

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET LES ÉNERGIES RENOUVELABLES SONT-ELLES COMPLÉMENTAIRES ?

RÉSUMÉ

L'affirmation, largement relayée par les médias et le personnel politique, que « *le nucléaire et les renouvelables sont complémentaires* » doit être nuancée. En effet il existe **deux catégories de moyens de production d'électricité d'origine renouvelable (EnR)** : ceux qui sont **pilotables** (hydraulique, biomasse, géothermie) car on peut faire varier la puissance produite en fonction des besoins, et ceux qui sont **intermittents** (EnRi : éolien, solaire) et dont la puissance produite dépend de facteurs extérieurs tels que le soleil et le vent non maîtrisables par l'homme et en partie non prévisibles à moyen terme.

Le **caractère intermittent de ces EnRi** impose de disposer dans le mix électrique de moyens de production pilotables, capables d'ajuster à tout moment leur production pour obtenir en temps réel **l'équilibre entre l'énergie produite et l'électricité consommée**. Cet équilibre concerne l'énergie produite (puissance x temps) et non pas la puissance crête.

Ainsi, quand on veut comparer des puissances installées, il faut avoir en tête que pour les EnRi, la puissance moyenne produite est très largement inférieure à la puissance installée (qui est assimilable à une puissance crête) ; le ratio, appelé facteur de charge, est de l'ordre de 0.2 à 0.3 suivant la filière. Pour les moyens pilotables il est proche de 1, quand le moyen est en service. En l'absence de cet équilibre, les paramètres principaux du réseau (tension fréquence) sont perturbés, ce qui est préjudiciable au réseau électrique lui-même et à de nombreux utilisateurs. Quand ce déséquilibre augmente ou persiste, des dispositifs de sécurité qui protègent certains dispositifs du réseau électrique s'enclenchent, ce qui fait baisser encore plus la quantité d'électricité disponible. Par effet d'avalanche, cela conduit à l'arrêt du réseau de distribution : c'est le black-out.

Dans la pratique, ces moyens pilotables sont constitués par certains EnR, le nucléaire et les moyens mettant en œuvre des combustibles fossiles (charbon, lignite, gaz, pétrole). Un autre contributeur au respect de cet équilibre pourrait être la mise en place de moyens de stockage direct (batteries) ou indirect (hydrogène) de l'électricité. A court et moyen terme, ces moyens de stockage sont très loin de pouvoir procurer une capacité suffisante en termes de puissance instantanée et d'énergie restituée, et ce pour un coût raisonnable. A l'extrême, l'incapacité de respecter cet équilibre production-consommation pourrait conduire à des politiques de « sobriété » (suggérée ou imposée) de la consommation.

La comparaison de la composition du mix électrique entre l'Allemagne et la France illustre l'impact des choix faits par ces deux pays sur la stabilité de leurs réseaux électriques et le respect de leurs engagements en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) :

- **l'Allemagne** réalise des investissements colossaux en matière d'EnRi et est sortie du nucléaire dans le même temps ; l'équilibre production-consommation est obtenu par le maintien d'un parc important consommant des combustibles fossiles (gaz, lignite, charbon), et dans une moindre mesure par des importations provenant notamment du parc nucléaire français ; la **stabilité du réseau reste précaire**, et les **émissions de GES restent très fortes** ;
- **la France** a investi massivement depuis les années 1970 dans un parc nucléaire qui assure une partie importante de la production d'électricité, même si cette part diminue avec l'augmentation de la production des EnR. Le parc nucléaire actuel, additionné de la production hydraulique et d'une faible part de production carbonée (centrales thermiques à cycle combiné gaz), permet d'assurer pleinement ce rôle de compensation des fluctuations de la production des EnRi.

La politique suivie par l'Allemagne semble donc conduire à une impasse en matière d'émissions de GES. En France la situation est actuellement maîtrisée et **favorable en matière de stabilité du réseau et très bonne en matière d'émission de GES**. Toutefois les contraintes techniques et financières que font peser les EnRi sur les moyens pilotables pourraient remettre en cause cette situation, surtout si la part des EnRi dans le mix électrique continue d'augmenter.

En France, la **complémentarité entre nucléaire et EnRi existe**, mais **les contraintes qu'elle impose de manière déséquilibrée aux moyens pilotables** pourraient remettre en cause leur existence à terme. Il est donc urgent de **remettre à plat cette situation**, en **rééquilibrant les contraintes et obligations** pesant sur les EnRi et le nucléaire, afin de préserver à terme la viabilité économique de ces 2 filières.

1. RAPPELS SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'objectif de fortement réduire la consommation de combustibles fossiles fait largement consensus, que ce soit pour des questions climatiques (rejets de gaz à effet de serre – GES – lors de leur combustion, dont le CO₂), de pollution de l'environnement (pollution chimique de l'air, des sols et des eaux) et de consommation de ressources minérales non renouvelables. Or ces matériaux sont actuellement beaucoup utilisés dans nos sociétés industrielles, que ce soit pour produire de la chaleur et de l'électricité, mais aussi pour la fabrication d'objets (par exemple engrais avec le méthane et matières plastique avec le pétrole). Cette réduction des émissions de GES qui transformera complètement nos sociétés et nos modes de vie est appelée la « transition énergétique ».

Dans l'optique de la présente fiche, il est d'abord nécessaire de s'intéresser aux moyens de transformation de l'énergie au sens large, donc à ce que l'on appelle « énergie primaire » et qui correspond à toutes les formes d'énergie avant transformation, et à l'électricité. Les statistiques pour 2024 sont données dans le tableau 1 pour le monde et pour la France.

	Energie primaire		Electricité	
	Monde	France	Monde	France
Combustibles fossiles (gaz, charbon, pétrole)	81 %	45 %	60 %	4 %
Renouvelables (éolien, solaire, biomasse, hydraulique)	15 %	16%	31 %	29 %
Nucléaire	4 %	39 %	9 %	67 %

Tableau 1 : Répartition des moyens de production de sources d'énergie primaire et d'électricité

sources : pour le monde : wikipedia ; pour la France :

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2024>

Il apparaît que la production de sources d'énergie primaire dans le monde est fortement carbonée, et relativement moins importante en France du fait de la présence d'un parc nucléaire abondant. Les efforts qui restent à mener sont donc considérables. En effet, la part que représente actuellement l'électricité dans les énergies primaires reste modérée (20 % dans le monde et 30% en France) mais est appelée à fortement croître.

Concernant l'électricité, la situation en France est très différente de celle du monde en général, avec une part particulièrement faible de moyens mettant en œuvre des combustibles fossiles. La décarbonation totale de la production d'électricité est donc pratiquement atteinte en France avec la répartition actuelle renouvelables-nucléaire. Toutefois les questions qui restent ouvertes sont :

- cette répartition renouvelables-nucléaire doit-elle évoluer : si oui : pourquoi et comment ?
- comment va évoluer la consommation d'électricité, notamment du fait de l'électrification souhaitée pour la société, et quel est le mix électrique le plus pertinent ?
- quels sont les impacts de l'intégration du système électrique français au système européen ?

Ce sont ces questions qui vont faire l'objet d'une analyse dans les paragraphes suivants, dans l'optique de la place respective des renouvelables et du nucléaire.

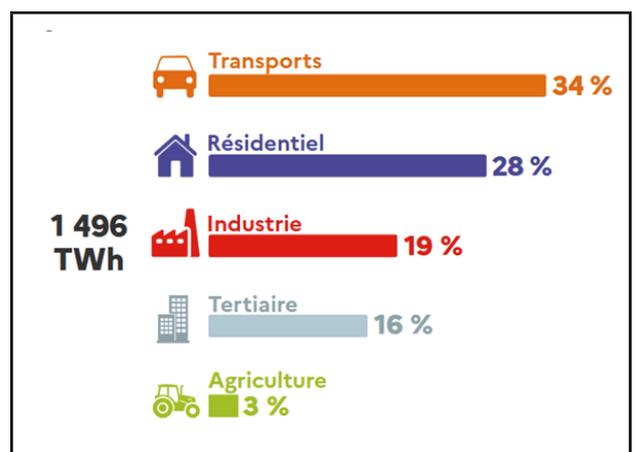
2. LES VOIES DE DÉCARBONATION POUR LES PRINCIPAUX SECTEURS ÉCONOMIQUES ET LA PLACE DE L'ÉLECTRICITÉ DANS CE CADRE

2.1. RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PAR GRANDS SECTEURS ÉCONOMIQUES

Pour la France, elle est donnée dans la figure 1 ci-contre.

Cette figure montre que, en dehors de l'agriculture qui est minoritaire, les efforts de décarbonation notamment via l'électrification des usages, doivent porter sur l'ensemble des secteurs économiques et impacteront nos sociétés et nos modes de vie en profondeur.

Figure 1 : Répartition de la consommation d'énergie primaire par secteur économique en France ▶
(données 2023)



2.2. LES TRANSPORTS

La substitution des combustibles fossiles dans les transports pourra s'effectuer en utilisant 2 vecteurs énergétiques : l'électricité et l'hydrogène.

Pour les transports routiers l'utilisation de batteries électriques se développe rapidement. Elles présentent l'avantage de constituer un moyen de stockage embarqué qui permet de dissocier la période d'utilisation de la période de connexion au réseau nécessaire pour stocker l'électricité (sous forme d'énergie chimique). Toutefois le prix de ces batteries et l'autonomie qu'elles donnent restent un frein majeur pour ces applications. L'utilisation de piles à combustible nécessitant le stockage d'hydrogène à bord des véhicules est l'autre piste pour la décarbonation. Techniquement les technologies nécessaires pour la production et le stockage de l'hydrogène, puis la fabrication et l'utilisation des piles à combustible, sont disponibles.

Toutefois il apparaît que les thématiques de la distribution de l'énergie (électricité ou hydrogène) comportent des difficultés tant techniques (mise en place des circuits de distribution en parallèle de ceux existants, pics de consommation pour les recharges électriques) que sociétales (dangers intrinsèques du stockage de l'hydrogène, autonomie des batteries, remises en cause des habitudes de circulation).

Le passage à une motorisation électrique conduit, en théorie, à une forte baisse des émissions de CO₂, même si on intègre l'ensemble du cycle de vie (fabrication, extraction des matières premières). Il convient toutefois de veiller à ce que les moyens de production de l'électricité ou de l'hydrogène soient eux-mêmes décarbonés, ce qui est actuellement loin d'être le cas dans de nombreux pays. Dans ce cas, l'augmentation de la part des EnRi dans le mix énergétique constitue une bonne solution à ce problème, si la capacité de production est cohérente avec les besoins de consommation (puissance et énergie appelées, chronologie). Ce point ne devrait pas poser de problèmes majeurs à court terme, mais pourrait conduire à mettre en place à moyen terme des mesures de contrainte en cas d'une très forte augmentation du nombre de véhicules électriques : nombre de recharges autorisées, taxation spécifique de l'électricité consommée pour les recharges, horaires des recharges.

La décarbonation de la propulsion des moyens de transport maritime se heurte aux grandes quantités d'énergie à stocker sous forme chimique (hydrogène) ou directement électrique, du fait de l'importance des masses à propulser et de la longueur des parcours. Le stockage à bord de l'énergie nécessaire à la propulsion paraît une solution complexe et coûteuse. Une solution intéressante serait l'utilisation de petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR), qui font d'ailleurs l'objet de plusieurs projets très avancés.

Concernant les transports aériens, le passage à la propulsion électrique avec stockage à bord se heurte d'abord à la question de la masse des moyens de stockage et donc du ratio masse/énergie stockée, pour lequel le kérosène est très performant. Sauf pour quelques applications spécifiques (avions légers de tourisme), le passage à la propulsion électrique paraît peu probable à moyen terme. Par contre le remplacement du kérosène par des biocarburants ou de l'hydrogène globalement moins polluants en GES sur l'ensemble du cycle (production + combustion) est prometteur et largement engagé.

Il ne faut pas oublier que si l'utilisation des vecteurs électricité et hydrogène a l'immense avantage de réduire fortement les sources de pollution de l'environnement, elle doit s'accompagner d'un cycle de fabrication également propre, ce qui est en général loin d'être le cas, que ce soit en termes de consommation de ressources naturelles (par nature limitées) ou de pollution de l'environnement. Concernant spécifiquement le cas de l'électricité, il faudra veiller à ce que les périodes de fortes demandes (recharge des batteries, électrolyse de l'eau pour l'hydrogène) coïncident avec les périodes de forte production ou de déstockage, notamment pour les moyens intermittents (EnRi).

Globalement, il est certain que la consommation d'électricité pour les transports continuera d'augmenter très fortement et pourrait constituer dans 20 ans l'un des principaux secteurs consommateurs, contrairement à la situation actuelle.

2.3 LE RÉSIDENTIEL

La capacité à maintenir un environnement agréable dans les habitations (température de l'air et eau chaude sanitaire) est fortement consommatrice d'énergie (gaz, fioul, électricité). Il s'agit là d'un paramètre important pour l'équilibre de nos sociétés, que ce soit en hiver (chauffage) ou en été (climatisation), etc. Les pompes à chaleur (pàc) air-air se répandent, en produisant selon la saison du froid ou de la chaleur, mais il ne faut pas oublier que ces dispositifs utilisent de l'électricité et que leur rendement global baisse quand la différence de température entre la source froide et la température visée augmente.

La meilleure efficacité est obtenue avec la géothermie de surface et la thalassothermie, qui fournissent pour l'hiver une source tiède, et l'été une source fraîche, avec une pàc chaleur eau-eau dont le rendement est supérieur à celui d'une pàc air-air mais dont l'installation est beaucoup plus complexe.

Cette consommation d'énergie peut être réduite en développant l'efficacité de l'isolation, en réduisant la température intérieure visée en hiver, et en améliorant les moyens de chauffage ou de climatisation passifs (chauffage solaire par exemple) via des incitations financières.

Il est certain que globalement les besoins en électricité pour domestique vont augmenter, notamment dans les pays utilisant beaucoup de combustibles fossiles pour ces usages. La situation de la France est différente puisque le chauffage électrique et plus récemment la climatisation reposent déjà beaucoup sur l'électricité, ceci depuis les années 70 avec la construction d'un parc électronucléaire important.

À noter que dans les pays de l'ex-URSS et d'Europe de l'Est, le nucléaire est utilisé couramment et depuis longtemps comme moyen de chauffage via des réseaux urbains, en récupérant une partie de l'énergie thermique non utilisée pour la production d'électricité (qui représente 2/3 de l'énergie produite lors des réactions de fission). Cette approche voit d'ailleurs un regain d'intérêt avec les SMR qui pourraient être implantés à proximité immédiate des besoins, sans requérir de longs réseaux de transport de chaleur dont les pertes peuvent être rédhibitoires

2.4. L'INDUSTRIE

Au XIX^{ème} siècle, la révolution industrielle s'est fondée sur la machine à vapeur fonctionnant au bois puis au charbon, et sur la production d'acier. Au XX^{ème} siècle, des efforts importants d'économie d'énergie ont déjà été réalisés, par exemple lors de la « chasse au gaspi » des années 1970 – 80. Au XXI^{ème} siècle, en France, la désindustrialisation fait qu'on n'attend pas de hausse importante de consommation d'énergie, ni – à court terme – de progrès significatif en matière de décarbonation. Il est donc probable que la consommation d'électricité n'évoluera pas significativement dans ce vaste secteur.

La question qui reste ouverte est plutôt l'ajustement imposé de la consommation électrique de ce secteur en fonction de l'état du système électrique notamment en période de déséquilibre production-consommation. Cette question n'est plus une simple hypothèse puisque ces « ajustements » ont déjà lieu depuis plusieurs années, notamment en hiver. La demande en électricité pour ce secteur est donc appelée à croître modérément dans les années à venir.

2.5. LE TERTIAIRE

Ce secteur recouvre un vaste champ d'activités qui s'étend du commerce à l'administration, aux activités financières et immobilières, aux services aux entreprises et aux particuliers, à l'éducation, à la santé et à l'action sociale. L'électrification des usages est, dans ce domaine, largement engagée. Les infrastructures informatiques, quant à elles, voient leurs besoins en électricité croître fortement, notamment à cause du développement des data centers.

Ces derniers requièrent de grandes quantités d'électricité, souvent de manière continue (pour le refroidissement par exemple), avec une très bonne garantie de disponibilité. Si des EnRi sont envisagés (parc photovoltaïque par exemple) pour produire cette électricité, ils devront être accompagnés de grandes capacités de stockage. L'implantation de SMR à proximité est une solution prometteuse car elle présente l'avantage d'un facteur de charge élevé.

2.6. L'AGRICULTURE

Ce secteur est à même de produire une partie de l'énergie dont elle a besoin en interne (biomasse pour la chaleur, agro-carburant pour les transports, éoliennes pour les besoins mécaniques (irrigation) et solaire photovoltaïque (PV) pour le contrôle-commande des procédés, voire l'injection d'électricité dans les réseaux.

Ce secteur reste cependant encore très dépendant des combustibles fossiles pour la propulsion de ses équipements lourds (tracteurs et machines agricoles) et le chauffage de certains grands équipements (serres, étables, séchage) pour lesquels des solutions techniques « décarbonées et notamment électriques » existent ou existeront à moyen terme, mais dont les coûts en investissement seront difficiles à supporter.

2.7 SYNTHÈSE SUR L'ÉVOLUTION DES BESOINS EN ÉLECTRICITÉ

Des solutions techniques existent dans la plupart des cas pour décarboner nos sociétés, que ce soit pour l'industrie ou les besoins des citoyens : pour cela il « suffit » de convertir tous les dispositifs qui utilisent de l'énergie à l'utilisation de l'électricité (directement ou via l'hydrogène utilisé comme moyen intermédiaire de stockage), en complétant avec la biomasse et la géothermie, quand c'est rentable.

De ce fait, la consommation d'électricité devrait fortement augmenter dans les années à venir. Toutefois on peut s'interroger sur la stagnation de cette consommation constatée ces dernières années (en tout cas dans les pays occidentaux), qui s'explique déjà par une activité économique peu dynamique et peut être aussi par des difficultés plus grandes que prévues pour électrifier massivement nos sociétés.

3. LA PLACE DES ENRI DANS LE MIX ÉLECTRIQUE

Le mix électrique décrit la manière dont les différents moyens de production de l'électricité sont employés dans un pays. A ce titre il est intéressant de comparer la situation dans 2 pays qui ont fait, depuis longtemps, des choix politiques très différents :

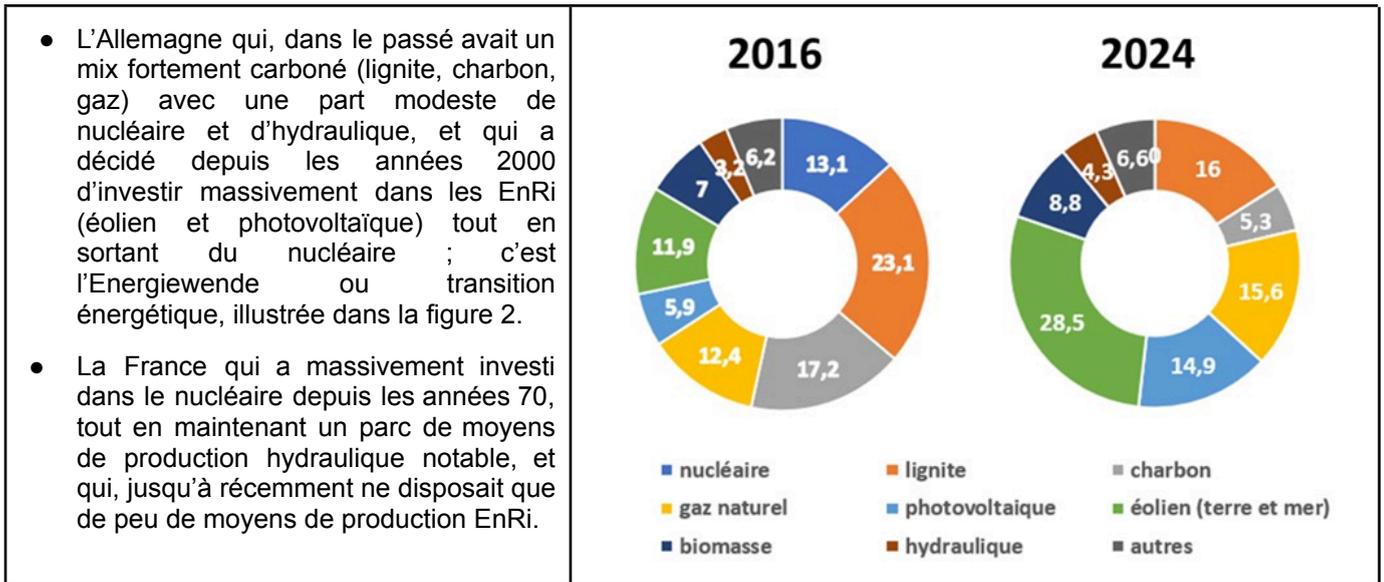
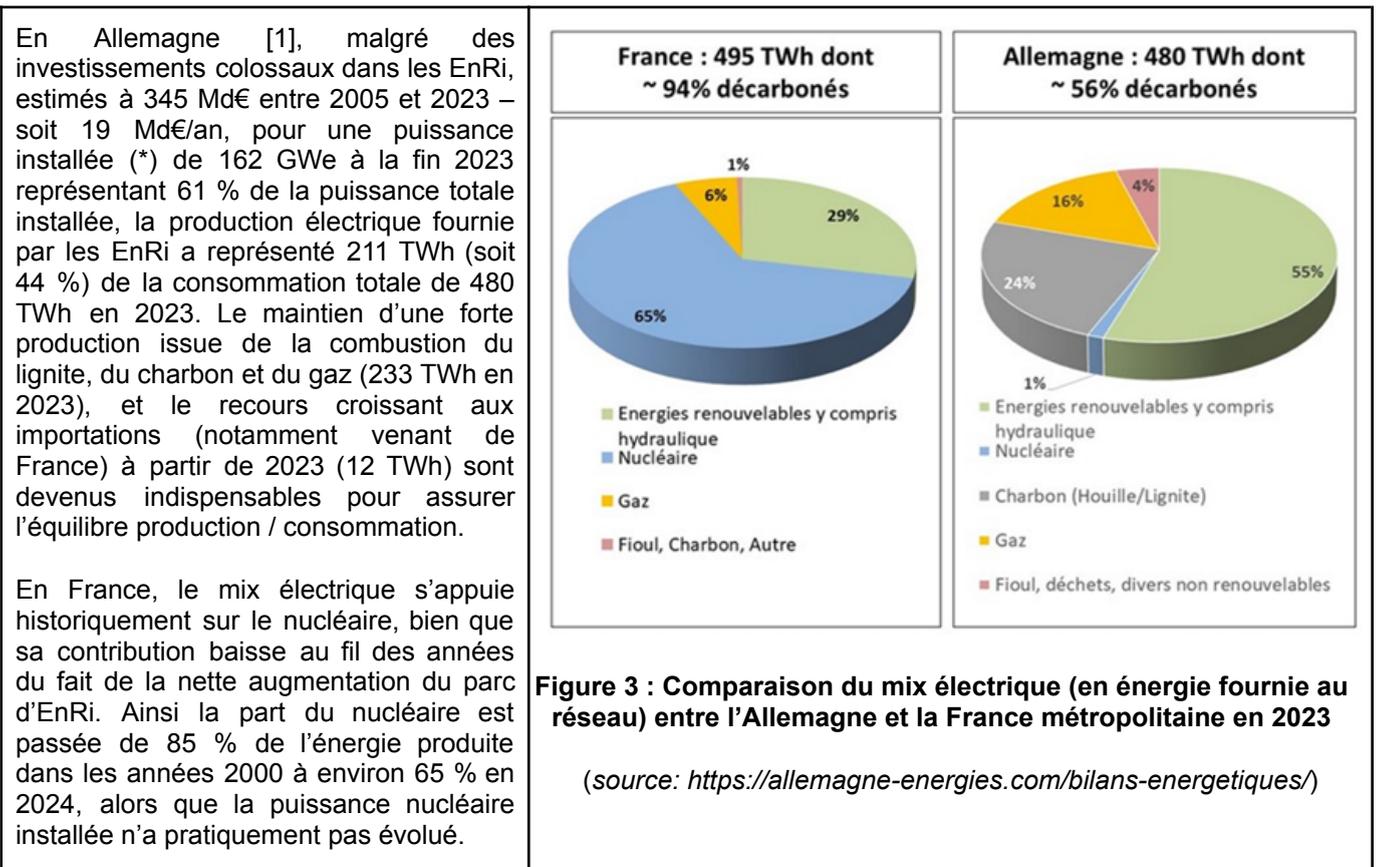


Figure 2 : Illustration de l'Energiewende : évolution du mix électrique en Allemagne (en % de la puissance installée totale) entre 2016 et 2024

source : <https://allemagne-energies.com/tournant-energetique/>

La figure 3 illustre l'impact de ces 2 configurations très différentes sur la production réelle.



(*) : Quand on compare les puissances installées, il faut avoir en tête que pour les EnRi, la puissance moyenne produite est très largement inférieure à la puissance installée (qui est assimilable à une puissance crête) ; le ratio, appelé facteur de charge, est de l'ordre de 0.2 à 0.3 suivant la filière. Pour les moyens pilotables il est proche de 1, quand le moyen est en service.

4. IMPACT DES ENRI SUR LES ÉMISSIONS DE CO2 LORS DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Cet impact est directement lié à la part des moyens dits « bas-carbone » (EnRi, biomasse, hydraulique, nucléaire) dans le mix énergétique.

Si l'objectif est de décarboner la production électrique, c'est déjà fait en France (avec environ 45 g de CO₂ émis par kWh), ce qui place la France, avec la Suède et la Norvège (hors UE), très en avance sur les autres pays de l'Europe. De ce point de vue, la France n'a pas besoin de moyens EnRi supplémentaires pour décarboner encore plus sa production d'électricité tant que son parc nucléaire sera maintenu à son niveau de puissance actuel (voir figure 4).

En Allemagne par contre, l'obligation de recourir pour environ 40% de la production électrique à des moyens carbonés (lignite – charbon – gaz) malgré un parc de moyens EnRi imposant en termes de puissance installée, et ceci pour compenser leur intermittence, conduit pourtant à des émissions de l'ordre de 380 g de CO₂ par kWh. Cela illustre la pertinence de la question de la complémentarité entre les EnRi et les moyens de production d'électricité pilotables.

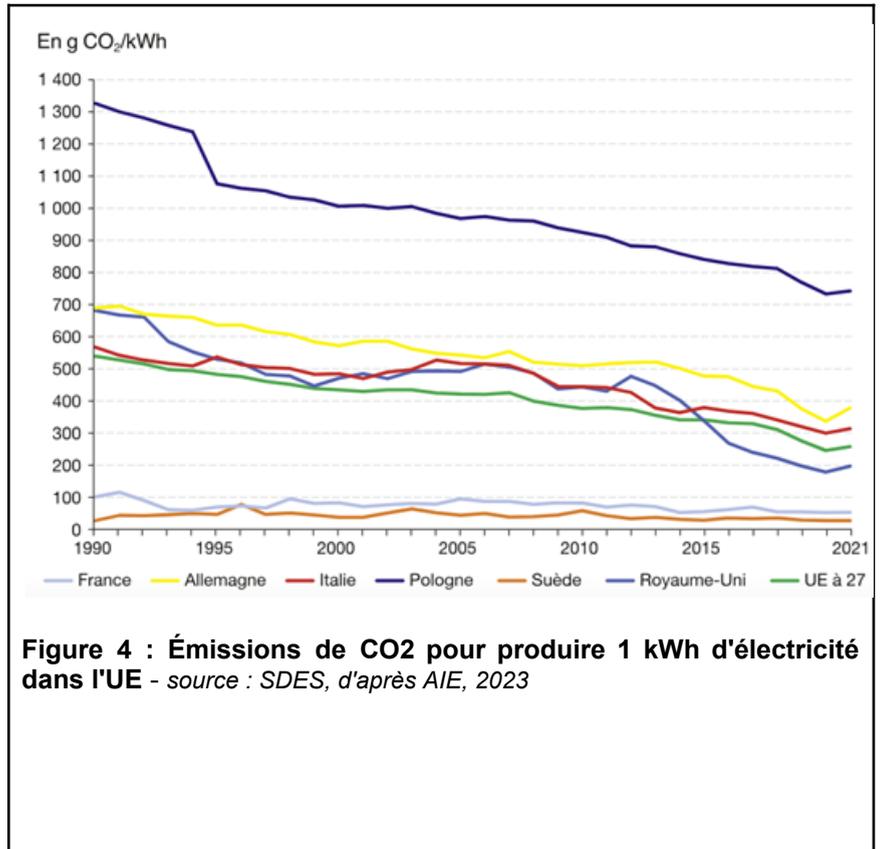


Figure 4 : Émissions de CO₂ pour produire 1 kWh d'électricité dans l'UE - source : SDES, d'après AIE, 2023

4. DANS QUELLES CONDITIONS RENOUVELABLES ET NUCLÉAIRE SONT-ILS COMPLÉMENTAIRES ?

4.1. LIMITES PHYSIQUES CONCERNANT L'INTRODUCTION DES ENRI DANS LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

L'introduction d'électricité fournie par des moyens intermittents dans le réseau électrique a des limites physiques, faute de la disponibilité de moyens de stockage avec des capacités suffisantes (en puissance crête et en énergie restituable). Ces limites sont liées à la nécessité d'équilibrer en permanence le réseau électrique (voir **fiches argumentaires GAENA** "[Intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le système électrique](#)" et "[Equilibre du réseau électrique](#)").

Cette question, très complexe, a été étudiée en détail par RTE [Réf. 1] et [Réf. 2], avec prise en compte de l'équilibre instantané et à moyen terme des réseaux français et européen. Ces études confirment que l'introduction de fortes capacités de sources intermittentes :

- ne réduit que faiblement la capacité nécessaire de centrales pilotables (d'où un double investissement pour la même production) ;
- ne peut dépasser 40 % de la production annuelle en Europe sans risquer de fragiliser le réseau, et à condition de respecter des taux instantanés d'électricité intermittente variant de 25 % pour des demandes faibles, à 35 % pour des demandes moyennes et à 70 % lors des pics de consommation ;
- rendrait nécessaire la maîtrise de l'écrêtage de la production intermittente imposée en période de surproduction, la réduction imposée de la consommation en période de sous-production et la mise en œuvre d'un stockage/déstockage d'électricité massif qui est techniquement irréalisable aujourd'hui. A ce sujet, plusieurs événements de surproduction des EnRi (alors que les autres moyens de production étaient tous à l'arrêt) sont intervenus à l'été 2024, obligeant à imposer l'arrêt de certaines installations EnRi. Compte-tenu de l'augmentation qui se poursuit de la puissance installée de ces EnRi, ces événements devraient se multiplier à l'avenir, ce qui mettra en péril la viabilité économique de ces installations à cause de la baisse du coefficient de charge qu'ils entraînent.

L'électricité d'origine intermittente est principalement injectée dans le réseau de distribution moyenne et basse tension d'ENEDIS et non dans le réseau de transport haute tension de RTE. Or ce dernier est maillé et permet de distribuer le courant dans toutes les directions (le soleil est au sud et l'éolien surtout dans le nord), le premier est étoilé et donc conçu pour véhiculer le courant dans un seul sens. Les productions solaires et éoliennes injectées dans le réseau ENEDIS doivent être en grande partie refoulées dans le réseau RTE faute d'usages locaux, pour être utilisées dans d'autres régions ou dans d'autres pays (exportations).

C'est donc une refonte importante des réseaux qui doit être engagée pour accompagner la croissance des EnRi. Une étude récente [Réf. 3] de RTE a chiffré les investissements nécessaires pour adapter son réseau à l'impact de la croissance des EnRi et des flux transfrontaliers, à 53 Md€ d'ici 2040. Le mode de financement de ces investissements n'est pas connu, mais devrait d'abord être répercuté sur les producteurs d'électricité responsables de cette situation et probablement aussi sur les consommateurs.

Il y a donc des limites physiques à l'introduction des EnRi dans le réseau. En l'absence à court-moyen terme de moyens de stockage suffisants de l'électricité, le parc d'EnRi doit être complété par des sources pilotables, de préférence bas-carbone : soit renouvelable (hydraulique), sinon recyclable (nucléaire), ou neutre en carbone (biomasse). Il faut en effet rappeler le risque que constitue un effondrement généralisé du réseau (*blackout*) : le coût annuel pour la France serait de 7,6 Md€¹(comparable au coût de construction d'un EPR-2 dont la durée d'exploitation sera a minima de 60 ans).

C'est pourquoi les Allemands ont maintenu leur parc de centrales thermiques ; ainsi, à la fin 2023, la puissance installée de ces parcs était encore de 85 GWe alors que celles des EnRi était de 152 GWe. Ces chiffres sont à comparer à la puissance délivrée au réseau qui a été en 2023 de respectivement 192 TWh pour les centrales thermiques et 260 TWh pour les EnRi.

4.2. UTILISATION DES EnRi POUR PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ

Les EnRi ne pouvant alimenter à elles seules un réseau stable et pertinent (fournir à tous moments une électricité avec les bonnes caractéristiques physiques : tension, fréquence, puissance), il y a quatre possibilités pour accompagner la poursuite de l'augmentation des capacités installées de ces moyens de production (à consommation à peu près constante) :

- Limiter ces nouvelles capacités de production EnRi à l'autoconsommation : c'est possible pour l'agriculture, qui est une activité diurne. C'est aussi la solution pour les sites isolés (îlots, refuges de montagne, etc.) en complétant avec des batteries, ce qui limite pratiquement (pour des raisons de capacités de stockage et de coûts) la consommation à l'éclairage et à l'alimentation de l'électronique.
- Compléter avec des moyens de production renouvelables et pilotables : hydraulique, biomasse. Ces ressources dépendent des conditions locales : la Norvège, très équipée en hydraulique, peut facilement subvenir aux défaillances des éoliennes danoises, mais tous les pays ne sont pas montagneux et bien arrosés. La biomasse, pour être durable, est limitée par son renouvellement qui doit justifier sa neutralité à moyen terme ; en Allemagne, où elle est fortement développée, elle ne représente pourtant que 7 % de la production d'électricité.
- S'assurer de la disponibilité de moyens de production pas nécessairement renouvelables, mais pilotables (nucléaire), voire même non renouvelables et fossiles après qu'une étude avantages/inconvénients ait montré que leur coût (production + investissements) est inférieur à leurs coûts environnementaux (fortes émissions de CO2 pendant des périodes très courtes)
- Disposer de moyens de stockage de capacité suffisante (voir la [fiche argumentaire GAENA "Stockage de l'énergie électrique"](#)) pouvant être :
 - des STEP, dont la technologie et les coûts sont bien maîtrisés, mais dont toute nouvelle installation semble compliquée du fait de leur impact sur l'environnement et les populations,
 - des batteries quand les technologies mises en œuvre auront prouvé leur efficacité : coûts en €/kWh, capacité restituable en MWh, puissance crête restituable en MWe, coût environnemental des matériaux constitutifs nécessaires, durée de vie,
 - voire ultérieurement une production d'hydrogène; puis de passage dans des piles à combustible quand le rendement global aura été jugé satisfaisant (rendement énergétique, impact environnemental).

4.3. LA COEXISTENCE DES EnRi AVEC LE NUCLÉAIRE EST ELLE POSSIBLE ?

En France, et dans de nombreux pays, les EnR en général et les EnRi en particulier ont la priorité d'accès aux réseaux électriques de distribution. Ceci à 3 conséquences :

¹ Energie Institut, Johannes Kepler Universität, Linz, Autriche.

- Les autres moyens de production, pour la plupart pilotables, doivent s'effacer (réduire ou arrêter leur production) dans les périodes de risque de surproduction. Il convient de noter que le parc nucléaire français a été conçu, dès les années 1990, pour fonctionner en suivi de charge. À cette époque le parc nucléaire produisait environ 75 % de la consommation électrique du pays, et il s'agissait d'adapter la production aux variations de la consommation, en grande partie prévisibles. Cette époque est révolue, car il s'agit maintenant de s'adapter à des variations rapides et de grande ampleur provoquées par l'intermittence des EnRi. Cela est clairement illustré par la figure 5 .

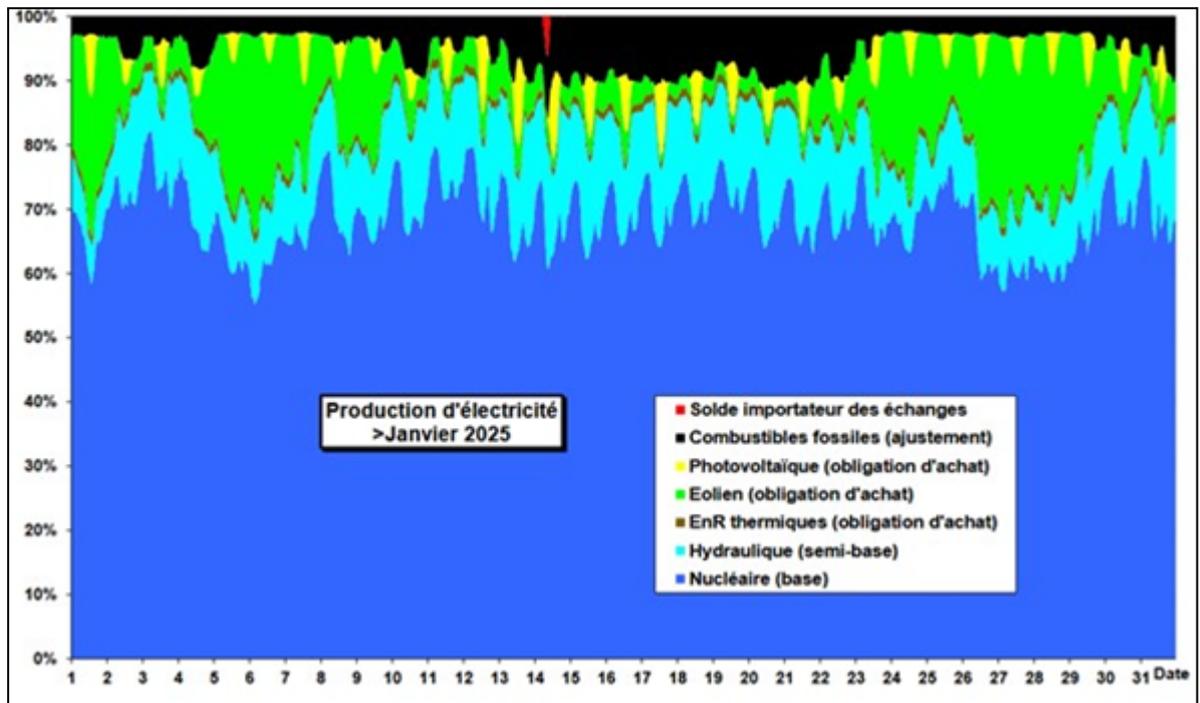


Figure 5 : Fluctuations comparées (en % de l'énergie électrique produite par pas de 30') des différents moyens de production au mois de janvier 2025 en France. Source : JP Hulot à partir des données de RTE

Commentaire : Sur une période de 1 mois la production éolienne a fluctué d'un facteur supérieur à 8, avec des variations de puissance équivalente de l'ordre de 10 GW en quelques heures (l'équivalent de 6 à 8 réacteurs nucléaires). Grâce aux moyens pilotables (essentiellement l'hydraulique et le nucléaire) la stabilité du réseau a pu être maintenue, sans quasiment avoir à recourir aux importations - sauf quelques heures le 15/01 pendant lesquelles la production éolienne a complètement disparu. Les périodes du 1^{er} au 10 janvier et du 26 au 31 janvier illustrent clairement l'anti-corrélation EnRi-(nucléaire + hydraulique).

La période du 12 au 21 janvier est caractéristique d'une période anticyclonique sur l'Europe de l'Ouest conduisant à une production éolienne très basse (réduction d'un facteur 5 de la puissance équivalente) et à une production solaire parmi les plus fortes du mois. Malgré ces grandes fluctuations, la réalité technique et l'efficacité de ce suivi de charge par les moyens pilotables (et en partie grâce au secours des combustibles fossiles) est donc largement démontrée.

- Les contreparties de ce suivi de charge sont des sollicitations mécaniques et thermiques importantes et imprévisibles des moyens de production (surtout nucléaires) lors des transitions de puissance qui peuvent atteindre en quelques dizaines de minutes plusieurs dizaines de % de la puissance nominale de certains réacteurs. Ce type de variations est pris en compte dans les dossiers de sûreté acceptés par l'ASNR. Toutefois l'amplitude et le nombre de ces sollicitations augmentent avec la croissance de la part des EnRi dans le mix électrique. A terme (quelques années avec la croissance prévue des EnRi) cette situation ne sera plus soutenable pour le parc nucléaire, et en partie pour l'hydraulique avec un risque de vidange totale des réserves en eau en période hivernale (donc sans possibilité de recharge).
- Contraintes financières et rentabilité

Ce mode de fonctionnement qui privilégie (techniquement et financièrement) les EnRi par rapport aux moyens pilotables ne pourra pas être maintenu longtemps. Une refonte complète de la réglementation et des modes de financement et de rétribution des différents moyens de production devra rapidement intervenir. Elle devra concerner :

- ❖ L'abolition de la priorité absolue et sans contreparties donnée aux EnRi pour injecter leur production dans le réseau électrique ;
- ❖ L'obligation de respecter les injonctions de RTE et de Enedis pour écrêter volontairement et sans indemnisation les surplus de production d'EnRi en l'absence de la mise en place de moyens de stockage

suffisants. Il est à noter que les premières injonctions de ce type ont été émises à l'été 2024 avec la fermeture d'un parc photovoltaïque dans les Landes pendant quelques heures ;

- ❖ La prise en charge par les EnRi d'une juste quote-part des dépenses et des investissements que leur mode de fonctionnement i
- ❖ impose au réseau électrique. Cela concerne :
 - la mise en place et l'exploitation de moyens de stockage pour limiter les fluctuations rapides d'énergie injectée dans le réseau,
 - la mise à niveau des moyens techniques (réseaux et centres de distribution) permettant d'assurer la mise en relation entre les sites de production (très dispersés pour les EnRi et très centralisés pour le parc nucléaire) ainsi que l'augmentation des flux transfrontaliers et de transit (il s'agit des flux provenant d'une région d'un pays tiers à destination d'une autre région du même pays, mais transitant par la France),
 - la mise en place des moyens techniques permettant d'assurer la stabilité des paramètres du réseau.
- La refonte des modes de rémunération des producteurs d'électricité pour se rapprocher de la réalité des coûts complets de production-distribution et de la situation du marché (sur-production / sous-production). Dans ce contexte, la notion de prix plancher/prix plafond devra être revue.

L'ensemble de ces mesures, indispensables du point de vue technique, obligeront à une remise à plat des notions de coût réel et de rentabilité des différents moyens de production d'électricité.

5. QUELQUES RÉFLEXIONS EN GUISE DE CONCLUSION

L'énergie électrique produite par les EnRi et les autres moyens de production est globalement compatible avec les besoins, mais les pics de production ne coïncident pas en général avec les pics de consommation. Il n'est donc pas surprenant que leur insertion dans le réseau électrique soit complexe et coûteuse, mais surtout qu'elle fragilise l'équilibre des réseaux régionaux, français et européens, ainsi que l'intégrité technique et financière des moyens de production pilotables destinés à compenser l'intermittence. Ceci est particulièrement vrai pour le parc nucléaire français. Il faut maintenir en Europe une réserve de production pilotable importante pour l'hiver, ce qui revient à doubler en grande partie les investissements.

Cette réserve de production devrait être très majoritairement constituée par des moyens non carbonés. Pour la plupart des pays européens, avancés techniquement, la mise en place, la prolongation ou le renforcement d'un parc nucléaire devrait être une solution à privilégier. En parallèle, le renforcement des moyens hydrauliques de production ou de stockage (STEP) devrait être envisagé quand la configuration du pays le permet.

Si pour raisons politiques ou techniques aucune de ces solutions n'est possible, la résolution du problème de l'intermittence des EnRi aboutit à une impasse. Cette configuration est bien illustrée par l'Allemagne qui, malgré des investissements colossaux pour la mise en place d'EnRi depuis plus de 20 ans destinés à atteindre l'objectif d'une production d'électricité 100% décarbonée en 2050 mais sans nucléaire, le pays a été contraint de maintenir un parc de production très carboné (gaz, charbon, lignite) pour compenser l'intermittence. Même si la stabilité du réseau électrique est maintenue pour l'instant, elle a montré ces dernières années l'échec auquel elle a conduit ce pays, incapable de tenir ses engagements en matière de réduction de ses émissions de CO₂, qui doit compter de plus en plus sur des importations (notamment venant du parc nucléaire français !) pour équilibrer à tous moments sa production avec sa consommation.

La situation en France est inverse : les investissements réalisés pour disposer de moyens de production pilotables (essentiellement nucléaire et hydraulique) ont été réalisés il y a longtemps et sont largement amortis. A la fin 2024, ils représentaient une puissance installée de 87 GWe, soit 57% de la puissance totale installée (152 GWe), pour une puissance maximale consommée équivalente à environ 80 GWe. La puissance installée des EnRi était d'environ 47 GWe à la fin 2024, en progression d'environ 5 GWe par an. Une utilisation rationnelle des parcs existants devrait raisonnablement conduire à ne pas poursuivre une rapide augmentation des parcs d'EnRi.

Dans tous les cas, il reste à poursuivre l'adaptation des réseaux de transports et de distribution de l'électricité qui sont d'ores et déjà fortement impactés par les conséquences de l'intermittence des EnRi, et surtout à les financer.

Cette analyse fait écho à des prises de position récentes et très argumentées publiées ces derniers mois. On peut citer le rapport 2024 de l'inspection générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection d'EDF [Réf. 4], les tribunes d'un collectif d'anciens dirigeants de la filière nucléaire [Réf. 5] et de 80 parlementaires [Réf. 6], que l'on peut résumer par l'extrait suivant (provenant de [Réf. 4]) :

« L'arrivée massive de nouvelles sources d'électricité renouvelables (EnRi), à la fois intermittentes et prioritaires sur le réseau, a multiplié les variations de charge des sources de substitution. Ces sources ne sont pas sans risque sur la **sûreté du système électrique (dont le risque de black-out)** ni sans contraintes sur le fonctionnement de nos installations. À long terme, elles remettent en cause le modèle économique.

De souplesse de fonctionnement, la modulation s'est transformée en contrainte, le nucléaire devant faire face à la demande, seul ou avec l'hydraulique, sauf à se résoudre à employer des moyens thermiques et carbonés.

En outre, le suivi de charge a forcément un impact sur **la machine, plus fréquemment sollicitée par des cyclages profonds**. L'augmentation des fortuits n'est pas flagrante mais c'est dans la durée que les effets seront appréciés ».

Face à ces risques de nombreux spécialistes s'inquiètent des dangers de moduler le nucléaire avec les énergies intermittentes et du fait de la priorité de réseau dont elles bénéficient dans le marché européen de l'électricité. Ils dénoncent « L'illusion répandue par les rapports officiels de RTE que les énergies renouvelables intermittentes et l'énergie nucléaire seraient complémentaires ».

5. RÉFÉRENCES

[1] : bilan prévisionnel 2023-2035 de RTE :

<https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/les-bilans-previsionnels#Lebilanprevisionnel20232035>

[2] : équilibre du réseau électrique :

https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-06/FE2050%20_Rapport%20complet_SOMMAIRE.pdf

[3] : schéma de développement du réseau RTE

<https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-schema-decennal-de-developpement-du-reseau#DocumentsSDDR2025>

[4] : rapport de l'IGSNR d'EDDF : <https://igsnr.com/wp-content/uploads/2025/02/Rapport-IGSNR-2024.pdf>

[5] : lettre ouverte du collectif d'anciens dirigeants de la filière nucléaire :

https://www.lepoint.fr/debats/proglio-gallois-accoyer-leur-lettre-ouverte-a-michel-barnier-sur-la-politique-energetique-de-la-france-01-12-2024-2576794_2.php

[6] : tribune de 80 parlementaires

https://www.lepoint.fr/politique/politique-energetique-de-la-france-une-pause-s-impose-13-01-2025-2579792_20.php

[7] Transition énergétique : La France en échec. Gilbert BRUHL, Dominique GRENËCHE, Maurice MAZIÈRE, Patrick MICHAILLE, Jean-Pierre PERVÈS, Jean-Pierre SCHWARTZ.

[8] [Fiche argumentaire GAENA "Équilibre du réseau électrique"](#)

[9] [Fiche argumentaire GAENA "Intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le réseau électrique"](#)

[10] [Fiche GAENA "Stockage de l'énergie électrique"](#)