



Quelques notions en énergie électrique

Principaux points abordés :

Cette fiche présente des notions clés sur l'énergie électrique :

- Le courant électrique, son intensité et sa tension ;
- La puissance électrique ;
- L'énergie ;
- Le facteur de charge ;
- La variabilité de la production éolienne ;
- D'autres notions d'énergie électrique.

Ces notions sont à chaque fois expliquées dans un cadre général, puis appliquées au cas particulier de l'énergie électrique créée par un parc éolien en mer.

1. Le courant électrique

Le courant électrique naît du déplacement d'électrons dans un conducteur, avec un mouvement continu (courant continu) ou avec un mouvement de va-et-vient (courant alternatif). Le courant le plus utilisé pour le transport et la distribution d'électricité est le courant alternatif. Les valeurs qui entrent en jeu dans la caractérisation du courant sont l'intensité et la tension.

1.1 L'intensité : I

L'intensité, mesurée en ampères (A), est la mesure du courant électrique ; c'est la quantité d'électricité qui traverse un conducteur pendant une seconde.

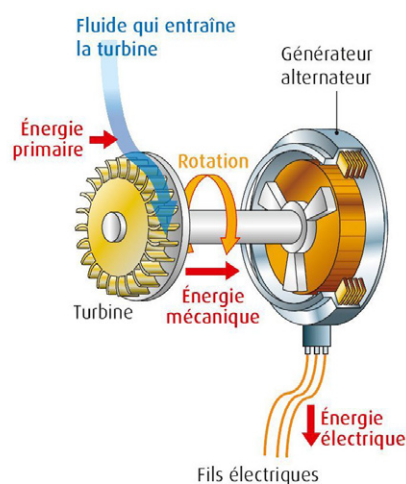
1.2 La tension : U

La tension, mesurée en volts (V) ou en kilovolts (1 kV = 1000 V), représente la force fournie à une quantité d'électricité donnée qui va d'un point à un autre.

Pour mieux visualiser ces unités de mesure, il est fréquent de comparer le déplacement électrique à celui d'un fluide : la tension correspond à la pression d'eau présente dans le tuyau, tandis que l'intensité correspond au débit.

Les éoliennes transforment l'énergie du vent en énergie mécanique. Le générateur convertit cette énergie mécanique en énergie électrique, produisant de l'électricité.

En sortie d'éolienne, le courant est généré en courant alternatif avec une tension de 66 kV. Cette tension est élevée dans la plupart des cas en courant alternatif à 225 kV¹ au sein du poste de transformation électrique situé sur une plateforme en mer. Puis le courant électrique est transporté jusqu'au poste de raccordement à terre, pour être injecté dans le réseau électrique existant à 225 kV ou 400 kV. Les postes électriques et les câbles haute tension constituent le raccordement. [Voir fiche 10 – Caractéristiques et scénarios de raccordement RTE]



© Belin Education/Humensis, 2020 Enseignement scientifique Terminale © COREDOC

2. La puissance : P

La puissance électrique est mesurée en watts (W) et ses multiples (kilowatts, mégawatts, gigawatts, térawatts). Elle est le produit de la quantité d'électricité qui traverse le conducteur pendant une seconde (Intensité du courant en ampères [A]) et de la tension (en volts [V]) : Puissance = Intensité x Tension.

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par les pales. Autrement dit, plus le rotor de l'éolienne est grand, plus elle peut produire d'électricité. Par conséquent, plus les éoliennes sont grandes, moins elles sont nombreuses pour produire la même puissance.

Pour le premier parc envisagé à l'issue du débat public, chaque éolienne pourrait disposer d'une puissance nominale de 15 MW (éolienne la plus puissante en cours de développement à ce jour chez Vestas, correspondant au modèle v236-15.0 MW).

Cela correspond à un parc de 34 éoliennes au maximum pour un parc de 500 MW, ou de 67 éoliennes pour un parc de 1000 MW. Si du fait des progrès technologiques une éolienne plus puissante était commercialisée, le parc envisagé pourrait avoir moins d'éoliennes mais de plus grande taille (avec des éoliennes de 18 MW, 28 unités pour un parc de 500 MW ou 56 pour un parc de 1000 MW).

3. L'énergie : E

L'énergie correspond à une puissance électrique pendant une unité de temps, s'exprime en wattheures [Wh] ou kilowattheures [kWh], MégaWh, GigaWh, TeraWh. Par exemple, une ampoule de 60 watts (puissance) qui éclaire pendant 1000 heures consomme une énergie de 60000 Wh, soit 60 kWh.

¹ La tension peut également être élevée, au sein d'une station de conversion en mer, pour passer au courant continu. [Voir fiche 10 – Caractéristiques et scénarios de raccordement RTE]

La consommation électrique totale française est de 460 TWh en 2020 en France dont 150 TWh pour le résidentiel (bilan électrique 2020 RTE²). Un foyer nécessite de l'énergie pour son chauffage, ses appareils électroniques (téléphones, ordinateurs, télévision, etc.), pour ses équipements ménagers (réfrigérateur, four, micro-ondes...) et bien d'autres. Pour évaluer la consommation annuelle des appareils électriques, il faut prendre en compte la puissance de l'appareil et sa durée annuelle d'utilisation. Pour avoir un ordre d'idées, les consommations de quelques appareils sur un an sont les suivantes :

- Réfrigérateur : 350 kWh ;
- Aspirateur : 150 kWh ;
- Lave-linge : 1150 kWh ;
- Ampoule de basse consommation : 22 kWh.

Pour connaître l'énergie annuelle que peut produire une éolienne en tenant compte de la variabilité du vent, il est nécessaire de définir le facteur de charge.

4. Le facteur de charge

Le facteur de charge est le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement en équivalent pleine puissance et le nombre d'heures de fonctionnement théorique dans l'année (8). En d'autres termes, il s'agit du ratio entre l'énergie que produit l'éolienne sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite durant cette période si elle avait constamment fonctionné à puissance nominale (c'est-à-dire la puissance la plus élevée qu'une unité de production peut délivrer).

Vitesse de vent	Inférieure à environ 10 km/h	Entre environ 10 et 40 km/h	Entre environ 40 et 100 km/h	Entre environ 100 et 125 km/h	Supérieure à environ 125 km/h
L'éolienne	Ne fonctionne pas	Fonctionne	Fonctionne	Fonctionne	Ne fonctionne pas
Production d'électricité	0	Passe de 0 à la puissance nominale	Égale à la puissance nominale	Proche de la puissance nominale	0

2 https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/wp-content/uploads/2021/03/PDF_BE2020-1.pdf p. 9.

Le facteur de charge est variable d'une année à l'autre, puisqu'il dépend des régimes de vent.

Selon WindEurope, les facteurs de charge annuels des parcs éoliens en mer en Europe en 2020 étaient compris entre 38 % et 42 %, selon la méthodologie utilisée³. En 2020, le facteur de charge moyen de l'ensemble des parcs en mer du Nord en fonctionnement était évalué à 42 %⁴. Les perspectives de facteurs de charge des parcs éoliens en mer en développement sont cependant nettement supérieures, de l'ordre de 60 % compte tenu des progrès technologiques et de la localisation des projets. Siemens-Gamesa, exploitant le parc éolien en mer de Hywind en Écosse, annonce même un facteur de charge record de 58 % pour l'année 2019.

Pour une installation de 500 MW d'éoliennes en mer avec un facteur de charge estimé à 40 %⁵, la quantité d'énergie produite sera de plus de 1750 GWh/ an, pour un fonctionnement annuel équivalent à environ 3500 heures à pleine puissance.

D'après RTE⁶, la consommation annuelle d'électricité dans le secteur résidentiel en 2020 est de 150 TWh, soit environ 2220 kWh par habitant et 5000 kWh par foyer. Ainsi, un projet de parc de 500 MW, sous l'hypothèse d'un facteur de charge de 40 %⁴, permettrait de produire l'équivalent de la consommation électrique domestique d'environ 790000 habitants, soit plus que la population de Charente-Maritime⁷.

5. La variabilité de la production éolienne dans le bouquet électrique

Ces dernières années, l'essor des énergies renouvelables a conduit à une modification du bouquet énergétique, appelé à évoluer selon les objectifs fixés par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

Pour plus de détails sur le bouquet électrique français et néo-aquitain consulter la [\[fiche 4 – Quelle alimentation électrique pour la Nouvelle-Aquitaine ?\]](#).

En particulier, la part des énergies renouvelables a fortement augmenté depuis 5 ans :

- L'éolien terrestre et le photovoltaïque représentent 20 % des capacités installées de production en France et 8,5 % de la production électrique ;
- Cette part a doublé depuis 2013, à la fois pour le photovoltaïque et l'éolien terrestre.

3 <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-in-2020-trends-and-statistics/> : Wind energy in Europe – 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025, p. 20-21.

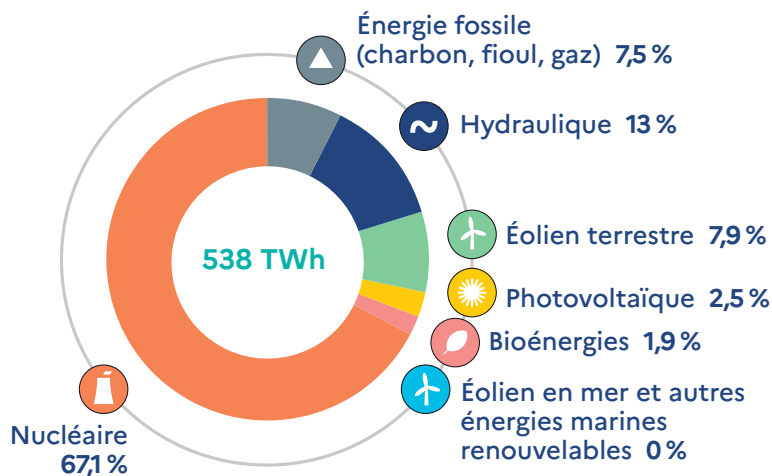
4 *idem*

5 Cette estimation est basée sur le facteur de charge estimé pour le parc éolien de Yeu-Noirmoutier (<https://iles-yeu-noirmoutier.eoliennes-mer.fr/le-dialogue-autour-du-projet/les-questions-reponses/>), projet le plus proche de la façade Sud-Atlantique. Cette estimation reste imprécise puisque la ressource en vent et les turbines n'est pas la même à Yeu et au large d'Oléron.

6 https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/wp-content/uploads/2021/03/PDF_BE2020-1.pdf, p.9.

7 Dossier complet Département de la Charente-Maritime, Évolution et structure de la population en 2017, INSEE : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=DEP-17#chiffre-cle-10>

Production d'électricité en France en 2020



Source : Bilan électrique 2020 (RTE)

Ministère de la Transition écologique, RTE. Réalisation : stratéact' 2021

L'éolien représente aujourd'hui 18 GW de puissance installée.

Ainsi, aux moyens de production pilotables (centrales nucléaires, thermiques à flamme, et une partie des centrales hydrauliques), se sont ajoutés des moyens de productions issus de sources d'énergie variables (éolien, photovoltaïque) soumises aux conditions météorologiques, mais en partie prévisibles.

Ceci tend à augmenter les besoins de flexibilité pour assurer l'équilibre offre-demande, devant être réalisé à chaque instant. RTE a analysé ces besoins dans le cadre de plusieurs publications, dernièrement via le schéma décennal de développement du réseau édition 2019.

Selon les analyses du schéma décennal de développement du réseau 2019⁸, jusqu'à 50 GW de capacités installées éolien/solaire (soit un doublement par rapport à 2019), des adaptations « à la marge » du réseau sont possibles. Dans ce cadre, les flexibilités existantes et prévues via la programmation pluriannuelle de l'énergie sont suffisantes pour couvrir les besoins de la flexibilité liés à la production variable, lorsqu'il n'y a pas de vent pour l'éolien par exemple. Elles proviennent de diverses sources : moyens de production pilotables, modulation de la consommation, utilisation intelligente de la recharge des véhicules électriques, interconnexions.

Au-delà de 50 GW (atteint probablement entre 2025 et 2030), des adaptations structurelles seront nécessaires sur le réseau. C'est notamment le cas sur la façade atlantique, identifiée comme zone de fragilité électrique. À cet horizon et à plus long terme, dans un contexte de diversification forte du mix, la gestion du système électrique reposera sur un équilibre global entre :

- Les capacités installées en énergies renouvelables (solaire et éolien) ;
- Le développement du stockage : batteries, barrages hydrauliques, hydrogène et gaz de synthèse... ;
- Le pilotage de la consommation : effacements, véhicules électriques, power-to-gas...
- La mise en service de nouvelles centrales thermiques ;
- Les capacités d'échanges aux frontières (interconnexions).

Pour des horizons de temps plus lointains, RTE publiera cette année un rapport d'étude présentant six scénarios mix d'évolution du système électrique permettant d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050. Cette étude est fondée sur une démarche inédite en matière de concertation et de transparence impliquant les parties prenantes intéressées à tous les stades de construction des scénarios. Un rapport d'étape avec un bilan de la consultation a été publié le 8 juin 2021⁹.

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

9 <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

Les scénarios intègrent une part de nucléaire allant de 0 % à 50 % et une part d'énergies renouvelables variant de 50 % à 100 %. L'éolien en mer représente quant à lui entre 12 et 31 %. Le rapport prend également en compte des variantes comme l'augmentation modérée de la consommation d'électricité, notamment dû à de nouveaux usages, ou encore l'influence de la sobriété et de l'efficacité énergétique sur la consommation d'électricité. Les scénarios prennent également en compte les besoins de flexibilité du système en particulier dans le contexte d'un développement massif des énergies renouvelables, ou encore les besoins de développement du réseau.

6. Autres notions d'énergie électrique

6.1 La puissance réactive : Q

La puissance réactive s'exprime en Var, abréviation signifiant voltampère réactif. Elle est définie par analogie à la puissance (active) P. Le courant électrique en courant alternatif circulant dans un câble souterrain génère une puissance réactive perturbatrice qui réduit les capacités de transit de l'ouvrage. Cette puissance réactive augmente avec la longueur de câble et peut provoquer également des échauffements des câbles et des surtensions dans le réseau électrique.

On peut maîtriser cette puissance par l'ajout de matériel de compensation (Bobines d'inductance shunt : BIS) dans différents postes électriques selon la configuration du réseau.

Ainsi, il pourrait être nécessaire au vu de la longueur totale de la liaison de raccordement électrique au réseau (sous-marin + souterrain) de créer un ou plusieurs postes intermédiaires de compensation électrique, entre le poste en mer et le poste de raccordement au réseau qui sera lui situé à proximité des lignes électriques haute tension existantes.

6.2 L'effet Joule

L'effet Joule est un effet thermique qui se produit lors du passage du courant électrique dans un conducteur. Il se manifeste par une augmentation de l'énergie interne du conducteur et généralement de sa température. L'effet joule peut être responsable de pertes d'énergie, c'est-à-dire la conversion indésirable, mais inévitable, d'une partie de l'énergie électrique en énergie thermique. C'est le cas, par exemple, des pertes en ligne lors du transport ou de la distribution du courant électrique.

6.3 La fréquence

La fréquence correspond au nombre de cycles que fait le courant alternatif en une seconde. Elle s'exprime en hertz [Hz]. En France et en Europe, la fréquence nominale est fixée à 50 Hz.

6.4 Les champs électriques et magnétiques

Dans le domaine de l'électricité, il existe deux types de champs distincts : les champs électriques et les champs magnétiques.

Un champ électrique est produit par la pression de charges électriques (si l'on reprend l'analogie avec l'eau), autrement dit la tension électrique (plus celle-ci est élevée, plus le champ qui en résulte est intense). Il se mesure en volts par mètre (V/m). Le champ magnétique apparaît lorsqu'un courant électrique circule (il est d'autant plus important que l'intensité est élevée). Il se mesure en ampères par mètre (A/m), néanmoins l'usage est d'utiliser l'unité qui mesure le flux d'induction magnétique, c'est-à-dire le microtesla (μT)¹⁰.

Tous les appareils qui fonctionnent à partir de l'électricité (électroménager, matériel de bureau ou industriel) et les équipements et installations qui servent à la produire (alternateurs et générateurs) et à l'acheminer (lignes et câbles électriques) engendrent des champs électriques et magnétiques quand ils fonctionnent.

S'agissant des champs électromagnétiques émis par les raccordements au réseau électrique : *[voir la fiche 16.1 – Les impacts environnementaux génériques d'un parc éolien en mer et de son raccordement]*

¹⁰ Dans l'air et la plupart des matériaux, l'équivalence 1 A/m = 1,25 μT est vérifiée.

