

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA

Groupe Argumentaire sur les Énergies Nucléaire et Alternatives

L'ÉQUILIBRE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ

La caractéristique essentielle d'un système électrique est de devoir assurer en permanence l'équilibre du réseau :

production = consommation

Il est difficilement concevable que chaque consommateur puisse assurer son propre équilibre production - consommation.

Les réseaux permettent d'assurer :

- la mutualisation ;
- l'optimisation ;
- la solidarité entre les consommateurs.

Depuis de nombreuses années les producteurs européens se sont regroupés. Au fil du temps le regroupement s'est élargi. Actuellement l'ENTSO-E¹ regroupe 34 pays interconnectés, ce qui donne au réseau une grande stabilité.

Une condition de fonctionnement du réseau est que l'équilibre soit réalisé instantanément sur l'ensemble du réseau.

Un indice du déséquilibre est la variation de la fréquence, qui est régulée en Europe à 50 Hz.

La balance consommation – production (voir figure 1 ci-contre) induit une baisse de fréquence si la consommation l'emporte sur la production, et réciproquement. Les marges sont faibles : $\pm 0,5$ Hz en fonctionnement normal, avec des marges ultimes de $\pm 1,0$ Hz. La première rétroaction est obtenue par l'inertie des masses tournantes couplées au réseau.

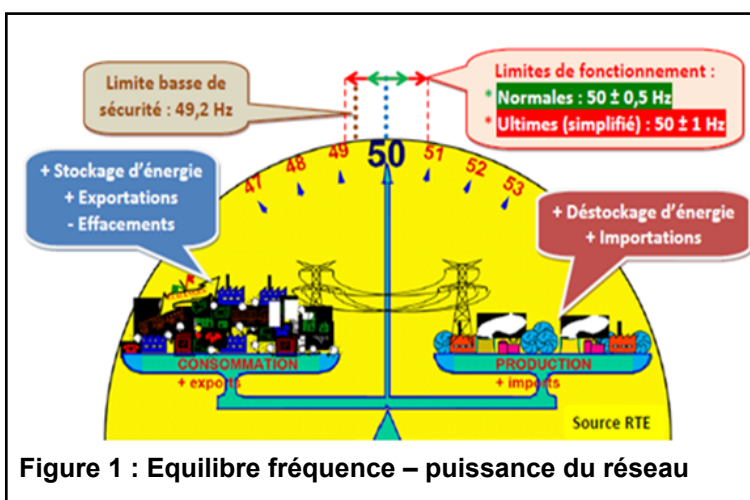


Figure 1 : Équilibre fréquence – puissance du réseau

Au-delà, il faut rééquilibrer le réseau en faisant intervenir les réserves de puissance (RP) ; elles sont classées : primaire, secondaire, tertiaire. Lors d'un déséquilibre, les premières secondes sont fondamentales pour éviter le « black-out ». Le « black-out » (« écroulement » du réseau) résulte d'un trop grand déséquilibre entre la production et la consommation, il peut être limité géographiquement (région ou pays) ou s'étendre à l'ensemble du réseau européen.

Les énergies renouvelables intermittentes (éolien et photovoltaïque) ne peuvent quasiment pas participer à l'équilibre du réseau. Une proportion importante de tels moyens de production dans le système électrique rend difficile le pilotage du réseau.

Une forte proportion de moyens de production intermittents nécessite le maintien d'une réserve de moyens de production pilotables, ce qui revient à augmenter fortement les investissements.

À noter que le nucléaire français participe activement à la régulation du réseau : un réacteur peut varier de 100 % à 20 % de sa puissance nominale en 30 min, ce qui représente une performance équivalente à celle d'une centrale à charbon. Avec ses 57 réacteurs situés au cœur de l'Europe, la France est un élément majeur de régulation du réseau de transport européen.

¹ ENTSO-E : European Network of Transmission System of Operators for Electricity.

2. INTRODUCTION

La caractéristique essentielle d'un système électrique est de devoir assurer en permanence l'équilibre du réseau :

production = consommation

Il est difficilement concevable que chaque consommateur ou producteur puisse assurer son propre équilibre production – consommation. Les réseaux permettent d'assurer :

- la mutualisation ;
- l'optimisation ;
- la solidarité entre les consommateurs.

Les réseaux publics permettent :

- de relier les producteurs aux consommateurs ;
- de secourir les zones en déficit de production par les zones en excès de production ;
- de mutualiser et d'optimiser les moyens de production grâce au foisonnement des consommations et aux effets de taille des moyens de production. Ce foisonnement permet de réduire fortement les investissements des moyens de production.

Il existe deux réseaux² (voir figure 2) :

- Le réseau **de transport** haute tension (HTB) et très haute tension (HTB2) est un réseau maillé qui relie les producteurs d'électricité aux consommateurs, soit directement, soit par l'intermédiaire du réseau de distribution. Il est géré en France par RTE (Réseau de Transport d'Électricité). RTE dispose d'un monopole pour le transport, il est le GRT (Gestionnaire du Réseau de Transport) français.
- le **réseau de distribution** moyenne (HTA) et basse (BT) tension est géré en France par ENEDIS (ex ErDF)³. C'est un réseau qui irrigue le territoire, ce réseau dessert le consommateur final, il reçoit également les productions intermittentes diffuses.

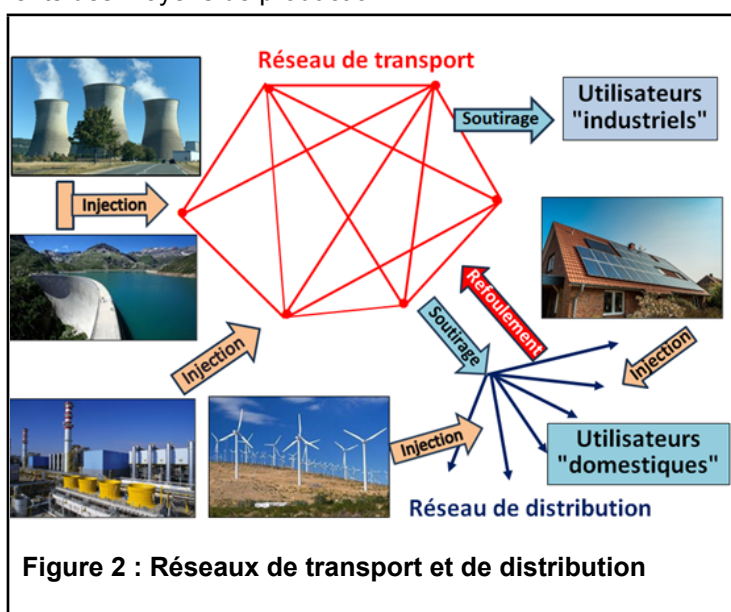


Figure 2 : Réseaux de transport et de distribution

2. L'ORGANISATION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE EUROPÉEN

Depuis de nombreuses années les producteurs européens se sont regroupés. Au fil du temps les regroupements (UCTE, NORDEL, UKTSOA, ATSOI) ont fusionné. Actuellement l'ENTSO-E⁴ (Voir figure 3) regroupe 34 pays de la plaque européenne interconnectés (42 GRTE⁵), ce qui donne au réseau une grande stabilité.

Par contre le risque de « black-out » (effondrement plus ou moins généralisé du réseau) peut se propager à une grande échelle.

Les pays membres de l'ENTSO-E se sont engagés à disposer de réserves de puissance permettant de pallier les défaillances de production ou du réseau (voir § 3).

Le réseau de transport français est très fortement connecté au réseau européen, la France disposant de plus de 50 interfaces avec ses voisins.

Le bon fonctionnement des réseaux nécessite la maîtrise des moyens de production, en particulier un parc de moyens de production pilotables important.

² Voir www.energethique.com : article GAENA N°35 : « Des smart grids, pour quoi faire ? »

³ Ainsi que par quelques ELD (Entreprise Locale de Distribution).

⁴ ENTSO-E : European Network of Transmission System of Operators for Electricity

⁵ Dans certains pays, comme l'Allemagne, il y a plusieurs GRT.

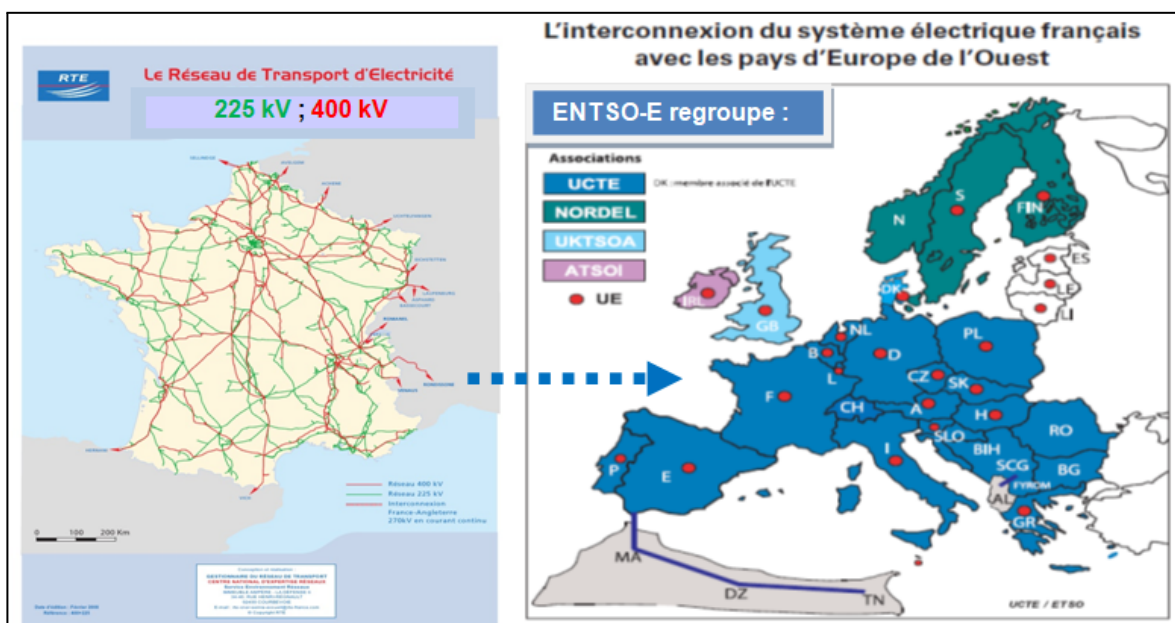


Figure 3 : Organisation du réseau électrique français et son interconnexion avec le réseau européen

3. L'ÉQUILIBRE PRODUCTION – CONSOMMATION

C'est une condition de fonctionnement du réseau : l'équilibre doit être réalisé instantanément sur l'ensemble du réseau.

Un indice du déséquilibre est la variation de la fréquence, qui est régulée en Europe à 50 Hz. La balance consommation – production (voir figure 4) visualise une baisse de fréquence si la consommation l'emporte sur la production, et réciproquement.

Les marges sont faibles : $\pm 0,5$ Hz en fonctionnement normal, avec des marges ultimes de $\pm 1,0$ Hz⁶.

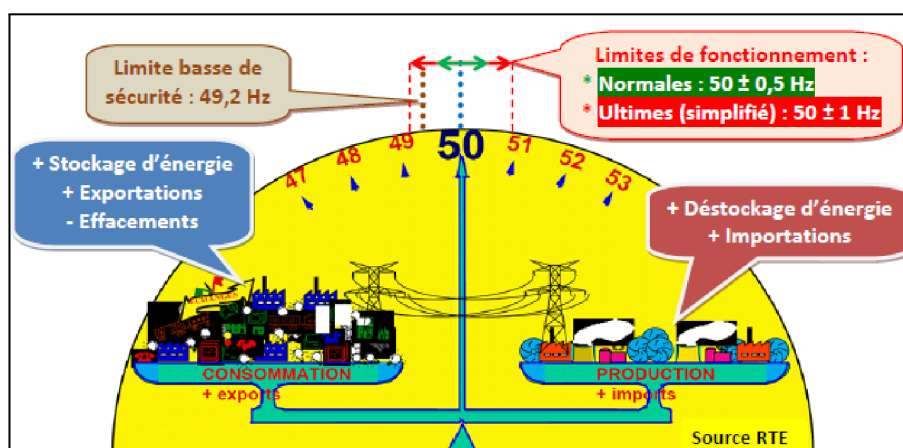


Figure 4 : Equilibre fréquence – puissance du réseau

Comment tenir la fréquence à l'intérieur des marges autorisées ? La première rétroaction est obtenue par l'inertie des masses tournantes couplées au réseau. Ce sont, pour 80 %, les groupes turboalternateurs (GTA) de production d'électricité, mus par la vapeur, le gaz ou l'eau et pour 20 % par les récepteurs (moteurs), essentiellement industriels.

La figure 5 en page suivante donne un exemple de variation de la fréquence, il s'agit de mesures faites au pas de 10 secondes pendant un mois. Ces mesures mettent en évidence des variations qui sont largement dans l'intervalle 49,5 Hz – 50,5 Hz.

⁶ Pour tenir compte de l'introduction des EnRi, l'ENTSO-E étudie la possibilité d'élargir un peu la norme : $50 \pm 1,0$ Hz en fonctionnement normal, avec un dépassement limité à 30 minutes.

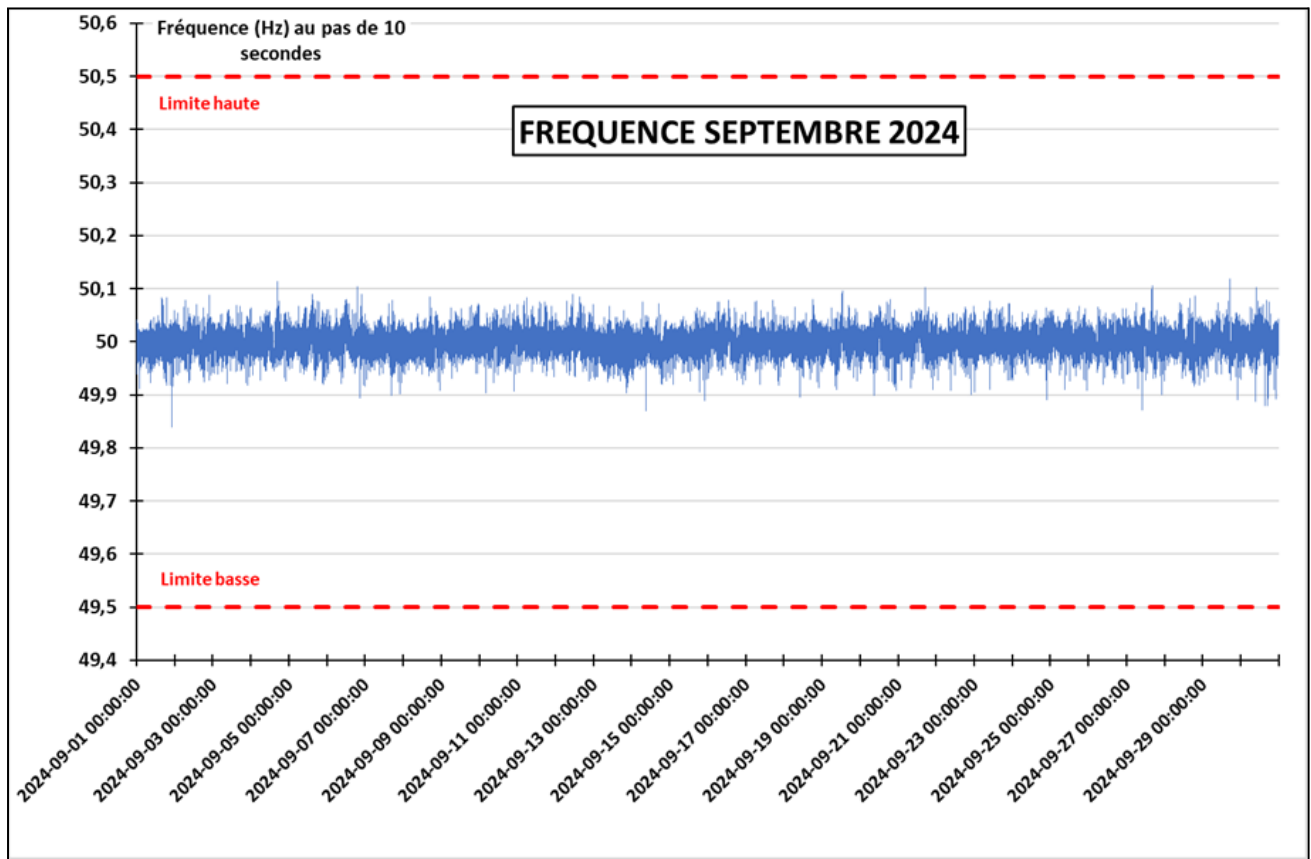


Figure 5 : Fréquence du réseau

La figure 6 met en évidence l'effet amortisseur de l'inertie sur la réponse du réseau en fréquence, dans le cas de la perte d'un moyen de production.

Au-delà, il faut rééquilibrer le réseau en faisant intervenir les réserves de puissance (RP) ; elles sont classées : primaire, secondaire, tertiaire.

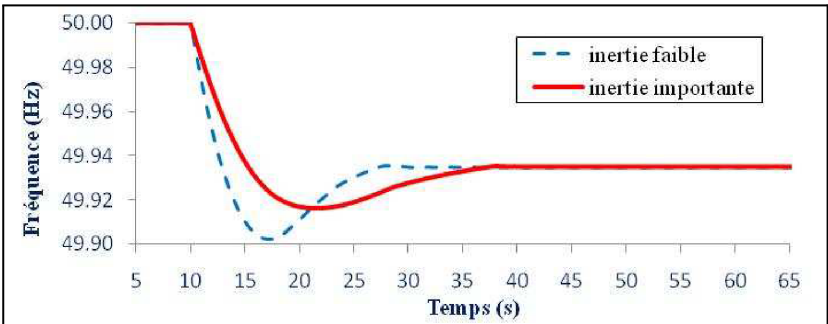


Figure 6 : Effet amortisseur de l'inertie sur la réponse du réseau en fréquence (Source EDF R&D)

Les premières secondes sont fondamentales pour éviter le black-out ; aussi, la réserve primaire réagit en moins de 30 s, les premières 15 s étant cruciales, pour redonner de la puissance. La réserve secondaire prend ensuite le relais pour ramener la fréquence à sa valeur nominale de 50 Hz en moins de 15 min.

Enfin, la puissance tertiaire reconstitue durablement les réserves primaires et secondaires, et permet aussi le suivi des grandes variations de charge.

Les causes de black-out sont nombreuses, par ordre croissant de risque elles sont : les moyens de productions pilotables, les postes électriques, les moyens de productions intermittents et les lignes aériennes.

La figure 7 montre le schéma d'évolution de la puissance produite et la réponse en fréquence du réseau lors d'une perturbation d'équilibre.

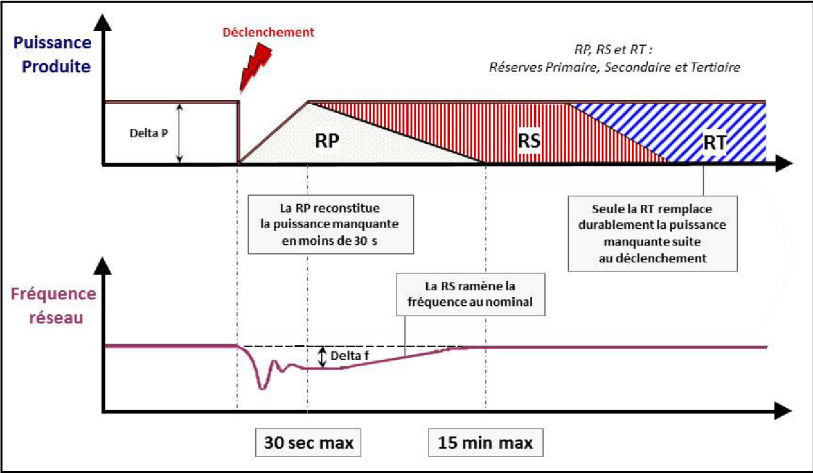


Figure 7 : Réactions des réserves primaires, secondaires et tertiaires suite à un incident sur le réseau

Le tableau 1 résume les capacités des moyens de production de participation aux différents niveaux de soutien au réseau.

Moyens de production	Possibilités de participation aux différents niveaux de soutien au réseau		
	Inertie	Réglage primaire	Garantie de réserve primaire pendant 15 min
Pilotables (nucléaire, hydraulique, fossiles)	OUI	OUI	OUI
Eolien	OUI en théorie (inertie synthétique)	OUI mais dissymétrique (uniquement à la baisse)	NON (sauf si stockage associé)
Photovoltaïque	NON	OUI mais dissymétrique (uniquement à la baisse)	NON (sauf si stockage associé)

Tableau 1 : Capacités des différents moyens de production au soutien du réseau

Quelques exemples d'incidents sur le réseau :

La figure 8 montre un exemple réel de perturbation liée à une perte de production de 2 800 MW sur le réseau européen, elle met en évidence la nécessité d'une réponse rapide des réserves de puissance.

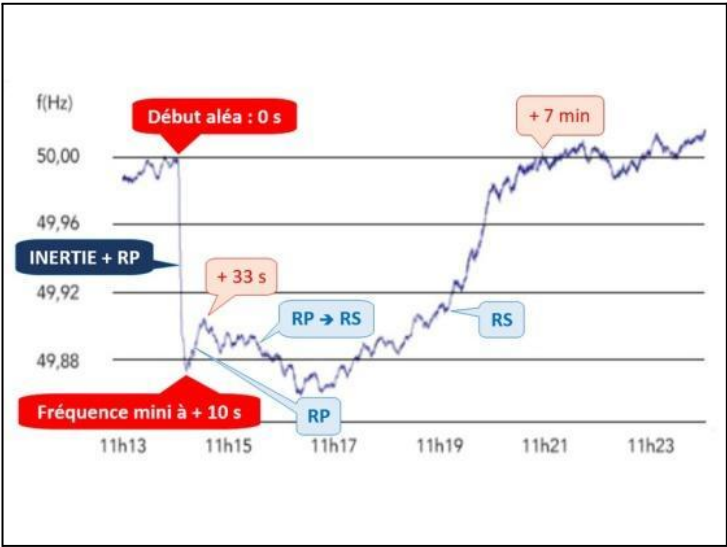


Figure 8 : Exemple réel de perturbation due à la perte de production de 2 800 MW

Un autre exemple est l'incident du 8 janvier 2021 survenu après une rupture des liaisons entre la zone sud-est et la zone nord-ouest de l'Europe. Cette rupture a entraîné l'isolement des deux zones pendant environ une heure (voir figure 9). Cet incident est décrit en détail dans l'article [GAENA n° 57](#) [Réf. 1].

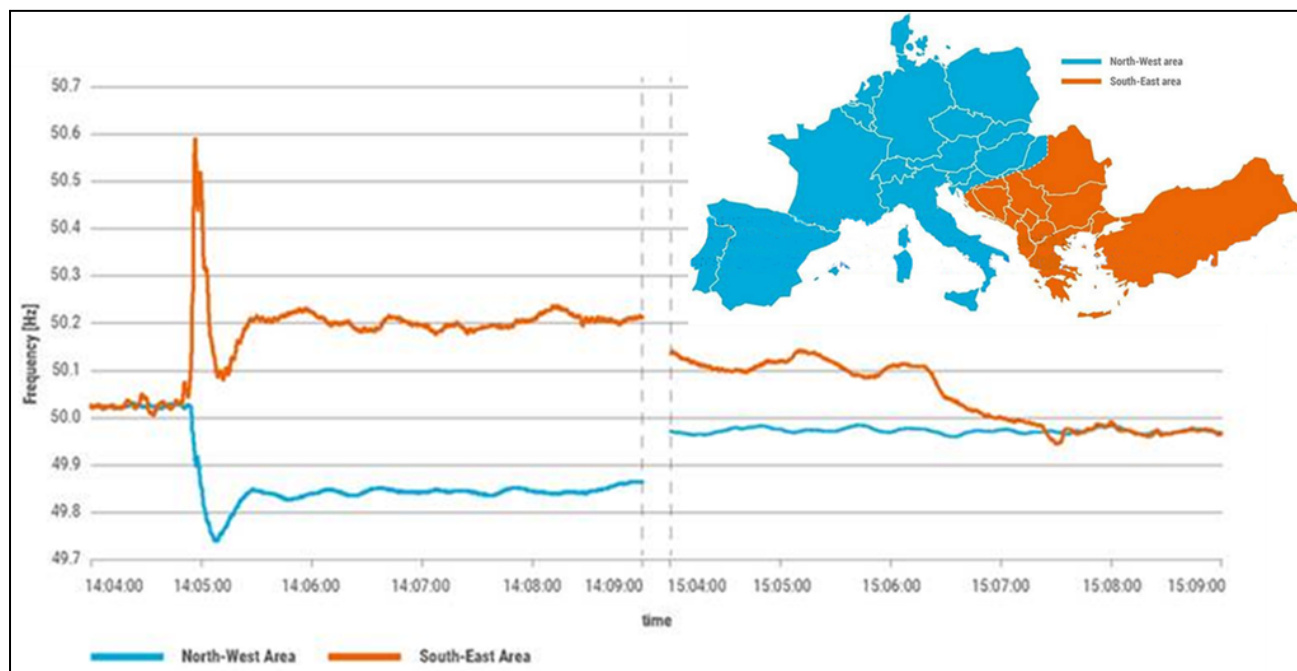


Figure 9 : Incident du 8 janvier 2021

Pour le « black-out » de la péninsule ibérique du 28 avril 2025 on ne connaît pas le détail des causes et de la chronologie des événements. Au moment du « black-out » la production photovoltaïque était de l'ordre de 70 % de la production totale, ce moyen de production n'ayant aucune inertie il est certain que le réseau était fragile et même si cette situation n'est pas la cause première de l'évènement elle l'a amplifiée.

4. IMPACT DES PRODUCTIONS INTERMITTENTES SUR LE RÉSEAU

Le mode de connexion sur le réseau et les variations aléatoires des productions éoliennes et photovoltaïques engendrent de fortes contraintes sur le réseau. La [fiche GAENA « Intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le système électrique »](#) [Réf. 2] détaille ces contraintes qui peuvent se résumer par :

- l'idéal serait de connecter les productions renouvelables intermittentes sur le réseau de transport mais cela n'est pas toujours possible pour des raisons de distance de raccordement et de nécessité d'une tension de raccordement plus élevée (225 kV ou 400 kV).
- le réseau de distribution, de par sa configuration en étoile qui irrigue le territoire, est plus facilement accessible et il nécessite une tension moins élevée pour se raccorder.
- à l'exception des parcs de production de forte puissance, les productions à partir des EnRi, qui sont diffuses, sont injectées sur le réseau de distribution, ce qui n'est pas a priori son rôle. Leur déversement inopiné provoque des perturbations telles que : augmentation de la tension locale, variation de la fréquence, inversion du sens du courant qui perturbent les protections. Ce mode de connexion peut aboutir à des « refoulements » vers le réseau de transport lorsque le réseau de distribution ne peut pas absorber l'énergie injectée. Ce refoulement nécessite d'élever la tension au niveau du réseau de transport. Il constitue un fonctionnement à « contre sens » non prévu dans le fonctionnement normal du réseau de distribution pour lequel les protections n'étaient pas prévues initialement pour ce genre de fonctionnement, celles-ci doivent être modifiées.
- les EnRi ont également des impacts sur le mix de production, nécessité de moyens de productions palliatifs pour les périodes de faible production et effacement des moyens de productions pilotables pour les périodes de forte production [Réf. 2].

5. LES EnRi SONT INCAPABLES DE SATISFAIRE SEULES LA CONSOMMATION

La figure 10 donne la courbe de consommation typique d'une journée d'hiver en France.

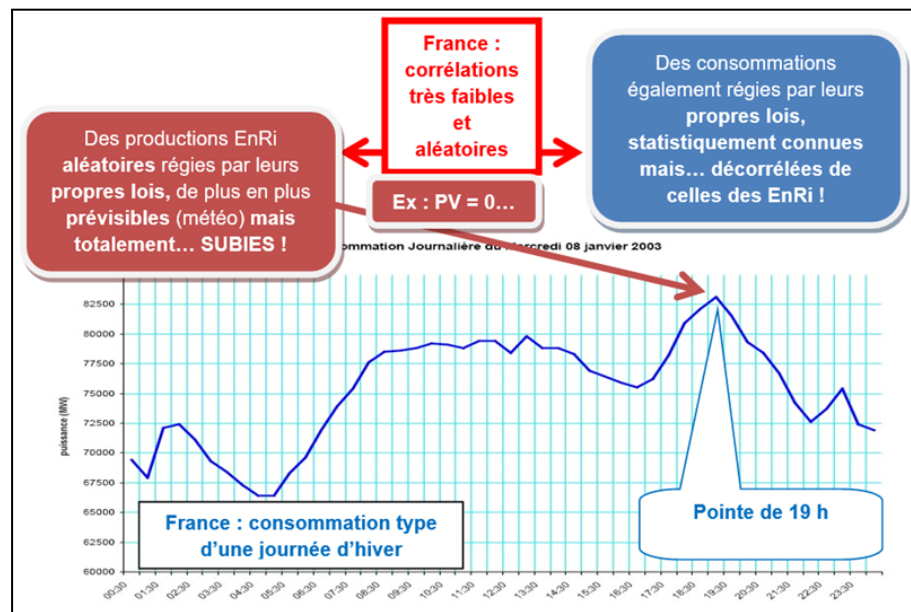


Figure 10 : Courbe de consommation typique d'une journée d'hiver en France

Les consommations sont prévisibles à partir des lois statistiques (à terme il y aura environ 35 millions de foyers équipés de compteurs Linky communicants en France).

Les phénomènes météorologiques sont, eux aussi, de mieux en mieux prévus (au moins 48 h à l'avance), mais ils resteront subis, et il faudra donc suppléer au manque des EnRi.

Les énergies renouvelables intermittentes ne permettront pas, à elles seules, de satisfaire la consommation électrique à 100 %.

6. LES EnRi RENDENT DIFFICILE LE PILOTAGE DU RÉSEAU

Le graphe (figure 11, au pas de 15 min, met en évidence la variabilité relative⁷ des moyens de productions selon qu'ils sont pilotables ou pas.

En vert pour la somme de l'éolien et du PV, En bleu pour les énergies pilotables (nucléaire, hydraulique et fossiles)

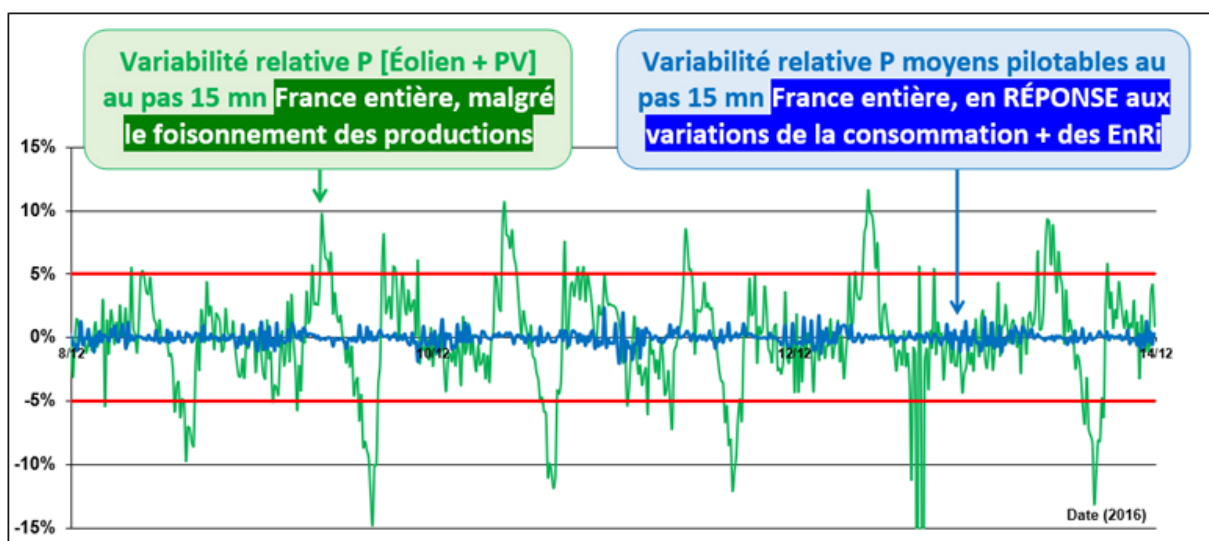


Figure 11: Variations relatives des moyens de production

⁷ Ecart entre deux valeurs au pas de 15 minutes par rapport à la valeur du premier pas.

Peut-on remédier à la variabilité des EnRi en introduisant de l'inertie ? Pour le PV, la réponse est non : il n'y a pas d'inertie propre.

Les génératrices des éoliennes présentent par contre une certaine inertie, mais comme elles fournissent un courant continu qui doit être transformé en courant alternatif par des onduleurs. Ce courant n'est pas synchronisé avec les alternateurs qui alimentent directement le réseau en courant alternatif. Il faut ajouter des automatismes complexes et coûteux pour constituer une inertie artificielle (dite inertie synthétique), afin de contribuer à l'inertie globale du réseau.

En tout état de cause, du fait de leur caractère aléatoire, on ne peut compter sur les seules EnRi pour constituer la réserve primaire, qui doit être garantie pendant 15 minutes.

7. L'IMPASSE ACTUELLE DU STOCKAGE DE MASSE INTER-SAISONNIER

Quand on parle de stockage, il faut en définir la durée : par exemple, les batteries, qui ont un rendement énergétique élevé (85 %), conviennent pour une réponse dans une période maximum d'une journée. Mais quand il s'agit de couvrir des périodes de la semaine ou du mois, il faut faire appel à des stockages de masse. En France, les STEP représentent une puissance installée de 5 GW, qui peut produire de 15 à 25 GWh par jour, alors que la consommation peut atteindre une puissance de plus de 80 GW et qu'une journée de consommation de pointe peut atteindre 1,5 TWh.

La seule solution à l'échelle des besoins inter-saisonniers serait de passer par une transformation chimique (production d'hydrogène). La chaîne de procédés : production d'hydrogène par électrolyse ; stockage ; combustion pour fournir de l'électricité, a un rendement opérationnel de 35 % : il faut donc stocker 3 kWh pour restituer 1 kWh ! On voit immédiatement le non-sens économique, compte tenu des coûts de production des kWh, d'un tel système (hors usages militaires ou spatiaux).

8. LES SURPLUS DES EnRi PERTURBENT AUSSI LES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

Mais il n'y a pas que les manques de production des EnRi qui posent problème : les surplus aussi, qui apparaissent en raison du surinvestissement que nécessite le faible facteur de charge des EnRi. En fait, la plupart des installations PV sont de petite puissance (quelques kW) et même les installations éoliennes de plus forte puissance (< 17 MW) sont raccordées au réseau de distribution.

Leur déversement inopiné provoque des perturbations telles que : augmentation de la tension locale, inversion du sens du courant qui perturbe les protections, avant que le surplus ne soit refoulé vers le réseau de transport – situation qui n'était pas prévue dans le fonctionnement normal de ces réseaux.

Les surproductions engendrent des prix SPOT négatifs qui eux-mêmes aboutissent à des écrêtements des productions. Ces écrêtements sont de plus en plus fréquents et importants, ils perturbent la fréquence. RTE envisage donc des contraintes à imposer aux exploitants. Les écrêtements peuvent être déclenchés à l'initiative des exploitants des installations ou à la demande de RTE. Selon le type de contrat les producteurs peuvent être indemnisés en totalité ou partiellement par rapport au prix d'achat contractuel

9. AUTOPRODUCTION – AUTOCONSOMMATION

Seul le stockage permettrait de pallier les conséquences de l'intermittence (déficit ou excès de production), mais qu'il n'existe pas actuellement de solution économique répondant aux besoins de stockage dépassant un à quelques jours au maximum, est-ce qu'une voie pour les EnRi peut être l'autonomie énergétique (autoproduction – autoconsommation) ?

Outre les réseaux fermés de distribution qui existent depuis longtemps pour des sites industriels spéciaux mais pour lesquels les EnRi sont inadaptés du fait de leur intermittence, l'autonomie peut être déclinée au niveau d'un réseau local de territoire (îlot résidentiel, grand ensemble urbain, quartier, etc.) ou au niveau domestique.

Leur première caractéristique commune est de perdre l'avantage du foisonnement de la consommation, qui permet en Europe de réduire d'un facteur 5 l'investissement de production. Deuxièmement, on rappelle l'inadéquation entre production PV et consommation électrique pour les latitudes éloignées des tropiques, ce qui oblige à investir en batteries coûteuses.

Si le photovoltaïque s'est développé en France, c'est grâce non seulement à la baisse du prix des panneaux (de moitié en 10 ans grâce à la production de masse chinoise), mais surtout aux subventions au kWh, racheté à un prix supérieur au prix de vente du réseau⁸, ce qui n'était pas durable. Et remarquons que si on voulait équiper

⁸ Une décision récente de la CRE modifie les tarifs de rachat du photovoltaïque des installations de petite puissance.

d'installations PV de 3 kWc⁹ les 33 millions de logements du pays, la puissance à installer totaliserait 100 GW ! Alors qu'avec 130 GW, la puissance nationale actuelle (qu'il faudra en tout état de cause conserver) satisfait l'ensemble des besoins, y compris industriels et de transport.

Pour la France continentale, le raccordement au réseau public reste et restera en tout état de cause nécessaire pour suppléer l'intermittence et le fait que le PV est 4 fois plus faible en hiver qu'en été. Mais alors, comment facturer ce service utilisé de façon intermittente ? La tarification au kWh consommé n'est alors plus pertinente, car le coût des réseaux est constitué à 95 % de coûts fixes, indépendants des kWh que le réseau fait transiter.

10. QUELQUES RÉFLEXIONS EN GUISE DE CONCLUSION

L'équilibre permanent du réseau entre les variations de la consommation et des productions intermittentes devient de plus en plus délicat. Cet équilibre ne peut être assuré que par une proportion importante de moyens de production pilotables qui apportent une inertie importante.

Les énergies intermittentes ne sont pas a priori adaptées pour produire de l'électricité de masse pas chère : les panneaux photovoltaïques ont été développés pour le spatial, et les éoliennes pour remonter l'eau des puits ou des polders. Il n'est donc pas surprenant que leur insertion dans le réseau électrique soit complexe et coûteuse : en Europe, il faut maintenir la réserve de production pilotable, ce qui revient à doubler les investissements.

À noter que le nucléaire français participe activement à la régulation du réseau : un réacteur peut varier de 100 % à 20 % de puissance nominale en 30 min, ce qui représente une performance équivalente à celle d'une centrale à charbon. Avec ses 58 réacteurs situés au cœur de l'Europe, la France est un élément majeur de régulation du réseau de transport européen.

Pour ce qui est de l'Europe, poursuivre la fuite en avant d'insertion des EnRi sans avoir développé des moyens de stockage de l'électricité viables au plan économique n'a pas de sens. Tant qu'à devoir garder des moyens de production pilotables, autant garder le nucléaire qui n'émet pas de carbone, et investir sur les batteries, et la production d'hydrogène à partir des EnRi et du nucléaire, pour développer des modes de transport décarbonés.

Le postulat de base du réseau électrique qui est « **la production suit la consommation** » ne risque-t-il pas d'être inversé par une trop grande proportion de productions intermittentes ?

11. RÉFÉRENCES

[Réf.1] [Article GAENA N° 57 « Analyse de l'incident survenu sur le réseau synchrone de la plaque continentale européenne le 8 janvier 2021 ».](#)

[Réf.2] [Fiche argumentaire GAENA AA-05 « Intégration des énergies renouvelables intermittentes dans le système électrique »](#)

⁹ Puissance « crête » correspondant à l'ensoleillement maximal.