prix sont élevés, notamment la nuit, en période de froid et en l'absence de vent. Dans ce cas, notre électricité nucléaire a d'autant plus de valeur pour nos voisins.

En revanche, pour que le solde soit positif, il faut éviter de multiplier les périodes de prix négatif, durant lesquelles nous sommes obligés, conformément aux contrats de long terme conclus avec les producteurs d'électricité – ce qui est parfaitement légitime – de compenser les pertes de revenus causées par ces prix négatifs.

Retenons une idée essentielle – vous parliez de pédagogie et de capacité de compréhension pour tout citoyen, et je parle en tant que non spécialiste, ayant arrêté les sciences en première : si j'ai compris, c'est donc que tout le monde peut comprendre. Le point clef pour la fiabilité de notre système est, me semble-t-il, l'équilibre entre les périodes de forte production et la consommation, car les conséquences d'un déséquilibre pourraient être extrêmement préjudiciables pour la fiabilité du réseau.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office. – Je souhaite formuler quelques remarques et poser quelques questions sur ce rapport, particulièrement intéressant et très riche, dont je remercie mes collègues.

Pour réagir à ce que disait notre collègue à l'instant sur la production d'électricité, il faut se souvenir qu'en 2024, nous avons exporté 89 TWh d'électricité. Certains y voyaient un inconvénient puisque, dans ce cas, la demande nationale était inférieure à l'offre.

Je ferai tout de même remarquer que nous n'étions pas dans cette situation il y a trois ans. Au contraire, nous avons eu un double problème en 2022, à la fois avec les centrales nucléaires, en difficulté en raison de la corrosion sous contrainte, et avec une sécheresse qui a limité la production des barrages hydroélectriques. Par conséquent, nous étions en déficit et nous étions alors bien contents de disposer des interconnexions. En 2024, cela a fonctionné dans l'autre sens.

Lorsque l'on exporte 89 TWh, on pourrait se dire que l'offre est supérieure à la demande et que c'est peut-être une difficulté. Pour ma part, je le vois aussi comme une chance. Pourquoi ? Parce que nous avons vendu ces 89 TWh, ce qui a rapporté 5 milliards

d'euros. De plus, ces 89 TWh étaient à plus de 95 % décarbonés ; nous avons donc aidé les pays voisins à se décarboner. Il faut aussi regarder le côté positif des choses. Je le dis parce que, parfois, dans le débat public, j'entends des choses qui me gênent un peu.

La production électrique est souvent confondue avec la consommation énergétique de ce pays. Celle-ci s'élevait à 1 503 TWh au total en 2023, dont 60 % issus de combustibles fossiles. Par conséquent, lorsque l'on parle de l'électricité, on ne parle que de 40 % du total.

En France, nous avons la chance – c'est une chance et une fierté, à mon sens – de produire ces 40 % d'électricité à plus de 95 % de manière décarbonée, avec un ratio de deux tiers de nucléaire pour un tiers d'énergies renouvelables. Il est important de l'avoir à l'esprit.

Autre remarque – qui n'est pas une critique. Un mot me gêne toujours : on associe systématiquement aux énergies renouvelables le mot « intermittent ». Je ne suis ni un « pro-renouvelables », ni un « pro-nucléaire », mais un partisan de la sortie progressive des énergies fossiles. On ne peut pas me taxer d'être antinucléaire, puisque j'ai été, avec notre président, co-auteur d'un rapport sur la sûreté nucléaire et aussi rapporteur d'une loi sur la sûreté nucléaire, qui a fait couler beaucoup d'encre, adoptée à une voix près à l'Assemblée nationale. Je peux donc dire que cela n'a pas été simple. Parfois, comme aux tirs au but, on finit par l'emporter.

Plus sérieusement, utiliser l'adjectif « intermittent » pour qualifier les énergies renouvelables leur donne une connotation inutilement négative. Si l'on regarde les technologies actuelles et tout le travail réalisé, notamment par RTE, on devrait plutôt parler de « variabilité ». Pourquoi ? Parce que la variabilité permet la prévisibilité. Aujourd'hui, la météo agricole – je suis fils de paysan – me dit à une heure près ce qui va se passer chez moi. Et cela fonctionne, tant pour la pluie que pour le vent et le soleil. Cette capacité de prévision est totalement intégrée, notamment par RTE ; il suffit d'aller au centre opérationnel situé au nord de Paris pour s'en convaincre.

Par conséquent, j'estime que lorsque l'on accole le mot « intermittent » aux énergies renouvelables, cela a une connotation un peu négative, alors que la variabilité, couplée à des outils avancés, y compris l'intelligence artificielle, n'empêche pas de déterminer à une heure près les quantités de vent, de soleil, *etc.*, donc d'avoir une prévisibilité de la production.

Après ces remarques, j'en viens à quelques questions sur vos recommandations et votre présentation. Elles n'ont peut-être pas toutes la même importance et je vous les livre un peu dans le désordre.

Si nous continuons à développer le photovoltaïque, notamment en lançant des appels d'offres, quelle sera la prochaine étape ? C'est une interrogation que j'avais déjà en préparant mon rapport sur le budget de l'énergie à l'Assemblée nationale, en tant que rapporteur de la commission des affaires économiques. Je me la pose également en tant que président du Conseil supérieur de l'énergie, où siègent d'ailleurs trois collègues sénateurs et trois députés

Ne faudrait-il pas à l'avenir conditionner tout soutien public au photovoltaïque au développement simultané de capacités de stockage ? Autrement dit, ne devrions-nous pas arrêter de développer le photovoltaïque seul, sans le coupler systématiquement à des solutions de stockage ? Il me semble que c'est un peu l'idée que vous défendez, mais je souhaiterais avoir quelques précisions à ce sujet.

À la lecture de votre cinquième recommandation, je me suis demandé si les contrats à long terme que vous évoquez ne pourraient pas également concerner certaines installations photovoltaïques ou, en tout cas, d'autres énergies renouvelables. Ces contrats de longue durée, appelés PPA (*Power Purchase Agreement*) dans le jargon anglais, peuvent-ils, d'après vous, être envisagés pour les énergies renouvelables ? Permettraient-ils un partage des risques avec les industriels ? Il y a peut-être une piste à creuser.

Votre septième recommandation porte sur l'autonomie stratégique pour la production et l'accès aux équipements critiques du système énergétique. Je m'interroge sur l'avancée des *gigafactories* que nous sommes en train de mettre en place pour la production de panneaux photovoltaïques en France, notamment les projets de Carbon ou Holosolis. Estimez-vous que nous avons une maîtrise suffisante ? Avons-nous, d'après vous, assez investi sur le sujet ?

Concernant la neuvième recommandation, sur le débat annuel au Parlement, l'Assemblée nationale a tenu un débat le 28 avril dernier – je crois que vous l'avez eu début mai au Sénat – à l'initiative de l'ancien Premier ministre, M. François Bayrou. Est-ce à ce type de débat que vous faites référence, ou s'agit-il d'un débat un peu plus approfondi, avec éventuellement un vote annuel sur des orientations, ce qui pourrait être problématique ? J'aimerais connaître la nature du débat que vous imaginez.

J'ai également une question sur l'hydrogène. Pour vous, reste-t-il un vecteur énergétique d'avenir ? Aujourd'hui, nous nous interrogeons beaucoup.

Que pensez-vous de l'adoption d'une dixième recommandation consistant à solliciter la publication de la troisième programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE3). En effet, il est urgent, de mon point de vue, de tourner la page de la PPE actuelle. Or, on ne peut tourner la page de la PPE2 qu'en publiant la PPE3. Dans la saisine de la commission des affaires économiques de l'Assemblée nationale, la question était un peu sous-jacente.

Enfin, estimez-vous qu'en matière de recherche sur l'énergie, l'État fait ce qu'il faut, ou faut-il aujourd'hui accompagner plus et mieux la recherche, en incluant le sujet des réseaux, sur lequel j'avais travaillé avec Daniel Salmon ?

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – En réponse à ces « quelques » questions, comme l'a dit Jean-Luc Fugit, je laisse la parole aux rapporteurs.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Je ne suis pas surpris que Jean-Luc Fugit ait des remarques à formuler. C'est notre expert à l'Assemblée nationale.

Je commencerai par la suggestion d'ajouter la publication de la PPE3 comme dixième recommandation. Il faut effectivement une nouvelle PPE. Mais, d'une certaine manière, c'est sous-jacent à notre première recommandation, qui appelle à prendre en compte la réalité de la situation actuelle. L'argent public devrait désormais être prioritairement orienté vers l'incitation et l'accélération de la décarbonation de notre économie. C'est à la fois un enjeu environnemental et un enjeu d'indépendance nationale, puisque nous dépendons encore à hauteur de 60 % des énergies fossiles importées.

Il ne s'agit en aucun cas d'opposer les différents modes de production d'électricité, mais simplement de prendre en compte les avantages et les inconvénients propres à chacun. La programmation pluriannuelle de l'énergie, et cela rejoint le sujet du débat annuel, n'a pas pour objet de redéfinir chaque année les grands objectifs. Elle peut être aussi un moment de

partage d'informations : où en sommes-nous ? Comment les choses ont-elles évolué ? Comment le contexte international a-t-il changé ? Notre collègue évoquait tout à l'heure l'enjeu de la pédagogie : un tel débat est aussi un moyen d'éclairer le grand public, d'autant que des événements extérieurs, souvent imprévisibles lors du lancement d'un programme, peuvent survenir. Les exemples récents, comme la guerre en Ukraine, en sont une parfaite illustration.

Clairement, la recommandation concernant le photovoltaïque est d'associer à tout projet d'installation des engagements en matière de stockage. L'idée est que ce soit l'opérateur qui prenne en charge le stockage, plutôt que de transférer la gestion de la variabilité aux seuls gestionnaires de réseau. On sait aujourd'hui qu'un parc photovoltaïque peut produire de l'électricité à un coût relativement faible, mais cela ne tient pas compte du fait que, parallèlement à cette production, par nature variable, il est nécessaire de déployer un certain nombre d'équipements pour en gérer les fluctuations. Il est logique que celui qui produit la variabilité assume au moins en partie ses conséquences. Effectivement, la réflexion progresse chez nos voisins : d'après les auditions que nous avons menées, l'Allemagne travaille activement sur cette question.

Les contrats de long terme passés avec les industriels sont une piste intéressante. Il faudrait sans doute associer une production d'énergie à un usage spécifique, pour un industriel donné, avec un prix garanti sur le long terme. Ce serait probablement une bonne solution, en tenant compte du fait que certains secteurs ont besoin d'une grande quantité d'énergie. C'est notamment pour ces usages que se fondent les espoirs placés dans les SMR, qui offriraient la capacité de répondre à une demande précise.

Sur les équipements, notre recommandation porte surtout sur la question de l'indépendance. Vous évoquez les *gigafactories*, mais quels que soient les modes ou les niveaux de consommation, il est essentiel de réduire notre dépendance pour un certain nombre d'équipements, notamment ceux qui contribuent à la fiabilité du réseau, vis-à-vis de technologies que nous ne produisons pas aujourd'hui en France ou en Europe, mais qui sont massivement développées en Chine.

Ce que nous avons entendu en audition sur les *gigafactories* est éclairant. Vous mentionnez les *gigafactories* pour l'industrie, mais la même logique vaut pour les grands centres de données, les *data centers*. Aujourd'hui, la multiplication des centres de données tire la consommation électrique aux États-Unis, mais la situation est différente en France. À Marseille, où plusieurs *data centers* se sont implantés, la consommation d'électricité n'est pas au rendez-vous. Les exploitants étaient partis sur des hypothèses beaucoup plus élevées. Il existe donc un temps de latence entre le moment où les projets sont lancés et la montée effective de la consommation.

Enfin, sur l'hydrogène, toutes les personnes que nous avons entendues en audition en soulignent les limites dans l'état actuel des technologies et insistent sur la nécessité de poursuivre des efforts de recherche importants.

L'hydrogène peut effectivement jouer un rôle en matière de stockage, notamment en tirant parti des périodes où les prix de l'électricité sont bas. Mais cela suppose de faire de grands progrès en matière d'électrolyseurs. Je pensais qu'un électrolyseur pouvait être arrêté quand l'électricité devient chère, puis relancé ensuite. J'ai découvert qu'il n'en est rien. C'est ce que souligne notamment l'Académie des sciences. Nous avons donc effectivement des efforts de recherche à accomplir sur ces technologies. Sans doute – et cela rejoint les débats

que nous avons sur notre propre budget – ces recherches gagneraient-elles à être menées également au niveau européen, pour mutualiser les coûts.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Je voudrais revenir sur la question du débat annuel. La justification principale de ce débat est que l'énergie est un sujet stratégique qui doit faire l'objet d'un suivi attentif, notamment par le Parlement, afin de disposer d'une mise à jour régulière permettant de rester au plus près de la réalité. Nous le voyons bien : nous sommes sur des temporalités longues, mais dans un secteur où les technologies et les besoins évoluent rapidement.

Ce que disait Joël Bruneau sur les centres de données est assez révélateur : lorsqu'un investisseur évalue les besoins énergétiques d'un projet, ceux-ci sont presque toujours très supérieurs à la consommation réelle. Cela tient peut-être au manque de recul, à une volonté de prudence ou au souci de sécuriser l'alimentation électrique des serveurs en toutes circonstances. Dans les faits, cela s'explique aussi par la montée en charge progressive de ces infrastructures : les salles de serveurs ne sont jamais entièrement remplies dès le premier jour. Il existe donc un décalage significatif entre les besoins exprimés et les besoins réels, d'où la nécessité, dans une vision globale, d'assurer un suivi régulier.

Sur la question de l'hydrogène, la véritable difficulté réside dans la capacité à disposer du bon outil pour produire de l'hydrogène vert. L'idée, j'entends bien, est de pouvoir l'utiliser pour le stockage. Ceci rejoint notre recommandation : chaque fois que l'on développe une capacité de production, notamment dans le domaine des énergies renouvelables, il faut penser aux dispositifs permettant d'assurer l'équilibre ou la continuité de production. L'objectif est d'éviter que l'équilibrage des réseaux repose, *in fine*, exclusivement sur le gestionnaire du réseau de transport d'électricité.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Lorsque l'on parle de « *gigafactory* », on pense, par exemple, aux grandes usines de batteries automobiles, qui seront sans doute d'importantes consommatrices d'électricité. Il existe aussi des projets importants dans la production de panneaux solaires.

Nous ne l'avons pas exprimé sous forme de recommandation, mais il est ressorti des auditions que, si nous voulons développer à nouveau une véritable filière solaire à l'échelle européenne, il va falloir trouver des mécanismes permettant, au moins pendant un certain temps, d'instaurer une forme de préférence communautaire. Sans cela, il sera très difficile pour ces entreprises d'émerger. Compte tenu du poids des investissements nécessaires pour lancer de telles productions, un acteur qui a déjà amorti son usine en Chine pourra toujours produire à moindre coût. Sans système de protection motivé par des considérations purement stratégiques, nous n'y parviendrons pas.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office. – Si je puis me permettre, Monsieur le Président, un tel dispositif existe avec la TVA à 5,5 % appliquée aux panneaux produits en France depuis le 1^{er} octobre. C'est une décision prise en début d'année. Cette mesure concerne la partie équipement, mais pas la partie travaux. C'est, en tout cas, une manière d'encourager la production nationale.

Mme Martine Berthet, sénatrice. – Je remercie les deux rapporteurs pour le travail accompli. Il était important de mener cette mission, surtout en direction de nos industriels, car l'impact pour eux est majeur, en particulier pour les industriels hyper-électro-intensifs. Il me

semblait que, jusque-là, peu de monde s'en souciait. Vos propositions sont donc très intéressantes.

De même, je salue la mise en avant de ce qui constitue l'un de nos atouts majeurs : l'importante production française d'énergie décarbonée. C'est un atout pour peser en Europe, et nous en voyons déjà les premières conséquences avec l'accord permettant de faire évoluer le régime des concessions hydroélectriques vers un système d'autorisation. Le rappeler noir sur blanc est une bonne chose, je vous en remercie.

Vous pointez également la question de la souveraineté en matière de terres rares. C'est un sujet dont je n'avais pas pleinement conscience. Bien sûr, je pensais aux terres rares sous l'angle de nos industries et de nos productions, mais beaucoup moins sous celui de leur rôle dans le fonctionnement de notre système électrique, en particulier pour les équipements indispensables au bon fonctionnement des réseaux, comme les onduleurs. Vous avez raison d'en souligner l'importance primordiale. Cette souveraineté sur les terres rares est d'autant plus difficile à garantir que les négociations avec la Chine, qui contrôle une partie écrasante des terres rares de la planète, compliquent l'application de clauses de sauvegarde dans d'autres domaines, comme le ferrosilicium, le manganèse ou les mesures d'antidumping sur le silicium. Le fait que la Chine restreigne ses ventes montre bien notre dépendance et accroît la difficulté des négociations visant à protéger certains secteurs. Vous faites donc bien de pointer également ce sujet.

Concernant le stockage des énergies renouvelables, vous mentionnez surtout les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Existe-t-il, selon vous, d'autres solutions ? On parlait, si je me souviens bien, de batteries au sodium. Avez-vous examiné les autres options possibles ? Dans quel délai EDF pourrait-elle mettre en œuvre de nouvelles STEP ? Faut-il vraiment attendre la mise en place des nouveaux régimes d'autorisation, ou cela peut-il être mis en œuvre dès maintenant ? En somme, quels sont les délais réalistes ?

Je voudrais revenir sur le mécanisme européen d'effacement et de capacité. Des entreprises qui pratiquent l'effacement m'ont alertée sur le fait que ce régime de capacité n'était négocié au niveau européen que pour une année encore et qu'il fallait commencer de nouvelles négociations pour le prolonger. Est-ce également un point que vous avez identifié et qui vous a été signalé lors de vos auditions ?

Je souhaiterais revenir sur cette électrification prioritaire que vous avez pointée pour les industries. Vous avez évoqué les contrats de long terme qui sont négociés actuellement, qui progressent. C'est très positif de l'avoir mentionné. Pour les industriels qui utilisent du gaz naturel, un basculement vers l'hydrogène peut-il être opéré sur certains procédés, ou bien l'hydrogène est-il utilisé sur des procédés différents ?

Vous mettez en avant le fait qu'il faut consommer toute l'électricité que nous produisons et que nos industries doivent donc s'orienter vers une plus forte consommation électrique. Or, la production d'hydrogène nécessitant une grande consommation d'électricité – ce sont des procédés hyper-électro-intensifs –, peut-elle constituer un levier de basculement ?

Quand vous mentionnez les SMR et les AMR, envisagez-vous qu'ils puissent être installés sur certains grands sites industriels pour assurer une production locale d'électricité, en complément des capacités existantes ?

Enfin, une dernière remarque : le débat parlementaire annuel est effectivement indispensable, car nous voyons bien que la situation évolue assez vite, dans un contexte géopolitique où les lignes bougent en permanence.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Je vous remercie d’aborder la question du ferrosilicium, qui est un sujet d’actualité pour notre territoire et qui est nécessaire pour la production des panneaux photovoltaïques. Si rien n’est fait rapidement, nous savons qu’à court terme, nous ne pourrions plus produire de panneaux photovoltaïques sur le territoire national : la Chine, qui pratique aujourd’hui un dumping assez fort, capterait alors l’ensemble du marché. Concrètement, sur chaque tonne produite en France, nous perdons 500 euros par rapport au coût de production. L’activité est donc mise à mal. Des démarches sont aujourd’hui engagées au plan politique pour essayer de rétablir une situation plus normale, mais ce dossier illustre tous ces phénomènes qui nous placent, à terme, sous dépendance ou qui, en tout cas, nous font prendre un risque stratégique.

Sur la question du stockage par STEP ou par batterie, ce qui ressort de nos travaux, c’est qu’aujourd’hui les STEP fonctionnent. C’est une technologie éprouvée, opérationnelle, y compris sur votre territoire, et qui répond efficacement aux besoins de stockage.

Pour les batteries, nous sommes encore à un stade de recherche ou d’ajustement : il s’agit de trouver la solution qui permettra d’atteindre une performance optimale. Sur le papier, la batterie apparaît presque comme une évidence ; dans la réalité, il y a encore un peu de travail à accomplir.

EDF suit évidemment ces opérations, mais ne nous a pas dit avoir engagé d’investissements lourds sur ces solutions de stockage, y compris sur les STEP. En effet, des incertitudes juridiques existent et, évidemment, lorsqu’on se trouve dans une telle situation, il est compliqué d’avancer.

S’agissant de passer du gaz naturel à l’hydrogène, je comprends que leurs conditions d’usage ne sont pas tout à fait équivalentes. Lorsque l’on utilise le gaz naturel, c’est souvent pour de la chaleur, avec de grandes capacités ; basculer vers l’hydrogène est quelque chose de très complexe. On ne peut pas remplacer une source d’énergie par une autre sans conséquence. Cela nécessite une remise à plat, notamment des processus, qui peut être réalisée dans certains cas, mais pas de manière universelle.

S’agissant des SMR, nous avons rencontré plusieurs *start-up* pour évaluer leurs propositions. Ce que j’en retiens, c’est que les SMR ont aujourd’hui pour cible – ou « devraient avoir pour cible », mais je ne sais pas comment Joël Bruneau l’a perçu – prioritaire la décarbonation de la chaleur industrielle plus que la production d’électricité. Leur efficacité apparaît réelle, avec une mise en œuvre plus facile et délocalisée. D’ailleurs, nous avons rencontré une *start-up*, Calogena, qui développe aujourd’hui un prototype qui pourrait remplacer une chaudière de chauffage urbain. Elle pourrait, par exemple, être installée en périphérie de zone urbanisée pour apporter de la chaleur et remplacer d’autres types de chaufferies. C’est, en France, le projet le plus avancé que nous avons identifié.

D’autres *start-up* proposent des solutions mixtes, associant production décentralisée d’électricité et de chaleur. L’intérêt est évident : éviter les impacts sur les réseaux que nous évoquions tout à l’heure, notamment les réseaux de transport, puisque l’on installe la source de production au plus près du besoin. Cela comporte néanmoins quelques inconvénients,

notamment en termes de résilience et de solution de secours : si le moyen de production subit une panne, l'industriel n'a pas forcément la possibilité de poursuivre son activité.

Ce sont des solutions qui aujourd'hui progressent. C'est pourquoi, je reviens au débat annuel. On voit que les choses peuvent avancer assez vite. En six mois ou un an, on franchit des étapes. Il serait important de pouvoir partager et intégrer ces réflexions dans une vision stratégique d'ensemble.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Nos interlocuteurs ont bien insisté sur le fait que les SMR étaient particulièrement pertinents pour la production de chaleur.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Et il s'agit bien d'un besoin de décarbonation.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Toutefois, pour des raisons d'acceptabilité, il sera sans doute plus simple d'installer un SMR à proximité d'une industrie quelque peu éloignée des habitations que de remplacer telle ou telle chaufferie urbaine au cœur d'un quartier. C'est un sujet, il faut en être conscient.

L'utilisation de l'hydrogène comme moyen pour stocker l'électricité est quelque peu utopique dans l'état actuel des connaissances. Il y a aussi un enjeu de taux de conversion. L'ordre de grandeur est le suivant : vous consommez 100 d'électricité pour produire l'hydrogène et, avec celui-ci, vous obtenez environ 70 en énergie ; le rapport n'est donc pas exceptionnel.

Pour ce qui concerne l'utilisation directe de l'hydrogène, c'est-à-dire le remplacement de l'hydrogène gris utilisé par de nombreuses industries, notamment pétrochimiques ou chimiques, par de l'hydrogène vert, l'enjeu reste celui du coût : aujourd'hui il est quatre fois plus cher. Ce rapport de un à quatre limite les possibilités de bascule pour des industries soumises à une forte pression concurrentielle.

Cela renvoie aussi à ce que nous indiquait le spécialiste de l'hydrogène de l'Académie des sciences, qui se montrait assez optimiste : une dizaine d'années de recherche, permettraient d'atteindre cet objectif. Pour le moment, nous n'y sommes pas. On rejoint ici la question de la recherche soulevée précédemment par Jean-Luc Fugit.

Concernant l'électrification et la décarbonation de l'économie, nous avons beaucoup parlé des grandes industries, qu'elles soient électro-intensives ou très consommatrices d'énergie fossile. Il ne faut jamais oublier que la part des particuliers n'est pas négligeable. Deux leviers apparaissent clairement pour accélérer le passage des énergies fossiles à l'électricité : le transport, avec l'électrification du parc automobile qu'il faudra sans doute renforcer, et les modes de chauffage individuels. Aujourd'hui, soyons honnêtes : compte tenu du prix de l'électricité, du prix du gaz et du coût de remplacement d'une chaudière par une pompe à chaleur, sur le strict plan économique, très peu franchissent le pas. Il y a des saints, mais c'est assez rare.

Il faudrait sans doute augmenter les incitations à la conversion vers l'électricité des usages fondés sur l'énergie fossile. On a pu lire à une certaine époque qu'en période excédentaire, les batteries de voiture réparties sur tout le territoire serviraient de moyen de stockage. C'était la théorie de Jeremy Rifkin, avec sa vision des *smart grids* et d'un système automatisé dans lequel chacun serait à la fois producteur et consommateur.

Les spécialistes nous expliquent que c'est un peu utopique : compter sur les batteries des voitures pour stocker massivement l'électricité est très illusoire et pas du tout à la hauteur du sujet. En revanche, avec de vraies unités de stockage, dotées de batteries spécialisées, un stockage massif est envisageable. Ces technologies sont déjà relativement au point, avec une limite : elles ne permettent que le stockage à court terme. Le court terme peut toutefois représenter une journée, ce qui peut suffire à passer le cap de la pointe de production, notamment photovoltaïque, et disposer d'électricité, comme je l'ai dit tout à l'heure, quand il fait nuit, qu'il fait froid et qu'il n'y a pas de vent. Pour cela, les batteries telles qu'elles existent aujourd'hui suffisent. Il y a donc effectivement plusieurs solutions, sachant que le stockage le plus massif reste celui des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), puisque l'équivalent en puissance, d'après EDF, est de 4 à 5 gigawatts, soit l'équivalent de quatre à cinq tranches nucléaires, dès lors que l'on aura levé l'obstacle juridique européen.

M. Daniel Salmon, sénateur. – Ce rapport apporte un nouvel éclairage. Nous avons tous besoin de pédagogie et de connaissances pour éviter la désinformation. Je suis toujours sidéré par le fait que nos concitoyens sont devenus des citoyens « hors sol » en matière d'énergie, ignorant même les unités les plus simples, que ce soit une unité de puissance, le kilowatt, ou une unité de quantité d'énergie, le kilowattheure. L'on s'aperçoit que même dans des articles de journaux qui sont, paraît-il, éclairés, ces unités sont facilement confondues. Il existe donc un réel besoin de se réapproprier la question de l'énergie.

Une fois cela dit, nous n'avons pas réglé l'affaire. Il est certain qu'au niveau du citoyen comme des parlementaires, il faut vraiment se réapproprier ces notions. Nous avons sans doute tendance à nous focaliser sur l'instant *t*. Or, quand on regarde l'historique, les fluctuations ont été très importantes au cours des dernières années. Aujourd'hui, nous en sommes à nous demander comment nous allons faire pour éviter cette surproduction à midi. Il y a trois ans, nous étions complètement à l'agonie, car deux événements importants et imprévus étaient survenus : la corrosion sous contrainte et la guerre en Ukraine, qui nous avaient placés dans une quasi-impasse. Il est donc évident que nous devons parvenir à manier le temps court, le moyen terme et le long terme, pour disposer d'un système robuste. Nous avons vraiment besoin de cette robustesse.

Nous en venons donc presque aujourd'hui à nous demander comment nous allons faire pour consommer toute cette énergie ! Et, d'un seul coup, nous mettons de côté la sobriété et l'efficacité énergétiques. Nous avons déjà oublié ces notions, alors qu'elles étaient le maître mot il y a deux ans. Il faut persévérer dans cette voie, car la seule énergie qui soit vraiment propre est celle que l'on ne consomme pas. La sobriété et l'efficacité me semblent donc être des principes à ne pas oublier.

Nous en sommes presque à attendre les centres de données pour pouvoir éponger ce surplus d'électricité... Ce n'est pas forcément l'attente qu'il faut avoir. Concernant l'électrification des transports, nous sommes un peu à la peine, mais les avancées sont tout de même assez colossales pour les batteries. *A priori*, Renault travaille aussi sur des poids lourds, ce qui était plus ou moins impensable il y a encore cinq ans.

Il y a cinq ans, nous nous disions que nous allions électrifier les véhicules particuliers, mais que pour les poids lourds, ce ne serait pas possible. Or, Renault produit aujourd'hui des poids lourds 100 % électriques, avec une autonomie de près de 1 000 kilomètres. Une évolution va donc se manifester dans les années à venir, car ces solutions vont devenir compétitives. S'il ne s'agit pas de reverser l'électricité contenue dans

les batteries vers le réseau, il s'agit au moins de les charger au bon moment, lorsque nous avons une production importante, notamment lors de la « cloche solaire ». Ce sont des éléments qu'il faut toujours avoir à l'esprit pour s'inscrire dans la durée.

Nous sommes à un moment – cela n'a pas été évoqué – où nous voyons effectivement que la production et la consommation électriques stagnent en France. Peut-être faudra-t-il dans les années à venir – j'ai entendu cette possibilité – mettre un peu sous cloche – non pas sous cloche solaire, mais simplement « sous cloche » – un certain nombre de réacteurs nucléaires. Il ne s'agirait pas de les arrêter définitivement, mais de les geler pour pouvoir, lorsque dans quelques années la consommation électrique repartira à la hausse, les remettre en service plutôt que de les faire moduler en permanence. C'est une chose que j'ai entendue et peut-être une possibilité qu'il va falloir évaluer dans les années à venir.

Il faut avoir une vision qui ne se limite pas à la situation d'aujourd'hui, mais qui s'inscrive réellement dans le moyen et le long terme ; sinon, nous allons au-devant d'erreurs stratégiques qui ne nous apporteront pas de robustesse.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Nous sommes assez d'accord sur ce point. Comme cela a été dit à plusieurs reprises, notamment par Patrick Chaize, la politique énergétique s'inscrit dans le long terme. Pour autant, il ne faut pas non plus regarder si loin que l'on ne voie pas l'obstacle qui est juste devant nous et que l'on trébuche dessus.

En tout cas, sur l'objectif que vous soulignez, celui de la sobriété, je suis d'accord. Je disais tout à l'heure que la stagnation de la consommation électrique était une réalité en France, à la fois pour de bonnes et pour de mauvaises raisons. Parmi les bonnes raisons, il y a le fait que nous faisons plus attention à la consommation électrique. Un certain nombre d'équipements électriques sont aussi moins énergivores pour un service rendu équivalent. Tout cela, ce sont de bonnes raisons. La mauvaise raison tient à la difficulté qu'éprouve notre industrie à se décarboner à la hauteur des ambitions, et à la faiblesse de notre industrie par rapport à ce qu'elle était il y a une quinzaine ou une vingtaine d'années.

Ces objectifs ne sont pas du tout antinomiques, sachant que l'objectif suprême, dans l'intérêt effectif de la préservation de notre environnement et de la planète, est bien sûr de limiter la consommation d'énergie fossile, sans oublier l'intérêt purement financier et d'indépendance nationale.

Il y a quelques années, lorsque l'on parlait de poids lourds, on pensait à l'hydrogène comme mode de propulsion. Aujourd'hui, on pense effectivement beaucoup plus à la batterie. De fait, comme un certain nombre de poids lourds n'effectuent pas forcément de très longs déplacements dans la journée, pour tout ce qui relève de la livraison de relative proximité, cela a tout son sens, bien sûr. Il est vrai que ce sont des sujets qui progressent.

Ce que Marine Berthet évoquait tout à l'heure à juste titre, c'est que plus nous aurons besoin de batteries, plus nous devons faire attention à notre approvisionnement en métaux stratégiques. On évoque le recyclage, mais il ne paraît pas complètement au point.

Enfin, j'aurais peut-être un désaccord au sujet des réacteurs nucléaires. Effectivement, aujourd'hui – on peut espérer que ce ne soit que momentanément – la décarbonation n'est pas suffisante pour tirer vers le haut la consommation d'électricité. On peut donc décider que, plutôt que d'avoir un surplus d'électricité, on arrête un réacteur. Je me permets toutefois de dire que cela ne me paraît rationnel, ni sur le plan économique ni sur le

plan technique. D'une part, sur le plan technique, faire redémarrer un réacteur nucléaire est assez long, car ce n'est pas un dispositif très souple,. D'autre part, si, parallèlement, on développe des énergies variables en garantissant un prix d'achat, alors même que l'on met à l'arrêt un réacteur nucléaire déjà amorti – parce qu'il a trente ou quarante ans – et capable de produire une électricité à bas coût, et que, dans le même temps, on compense le prix d'achat pour des acteurs qui envisagent de construire un nouveau parc solaire dont nous n'avons pas réellement besoin à court terme, la logique économique de tout ce processus m'échappe...

En revanche, la question peut se poser de savoir combien de nouveaux réacteurs nucléaires il faut construire, au regard de l'évolution de la consommation d'électricité. Le projet de PPE3 table sur six réacteurs nucléaires dans un premier temps. Dans un deuxième temps, en faudra-t-il encore six ou quatre ? C'est peut-être cela qu'il faudra adapter. À court terme, arrêter une installation amortie qui fonctionne n'est pas une bonne solution.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Je vous remercie, cher Daniel Salmon, de ces remarques, car elles confortent ce besoin de suivi régulier visant à adapter les orientations de la politique énergétique.

C'est là tout le sujet. Nous avons besoin de temps long pour mener à bien les projets. On ne décide pas, d'un simple claquement de doigts, d'ouvrir une tranche nucléaire. Il faut une vision stratégique à très long terme.

Cependant, les évolutions technologiques, les changements sociétaux et, sans doute, les évolutions de prix, que vous n'avez pas évoquées mais qui ont une incidence sur la consommation, doivent être intégrés. Le prix de l'électricité aura assurément une incidence sur la consommation et les besoins en énergie. Tout cela appelle un pilotage beaucoup plus fin, ce qui renforce encore la pertinence de ce rendez-vous annuel qui devrait permettre de « recalculer » en permanence les deux courbes de l'offre et de la demande.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – J'ai pris connaissance, il y a quelques semaines, des prévisions relatives à la production et aux niveaux de prix des énergies carbonées, gaz et pétrole, qui sont anticipés à un niveau plutôt bas. Cela réduit d'autant l'incitation à basculer vers l'électricité pour un certain nombre d'usages, notamment industriels.

M. Philippe Bolo, député. – Je souhaite, moi aussi, féliciter les deux rapporteurs pour leur travail, en insistant sur le fait qu'il s'agit d'un travail de l'OPECST et donc d'un travail commun entre l'Assemblée nationale et le Sénat. Jusqu'alors, le Parlement avait réalisé beaucoup de rapports, notamment sur le prix de l'électricité ou sur l'hydroélectricité, une assemblée prenant la suite de l'autre. Les sénateurs commençaient, puis les députés faisaient la copie dans l'autre chambre, ou inversement. Il est donc très positif que nous puissions avoir un rapport commun qui stabilise un certain nombre d'éléments que nous avons constatés les uns et les autres.

Cela ne vous surprendra pas, je vais vous parler du réseau électrique, car, de mon point de vue, il ne peut y avoir de stratégie considérant la production d'un côté et la consommation de l'autre sans lier les deux, à un moment donné, par le réseau électrique. Votre présentation, à la page 28, concerne surtout, selon moi, le réseau de transport et un peu moins le réseau de distribution.

Je voudrais rappeler le rôle clé des autorités organisatrices du service public local de la distribution d'électricité (AODE), nos fameux syndicats d'énergie qui œuvrent notamment dans les territoires ruraux. Avec Stéphane Piednoir, j'ai eu la chance, très récemment, de fêter les cent ans du syndicat d'énergie de Maine-et-Loire, ce qui montre bien que ces structures sont présentes, en place, avec une longue expérience du réseau sur le territoire. Ces syndicats interviennent et investissent sur des sujets clés, en lien avec ce dont vous nous avez parlé. Notamment, ils travaillent sur l'intelligence et la numérisation du réseau pour l'accueil des nouvelles productions locales. Ils installent les infrastructures de recharge pour les véhicules électriques et travaillent également à l'enfouissement des réseaux, pour les rendre résilients face aux aléas climatiques.

Tout cela est très important et a des retombées indirectes non négligeables. La première est l'équité entre les territoires urbains et ruraux en matière de qualité et d'accès à l'électricité. La seconde est un effet de levier : le syndicat d'énergie de Maine-et-Loire a montré que, pour un euro investi sur le réseau *via* les maîtrises d'ouvrage gérées par le syndicat, les retombées dans les entreprises locales s'élevaient à trois euros.

Ces réseaux et leurs opérateurs sont au cœur des sujets que vous avez traités, par l'intermédiaire des syndicats, d'Enedis et des entreprises locales. Ma question est la suivante. Ces dernières semaines, une idée a émergé : celle du transfert aux départements de la gestion de ces réseaux de distribution, actuellement assurée par les syndicats d'énergie. J'y vois trois inconvénients. Le premier est que les départements n'ont aucune compétence en la matière. Le deuxième est que, de mon point de vue, les départements y voient surtout une opportunité budgétaire, en considérant qu'ils pourraient « capter » le produit des taxes liées à la gestion des réseaux. Si ces ressources servent à financer des politiques qui ne sont pas à l'équilibre, au détriment des réseaux, ce serait très problématique. Une telle évolution concourrait-elle *in fine* aux objectifs, que nous visons, de simplification et d'efficacité du fonctionnement des différentes administrations et institutions départementales ? Je voudrais donc connaître votre analyse de cette perspective d'évolution, qui mettrait à mal les fonctionnalités des syndicats et des réseaux et qui ne permettrait pas de répondre, par ailleurs, à plusieurs de vos recommandations. J'en compte au moins quatre : les recommandations n° 1, 2, 5 et 9.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Avant de répondre à cette question, permettez-moi un bref détour personnel. J'ai été pendant plus de vingt-cinq ans directeur d'un syndicat départemental d'énergie. Je rejoins totalement ce que vous venez de dire. Je considère que la gestion de ce type de réseau doit s'effectuer au plus près du terrain, avec une connaissance fine des effets des réseaux sur le terrain, pour pouvoir s'adapter aux nouvelles dispositions, aux nouvelles fonctionnalités et aux nouveaux besoins, comme les bornes de recharge.

J'ai quitté mes fonctions en 2014, lorsque je suis devenu sénateur. Le déploiement des bornes de recharge n'en était qu'à ses débuts : la demande émergeait et les syndicats d'électricité ont su s'adapter pour y répondre. S'ajoutent aussi les questions de résilience, notamment avec l'enterrement des réseaux et les travaux réalisés après les tempêtes et autres intempéries, pour ne citer que ces exemples. Ce serait donc, à mon avis, une aberration que d'aller dans ce sens. Les départements – c'est ma vision et je la sais largement partagée – disposent d'une vision stratégique et « macro », mais ne sont pas structurés pour assurer des missions techniques. D'ailleurs, sauf exception, ils ne disposent pas de services techniques et ce sont le plus souvent des acteurs associés qui prennent en charge les interventions.

Je défendrai bec et ongles l'organisation actuelle. Aujourd'hui, je préside une structure nationale dédiée au numérique et je plaide pour que l'on s'inspire du modèle électrique dans ce domaine, notamment sur la question de la péréquation, qui n'est pas réglée. Cela illustre bien que le système électrique, dans son organisation fonctionnelle entre les collectivités, les exploitants et le niveau national, a fait ses preuves depuis 1946, et même auparavant, puisque certains syndicats ont une centaine d'années d'existence. Il faut maintenir cette organisation et la renforcer.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Puisque ce n'est pas le sujet du rapport, nous pouvons nous permettre d'avoir des voix un peu discordantes. Honnêtement, je n'ai pas d'avis définitif sur la question. J'ai été maire pendant dix ans et président d'une communauté urbaine. Je remarque simplement que les syndicats en question ont été créés à l'origine pour l'électrification des campagnes et que cet objectif est largement atteint. Une fois ceci dit, tout est envisageable.

Les objections que vous avez exprimées sont pertinentes, dès lors qu'il s'agirait effectivement de consulter les techniciens, comme nous le faisons par exemple dans une communauté urbaine pour la direction des transports. Si l'idée d'un transfert aux départements doit prospérer, il est impératif que les ressources correspondantes ne soient pas intégrées au budget général afin de préserver leur destination ; on doit raisonner en termes de budget annexe et de taxes affectées. Sinon, vous avez raison : le budget social, par nature difficilement contraint, absorberait inmanquablement une partie de ces fonds.

En somme, une évolution pourrait être envisagée, mais à condition de l'accompagner de garde-fous solides, notamment l'inscription des fonds dans un budget bien identifié et étanche par rapport au reste. Autrement, les investissements aujourd'hui réalisés par les syndicats seraient reportés sur d'autres sections budgétaires, non pas en raison d'éventuelles dérives politiques, mais tout simplement parce que les départements, au regard de leur situation financière actuelle, y seraient contraints pour boucler leur budget.

M. David Ros, sénateur, vice-président de l'Office. – Merci à nos deux collègues qui ont utilisé leur « mix énergétique » de compétences pour rédiger ce rapport passionnant.

Mes collègues ont déjà planté bon nombre de banderilles – oui, des banderilles, car je sais que l'un d'eux aime la tauromachie. Je vais donc aborder très rapidement quatre points.

Le premier concerne les centres de données. J'ai été extrêmement intéressé par tout ce qui est écrit à la page 85 – j'y vois un peu la signature de Patrick Chaize sur des travaux qui nous tiennent à cœur – et j'ai donc été un peu déçu de ne pas retrouver ce sujet dans les recommandations. Est-il inclus dans les recommandations n° 7 et n° 9, au titre du débat général ?

Je fais référence aux enjeux liés aux centres de données, déjà évoqués, et notamment au fait que l'intelligence artificielle, dans son état actuel mais aussi avec l'évolution de l'IA générative, engendrera des besoins énergétiques croissants. Nous avons beaucoup de doutes sur la très forte augmentation de ces besoins, même si, *a priori*, il existe des réserves. Cela interroge également quant à la localisation de ces centres de données au regard du raccordement au réseau de RTE, et quant à l'usage, ou l'absence d'usage, de la chaleur fatale qu'ils produisent. Autant de questions qui relèvent à la fois de l'énergie et de l'aménagement du territoire. Ces sujets pourraient s'inscrire dans un débat plus large, mais je ne savais pas où vous souhaitiez les situer.

Le deuxième point concerne les véhicules électriques. Plusieurs éléments ont été évoqués sur les modalités de recharge et l'usage des batteries. Avez-vous été saisis ou avez-vous porté un regard sur les recherches menées, à une époque, sur des infrastructures de voirie permettant la recharge des véhicules en mouvement ? Ce type de dispositifs, qui pourrait concerner certains axes autoroutiers français, représenterait un avantage énorme dans le cadre de l'évolution du mix énergétique.

La troisième question, déjà évoquée, concerne la recherche. On parle de « la » recherche, mais il s'agit plutôt « des » recherches, tant le domaine est vaste. À ma connaissance, il n'existe pas de vision consolidée d'une planification des différents axes de recherche couvrant l'ensemble du mix énergétique. Au-delà de la recherche elle-même, se pose d'ailleurs la question de la formation. On a vu, avec le temps qui a été nécessaire pour reconstituer une filière de soudeurs qualifiés pour les centrales nucléaires, qu'il faut maintenir et renouveler les compétences en permanence. Cela appelle donc à une réflexion globale sur la recherche et la formation.

J'en viens à un quatrième point : le débat annuel sur l'énergie évoqué dans votre neuvième recommandation.

Avez-vous une idée plus précise de la manière dont il pourrait être organisé ? S'agirait-il d'un débat précédé de travaux dans toutes les commissions ? Je pose cette question, car le sujet peut être abordé sous des angles très différents : aménagement du territoire, recherche, économie, finances ou démocratie. Faut-il envisager un débat préalable en commission avant la tenue d'un débat en séance publique ?

Au-delà de ce que prévoit votre neuvième recommandation, ne serait-il pas opportun de créer une sorte d'observatoire, chargé non seulement d'organiser ce débat, mais aussi d'en assurer le suivi dans la durée et de formuler des recommandations régulières ? En effet, ce sujet irriguera très fortement nos travaux dans les prochaines années. Merci encore pour ce rapport extrêmement instructif.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Sur les centres de données, le vrai sujet est que nous ne disposons pas encore d'une vision stabilisée. Je m'explique : au contact des *start-up* ou des entreprises actives dans ce domaine, nous constatons que la principale limite au développement de l'intelligence artificielle est aujourd'hui d'ordre environnemental, ce qui inclue bien entendu la dimension énergétique. On voit déjà apparaître des articles de presse indiquant que, dans certains États américains, on a procédé à des opérations de délestage pour réserver la capacité électrique aux centres de données. Cela pose tout de même question.

C'est donc un premier élément du sujet. Par ailleurs, des recherches laissent entrevoir des évolutions technologiques qui permettraient, sans contrôle, de faire fonctionner l'IA non plus sur des GPU – processeurs très énergivores et générant une chaleur fatale importante – mais sur des CPU, ce qui diviserait à peu près par dix les besoins en énergie.

Une fois encore, cela renforce l'idée qu'il est indispensable de suivre de près ces évolutions et d'adapter nos réflexions et notre vision stratégique en conséquence.

Le deuxième élément sur les besoins liés aux centres de calcul concerne la stratégie adoptée par d'autres pays. Aujourd'hui, certains investisseurs américains cherchent à prendre position sur le territoire national en préemptant des entreprises françaises, parce que le coût de notre énergie demeure compétitif à l'échelle mondiale. Leur objectif est clair : pouvoir

installer chez nous des centres de calcul qu'ils ne parviennent plus à construire aux États-Unis, faute de capacités énergétiques suffisantes.

Le risque pour nous serait double : nous retrouver contraints nous aussi en termes de production, ou devoir investir pour accroître cette production au bénéfice de centres de calcul dont nous ne tirerions pas un intérêt direct. Il faut vraiment s'interroger.

Pour l'instant, il serait hasardeux d'affirmer : « voilà la stratégie », « voilà ce qu'il faut faire » ou « voilà ce qu'il ne faut pas faire ». Cette incertitude renforce l'intérêt du débat régulier que nous proposons, dont nous n'avons toutefois pas défini la forme. Il est nécessaire d'adopter une approche pragmatique et de bâtir une organisation s'appuyant sur la perception des différents acteurs. Pourquoi ne pas envisager un dispositif de suivi avec un observatoire chargé de tirer des conclusions et de formuler un certain nombre d'éléments d'appréciation plus globaux ?

Enfin, sur la question de la recherche et de la formation, la recherche sur les moyens de production doit être soutenue. Dans le cadre du projet de loi de finances – j'ai la chance d'être rapporteur pour avis des crédits de la recherche avec Stéphane Piednoir –, un effort sera proposé sur ce volet, notamment pour la recherche sur le nucléaire. Toutefois, si nous avançons dans cette direction, vous avez raison de souligner qu'il faut anticiper tous les effets induits, notamment sur la formation et sur les besoins en compétences techniques.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Pour aller dans le même sens, j'évoque la Normandie, qui est un territoire très en pointe sur la relance du programme nucléaire et accueille de nombreux projets. Effectivement, les besoins estimés en ingénieurs s'élèvent à 14 000 ou 15 000. Un travail a donc été entrepris dans le cadre d'un partenariat État-région, pour relancer les formations autour de ces métiers, qui avaient été progressivement un peu abandonnées.

Une loi avait confié à l'OPECST l'évaluation de la stratégie de recherche en énergie. Je n'étais pas parlementaire à cette époque. L'élaboration de cette stratégie a été interrompue il y a déjà quatre ou cinq ans. Cela aurait pu constituer une recommandation supplémentaire. Ce point n'a pas été signalé lors des auditions, mais il apparaît clairement qu'une vision plus structurée et stratégique de ce champ de recherche serait nécessaire.

Les expérimentations relatives aux véhicules électriques, par exemple en matière de recharge, ne nous ont pas été présentées. Certains de nos interlocuteurs ont plutôt insisté sur l'insuffisance du déploiement des bornes de recharge, condition essentielle à la mobilité électrique, mais les aspects expérimentaux n'ont pas été abordés.

Le département de l'Orne a mené une autre forme d'expérimentation. Il ne s'agissait pas de recharger des véhicules électriques, mais de faire en sorte que la chaussée produise elle-même de l'électricité. Une production a bien été enregistrée, mais le projet, porté par une grande entreprise, a été abandonné faute de résultats concluants.

Il y a sans doute des pistes à explorer, mais cela plaide, une fois encore, pour l'élaboration d'une stratégie plus ambitieuse et mieux structurée en matière de recherche sur l'énergie, parce que l'énergie est au cœur de tout, au cœur même de nos vies. On parle beaucoup de pouvoir d'achat aujourd'hui. Mais parler de pouvoir d'achat sans parler d'énergie est impossible, l'énergie irrigue l'ensemble de nos activités. Toute amélioration du niveau de vie y est directement liée. Jean-Marc Jancovici l'explique remarquablement bien.

Enfin, un chiffre m'a particulièrement marqué, moi qui suis aussi fils de paysan : un litre d'essence équivaut à une journée de travail de trente-cinq paires de bras. Tout est dit. C'est parce que nous avons bénéficié d'une énergie abondante et peu chère pendant plusieurs décennies que nous avons globalement augmenté notre niveau de vie. En somme, parler d'énergie, c'est parler de vie, tout simplement.

M. Pierre Henriet, député, premier vice-président de l'Office. – Tout d'abord, bravo pour le travail fourni.

Je souhaite revenir sur les interrogations relatives aux conséquences à long terme d'une modulation intensifiée. C'est un point que vous avez détaillé dans le rapport. Alors que la plupart des sujets occupent une demi-page, parfois une page, celui-ci s'étend sur quatre pages, ce qui en montre l'importance. À l'OPECST, nous devons d'ailleurs être très vigilants sur cette question, car elle est évidemment fondamentale pour asseoir la durée de vie de notre parc nucléaire dans un contexte où, au moment de la construction de la plupart de nos réacteurs, le mix énergétique n'était pas encore celui que nous connaissons aujourd'hui.

Des connaissances restent donc à acquérir, notamment au travers d'analyses comparatives portant sur des réacteurs similaires – ou du moins de même génération – implantés dans d'autres pays, dont le mix énergétique diffère du nôtre. La modulation soulève des interrogations, en particulier sur la durabilité de certains matériaux ; les premières études indiquent que le circuit primaire ne serait pas concerné.

Par ailleurs, pour avoir échangé avec plusieurs chercheurs en sciences des matériaux – vous avez notamment interrogé Yves Bréchet sur ce sujet –, il apparaît qu'il n'existe pas encore de corpus de connaissances suffisamment robuste pour se positionner sur cette question.

Nous devrions donc peut-être aussi faire entrer en jeu le principe de précaution. Il trouve pleinement à s'appliquer dans ce cas, même si c'est un peu à rebours de ce que disent ceux qui, d'habitude, en sont les premiers défenseurs. Le principe de précaution, à mon sens, consisterait à réduire autant que possible la modulation de notre parc.

Cela m'amène à la troisième recommandation que vous formulez, relative à la contribution des producteurs d'électricité non pilotable à l'équilibrage du réseau. Le vrai sujet du mix énergétique est là. On parle de mix énergétique, mais quand un seul acteur joue véritablement le rôle de variable d'ajustement, l'équilibre global devient difficilement soutenable. C'est d'ailleurs sur ce point que je souhaite revenir à la sémantique évoquée tout à l'heure par Jean-Luc Fugit. L'intermittence renvoie à une variabilité liée à des conditions environnementales sur lesquelles l'homme n'a pas prise ; la capacité de modulation, en revanche, correspond à une variabilité maîtrisable, ce qui est le cas pour notre parc nucléaire.

Comment envisagez-vous, justement, la mise en œuvre de cette troisième recommandation ? Je ne vois pas vraiment comment les acteurs des énergies renouvelables pourraient contribuer à la modulation, si ce n'est par l'intermédiaire de systèmes de stockage. C'est là que se situent tous les enjeux sous-jacents, liés à leur contribution au réseau et au déploiement, pour que l'on puisse véritablement réaliser ce mix énergétique dans des conditions équitables. Pour l'heure, ce n'est pas le cas. En tout cas, il était important que vous mettiez en avant cet élément indispensable, notamment en vue de la future programmation pluriannuelle de l'énergie.

M. Joël Bruneau, député, rapporteur. – Je commencerai par ce dernier point, relatif aux pointes de production qui pourraient déséquilibrer le réseau. Les Allemands s'acheminent vers de nouveaux types de contrats : d'une part, ils incitent au stockage, mais ils prévoient aussi expressément cette possibilité de modulation dans les clauses contractuelles. C'est d'ailleurs ce que nous a expliqué le Syndicat des énergies renouvelables, qui a cité l'exemple de l'Allemagne, lorsque nous lui avons demandé comment gérer les pointes pour assurer la solidité du réseau.

Certains contrats prévoient désormais des périodes d'effacement. Il ne s'agit pas de variabilité ou de prévisibilité, nous n'allons pas faire de la sémantique ; on prévoit facilement que demain, de telle heure à telle heure, il y aura beaucoup de soleil et que l'on produira beaucoup. Ce que les Allemands mettent en place consiste à dire : « pendant cette période, nous ne voulons pas de votre électricité, vous la conservez. » En contrepartie, la durée du contrat, fixée par exemple à vingt ans à l'origine, est prolongée à due concurrence des périodes pendant lesquelles l'opérateur a été tenu de suspendre sa production. Je ne sais pas comment est gérée, sur le plan technique, l'interruption d'injection sur le réseau, mais il existe des périodes où il est prévu que cette injection ne doit pas avoir lieu.

Cela rejoint finalement le premier sujet : aujourd'hui, c'est notre parc nucléaire qui joue ce rôle de « tampon », en modulant sa production. Il faut être conscient que nous sommes, en cela, atypiques par rapport à nos voisins, car eux modulent avec du gaz. D'ailleurs, il y a quelques jours, j'ai lu que l'Allemagne prévoyait de construire cinq ou six nouvelles centrales à gaz pour assurer la modulation de la production sur le réseau en fonction des conditions climatiques, en complément des énergies éolienne et solaire.

Clairement, la France, compte tenu de son histoire et de l'importance de son parc nucléaire, ne dispose pas de la même souplesse, celle d'une modulation s'appuyant sur des centrales à gaz. Cela soulève effectivement, comme vous l'avez souligné, une problématique, évoquée par plusieurs de nos interlocuteurs : la nécessité de porter une attention particulière aux conséquences de cette modulation sur la durabilité du parc, alors même qu'il serait sans doute dans notre intérêt d'en prolonger l'exploitation. D'ailleurs, un rapport de la Cour des comptes estime que l'entretien du parc nucléaire, soit un coût d'environ 6 milliards d'euros par an, demeure rentable dès lors qu'il permet d'allonger sa durée d'utilisation.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – L'idéal serait de mettre en place des contrats d'objectifs afin que la courbe de production reste au plus près de la courbe de consommation.

Comme cela a été rappelé tout à l'heure, avec l'intelligence artificielle et les outils désormais disponibles, il devient plus facile d'anticiper les événements et d'améliorer la pertinence de ces moyens de production. C'est certain, et nous avons encore des marges de progression dans ce domaine.

La situation idéale est que la courbe de production épouse au mieux la courbe de consommation. Comment y parvenir ? Tous les moyens sont à considérer. J'ai souvent évoqué cette question : quand on produit avec des énergies renouvelables, il est indispensable de s'interroger sur les moyens de production mobilisables lorsque le soleil ou le vent ne permettent plus d'assurer la continuité de l'approvisionnement.

En mission à Mayotte avec la commission des affaires économiques, j'ai visité le centre de production d'énergie. Le site accueille plusieurs hangars abritant des moteurs diesel

alignés, auxquels s'ajoute une centrale photovoltaïque. Pendant la visite, j'ai observé le chef de site qui, à un moment, s'affolait, se précipitait à son pupitre et mettait en route un groupe, en pleine journée. Évidemment, nous l'avons laissé agir. Je lui ai demandé ensuite : « Que se passe-t-il ? » Il m'a répondu : « Un nuage arrive. »

Cette scène illustre de manière saisissante le besoin d'adapter la production à la consommation, parfois de façon très artisanale. Nous pourrions sans doute améliorer ce processus et le rendre un peu plus technique.

M. Daniel Salmon, sénateur. – Je regarde aujourd'hui la consommation d'électricité : la puissance appelée varie de 57 gigawatts pendant la nuit à 74 gigawatts en journée. Par conséquent, nous avons en permanence une fluctuation de la consommation dans ce pays. Plus nous avons de nucléaire, plus celui-ci est obligé de moduler, car, de toute façon, la nuit, il faut qu'il module. Il a été conçu pour cela, parce que la France a décidé de recourir massivement au nucléaire.

La question est effectivement qu'on l'oblige à moduler deux fois dans la journée. Je l'entends parfaitement, comme j'entends la nécessité d'avoir des coûts intégraux. On ne peut pas comparer un mégawattheure ici à un mégawattheure là. Il est clair qu'il faut avoir cette vision ; en juxtaposant du solaire avec des batteries, on arrive à obtenir une capacité de modulation.

Le fait est que, s'il y a bien un domaine où les choses évoluent très vite, c'est celui des batteries. Nous avons divisé le prix des kilowattheures stockés par dix en dix ans. J'espère que beaucoup de progrès seront encore réalisés dans ce domaine, y compris au niveau des matières premières nécessaires pour fabriquer les batteries. Il y a donc vraiment un besoin de lisibilité et de transparence.

Ensuite, il y a des choix politiques. C'est pourquoi RTE avait présenté un certain nombre de scénarios, allant du « 100 % renouvelable » jusqu'à « 50 % de nucléaire ». Il s'agit de choix politiques. Il faut vraiment que nous ayons un choix éclairé et transparent sur ce point. Ce seront les citoyens qui trancheront et, en fin de compte, les votes au Parlement. Il faut vraiment que ce débat ait lieu. Je suis tout à fait d'accord pour que nous avancions en connaissance de cause, en mettant également en regard le prix que coûtera le mégawattheure.

M. Patrick Chaize, sénateur, rapporteur. – Monsieur Salmon, vous ne trouverez pas dans le rapport un endroit qui dise qu'il faut renoncer aux énergies renouvelables. Il y a cependant une réalité technique, une réalité de vie aussi, qui fait que nous devons prendre en compte leurs conséquences. L'exemple de Mayotte est un cas spécifique.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Pour conclure ce débat qui nous passionne tous, il est intéressant de noter que votre rapport retrace bien l'historique et la singularité française, comme Joël Bruneau l'a rappelé tout à l'heure.

Ce qui n'a pas été beaucoup dit, c'est que la France a fait un choix il y a cinquante ans. On peut le critiquer, mais c'est en tout cas une réalité. Ce n'est pas un choix qui a été fait par les pays voisins en Europe, ni même ailleurs dans le monde. Cela donne d'ailleurs à la France un rôle singulier d'interconnexion au cœur de l'Europe. Quand il y a des *blackouts* – nous aurons prochainement les conclusions pour l'Espagne –, le rôle tampon de la France est, à mon sens, essentiel et il faut le préserver.

J'ai eu l'occasion de le dire plusieurs fois ici, à l'Office ou ailleurs : c'est grâce à ce choix français, mais en réalité européen, que l'on peut tamponner des excès de production. L'excédent de production d'électricité n'a de sens que s'il rend service, car s'il s'agit de produire à coût nul, voire à prix négatif, cela pose évidemment problème, parce qu'il y a des coûts derrière. Nous savons que le coût marginal de la production nucléaire est très faible. Comme le disait Patrick Chaize, nous avons intérêt – mais c'est la préoccupation de n'importe quel industriel – à faire tourner notre outil industriel au maximum pour l'optimiser, notamment quand les coûts marginaux sont faibles, plutôt que de moduler. Mais c'est quand même ce qui se passe.

Les craintes sur les réseaux étaient au cœur de la commande de ce rapport, ainsi que les craintes sur la robustesse des centrales nucléaires. EDF produira prochainement un rapport portant spécifiquement sur le circuit secondaire, sujet que vous pointez dans votre rapport. On comprend bien qu'une centrale nucléaire, qui a été conçue pour moduler et pas pour produire à 100 % vingt-quatre heures sur vingt-quatre, n'avait pas été conçue dans les années 1970-1980 pour moduler à 20 % seulement de sa puissance nominale. Le Haut-Commissaire à l'énergie atomique le dit très bien : si l'on arrête complètement un réacteur nucléaire, il faut vingt-quatre heures pour commencer à le relancer – et donc même pas retourner à la pleine puissance. On peut comprendre qu'il ne soit pas fait pour des modulations extrêmes.

Vous avez certainement tous regardé le rapport de Vincent Berger sur l'évolution du mix énergétique. Si l'on continue à envisager une augmentation de l'électrification des usages, qui n'est aujourd'hui pas au rendez-vous, c'est ce qui pourrait se passer.

Nous risquons de devoir mettre à l'arrêt plusieurs réacteurs nucléaires. C'est un contresens. Je sais que nous ne sommes pas tous d'accord sur ce point, mais c'est un contresens. Quand on calcule le coût de production pour l'éolien ou le photovoltaïque – ce qui est une question relevant plutôt des commissions des affaires économiques –, il faudrait presque faire une péréquation sur la base du fait qu'on a permis à l'éolien et au photovoltaïque de produire à un moment donné de la journée qui était favorable et parce que le nucléaire s'est effacé. Il y a quelque chose qui n'apparaît pas dans les livres comptables, c'est la charge que supporte le parc électronucléaire pour permettre à d'autres systèmes de produire. Cela n'est pas totalement quantifiable, j'en ai bien conscience. On peut définir un modèle, mais il y existe un coût induit sur le réacteur qui résulte du fait qu'au lieu de produire à 100 %, et donc, facialement, de diminuer le coût moyen de production puisque le coût marginal est faible, le réacteur est retiré des moyens appelés et permet à d'autres de produire. C'est un sujet que nous pourrions examiner dans le cadre du débat annuel que vous préconisez.

La PPE, évidemment, nous la réclamons tous. Le Gouvernement a indiqué qu'elle a été mise « sur le haut de la pile » de ses dossiers à traiter. On ne sait pas de quelle pile il s'agit et on n'a actuellement aucune visibilité. Or, il faut une implication du Parlement. Les palabres, c'est sympathique, mais il faut du concret à un moment donné.

Un mot pour finir sur la nécessaire électrification des usages. On voit que, pour la décarbonation – ou la « défossilisation », pour reprendre un terme cher à Jean-Luc Fugit –, l'objectif est de supprimer les usages reposant sur les énergies fossiles. Pour cela, nous devons agir sur la mobilité et sur les industries.

Concernant les industries, un enseignement que nous avons tiré en visitant récemment le salon nucléaire international WNE est que les SMR et les AMR se réorientent

massivement vers la production de chaleur, car c'est là que l'on a le meilleur rendement. Une centrale nucléaire produit de la chaleur avant de produire de l'électricité ; il y a un facteur de conversion entre les deux. Sur la chaleur, il y a vraiment un excellent rendement. Or les industries lourdes sont très demandeuses de chaleur, avant d'être demandeuses d'électricité. C'est donc un sujet d'espoir.

Je mets maintenant aux voix le projet de rapport présenté par Joël Bruneau et Patrick Chaize. Y a-t-il des oppositions à l'adoption de ce rapport ? des abstentions ? Je n'en vois pas. Il est donc adopté à l'unanimité.

L'Office adopte à l'unanimité le rapport sur « les impacts technologiques de l'évolution du mix énergétique et ses conséquences sur l'outil industriel et les réseaux » et autorise sa publication.

*
* *
*

Je vais maintenant vous présenter une brève communication sur le partenariat entre l'Office, l'Académie des sciences et l'Académie nationale de médecine. Ce partenariat avait été mis en place par Cédric Villani, alors président de l'Office, et relancé lors du 40^e anniversaire en juillet 2023, avec pour objectif d'accroître la compréhension mutuelle des mondes parlementaire et scientifique – car nous ne comprenons pas forcément ce que nous faisons dans nos assemblées respectives – et de discuter de sujets d'intérêt commun que nous définissons à l'avance avec les académies.

Dans ce partenariat, il y a deux composantes. La première est un jumelage qui donne lieu à la constitution de trinômes. Chaque trinôme comporte un parlementaire, un académicien et un « jeune chercheur » – comme nous sommes assez conciliants, la qualité de « jeune chercheur » peut être retenue pour des quarantennaires. Les trinômes ont été constitués progressivement au cours du second semestre 2023 jusqu'au début de l'année 2024. Leur activité a été organisée autour de trois séquences. Une première séquence collective d'accueil à l'Assemblée nationale et au Sénat, qui s'est déroulée le 15 mai 2024, pour présenter aux chercheurs et aux académiciens le travail parlementaire à Paris ; une séquence parlementaire locale prévoyant l'accueil des scientifiques dans les circonscriptions selon les choix et les souhaits des parlementaires ; et une séquence scientifique, avec cette fois l'accueil du parlementaire dans l'unité de recherche, dans les laboratoires. Ces séquences ont eu lieu pendant le premier semestre 2024, avec pour deux trinômes un prolongement au début de l'année 2025.

La seconde composante est une « rencontre de haut niveau » consacrée à un débat sur des sujets proposés par les académies et dont la mise en œuvre suppose des décisions des pouvoirs publics. Cette rencontre a eu lieu le 23 janvier 2025, avec quatre rapports : « L'hydrogène aujourd'hui et demain », présenté par Marc Fontecave, de l'Académie des sciences ; « Les grandes constellations de satellites », présenté par François Baccelli, de l'Académie des sciences également ; « La vaccination des seniors », présenté par Yves Buisson, de l'Académie de médecine ; enfin, un document intitulé « Pour une réforme de la recherche en biologie et santé » – des recommandations plutôt qu'un rapport –, présenté par Arnold Migus, de l'Académie de médecine.

Vingt-quatre académiciens s'étaient portés volontaires pour participer aux trinômes, ce qui montre une réelle attractivité. Les Académies étaient très demandeuses de ces

jumelages, mais il n'a été possible de constituer que treize trinômes, dont huit avec un membre de l'Académie des sciences et cinq avec un membre de l'Académie de médecine. Trois membres de l'Office se sont engagés dans deux trinômes à la fois – Christine Arrighi, Philippe Berta et Yannick Neuder. Ils ne font plus partie de l'Office, mais il n'y a évidemment pas de lien de causalité !

L'année 2024 n'a pas facilité la vie de ces trinômes. L'OPECST a été mis à l'arrêt pendant six mois, je vous le rappelle. La séquence collective du 15 mai a été appréciée par les académiciens et les jeunes chercheurs que nous avons accueillis au Parlement – une quarantaine de scientifiques au total. La matinée s'est déroulée à l'Assemblée nationale avec une présentation de l'élaboration de la loi, illustrée en direct par la retransmission vidéo de l'examen en commission du projet de loi sur la fin de vie, puis des échanges libres avec des parlementaires à Paris. L'après-midi s'est passé au Sénat. La délégation a assisté à la séance de questions au Gouvernement et a poursuivi des échanges sur le budget et la politique de recherche. Les séquences locales ont, quant à elles, eu une intensité contrastée. Certains parlementaires souhaitaient ou non accueillir le scientifique en circonscription.

La rencontre du 23 janvier 2025 a réuni une trentaine de scientifiques et dix membres de l'Office. Le format de cette rencontre n'est pas inédit, puisqu'il a été celui qui prévalait pendant la législature 2017-2022, avec des petits-déjeuners thématiques organisés à tour de rôle par chaque Académie et par l'Office, soit à l'Assemblée nationale, soit au Sénat. Les présentations des académiciens étaient néanmoins passionnantes et très détaillées, et les débats ont provoqué l'intérêt de tous les participants. Toutefois, cette séquence pourrait sans doute être mieux utilisée afin de donner plus de poids politique aux travaux des deux académies, qui d'ailleurs le réclament.

J'en viens aux points sur lesquels il nous faudrait réfléchir. Il s'agit, d'abord, du choix des sujets que nous mettrions sur la table pour de nouvelles présentations, en cherchant à mieux cerner si les sujets proposés par les académies sont susceptibles de trouver un écho au-delà de notre partenariat. Il s'agit, deuxièmement, du moyen de faire vivre ces sujets auprès des autorités publiques – au premier chef le Parlement – après leur présentation et leur discussion devant l'Office.

Pour conclure, les objectifs fixés au partenariat ont été, pour une bonne part, assez bien atteints. Au contact des scientifiques, les parlementaires ont pu être éclairés sur la réalité de leurs recherches et de leurs travaux. Du côté des scientifiques, ces échanges ont permis de mieux comprendre le travail parlementaire et notre quotidien de député ou de sénateur. La diversité des sollicitations qui nous sont adressées a également été relevée, certains s'étonnant de nous voir mobilisés de toutes parts. Et c'est sans parler des tensions – c'était pendant l'année 2024 – auxquelles les parlementaires sont soumis continûment.

Les Académies souhaitent une nouvelle édition du partenariat. Je vous propose donc que nous nous mettions en mesure d'organiser un nouvel appel à constitution de trinômes, afin de relancer cette dynamique des jumelages.

La réunion est close à 11 h 30.

Membres présents ou excusés

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Réunion du jeudi 27 novembre 2025 à 9 h 30

Députés

Présents. - M. Philippe Bolo, M. Joël Bruneau, M. Jean-Luc Fugit, M. Pierre Henriot, M. Alexandre Sabatou

Excusés. - Mme Olga Givernet, M. Maxime Laisney, M. Gérard Leseul, Mme Dominique Voynet

Sénateurs

Présents. - Mme Martine Berthet, M. Patrick Chaize, Mme Florence Lassarade, M. Stéphane Piednoir, M. David Ros, M. Daniel Salmon

Excusés. - M. Arnaud Bazin, Mme Alexandra Borchio Fontimp, M. André Guiol, M. Ludovic Haye, Mme Sonia de la Provôté, M. Michaël Weber