



FICHE N°4

Quelques notions sur l'énergie électrique

LES 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.

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.

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.

La tension : U

La tension, mesurée en volts (V) ou en kilovolts (1 kV = 1000V), 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 généré a une tension de 66kV. Cette tension est élevée à 225kV à travers le passage 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 225kV ou 400kV.



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 et à la vitesse du vent. 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. À cet effet se conjugue le fait que la vitesse du vent est plus forte en altitude. L'augmentation de la taille des éoliennes permet ainsi d'aller capter des vents plus forts et d'augmenter la production d'électricité.

Pour les deux premiers parcs de 250 MW envisagés à l'issue du débat public, chaque éolienne pourrait disposer d'une puissance de 13 MW (éolienne la plus puissante sur le marché à ce jour, par General Electric), soit un parc de 19 éoliennes au maximum. 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 (15 avec des turbines de 17 MW). Une éolienne de 15 MW a par exemple été annoncée par Siemens Gamesa en 2024 mais n'a pas encore fait l'objet de tests en conditions réelles.

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. Exemple : une ampoule de 75 watts (puissance) qui éclaire pendant 1000 heures, consomme une énergie de 75000Wh, soit 75 kWh.

La consommation électrique totale française est de 473 TWh en 2019 en France dont 170 TWh pour le résidentiel (bilan électrique RTE). Un foyer nécessite de l'énergie pour son chauffage, ses équipements technologiques (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.

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 (8760h). 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).

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 2017 étaient compris entre 29% et 48%, selon la méthodologie utilisée¹. En 2018, le facteur de charge moyen de l'ensemble des parcs en mer du Nord en fonctionnement était évalué à 37%². Siemens-Gamesa, exploitant le parc éolien flottant de Hywind en Écosse, déclare même un facteur de charge record de 58% pour l'année 2019. Les facteurs de charge prévisionnels des fermes pilotes du golfe du Lion se situent entre 43 et 50 % selon les sites. Du fait de vents plus forts au large et des améliorations attendues dans le domaine de l'éolien flottant, l'hypothèse d'un facteur de charge à 50 % pour le projet de parcs éoliens flottants en Méditerranée a été retenue.

Pour une installation de deux fois 250 MW d'éoliennes flottantes en mer, la quantité d'énergie produite sera de près de 2190 GWh/an, pour un fonctionnement annuel équivalent à environ 4380 heures à pleine puissance³.

¹ Offshore Wind in Europe : key trends and statistics 2017, p. 16.

² Offshore Wind in Europe : key trends and statistics 2018, p. 17-18.

³ Ce qui correspond à un facteur de charge de 50 %.

D'après RTE⁴, la consommation annuelle d'électricité dans le secteur résidentiel en 2017 est de 148,6 TWh, soit environ 5200 kWh par ménage⁵. Ainsi, deux parcs de 250MW, sous l'hypothèse d'un facteur de charge de 50 %, permettraient de produire l'équivalent de la consommation électrique d'environ 925 000 personnes, soit l'équivalent de la population de Marseille et Aubagne réunies.

LA GESTION DE LA VARIABILITÉ DE LA PRODUCTION ÉOLIENNE

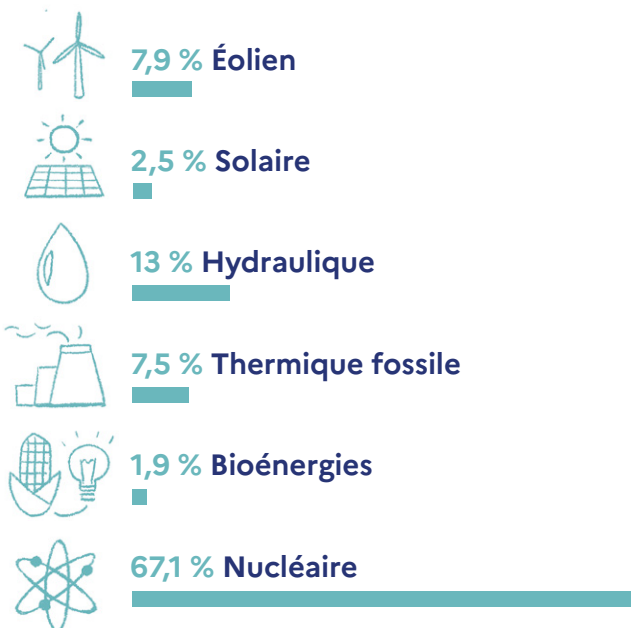
Ces dernières années, l'essor des énergies renouvelables a conduit à une modification du bouquet énergétique, appelé à évoluer selon les objectifs fixés par la programmation pluriannuelle de l'énergie.

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

~ L'éolien terrestre et le photovoltaïque représentent **20%** du parc électrique français et **10,4%** de la production électrique.

~ Cette part a **doublé** depuis 2013, à la fois pour le photovoltaïque et l'éolien terrestre.

Répartition de la production par filière



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 2019⁶, **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. 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).

Afin d'éclairer les parties prenantes et les pouvoirs publics, RTE a publié en 2021 un « bilan prévisionnel 2050 » étudiant des scénarios pour le mix électrique à horizon 2050 visant à atteindre la neutralité carbone.

⁴ <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com>

⁵ D'après l'INSEE en 2017, chaque ménage français comporte en moyenne 2,2 habitants. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381486#tableau-figure1>

⁶ <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/le-schema-decennal-de-developpement-du-reseau>



AUTRES NOTIONS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

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 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 les différents postes électriques selon la configuration du réseau. Ainsi, il pourrait être nécessaire au vu de la longueur totale de la liaison (sous-marin + souterrain) de créer un poste intermédiaire de compensation électrique à terre, entre le poste en mer et le poste de raccordement au réseau qui sera lui situé à proximité des lignes électriques existantes à 225 et 400 kV.

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.

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.

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)⁷.

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.

En matière d'exposition du public aux CEM50, RTE respecte les limites de l'article 12 bis de l'arrêté technique du 17 mai 2001 qui fixe un seuil maximal de 100 μT (champ magnétique) et de 5 kV/m (champ électrique) pour les nouveaux ouvrages. Sur la santé humaine, les autorités sanitaires, nationales, européennes et mondiales, affirment qu'aucun effet lié à l'exposition aux CEM50 n'a été démontré. Une étude bibliographique de l'Ifremer de 2019⁸ sur l'impact des câbles électriques sous-marin conclut que les expériences *in situ* n'identifient pas d'effet significatif sur la faune benthique et halieutique. Les câbles ne constituent pas une barrière au mouvement pour les espèces étudiées. Toutefois, le niveau d'incertitude scientifique étant jugé moyen, des études complémentaires sont nécessaires.

⁷ Dans l'air et la plupart des matériaux, l'équivalence 1 A/m = 1,25 μT est vérifiée.

⁸ <https://doi.org/10.13155/61975>