

# Concepts et chiffres de l'énergie : Le transport de l'électricité Infrastructure physique

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Delphine CHAREYRON - Hélène HORSIN MOLINARO  
Bernard MULTON

Édité le  
12/04/2021

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 cette ressource, nous proposons au lecteur les 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 – Présentation du réseau électrique français

### 1.1 - Réseaux et niveaux de tension associés

Dans un système électrique centralisé, tel qu'il s'est développé durant la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, l'électricité circule depuis les lieux de production centralisés (on parle de « centrales ») jusqu'aux lieux de consommation à l'aide **du réseau de transport, du réseau de répartition et du réseau de distribution**. À chaque connexion entre ces réseaux, se trouvent des **postes de transformation** permettant d'adapter la tension en fonction des spécificités de chacun de ces réseaux.

Sur le **réseau de transport français**, l'électricité est acheminée en triphasé à très haute tension (THT) 225 et 400 kV. Tous les niveaux de tension (en courant alternatif) sont spécifiés en valeur efficace et entre phases. Le réseau de transport relie les centres de productions (centrales) aux zones de consommation. C'est également ce réseau qui est interconnecté (parfois en courant continu) avec les pays voisins pour permettre des échanges d'énergie bidirectionnels.

Le **réseau de répartition** transporte ensuite l'électricité des grandes zones de consommation vers les centres de distribution régionaux ou locaux à haute tension (HT) 63 et 90 kV (figure 1). En France, c'est l'entreprise RTE qui est l'unique gestionnaire de ces réseaux [1][4] (en anglais gestionnaire du réseau de transport électrique = Network of Transmission System Operators for Electricity, NTSOE). Toute cette gamme de tensions rentre dans la catégorie HTB (> 50 kV).

Lorsque leur puissance maximale dépasse un certain niveau, des installations de production et des consommateurs peuvent être raccordés à ces réseaux. Pour information, ces puissances valent : environ 400 MW pour 400 kV, entre 100 et 400 MW pour 225 kV, entre 12 et 100 MW pour 63 et 90 kV.

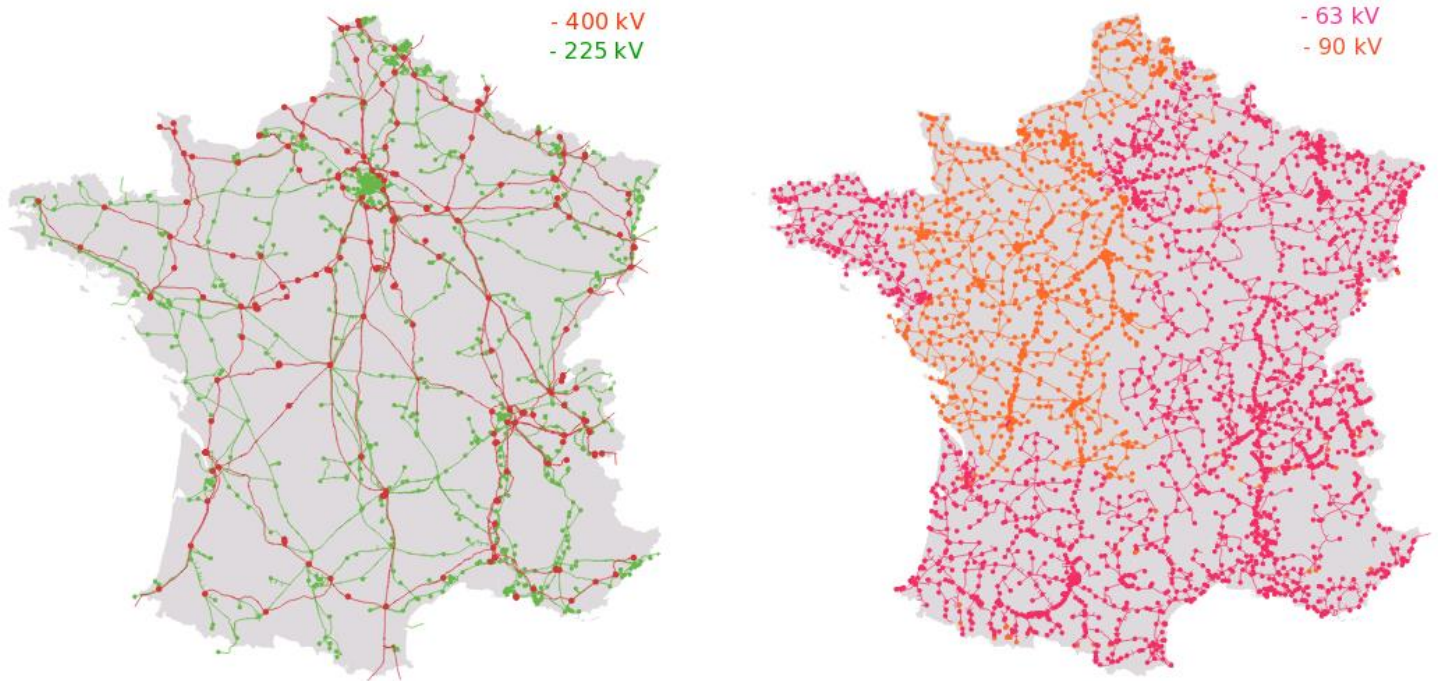


Figure 1 : Carte des lignes 400 kV, 225 kV, 63 kV et 90 kV au 31 décembre 2018, source [1]

En 2019, le réseau de transport et de répartition, sous la tutelle du gestionnaire français RTE, cumulait 105 942 km de lignes. Il se composait de 99 527 km de liaisons aériennes et de 6 415 km de liaisons souterraines, figure 2. Sur l'année 2018-2019, la longueur du réseau a augmenté de 85 km, et 59 km de lignes aériennes sont passées souterraines.

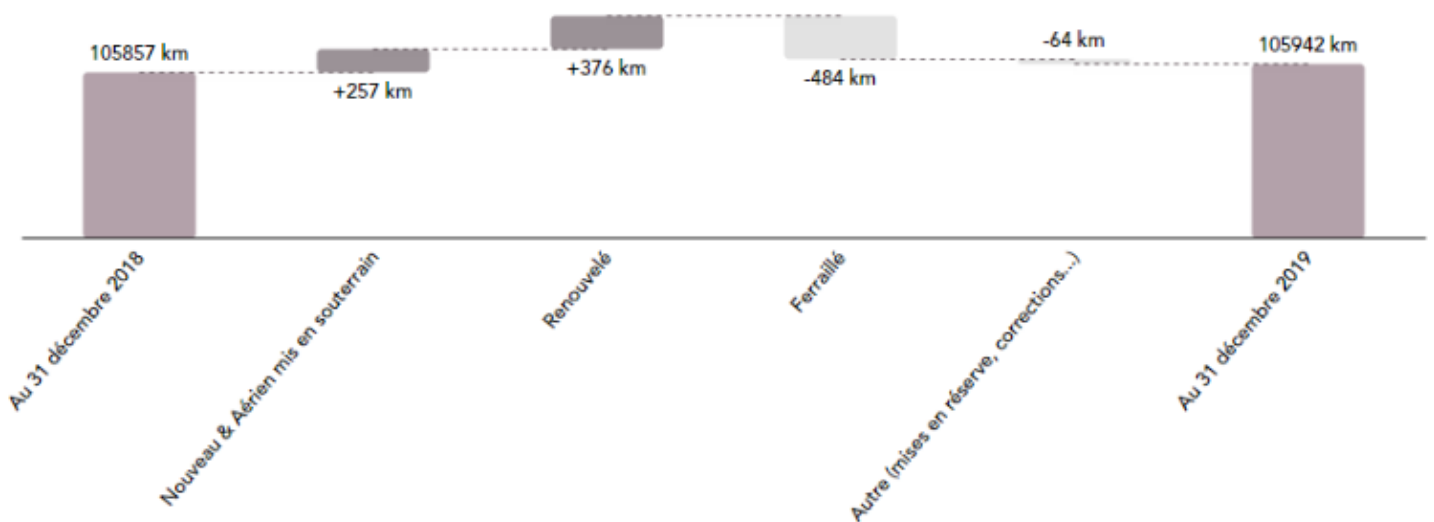


Figure 2 : Évolution de la longueur de lignes en exploitation entre 2018 et 2019, source [2]

Depuis 2013, la diminution de la longueur totale des lignes aériennes se poursuit, figure 3. L'entreprise RTE s'est engagée, dans le cadre de son contrat de service public avec l'État signé en mai 2017, à ce que le réseau de lignes électriques aériennes n'augmente plus, voire diminue.

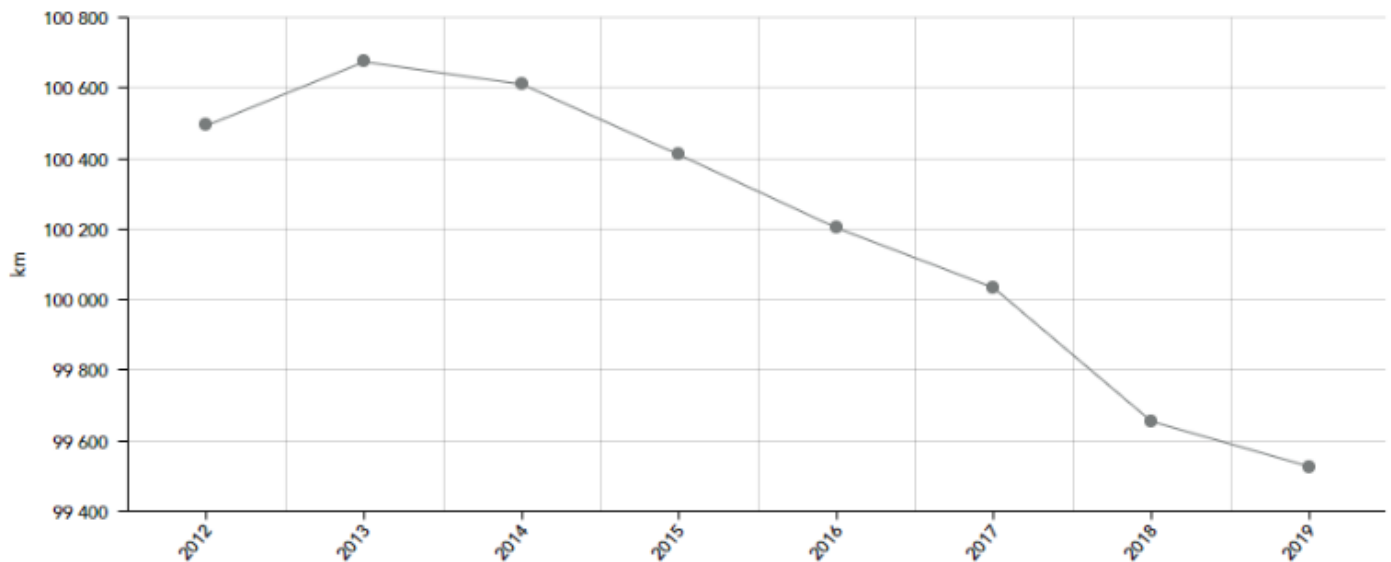


Figure 3 : Évolution de la longueur totale de lignes aériennes du réseau de transport et de distribution en km de 2012 à 2019, source [2]

Le réseau de transport et de répartition de l'électricité est en moyenne âgé de 50 ans en France, les lignes les plus vieilles ayant 85 ans (en 2019), le réseau français est l'un des plus vieux d'Europe. Avec le rythme actuel de renouvellement des lignes, il faudrait 150 ans pour rénover entièrement le réseau. Cette durée est très supérieure aux limites techniques de certains composants. Ainsi, dans l'avenir proche ce rythme et les coûts associés vont fortement augmenter [1].

Le **réseau de distribution** achemine l'électricité des postes de distribution jusqu'aux consommateurs. Les tensions sont abaissées en moyenne tension (MT) 20 000 V (HTA : entre 1 et 50 kV), ou en basse tension (BT) 400 V ou 230 V, figures 4 et 5. Le réseau de distribution comptait près de 1,3 millions de km de lignes en 2016. Le gestionnaire principal de ce réseau, ERDF devenu Enedis en 2016, est tenu de l'exploiter, l'entretenir et le développer. Lors de l'ouverture à la concurrence de marché de la commercialisation et de la fourniture d'électricité, en 2007, le transport et la distribution de l'électricité sont restées des missions de service public.

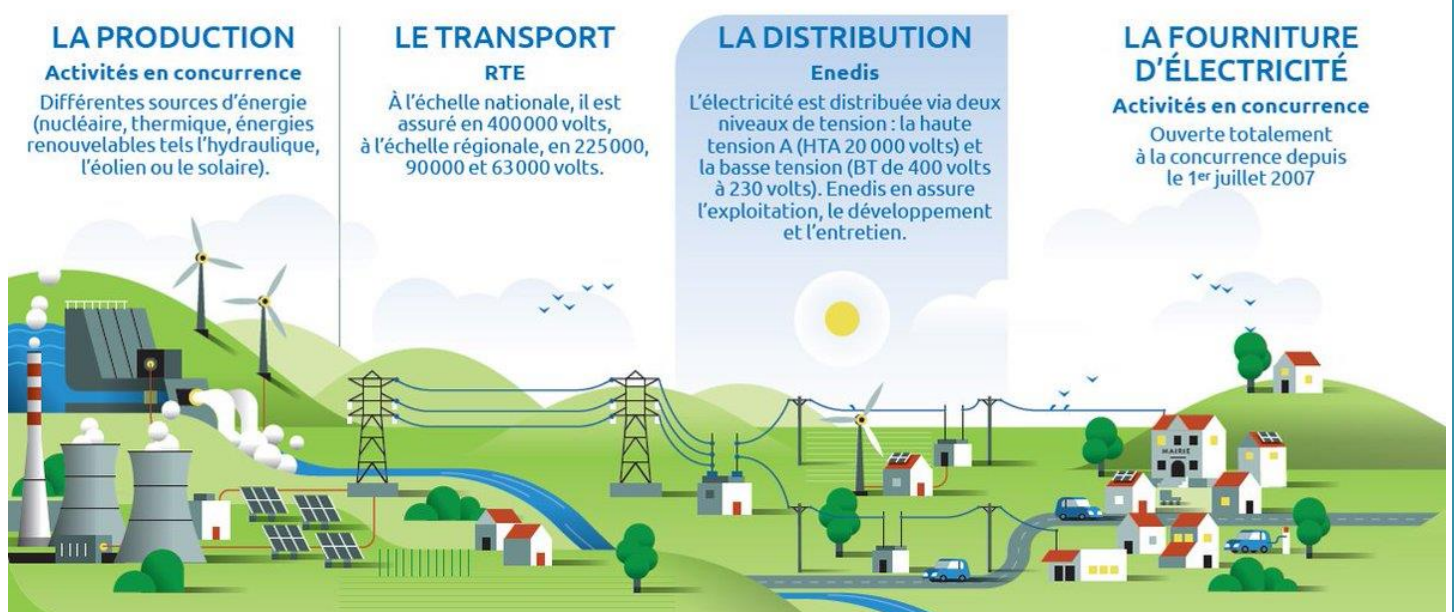


Figure 4 : Répartition de la gestion du réseau de transport et de distribution de l'électricité, source [Enedis](#)



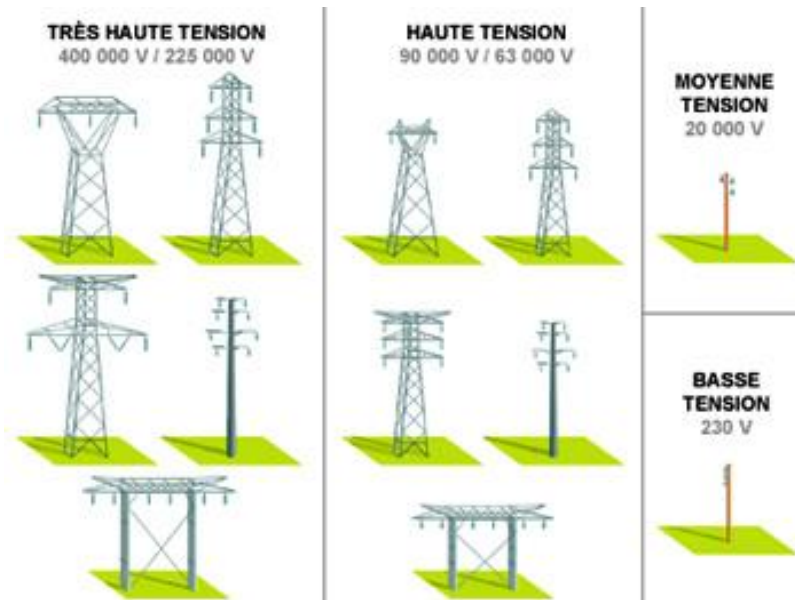


Figure 5 : Aspects des différents pylônes électriques, source [7]

La figure 6 récapitule, sous la forme d'un schéma, le transport de l'électricité de la production à la consommation. Les lignes THT sont représentées en rouge, les HT en jaune, les MT en bleu et les BT en blanc. À chaque changement de niveau de tension se trouve un transformateur. Le réseau est interconnecté (maillé) afin d'être plus résilient en cas de défaillances. Les installations de production électrique de puissance inférieure à 12 MW (hydrauliques, éoliennes, photovoltaïques, thermiques...) sont généralement connectées au réseau de distribution (20 kV) et celles de très petite puissance, typiquement photovoltaïques en toiture, sont raccordées au réseau basse-tension 230V-400V.

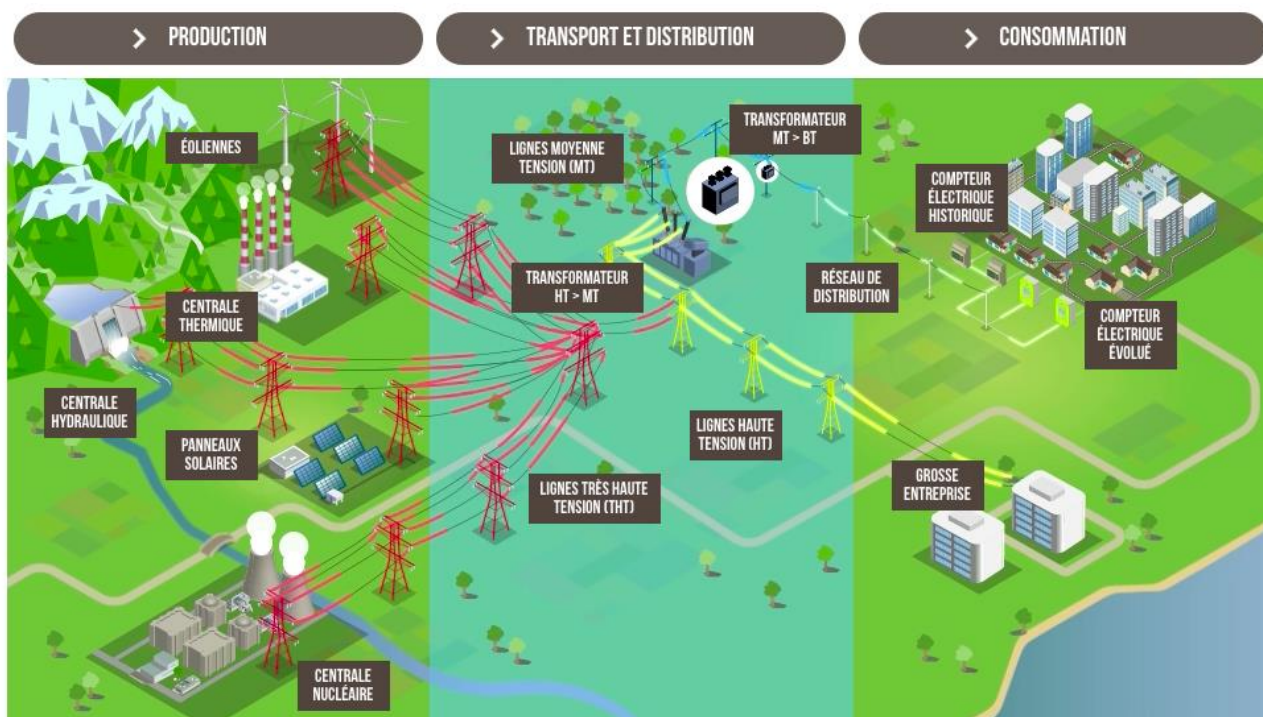


Figure 6 : Production, transport et distribution de l'électricité, source [3].  
 Voir l'animation sur le site de la [Commission de régulation de l'énergie](#)

Notons que dans les zones insulaires, il n'y a ni réseau de transport, ni gestionnaire de réseau. Le système électrique (réseaux et production) est géré par un seul opérateur EDF-SEI (systèmes énergétiques insulaires).

## 1.2 - Supports des lignes et interconnexion des réseaux d'acheminement de l'électricité

Début 2019, le réseau de transport et de répartition de l'électricité s'appuyait sur 81 000 km de files de pylônes, figure 7. Il comptait 48 liaisons d'interconnexion avec les réseaux limitrophes européens [1] pour une capacité cumulée d'environ 18 GW, encore en progression, permettant d'accroître la stabilité du système électrique européen. Notons qu'une file de pylônes peut supporter deux lignes aériennes, ce qui explique que la longueur de circuit aérien soit supérieure à celle de files de pylônes.

	400 kV	225 kV		150 kV*-90 kV-63 kV-45 kV*		Courant continu	Total
	Aérien	Aérien	Souterrain	Aérien	Souterrain	Souterrain	
Longueur de circuit (km)	22 033	25 561	1 500	52 375	4 620	183	106 272
File de pylônes (km)	13 623	21 687	-	45 911	-	-	81 221

\*Longueurs totales très faibles

Figure 7 : Longueur de circuit et file de pylônes du réseau de transport au 31 décembre 2018, source [1]

Les technologies employées pour les pylônes ont fortement évolué depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle et les matériaux entrant dans la constitution de ces supports se sont diversifiés. En 2019, l'âge moyen des pylônes et poteaux était de 48 ans et 11% comptaient plus de 80 ans, figure 8. Ainsi, dans les années à venir, le nombre de supports à renouveler va continuer à croître.

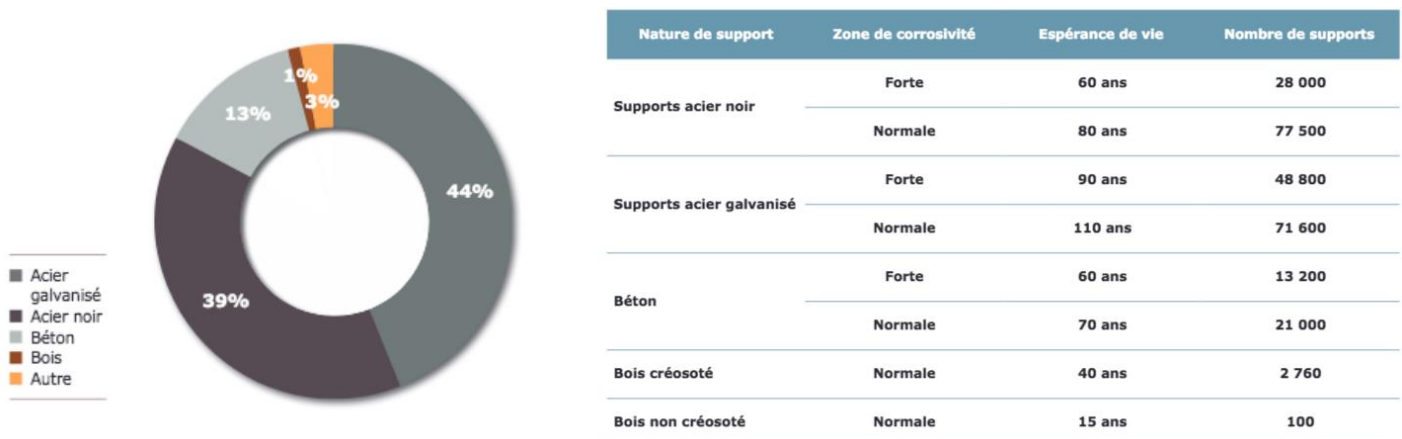


Figure 8 : Répartition des supports par nature et espérance de vie des supports de liaisons aériennes, source [1]

À l'interconnexion des réseaux se trouvent les postes électriques, figure 9. Ils se composent de **transformateurs de puissance et de mesure, de disjoncteurs et de sectionneurs**. Leur rôle est de changer de niveau de tension, de mesurer et d'aiguiller les flux d'énergie entre les différentes portions de réseaux. Les transformateurs de puissance convertissent la tension afin de transmettre l'énergie depuis les centrales jusqu'aux clients industriels ou aux réseaux de distribution. La tension est d'abord élevée en sortie des outils de production afin d'acheminer l'énergie sur de longues distances avec de moindre pertes, puis elle est abaissée pour être distribuée. Les disjoncteurs protègent le réseau en mettant une partie du circuit hors tensions, lors d'éventuels défauts et surcharges. Les sectionneurs assurent les fonctions de séparation électrique, d'aiguillage et de mise à la terre, notamment pour assurer les travaux de maintenance. Les transformateurs de mesure sont utilisés pour assurer la captation des informations électriques nécessaires à la surveillance et la protection du réseau.



Figure 9 : Poste électrique, source [8]

En 2019, 16 nouveaux postes de transformations ont été raccordés au réseau dont 9 en 225 kV [2]. Le réseau de transport et de répartition comptait alors plus de 3 900 postes électriques, nœuds des jonctions.

On rappelle ici rapidement le fonctionnement d'un transformateur monophasé. Il est formé de deux enroulements en cuivre ou aluminium enlaçant un circuit magnétique en matériau ferromagnétique (figures 10a et b). En triphasé, le principe est similaire mais il existe des couplages (magnétiques et électriques) entre les 3 phases. Les figures 10b et 10c montrent, respectivement, des architectures schématiques de circuits magnétiques et une photo d'un transformateur de forte puissance (environ 300 MVA, plus de 200 tonnes), d'ailleurs assemblé sur site afin de contourner les contraintes de transport.

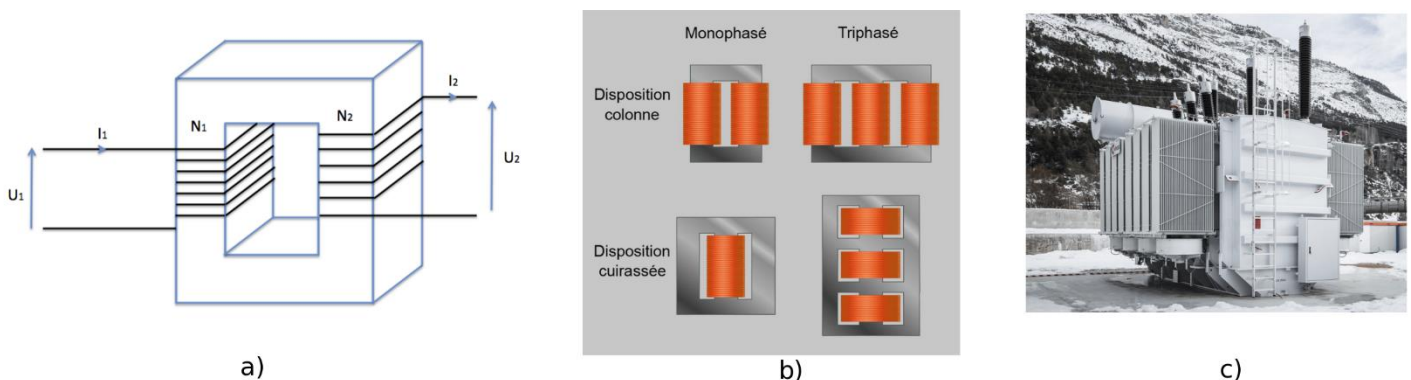


Figure 10 : a) Schéma d'un transformateur monophasé ; b) Transformateurs de puissance mono ou triphasés (source [SpinningSpark](#), Wikimedia) ; c) Tranformateur 225/63kV de l'Argentière (source [RTE](#))

Une tension sinusoïdale appliquée à l'enroulement primaire vient créer un flux magnétique variable dans le circuit magnétique. Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles (feuilletage) de telle sorte que les lignes de champs et les tôles aient la même direction : les lignes de champ restent alors canalisées dans chacune des tôles, ce qui limite les pertes magnétiques par courant induit dans ce milieu conducteur de l'électricité. Par induction, l'enroulement secondaire est le siège d'une tension, et d'un courant si le circuit est fermé. Le rapport de transformation  $m$  est défini par :



$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_{20}}{U_1}$$

Avec  $N_1$  et  $N_2$  respectivement les nombres de spires au primaire et au secondaire,  $U_{20}$  la valeur efficace de la tension au secondaire à vide (sans charge),  $U_1$  celle aux bornes de l'enroulement primaire.

Dans un modèle de transformateur parfait, nous négligeons :

- les pertes par effet Joule dans les enroulements (résistance des enroulements nulle)
- les pertes fer dans le circuit magnétique (pertes par hystérésis et par courant de Foucault)

Dans ce modèle, proche de la réalité en très forte puissance (rendement très proche de 100%), on peut écrire :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Un transformateur est également caractérisé par sa puissance apparente nominale égale au produit des valeurs efficaces nominales de la tension secondaire et du courant secondaire (en triphasé, on multiplie par 3 en considérant les tension et courant de chaque enroulement secondaire). La puissance apparente s'exprime en VA (volts-ampères), kVA ou MVA.

### 1.3 - Caractéristiques du signal électrique européen

Le réseau électrique européen interconnecté est en courant alternatif. L'onde de tension prend idéalement la forme d'une sinusoïde de fréquence sensiblement constante, égale à 50 Hz et, dans le cas du réseau domestique, de valeur efficace nominale 230 V en monophasé ou 400 V en triphasé [5] avec une tolérance de +/-10%.

La figure 11 présente un schéma pour un raccordement en triphasé et en monophasé. Selon le type de protection utilisée, le neutre du transformateur peut être raccordé à la terre, ce qui permet de détecter d'éventuelles fuites (détection différentielle) vers la terre, fuites témoignant d'un défaut d'isolement des parties métalliques elles-mêmes reliées à la terre.

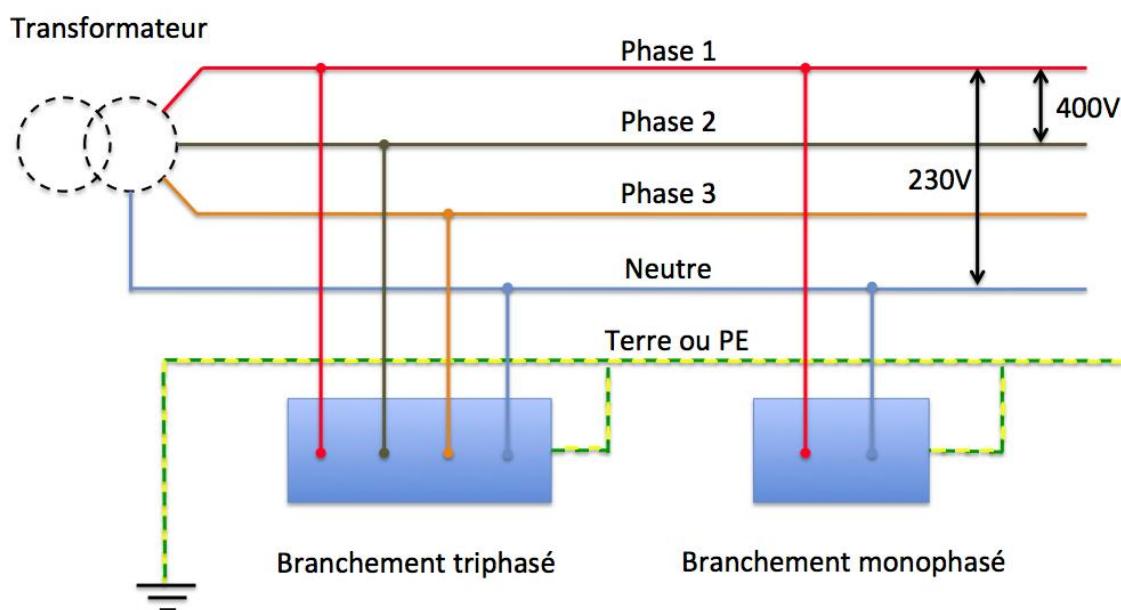


Figure 11 : Schéma de raccordement triphasé ou monophasé.  
La Terre est aussi appelée Protective Earth (PE)

Dans les faits, la forme d'onde n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude varient et s'écartent parfois des valeurs de références avec une certaine tolérance, figure 12. Le réseau peut connaître des creux de tensions très courts (effondrement de la tension de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes), mais également des variations permanentes, respectivement entre 90% et 110% de la valeur efficace nominale, des surtensions impulsionnelles, des papillotements (fluctuations rapides et relativement faibles de la valeur efficace ou phénomène de flicker) et, plus rarement, des coupures.

La fréquence du réseau peut connaître des fluctuations (marge autorisée  $50 \pm 0,5$  Hz) en fonction de l'équilibre production-consommation, cette souplesse, aujourd'hui surtout associée à l'inertie mécanique de tous les groupes tournants de production, permet de stabiliser le réseau en agissant sur leur puissance. La forme d'onde sinusoïdale peut être perturbée par des harmoniques de courant qui engendrent des déformations de l'onde.

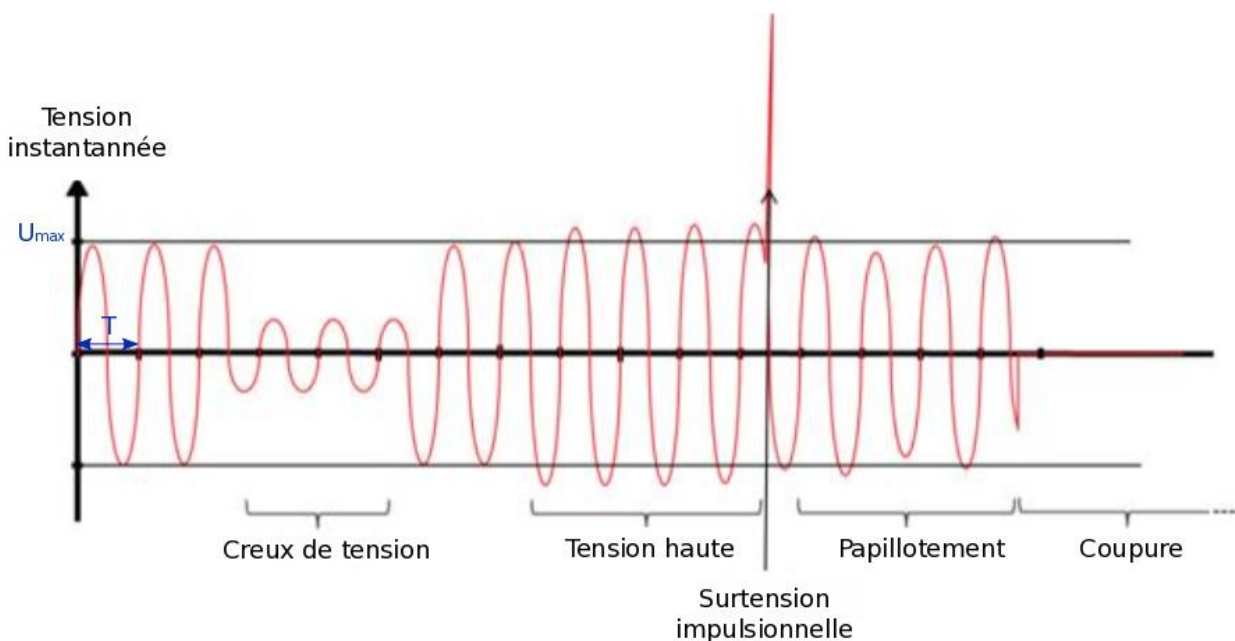


Figure 12 : Différentes altérations de l'onde de tension délivrée par le réseau électrique, source [5]

## 1.4 - Pertes en lignes

Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, le passage du courant fait chauffer le conducteur et engendre des pertes d'énergie, appelée **pertes par effet Joule** (en W). Ces pertes sont liées à la résistance du conducteur  $R$  (en  $\Omega$ ) et à l'intensité  $I$  (en A). On a :

$$P_{Joule} = RI^2$$

La résistance  $R$  d'un conducteur dépend de sa résistivité ( $\rho$  en  $\Omega.m$ ), sa section ( $S$  en  $m^2$ ) et sa longueur ( $L$  en m) :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Pour réduire les pertes par effet Joule on minimise la résistance des câbles en choisissant un métal de faible résistivité électrique. Il faut également tenir compte du fait qu'en courant alternatif, l'intensité ne se répartit pas de façon homogène (effet de peau).

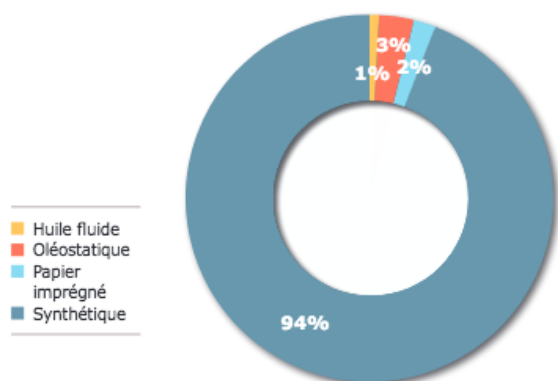
Enfin, il existe d'autres pertes sur les réseaux, celles dans les transformateurs (pertes magnétiques associées essentiellement à la tension et pertes par effet Joule associées au courant) et celles par effet couronne (ou corona) associées à l'ionisation de l'air autour des lignes en très haute tension.



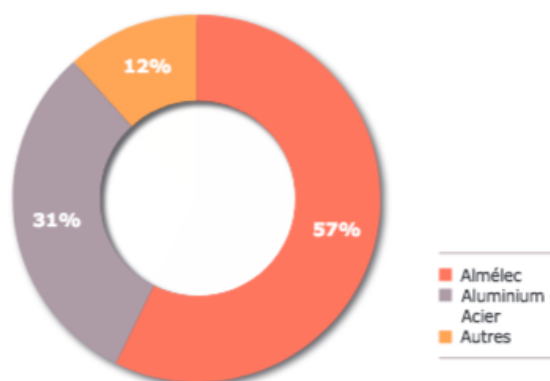
L'ensemble de ces pertes de transport et de distribution représentent de l'ordre d'une dizaine de pourcent de la production, valeur très dépendante de l'étendue du réseau et de la densité des consommateurs qui y sont raccordés.

La figure 13 présente, dans le cas des lignes souterraines, les compositions et proportions des technologies isolantes et, dans le cas des lignes aériennes, les compositions et proportions des technologies de conducteurs (Aluminium + acier, Almélec et autres-soit surtout du cuivre) en 2019 en France [1]. La nature des conducteurs dépend fortement de leur période d'installation.

### Lignes souterraines



### Lignes aériennes



Type de liaison électrique	Nature des câbles conducteurs	Espérance de vie	Longueur de câbles (en km)
Liaisons aériennes	Conducteurs Aluminium-Acier	85 ans	124 000
	Conducteurs Almélec	80 à 100 ans	228 000
Liaisons souterraines	Câbles à papier imprégné	65 ans	400
	Câbles à isolation synthétique	80 à 100 ans	17 000

Figure 13 : Répartition des technologies d'isolation dans les lignes souterraines et de conducteurs dans les lignes aériennes, source [1]  
L'Almélec est un alliage d'aluminium, de magnésium et de silicium

L'âme conductrice des lignes souterraines est en aluminium ou en cuivre. La couche isolante autour de l'âme peut être en papier imprégné d'huile ou, désormais le plus souvent, en matière synthétique (généralement du polyéthylène). La protection mécanique est réalisée avec une gaine synthétique armée.

Avant 1945 la technologie des câbles aériens était composée d'aluminium et d'acier. Ensuite, jusqu'en 1975, on a déployé des câbles Aluminium-Acier, et finalement l'Almélec apportant un meilleur compromis technico-économique. Les câbles conducteurs aériens sont nus, ils ne sont pas dans une gaine, leur isolation électrique est assurée par l'air. Le circuit triphasé est composé de trois phases. Chacune est constituée d'un faisceau de conducteurs ou d'un conducteur simple, représentant une âme centrale, sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium (voir figure 14). Cette disposition permettant de réduire les pertes dues à l'effet de peau évoqué plus haut. Sur les lignes de transport, on peut observer un 4<sup>ème</sup> conducteur situé au faîte de l'ensemble et appelé câble de garde destiné à protéger des effets de la foudre. En 2019, pour le réseau de transport de l'électricité français, on comptait alors 400 000 km de câble conducteur, cela représente un peu plus de la distance moyenne Terre-Lune (384 000 km) !



Figure 14 : Constitution des lignes aériennes, source [Dave Bryan](#), Wikimedia

Grâce à sa grande conductivité le cuivre a longtemps été un matériau très apprécié (résistivité de  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ). Cependant sa masse volumique importante ( $8\,920 \text{ kg/m}^3$ ), son coût fluctuant (associé à une certaine criticité d'approvisionnement) et ses problèmes de fluage ont orientés les choix vers d'autres matériaux. La résistivité de l'aluminium ( $2,82 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) est un peu plus importante mais sa masse volumique est nettement plus faible ( $2703 \text{ kg/m}^3$ ). L'Almélec est un alliage d'aluminium, de magnésium et de silicium, permettant d'améliorer sa résistance mécanique. Sa résistivité à  $20^\circ \text{C}$  est de  $3,57 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ , sa masse volumique :  $2703 \text{ kg/m}^3$ . Les limites de rupture en traction sont pour le cuivre  $210 \text{ N/mm}^2$ , l'aluminium  $80 \text{ N/mm}^2$  et l'almélec  $245 \text{ N/mm}^2$ . On utilise des combinaisons aluminium-acier ou almélec-acier où les brins d'acier permettent d'accroître les caractéristiques mécaniques du conducteur [6].

Sur le réseau, 78% des pertes en ligne sont des pertes par effet Joule [9]. Les interconnexions et notamment les liaisons avec les postes de transformation engendrent aussi des pertes estimées à 11%. On compte 8% des pertes dues aux décharges électriques entre l'air et le conducteur (effet couronne). Enfin, les 3% restant correspondent au fonctionnement des postes de transformation (pertes fer dans le circuit magnétique).

En 2019, le taux de pertes moyen sur le seul réseau de transport a été de 2,22% de l'énergie transportée, ce qui représente environ 11 TWh [2].

## 2 – Distribution régionale et européenne

### 2.1 - Équilibre entre production et consommation au sein du pays

Le réseau de distribution est interconnecté et les différentes mailles permettent d'assurer un équilibre entre des régions fortement productrices et d'autres plus consommatrices. Sans grandes surprises, l'évolution de la consommation régionale en France suit globalement la dynamique démographique, cependant la consommation nationale intérieure est en légère diminution depuis 2012.

La figure 15 présente, à gauche, l'évolution de la démographie (de 0% à plus de 4% selon le code couleur) et, à droite, l'évolution de la consommation électrique (de -10% à plus de 5% selon de code couleur) entre 2007 et 2018.

Evolution de la population entre 2007 et 2017

Evolution de la consommation corrigée entre 2007 et 2018

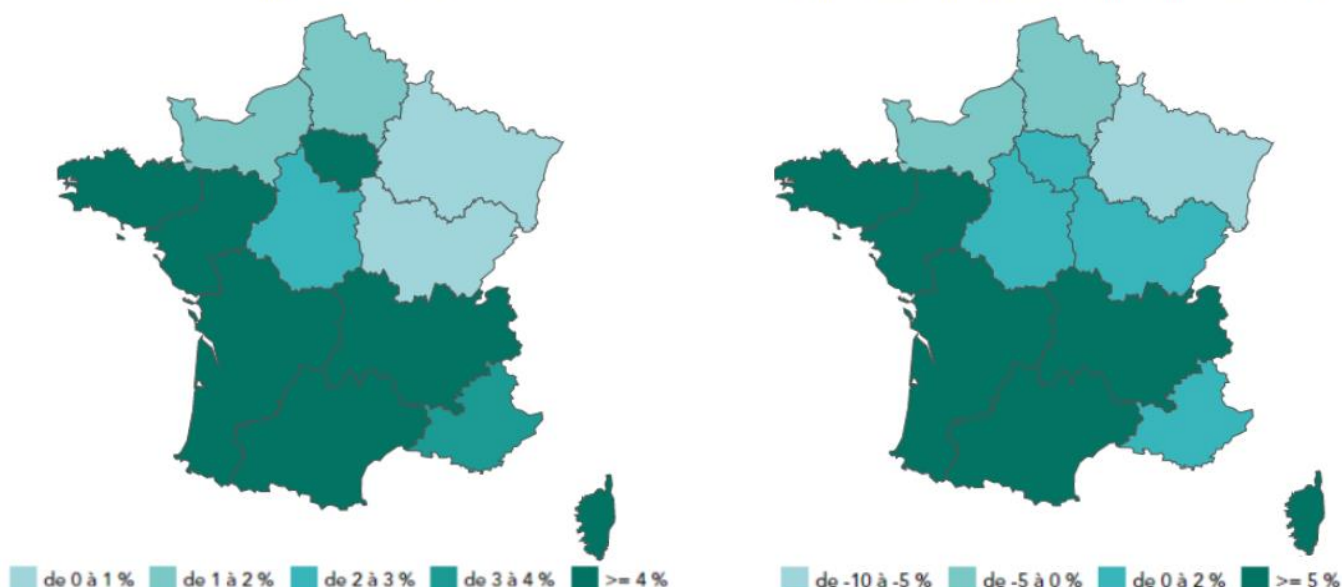


Figure 15 : Évolution de la dynamique démographique (gauche) et de la consommation électrique (droite) entre 2007 à 2018, source [2]

Les données de production (par filière), de consommation d'importation et d'exportations au pas horaires sont accessibles en ligne via le site [ECO2mix](https://www.eco2mix.com/) de RTE.

## 2.2 - Exportations de l'électricité

La France a conservé en 2019 sa place de premier pays exportateur d'électricité en Europe avec un solde des échanges de 55,7 TWh, figure 16. La figure 17 présente les importations et exportations d'électricité de 2009 à 2019. Le solde exportateur est toujours positif. Notons que ces données concernent les échanges contractuels et non les échanges physiques aux frontières (un échange contractuel avec un pays peut très bien emprunter une interconnexion physique avec un autre pays).

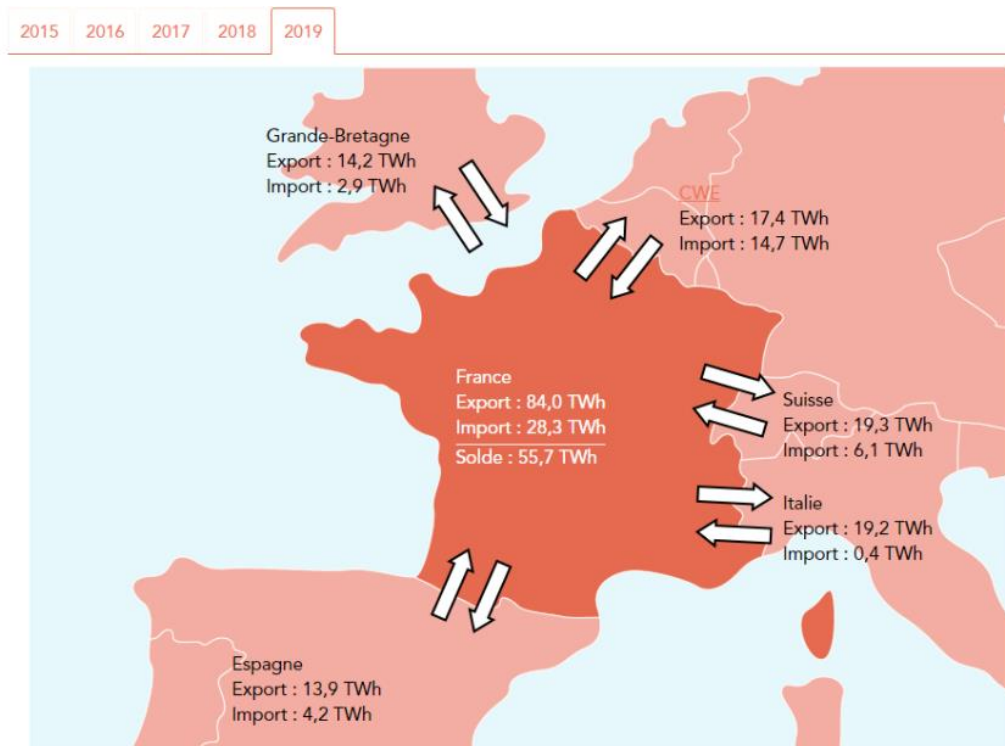


Figure 16 : Imports et exports d'électricité en 2019. La zone CWE (Central West Europe) regroupe l'Allemagne, la Belgique et le Luxembourg, source [2]

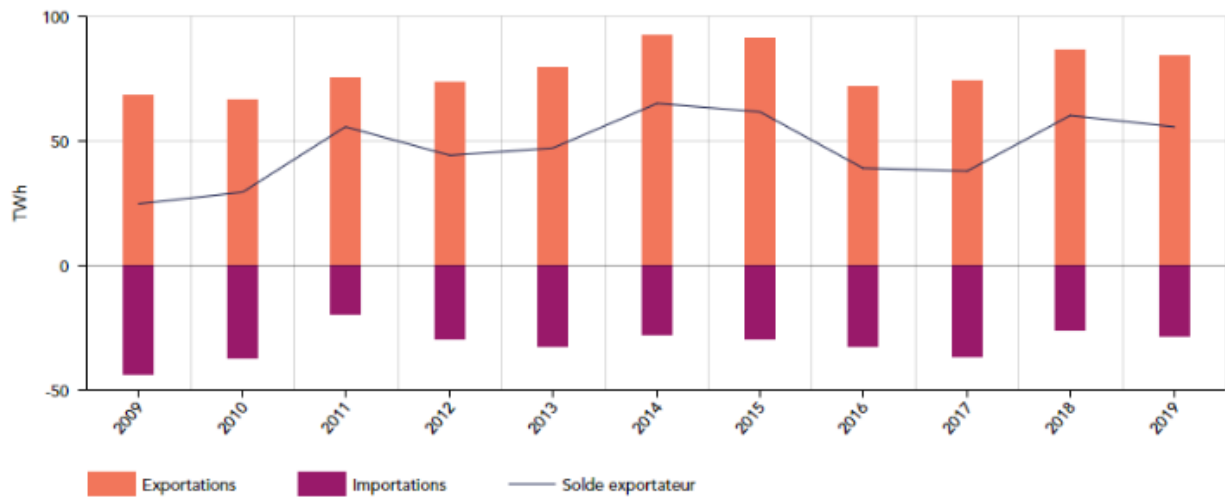


Figure 17 : Échanges d'importations et d'exportations contractuels d'électricité entre la France et l'ensemble de ses voisins de 2009 à 2019, source [2]

La France est quasiment toujours exportatrice nette vers la zone CWE (Central West Europe : Allemagne, Belgique et Luxembourg). La figure 18 montre que, depuis 2006 excepté en 2011, la France a toujours été importatrice d'électricité vis-à-vis de l'Allemagne. L'Allemagne, même en décidant d'abandonner sa filière électronucléaire, n'est pas dépendante de la production française.

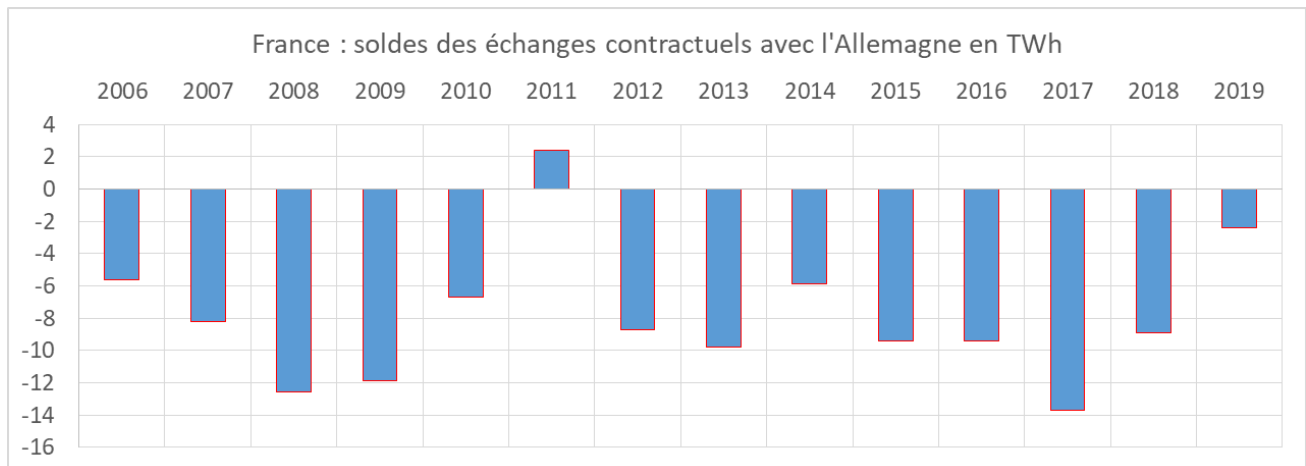


Figure 18 : Solde des échanges contractuels d'électricité entre la France et l'Allemagne de 2006 à 2019, source d'après les bilans électriques annuels de RTE et les rapports d'Agora Energiewende [10] (une valeur négative signifie que la France était importatrice nette d'électricité vis-à-vis de l'Allemagne)

Nous venons de présenter quelques données concernant les infrastructures physiques du réseau électrique français, originellement conçu pour accueillir des sources très centralisées. Actuellement, l'intégration croissante d'électricité d'origine renouvelable, variables, peu pilotables et avec peu d'inertie, telles que l'éolien et le photovoltaïque, oblige à repenser le pilotage du réseau électrique. La gestion du réseau nécessite ainsi des changements importants, notamment dans le maintien de l'équilibre du signal électrique (stabilité de la fréquence). Différents travaux de recherche laissent penser qu'un système en courant alternatif à très haute teneur en sources renouvelables peu pilotables (éolien et photovoltaïque) peut tout à fait rester stable. C'est le cas du projet européen MIGRATE [11] (Massive InteGRATion of power Electronic devices) auquel participait entre autres le gestionnaire du réseau de transport RTE. Une vidéo pédagogique [12], publiée par RTE, explique très bien le fonctionnement du réseau électrique, notamment en présence massive de sources renouvelables variables et peu pilotables.



## 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]: Le renouvellement du réseau existant, RTE, 2019, <https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/SDDR%202019%20Chapitre%202%20-%20Le%20renouvellement%20du%20r%C3%A9seau%20existant.pdf>
- [2]: Bilan électrique 2019, RTE, février 2020, <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/Bilan%20C3%A9lectrique%202019.pdf>
- [3]: L'électricité, comment ça marche ? Module pédagogique développé par la Commission de régulation de l'énergie (CRE), <http://modules-pedagogiques.cre.fr/m1/index.html>
- [4]: Le réseau de transport EDF, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/le-reseau-de-transport>
- [5]: Qualité de l'électricité, CRE, avril 2019, <https://www.cre.fr/Electricite/Reseaux-d-electricite/qualite-de-l-electricite>
- [6]: Dimensionnement d'une jonction triphasée, Olivier Houet, Université de Liège, [http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/tfe\\_oh.pdf](http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/tfe_oh.pdf)
- [7]: Comment distinguer les différentes lignes électriques ? EDF, juin 2013, <https://www.connaissancedesenergies.org/comment-distinguer-les-differentes-lignes-electriques-130626>
- [8]: Les postes de transformation, EDF, <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/l-acheminement-de-l-electricite/les-postes-de-transformation>
- [9]: Déperditions d'énergies ou pertes en ligne: un phénomène naturel, RTE, consulté en mars 2021, <https://www.rte-france.com/riverains/deperditions-denergies-ou-pertes-en-ligne-un-phenomene-naturel>
- [10]: Agora Energiewende, Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019, <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/die-energiewende-im-stromsektor-stand-der-dinge-2019/>
- [11]: <https://www.h2020-migrate.eu/about.html>
- [12]: Intégration des énergies renouvelables, RTE facilitateur de la transition énergétique, vidéo, mai 2020, [https://www.youtube.com/watch?v=i\\_QhVNMZljl](https://www.youtube.com/watch?v=i_QhVNMZljl)

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