

# Concepts et chiffres de l'énergie : La gestion de la production et de la distribution de l'électricité

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Delphine CHAREYRON - Hélène HORSIN MOLINARO  
Bernard MULTON

Édité le  
04/10/2021

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

*Le dossier « Concepts et chiffres de l'énergie » est co-rédigé et co-publié avec le site [Culture Sciences Physique](#). Les données sont tirées de nombreuses références (rapports de groupes de recherche, publications dans des revues spécialisées, rapports d'instituts nationaux...).*

Dans une première ressource « [Concepts et chiffres de l'énergie : Le transport de l'électricité](#) » [1] nous avons présenté les infrastructures physiques du transport de l'électricité. Avec le déploiement des énergies renouvelables dans le réseau, nous nous intéressons ici à la gestion de la production et la distribution de l'électricité.

Dans ce document, nous proposons au lecteur des données concernant le réseau de transport et de distribution de l'électricité en France. Chaque document est sourcé afin de pouvoir retrouver les valeurs ou les comparer à d'autres pays, périodes, unités...

Les définitions des termes employés peuvent être retrouvées dans le [glossaire](#) du dossier.

## 1 – Ajustement de la production d'électricité à la demande

Au cours d'une journée, la demande en électricité varie constamment, notamment en fonction des activités humaines (horaires de travail, des périodes de congés, ...) et des conditions météorologiques (température, luminosité, ...). Depuis l'origine, c'est essentiellement le système de production (les « centrales ») qui s'adapte à la demande pour respecter les équilibres, avec l'utilisation de prévision et l'assistance des moyens de stockage que sont les centrales de pompage-turbinage, dont on oublie parfois le rôle important joué lorsque le système de production manque de flexibilité (forte proportion de nucléaire). Avec les installations éoliennes et photovoltaïques, de plus en plus nombreuses, dont la production est directement corrélée aux conditions météorologiques, mais également, dans une moindre mesure, les installations hydroélectriques au fil de l'eau et celles de cogénération (chaleur + électricité) pilotées par la demande de chaleur, le système électrique est en cours de transformation.

Dans ces conditions, l'équilibre production-consommation nécessitera, à terme, outre des moyens de production flexibles classiques (hydrauliques de barrage et thermiques), tout particulièrement lorsque le taux de production variable deviendra très élevé, un accroissement du pilotage de la demande (qui existait déjà avec les chauffe-eaux et la tarification heures pleines et heures creuses) et la mise en œuvre de moyens de stockage supplémentaires.

L'acheminement des flux d'énergie électrique (puissances) des lieux de production vers les lieux de consommation s'effectue via des lignes électriques (réseaux de transport, de répartition et de distribution) qui ne doivent pas entrer en surcharge. Dans le cas des lignes aériennes, leur capacité de transport est limitée essentiellement par la dilatation des câbles, ainsi la puissance maximale qui peut transiter par ces lignes dépend de la température ambiante et de la durée des surcharges en lien avec leur inertie thermique. Les lois de Kirchhoff jouent prioritairement, mais des moyens d'aiguillage existent pour rééquilibrer les flux (transformateurs à réglage en charge, déphaseurs et

autres dispositifs électroniques de puissance modernes tels que les FACTS : Flexible Alternating Current Transmission System).

Afin d'ajuster la production à la demande, le réseau s'appuie sur des centres de répartition de l'électricité, appelés **les dispatchings**, voir figure 1. En France, il existe un dispatching national qui gère le réseau d'interconnexion à 440 kV et les échanges avec l'étranger, et sept dispatchings régionaux qui se chargent de la distribution dans les régions [2].



Figure 1 : Centre de dispatching, source RTE [2]

Grâce aux prévisions météorologiques et aux relevés des mesures passées de consommation d'électricité, une courbe prévisionnelle de consommation est définie chaque jour pour le lendemain. Des ajustements ont ensuite lieu en permanence pendant la journée. Par exemple la figure 2 présente, pour le lundi 18 janvier 2021, la consommation en temps réel en bleu, les prévisions de consommation basées sur le jour précédent en blanc et les prévisions réactualisées pour le jour J en magenta.



Figure 2 : Consommation, prévision J et prévision J-1 pour le lundi 18 janvier 2021, en MW, source RTE [3]

L'outil de visualisation de la consommation d'électricité en France en temps réel et les données associées sont en libre accès sur le site Eco2mix de RTE [3], l'unique gestionnaire du réseau de transport français (disponible également en application mobile).

Avec cet outil, il est aussi possible d'observer la production d'électricité par filière en temps réel. Par exemple (figure 3), le lundi 18 janvier 2021 à 10h30, 61% de l'électricité produite était issue du nucléaire, 18% de la filière hydraulique, 10% de la filière gaz, 8% provenant des autres sources

renouvelables (éolien, solaire et bioénergies) et les 3% restant issus de la combustion du charbon. On peut également observer (en gris) des exportations, à hauteur d'environ 3% de la consommation nationale.



Figure 3 : Production d'électricité par filière pour le 18 janvier 2021, en MW, source RTE [3]

## 2 – Déploiement des énergies dans le réseau

### 2.1 - Localisations géographiques

La figure 4 présente la répartition des différentes sources de production d'électricité sur le territoire de la France métropolitaine.

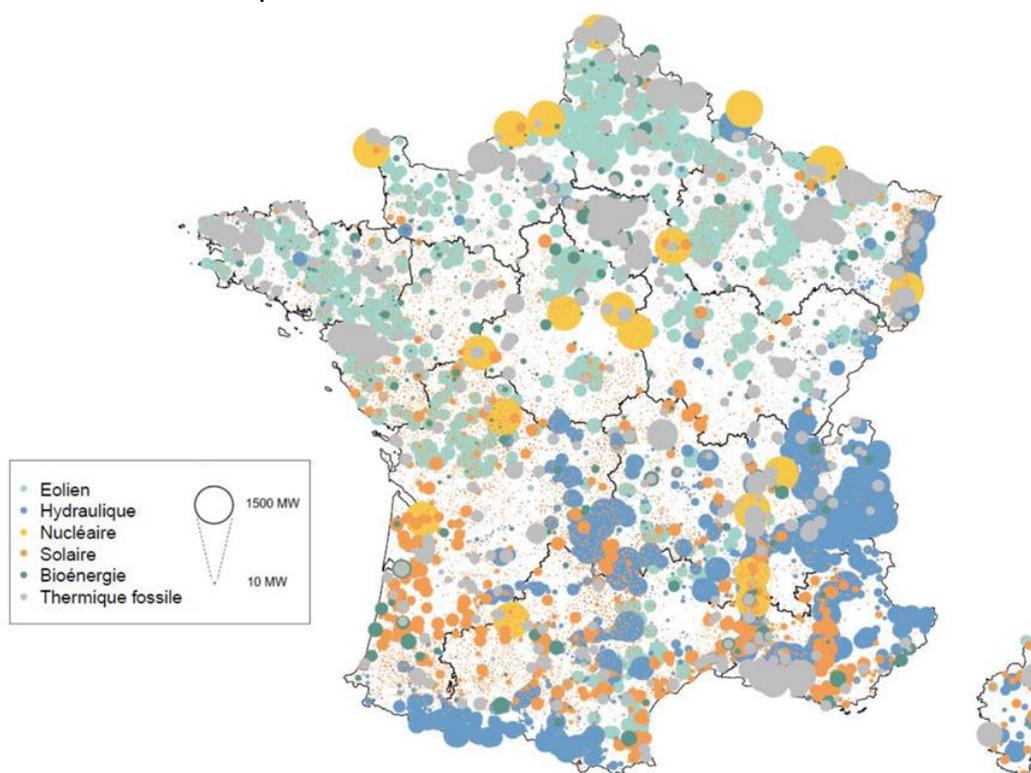


Figure 4 : Puissance et localisation des installations de production d'électricité en France en 2019, source RTE [4]

On observe clairement que les filières hydrauliques sont principalement situées dans les reliefs. Le parc éolien est principalement regroupé dans la partie nord de la France, alors que le sud concentre la filière solaire. Les parcs nucléaires sont répartis de manière un peu plus uniforme, et principalement le long des fleuves ou en bord de mer afin de disposer de quantités suffisantes d'eau pour le refroidissement (les deux tiers de l'énergie de fission doivent être dissipés dans l'environnement). La production thermique fossile est aussi assez bien répartie, mais elle est amenée à diminuer dans le cadre de la transition énergétique. La production d'électricité par les bioénergies est assez minime et relativement bien répartie.

La figure 5 présente les productions et consommations en fonctions des régions. Sur la gauche, on peut retrouver la répartition des productions, en couleur, pour chaque région. La consommation est codée en gris. La carte de droite représente les différents modes de production en fonction des conditions météorologiques spécifiques propres à notre pays. Cette carte ne signifie pas pour autant que les régions moins favorables ne présentent pas d'intérêt pour ces modes de productions d'autant que les prix de revient du kWh éolien et photovoltaïque sont toujours en diminution, grâce aux progrès technologiques de ces filières. Par exemple, la région Bourgogne-Franche-Comté (en blanc sur la carte) donne une place considérable aux énergies renouvelables électriques pour devenir à terme une région à énergie positive [5] (voir son SRADDET<sup>1</sup>, approuvé en septembre 2020).

Pour chaque région, si les parties en gris (clair et foncé) sont plus importantes que les autres parties colorées, cela signifie qu'il y a plus d'électricité consommée que produite dans cette région. La carte de droite montre que les sites de production des énergies renouvelables ne vont pas forcément corriger les déséquilibres de certaines régions. Actuellement, c'est le réseau de transport de l'électricité qui permet de rééquilibrer spatialement les régions [6]. A l'avenir, le déploiement des réseaux sera fortement lié au développement des nouveaux moyens de production en régions.

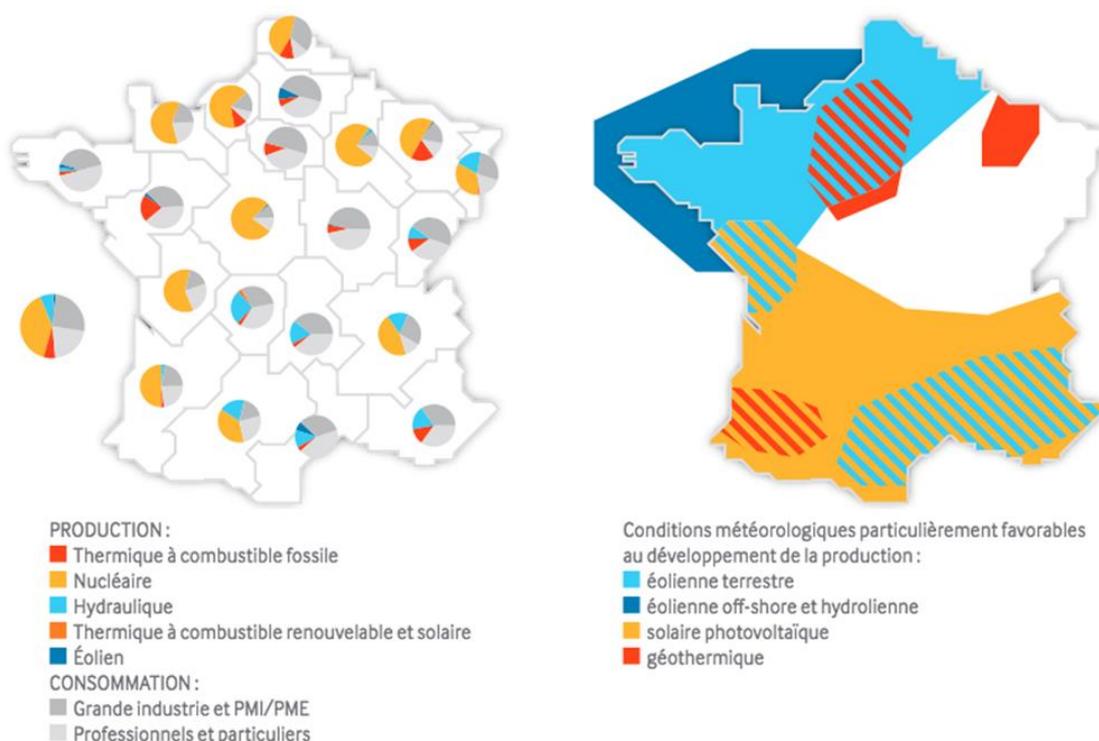


Figure 5 : Réconciliation géographique opérée par le réseau de transport de l'électricité, source RTE [6]  
 Attention, sur la carte de droite, la zone blanche ne signifie pas qu'elle est sans intérêt pour le développement des énergies renouvelables comme expliqué plus haut avec l'exemple de la Bourgogne-Franche-Comté

<sup>1</sup> SRADDET = Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires [7]

La figure 6 synthétise les productions et consommations de chaque région sous forme de flux entrants (en rouge) et de flux sortants (en bleu).

↓ Flux physiques **entrant** et **sortant** des régions en 2020



Figure 6 : Flux physiques d'électricité entrant et sortant des régions, source RTE [8]

On retrouve des régions qui produisent beaucoup plus qu'elles ne consomment et inversement. Le réseau de transport de l'électricité joue alors un rôle clef pour approvisionner toute la France métropolitaine.

## 2.2 - Gestion du réseau électrique

RTE est le gestionnaire du réseau public de transport d'électricité français. Par ce biais il est responsable [9] [10] :

- D'assurer à tout instant l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité ;
- De résoudre les congestions sur le réseau de transport.

Ainsi RTE prend en compte toutes les contraintes liées au réseau d'électricité : capacité des lignes et des interconnexions, gestion des réserves d'équilibrage et anticipation pour assurer l'équilibre des injections et des soutirages sur le réseau.

Lorsque la production ne suit plus la consommation, cela se traduit par une baisse de la **fréquence** sur le réseau (**valeur de référence de 50 Hz**), elle-même due à une baisse de la vitesse de rotation des groupes tournants de production thermiques et hydrauliques. À l'opposé, lorsque la production est plus importante que la consommation, la fréquence augmente. Pour le bon fonctionnement de tous les appareils connectés au réseau il est essentiel que la fréquence reste extrêmement stable. Comme nous l'avons vu dans l'article « [Concepts et chiffres de l'énergie : Le transport de l'électricité](#) » [1] la marge autorisée est de  $50 \pm 0,5$  Hz instantanément, mais elle est en moyenne rigoureusement maintenue à 50 Hz sur l'ensemble de la plaque européenne.

Historiquement, le réglage de la fréquence des grandeurs électriques était géré par le réglage de la vitesse de rotation des groupes tournants associés à des génératrices synchrones (ou alternateurs) rigoureusement proportionnel à la fréquence. Ceci est cependant en train de changer avec l'arrivée de moyens de production connectés au réseau via des convertisseurs électroniques de puissance, essentiellement les éoliennes et installations photovoltaïques.

Pour assurer cette stabilité RTE dispose d'outils : les services systèmes fréquence [9] [10] [11] qui agissent comme des réserves d'énergie intervenant à différentes échelles de temps (RP, RS et RT pour respectivement réserves primaires, secondaires et tertiaires), figure 7.

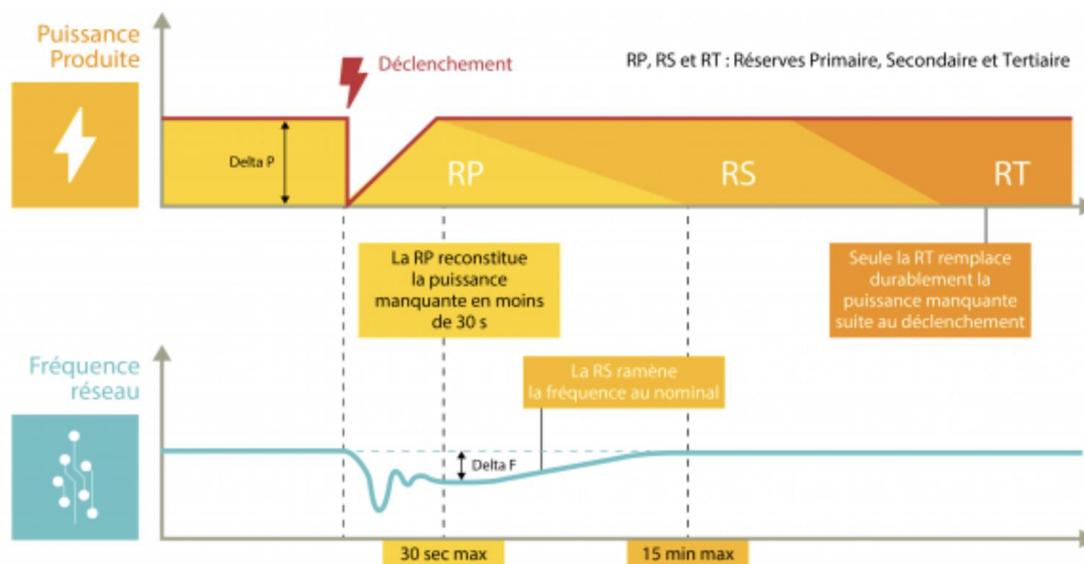


Figure 7 : Fonctionnement des réserves pour rétablir l'équilibre production/consumation, source CRE [9]

Les réserves primaire et secondaire sont activées automatiquement (soutirage ou production) pour rétablir la fréquence à 50 Hz et ramener à leur valeur prévue les échanges d'énergie aux frontières. La réserve primaire est activée de manière décentralisée au niveau de chaque groupe de production en capacité technique de la fournir et qui doit ainsi offrir une marge de sécurité (+/-15%) à disposition autour de sa puissance nominale sur un pas demi-horaire. Elle intervient en 15 à 30 secondes. Pour des raisons de sûreté, une seule entité ne doit pas dépasser 150 MW soit 5% de l'ensemble de la réserve primaire de la zone continentale européenne synchrone.

La réserve secondaire est activée automatiquement par RTE en 30 à 400 secondes sur la base de moyens de production contractuellement mis en réserve (en France, capacité totale entre 500 MW et 1000 MW, toujours à la hausse ou à la baisse). Elle doit pouvoir être opérationnelle sans limitation de durée.

La réserve tertiaire (encore appelée « mécanisme d'ajustement ») est utilisée pour compléter la réserve secondaire si celle-ci est épuisée ou insuffisante pour faire face à un déséquilibre, et aussi pour se substituer aux réserves primaire et secondaire ou anticiper un déséquilibre à venir. Ce type de réserve est qualifié, en fonction de son temps de mise à disposition, de rapide (moins de 15 min) et complémentaire (entre 15 et 30 min).

Les réserves sont bien sûr sujettes à rémunération et pénalités. Leur planification permet de garantir que les moyens de production seront en capacité de fournir la demande compte tenu des prévisions associées aux activités humaines et aux conditions climatiques (température, luminosité, ...). Désormais, cette planification doit prendre en compte les prévisions météorologiques avec encore plus de précision, pour mieux intégrer les productions éoliennes et solaires. Ainsi la fréquence est maintenue sensiblement constante et toutes ses variations sont compensées en continu pour qu'elle reste constante en moyenne, ce qui permet d'ailleurs de s'en servir comme horloge de précision.

La réglementation sur ces différentes réserves est cadrée. La réserve primaire est constituée en France par un appel d'offres hebdomadaire mené conjointement par RTE et ses homologues allemand, autrichien, belge, néerlandais et suisse. Pour la réserve secondaire, tous les producteurs de groupes de production de plus de 120 MW en France ont l'obligation d'y participer. En ce qui concerne la réserve tertiaire, une partie est contractualisée, l'autre se compose d'appels d'offres libres.

Précisons qu'une autre grandeur que la fréquence, cette fois plus locale, **le niveau de tension** doit également rester au sein d'intervalles bien définis afin de ne pas endommager les matériels électriques et de garantir une qualité de fourniture suffisante. Le maintien de la tension est moins difficile à réaliser techniquement que celui de la fréquence car il ne met pas en œuvre de grandes quantités d'énergie. La grandeur physique la plus influente sur la tension est la **puissance réactive** elle-même corrélée au **déphasage du courant par rapport à la tension**. Il existe plusieurs solutions pour régler la puissance réactive dont les plus modernes sont fondées sur l'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance. Les plus traditionnelles exploitent la possibilité d'agir sur le courant d'excitation des alternateurs de production ou encore des machines spécifiquement dédiées à cette fonction et appelées compensateurs synchrones.

Comme pour les « services systèmes fréquence » nécessaires au maintien de l'équilibre du réseau pour garantir que la tension reste dans un intervalle prédéfini, RTE dispose des « services systèmes tension » [12]. Par exemple, l'intervalle est de 360 à 420 kV pour le réseau 400 kV et de 198 à 245 kV pour le réseau 225kV. Exceptionnellement, il est également possible de sortir, un nombre de fois limité annuellement, de ces intervalles [13].

Si la fréquence et la tension sortent des intervalles définis, des sécurités automatiques se mettent en action et il peut arriver, très exceptionnellement, que par un malheureux effet domino (disjonctions en cascade, pertes de moyens de production, etc.), une partie du réseau s'effondre, c'est alors le blackout tant redouté par les gestionnaires de réseaux de transport, principaux responsables de la bonne conduite du système.

Le système électrique de production, transport, distribution et consommation, en courant alternatif est extrêmement délicat à piloter et requiert beaucoup d'intelligence pour fonctionner. Lorsque l'on parle de « smart-grids » (traduisible par réseaux intelligents), on devrait plutôt dire « more smart-grids », car il s'agit « seulement » de mettre un peu plus d'intelligence dans le pilotage d'un système déjà très sophistiqué et faisant intervenir à la fois des automatismes et des humains (prises de décision).

Pour plus de détails techniques, on pourra consulter l'intervention pédagogique de Nouredine Hadjsaïd sur les [particularités physiques des réseaux électriques](#) :

### 2.3 - Déploiement des énergies renouvelables dans le réseau

Les réseaux de transport et de distribution sont au cœur de la transition énergétique, en effet ils doivent se déployer pour accueillir de plus en plus de productions locales renouvelables, en dehors de l'hydroélectricité arrivée à saturation et parfois même en démantèlement. Il s'agit surtout des installations éoliennes, photovoltaïques (donc fondamentalement variables) et, dans une moindre mesure, de bioénergie (cogénération par biomasse, souvent biogaz).

La loi Énergie-Climat, promulguée en 2019 précise le cadre de la transition énergétique. Un des objectifs est notamment d'atteindre 33% de consommation finale d'énergie de source renouvelable à l'horizon 2030 [14]. Pour l'électricité, seule une baisse de la production nucléaire à un niveau de 50% à l'horizon 2050 a été actée, ce qui devrait donc se traduire par un peu moins de 50% de sources renouvelables incluant l'hydroélectricité historique.

La France a produit 127 TWh (soit 25,3% de la production totale) d'électricité d'origine renouvelable en 2020 [15], dont 52,3 TWh éoliens et solaires, donc variables (10,4% de la production totale). La figure 8 présente la répartition de la production électrique française en 2020 par filière.

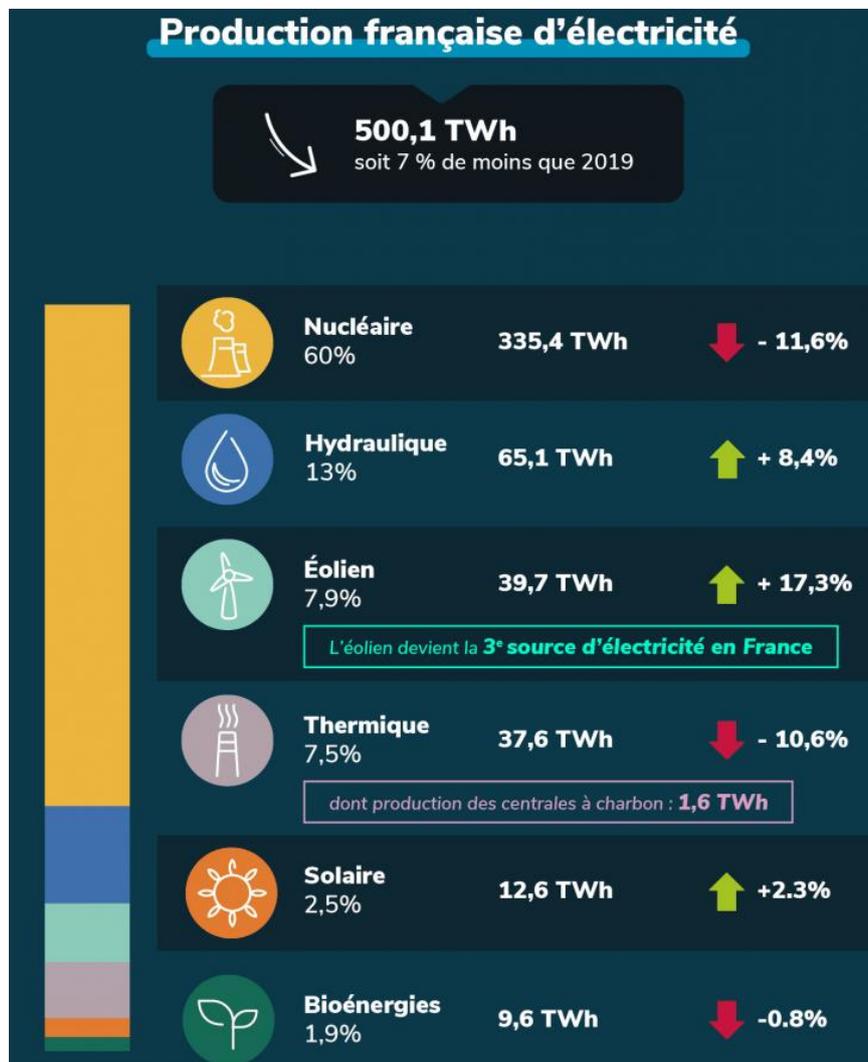


Figure 8 : Répartition de la production d'électricité de la France pour l'année 2020, source RTE [12]

La figure 9 présente un schéma simplifié d'organisation du système électrique, incluant trois échelles de tension selon les niveaux de puissance. La production d'électricité est représentée par des flèches orange, et la consommation par des flèches bleues. Alors qu'historiquement la production était centralisée, désormais chaque constituant du réseau maillé peut produire localement de l'électricité et l'injecter dans le réseau. Ceci engendre des flux remontants d'énergie, sens non prévu initialement et compliquant partiellement la gestion en attendant que les divers équipements, de comptage notamment, soient mis à jour. Les informations sur les productions et consommations en temps réel sont centralisées par les gestionnaires des réseaux électriques afin de s'assurer de l'équilibre entre consommation et production.

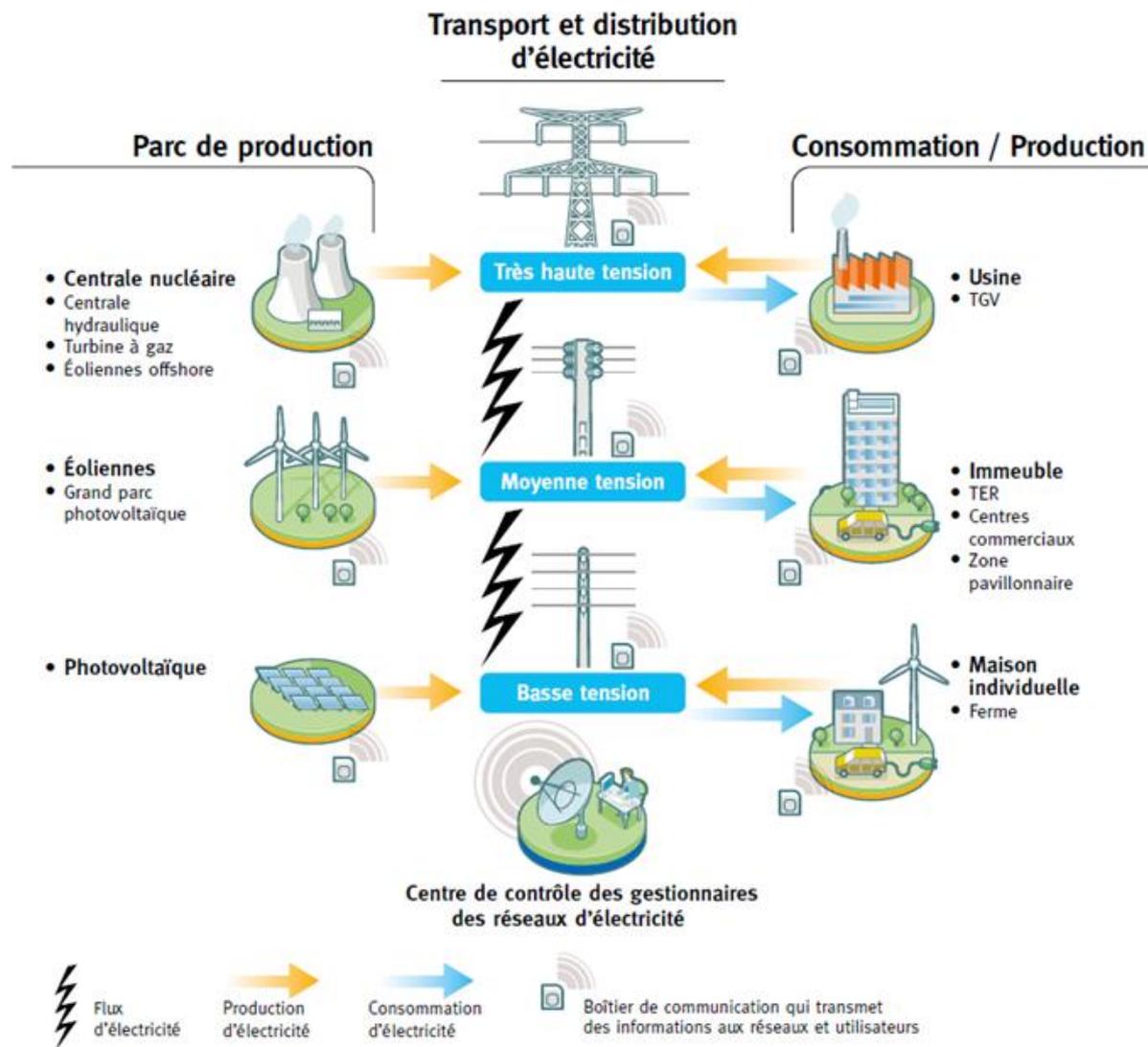


Figure 9 : Schéma simplifié d'organisation du système électrique, source CRE d'après [16]

### 3 – La prévision au service de la gestion du réseau

Le réseau doit désormais faire face à la variabilité, à la dispersion territoriale et au manque de flexibilité des nouvelles productions renouvelables mais également aux caractéristiques similaires de la consommation ainsi qu'à la présence des moyens historiques de production sur le territoire tout en garantissant une distribution d'électricité répondant à la demande à chaque instant.

On appelle **smart-grid** ou réseau intelligent, un réseau d'énergie qui intègre les technologies de l'information et de la communication pour améliorer son exploitation et développer de nouveaux usages. Une couche de réseaux numériques vient se superposer aux réseaux physiques de transport et de distribution de l'électricité pour assurer le pilotage de la production en fonction de la consommation [17]. La figure 10 présente les différents contrôles, pilotages, ou déploiements prévus pour le développement du réseau (animation du site web de la CRE [18]).



Figure 10 : Introduction aux smart-grids, source CRE [18] (animation)

Afin d'accueillir les énergies renouvelables variables dans le réseau, les réseaux de transport et de distribution de l'électricité développent les Schémas Régionaux de Raccordement aux Réseaux des Energies Renouvelables (S3REnR).

On pourra consulter le chapitre « 2 - Energies renouvelables, intermittence ou variabilité ? » de la ressource « [Concepts et chiffres de l'énergie : Variabilité des sources renouvelables électriques](#) » [19]. On pourra également consulter dans le [glossaire](#) : source d'énergie intermittente versus variable.

La stabilité de la fréquence du signal électrique (50 Hz) est reliée à la vitesse de rotation des alternateurs injectant l'électricité dans le réseau. Les technologies classiques de production d'électricité, qui utilisent des alternateurs comme les centrales thermiques (nucléaire ou à combustible fossile) ou l'hydroélectricité, constituent des masses tournantes, quelquefois de plusieurs dizaines de tonnes, qui sont autant de résistance au ralentissement ou à l'accélération de leur rotation. L'inertie physique de ces moyens de production a un effet stabilisateur de la fréquence, très important pour le réseau. En outre, ces systèmes de production peuvent générer leur propre onde de tension et se synchroniser de façon autonome avec les autres sources d'électricité. Les machines tournantes sont historiquement la pierre angulaire de la stabilité du système électrique. Ces technologies sont actuellement très majoritaires dans le système électrique européen, offrant une abondance d'inertie. Mais tous les moyens de production ne sont pas égaux en matière d'inertie. Un changement important de technologies de production pourrait entraîner une baisse de la stabilité de la fréquence de l'onde électrique, qu'il faudrait prendre en compte.

À mesure que va croître la part des moyens de production non synchrones, comme l'éolien et le photovoltaïque, les groupes tournants risquent d'être moins nombreux dans le système de production électrique. Contrairement aux centrales classiques, les parcs éoliens et les panneaux photovoltaïques sont reliés au réseau par des convertisseurs de puissance. Or les technologies actuelles des onduleurs ne contribuent pas à l'inertie et ne peuvent participer pleinement à la stabilité du système. Par ailleurs, sauf à être équipées de moyen de stockage d'énergie de capacité relativement importante (ce qui est envisageable au moins pour quelques sources importantes), elles ne sont pas en mesure de générer leur propre onde de tension et dépendent du signal de fréquence donné par d'autres sources de production (comme les centrales conventionnelles) pour fonctionner correctement [20].

De plus, l'augmentation de la production éolienne et photovoltaïque peut se traduire par des incertitudes plus importantes sur les prévisions de production même à quelques heures. Il est donc nécessaire d'améliorer les prévisions en temps réel et l'exploitation des réserves. Notons que, dans ce contexte, des prévisions de haute qualité permettent de réduire le surcoût de réserves supplémentaires, elles ont donc une grande valeur dans le nouveau système électrique en émergence.

On peut, par exemple, évoquer un projet mis en place sur l'île de La Réunion. En effet, le cas des îles est particulièrement intéressant car elles ne sont pas connectées à un réseau d'électricité continental et représentent des situations plus critiques. Leurs caractéristiques climatiques, géographiques et leur taille justifient de recourir à des solutions spécifiques. Notons d'ailleurs que le cas le plus élémentaire, connu depuis très longtemps, est celui des installations totalement autonomes, par exemple photovoltaïques avec stockage électrochimique associées éventuellement à un groupe électrogène [21].

L'expérimentation du projet *PEGASE* sur l'île de la Réunion a permis de développer des méthodes, des outils et des logiciels de prévision de production performants et opérationnels. Il a aussi permis d'étudier le couplage entre des batteries et des fermes de production d'électricité renouvelable (éoliennes et photovoltaïques) afin de lisser la production avec une gestion intelligente du système [22]. À l'échelle de grands réseaux et donc des grandes puissances, il existe de nombreuses expériences, par exemple en Australie [23] avec des installations de stockage de l'ordre de la centaine de MWh en capacité énergétique et de de la centaine de MW en puissance. En France Métropolitaine, il existe également plusieurs sites expérimentaux dont le projet *RINGO* [24] porté par RTE en 2021 avec trois sites équipés de batteries électrochimiques (lithium-ion) de 30 à 37 MWh.

Nous n'avons pas abordé la planification à long terme des investissements, sujet éminemment politique. Pour cela RTE collabore avec les territoires et les producteurs pour l'élaboration de nouveaux schémas territoriaux (Les Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables, S3REnR [25]).

En métropole, RTE a proposé en janvier 2021, en commençant par la publication d'un rapport commun avec l'Agence Internationale de l'Énergie [26], l'élaboration des scénarios futurs énergétiques permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050, figure 13. Les modèles intègrent les données des travaux du GIEC, les variables météorologiques, les interactions entre le système électrique européen, etc. [27]. Les futurs S3REnR se développeront alors en fonction du scénario choisi.

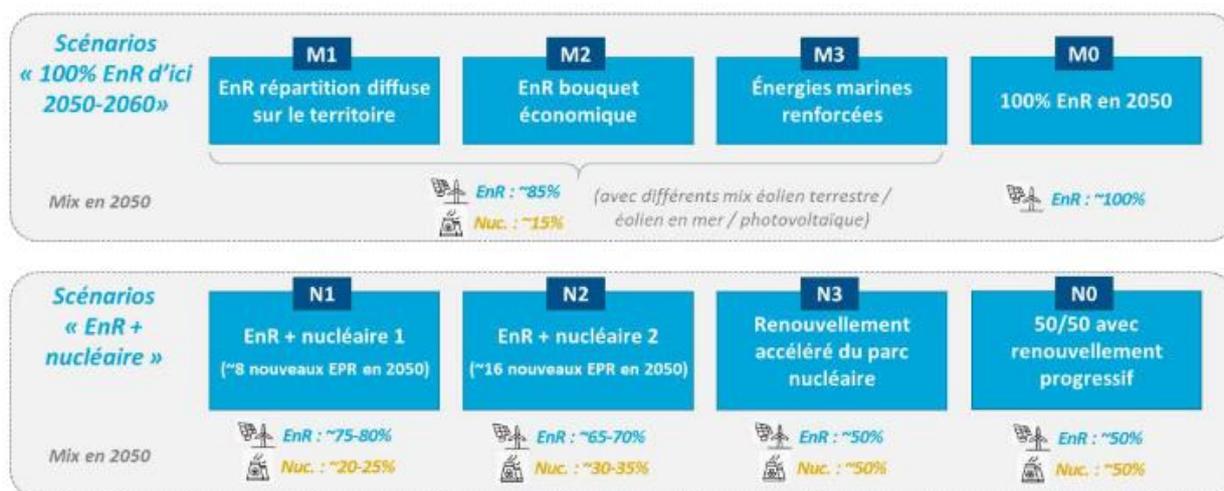


Figure 11 : Huit scénarios émergents de l'analyse technico-économique du système électrique, source RTE [26]

## 4 – De l'alternatif vers les réseaux en continu

Le système électrique fonctionne sur la base du courant alternatif à fréquence fixe pour des raisons historiques liées aux technologies disponibles à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. En effet, les générateurs électriques sont fondamentalement à courant alternatif (ceux, dits à courant continu, requièrent des collecteurs mécaniques limitant considérablement les performances et surtout leur montée vers les grandes puissances).

Pourtant les débuts de l'électricité industrielle se sont faits sur la base du courant continu, à l'origine issu de sources électrochimiques puis de génératrices à collecteur. C'est surtout la découverte du transformateur électromagnétique qui a permis d'envisager de transporter aisément l'électricité en très haute tension puis de l'abaisser simplement au niveau requis par les besoins des différents consommateurs. En outre, le courant alternatif est beaucoup plus facile à couper en cas de disjonction puisqu'il s'annule naturellement ce qui facilite grandement l'extinction des arcs électriques qui se développent dans les organes de coupure, les rendant beaucoup moins coûteux. Enfin l'existence de moteurs à courant alternatif, tels que le moteur asynchrone ou encore le moteur universel capables de démarrer et de fonctionner sur de telles sources, mais également des dispositifs d'éclairage bien adaptés à l'alimentation en alternatif (lampes à décharge), a conduit à l'émergence de systèmes électriques en courant alternatif beaucoup plus compétitifs que ceux à courant continu.

On pourra consulter la ressource « [Conversion d'énergie - Comment produire de l'électricité à partir des mouvements d'un solide ou d'un fluide](#) » [28] pour retrouver l'historique des premières machines électriques la construction du réseau et notamment le calcul des pertes en ligne du transport de l'électricité.

L'histoire a retenu les célèbres « batailles des courants » qui ont opposé, en Europe, Werner von Siemens<sup>2</sup> et Marcel Deprez<sup>3</sup> et, aux USA, Nikola Tesla<sup>4</sup> et Thomas Edison<sup>5</sup>. En contrepartie de ces atouts technologiques, faire fonctionner de grands réseaux électriques a nécessité une gestion particulièrement délicate pour éviter les effondrements (blackouts). Il existait encore dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, une multitude de « petits » réseaux en courant alternatif à des fréquences différentes (monophasés, triphasés et même parfois diphasés) et ce n'est qu'au cours du temps qu'ils se sont normalisés pour converger vers les deux grands standards de fréquence que nous connaissons 50 et 60 Hz avec un transport en triphasé.

Depuis, la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, l'électronique de puissance s'est considérablement développée en offrant de nouvelles possibilités jusque-là impensables. Elle permet de réaliser des sources non synchrones (comme les génératrices à vitesse variable des éoliennes ou encore les modules photovoltaïques en courant continu) mais également des systèmes de stockage parfaitement capables de fonctionner sur tout type de réseau. Les progrès dans les semi-conducteurs de puissance permettent désormais de réaliser, à des coûts très compétitifs, des convertisseurs électroniques de puissance à toutes les échelles de puissance de la fraction de watt au millier de mégawatts. Ces convertisseurs occupent une place absolument stratégique dans le monde moderne de l'électricité mais leur incroyable discrétion a conduit à ce que cette technologie cruciale reste inconnue en dehors des spécialistes. Et l'on peut vraiment parler d'une révolution majeure

<sup>2</sup> Werner von Siemens (1816-1892), inventeur et industriel allemand

<sup>3</sup> Marcel Deprez (1843-1918), ingénieur français

<sup>4</sup> Nikola Tesla (1856-1943), inventeur et ingénieur américain d'origine serbe

<sup>5</sup> Thomas Edison (1847-1931), inventeur, scientifique et industriel américain

silencieuse en génie électrique qui permettrait en l'occurrence, si cela était nécessaire, de revenir au courant continu.

Le courant continu offrirait de grands avantages, notamment une meilleure efficacité énergétique en réduisant le nombre d'étages de conversion dans la plupart des applications modernes de l'électricité. Il serait également plus facile de transporter l'électricité en courant continu car il n'y aurait plus besoin de synchroniser des sources en courant alternatif avec tous les risques d'effondrement associés. Mais un tel changement nécessiterait des investissements extrêmement lourds et, s'il se produit un jour à l'échelle de tout le système électrique, cela prendra inévitablement plusieurs décennies. Toutefois, cela pourrait commencer par les usages comme c'est déjà le cas dans les systèmes de télécommunication tels que les datacenters ou certaines habitations en site isolé. Cette question a même fait l'objet de travaux de recherche posant, entre autres, la question du niveau de tension optimal du système électrique en courant continu au sein de bâtiments raccordés au réseau [29].

### Dossier Concepts et Chiffres de l'Énergie

Retrouvez toutes les ressources du dossier « [Concepts et Chiffres de l'Énergie](#) »

Retrouvez « Concepts et chiffres de l'énergie » sur le site [Culture Sciences Physique](#)

### Références :

- [1]: Concepts et chiffres de l'énergie : Le transport de l'électricité, D. Chareyron, H. Horsin-Molinaro, B. Multon, avril 2021, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/Concepts-chiffres-energie-transport-de-lelectricite-infrstructure-physique](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/Concepts-chiffres-energie-transport-de-lelectricite-infrstructure-physique)
- [2]: Le dispatching, EdF. RTE, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/le-dispatching>
- [3]: La consommation d'électricité en France, Eco2Mix, RTE, <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-consommation-delectricite-en-france>
- [4]: RTE, Bilan électrique 2019, [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020\\_0.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf)
- [5] : Région Bourgogne-France-Comté, Une région à énergie positive !, <https://www.bourgognefranche-comte.fr/une-region-energie-positive>
- [6]: Accueil des énergies renouvelables sur le réseau RTE, <https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/Accueil%20des%20C3%A9nergies%20renouvelables%20sur%20le%20r%C3%A9seau%20-%20RTE%20se%20mobilise.pdf>
- [7] SRADDET : Un schéma stratégique prescriptif et intégrateur pour les régions, <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/sraddet-un-schema-strategique-prescriptif-et-integrateur-pour-les-regions>
- [8]: Faits marquants de 2020, bilan électrique 2020, RTE, <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/production-production-renouvelable/#>
- [9]: Services système et mécanisme d'ajustement, CRE, <https://www.cre.fr/Electricite/Reseaux-d-electricite/services-systeme-et-mecanisme-d-ajustement>
- [10]: Règles Services Système Fréquence, RTE, 2018, [https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/pdf/role-gestionnaires/20181026\\_Regles\\_services\\_systeme\\_frequence.pdf](https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/pdf/role-gestionnaires/20181026_Regles_services_systeme_frequence.pdf)
- [11]: La gestion de l'équilibre du système électrique, observatoire de l'industrie électrique, 2017, [https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/oi\\_e\\_-\\_fiche\\_pedago\\_flexi\\_avril\\_2017.pdf](https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/oi_e_-_fiche_pedago_flexi_avril_2017.pdf)

- [12]: Règles Services Système Tension, RTE, 2017, [https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/pdf/Systeme%20tension/20170401\\_article\\_8-10\\_v4.pdf](https://www.services-rte.com/files/live/sites/services-rte/files/pdf/Systeme%20tension/20170401_article_8-10_v4.pdf)
- [13] : Documentation technique de référence, Performance du RPT : Enjeux pour le système électrique et les utilisateurs, principes de fonctionnement - Plages de tension et de fréquence normales et exceptionnelles, TRE, août 2020, [https://services-rte.fr/files/live/sites/services-rte/files/documentsLibrary/Article%203.1%20-%20Plages%20de%20tension%20et%20de%20fr%C3%A9quence%20normales%20et%20exceptionnelles\\_en](https://services-rte.fr/files/live/sites/services-rte/files/documentsLibrary/Article%203.1%20-%20Plages%20de%20tension%20et%20de%20fr%C3%A9quence%20normales%20et%20exceptionnelles_en)
- [14]: Loi énergie-climat, Ministère de la transition écologique, <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>
- [15]: Bilans électriques nationaux et régionaux, RTE, <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilans-electriques-nationaux-et-regionaux>
- [16]: Réseau intelligent (Smart-grid), Connaissances des énergies, <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>
- [17]: Comprendre les Smart-grids, CRE, <https://www.smartgrids-cre.fr/module-pedagogique>
- [18]: Introduction aux smart-grids, animation, CRE, <https://www.smartgrids-cre.fr/module-pedagogique>
- [19]: Concepts et chiffres de l'énergie : Variabilité des sources renouvelables électriques, D. Chareyron, H. Horsin Molinaro, B. Multon, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-variabilite-des-sources-renouvelables-electriques](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/les-chiffres-de-lenergie-variabilite-des-sources-renouvelables-electriques)
- [20]: Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050 , IEA, RTE, [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE\\_synthese%20ENR%20horizon%202050\\_FR.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese%20ENR%20horizon%202050_FR.pdf)
- [21]: Ressources énergétiques et solutions pour l'alimentation en électricité des populations isolées » B. Multon et al., Electrotechnique du Futur 2011, Belfort, 14-15déc. 2011, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674833>
- [22]: Prévision des énergies renouvelables et garantie active par le stockage d'énergie, Smart grids, CRE, <https://www.smartgrids-cre.fr/projets/pegase>
- [23] : Australie : une nouvelle batterie géante au secours des renouvelables et du réseau électrique, Connaissance des Energies, 7 fév. 2020, <https://www.connaissancedesenergies.org/australie-une-nouvelle-batterie-geante-au-secours-du-reseau-electrique-200131>
- [24]: Stockage de l'électricité - l'expérimentation RINGO, RTE, <https://www.rte-france.com/projets/stockage-electricite-ringo>
- [25]: Les Schémas Régionaux de Raccordement au Réseau des Énergies Renouvelables : des outils stratégiques, RTE, <https://www.rte-france.com/projets/les-schemas-regionaux-de-raccordement-au-reseau-des-energies-renouvelables-des-outils-0>
- [26]: Conditions and Requirements for the Technical Feasibility of a Power System with a High Share of Renewables in France Towards 2050, IEA & RTE, jan. 2021, [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE\\_rapport%20complet%20ENR%20horizon%202050\\_EN.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_rapport%20complet%20ENR%20horizon%202050_EN.pdf)
- [27]: Bilan prévisionnel long terme « Futurs énergétiques 2050 », RTE, janvier 2021, <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>
- [28] : Conversion d'énergie - comment produire de l'électricité à partir des mouvements d'un solide ou d'un fluide en 3 questions à Bernard Multon (partie 1/2), septembre 2013, <http://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/conversion-energie-Multon1.xml>

[29] : Une approche de dimensionnement sur cycle de vie pour l'évaluation du potentiel de la distribution DC dans le bâtiment, C. Jaouen, B. Multon, F. Barruel, 2013, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01753951/>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>