



Le transport d'électricité

UNE ÉNERGIE CONVERTIBLE

Actuellement, la consommation d'énergie dans le monde atteint 10 milliards de tonnes d'équivalent pétrole. Cette énergie provient pour la plus grande part de combustibles



fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), mais aussi du nucléaire et des énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, géothermie,

solaire et éolien). On parle alors d'énergie primaire. L'énergie finale est, quant à elle, celle qui est délivrée au consommateur.

L'une de ces formes d'énergie est l'électricité : indispensable à la vie quotidienne, elle représente environ un tiers de l'énergie consommée dans le monde. L'électricité est produite à partir d'énergie primaire via la transformation d'énergie mécanique. Par exemple, une centrale thermique produit de la vapeur d'eau dont la force va générer une énergie mécanique, finalement convertie en énergie électrique. En quantité moindre, elle peut provenir directement d'une source chimique (batteries et accumulateurs) ou photovoltaïque (énergie solaire).

L'intérêt de l'électricité est qu'elle est elle-même convertible en toutes formes d'énergie, en particulier en énergie mécanique. Cependant, l'électricité est un vecteur d'énergie, c'est-à-dire un moyen de transport de l'énergie. Elle peut être acheminée sur de longues distances et en grande quantité à un coût relativement faible. Par contre, l'électricité ne peut pas être stockée (sauf dans des piles et des accumulateurs, mais ceux-ci n'offrent pas de possibilités d'applications industrielles). Ainsi, les producteurs d'électricité doivent être reliés en permanence et en temps réel aux consommateurs et la production d'électricité doit au moins être égale à la consommation. C'est là qu'interviennent un certain nombre d'équipements et d'acteurs assurant cette organisation complexe qu'est le réseau de transport de l'électricité.

HISTORIQUE

Dès l'Antiquité, les Grecs découvrent qu'en frottant l'ambre jaune (*elektron*), celle-ci crée une

attraction sur d'autres objets (électricité statique). Ils appellent ainsi cette force électrique.

Ce n'est pourtant qu'au XVIII^e et XIX^e siècles que les principales découvertes sur l'électricité vont voir le jour : la pile de Volta, la loi de Coulomb, la loi d'Ohm, la loi de Joule, les travaux d'Ampère, l'électroaimant de Sturgeon, les travaux de Faraday ou encore de



Tesla et d'Edison... Concernant le transport de l'électricité, les premiers dispositifs sont expérimentés à la fin du XIX^e siècle et

au début du XX^e siècle. Ils sont alors adaptées à des besoins locaux et présentent donc des caractéristiques variables selon les sites, notamment en termes de tension et de fréquence. La nécessité d'assurer une continuité de l'approvisionnement va engendrer la création des premiers réseaux et l'adoption de normes standards. En France, la réglementation sur le transport de l'électricité est mise en place dès les années 1920. Progressivement, le maillage et les capacités de transport s'étendent sur tout le territoire. On passe de 7 000 communes électrifiées en 1919 à plus de 36 000 en 1938.

En 1946, les entreprises d'électricité sont nationalisées. Électricité De



France (EDF) est née et devient le principal producteur d'électricité en France.

Dès l'après-guerre, la consommation d'électricité en France connaît un essor considérable et implique le développement du réseau et de plus grandes puissances de transport, notamment avec les lignes à très haute tension.

LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Un réseau électrique est constitué d'un ensemble d'infrastructures acheminant l'électricité des centrales de production vers les consommateurs. Il est formé d'un maillage de lignes électriques, connectées entre elles par des postes électriques. L'acheminement

et la distribution imposent des contraintes et des exigences spécifiques, que l'on parle de transport sur de grandes distances, de livraison auprès des industries ou encore des particuliers. Ainsi, selon les fonctions des lignes, différentes tensions leurs sont appliquées.

LES LIGNES À TRÈS HAUTE TENSION

Les lignes à très haute tension servent au transport de l'électricité sur de grandes distances (à l'échelle d'un pays ou d'un continent) et permettent d'assurer la sécurité de l'approvisionnement sur l'ensemble du territoire, voire avec d'autres pays. Les tensions utilisées en France s'étendent de 400 000 V (400 kV) à 225 000 V (225 kV). Ces valeurs représentent un bon compromis technico-économique entre les puissances nécessaires et les distances parcourues. L'application d'une tension élevée permet en effet de réduire les pertes énergétiques par effet Joule et d'assurer ainsi un rendement efficace sur ces grandes distances.

LES LIGNES HAUTE TENSION

Les lignes à haute tension (90 kV et 63 kV) sont chargées du transport de l'électricité au niveau régional. Elles assurent également la distribution électrique auprès des industries demandant de fortes puissances : industries lourdes, transport ferroviaire...

LES LIGNES À MOYENNE TENSION

Les lignes à moyenne tension (20 000 V) assurent le transport de l'énergie au niveau local et

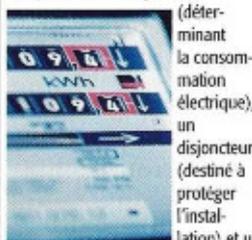
alimentent également directement certaines industries légères ou entreprises.

LES LIGNES À BASSE TENSION

Les lignes à basse tension (380 V et 220 V) constituent le réseau de distribution final de l'électricité auprès des consommateurs (particuliers, collectivités et entreprises).

LE RÉSEAU DOMESTIQUE

Enfin, le réseau domestique achemine l'électricité aux différents appareillages électriques d'une habitation ou d'une entreprise. Il est composé d'un tableau électrique comportant un **compteur**



(déterminant la consommation électrique), un disjoncteur (destiné à protéger l'installation) et un

circuit électrique composé d'un conducteur neutre et d'un conducteur phase, alimentant l'ensemble de l'installation domestique.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU RÉSEAU

LES LIGNES

Le maillage du réseau est constitué de lignes aériennes, souterraines ou sous-marines.

Lignes aériennes

La **ligne aérienne** est composée de câbles conducteurs, auparavant en



cuivre mais aujourd'hui en aluminium ou en alliage. Ces câbles sont parcourus par un courant alternatif triphasé.

Les lignes sont supportées par des pylônes. Les câbles conducteurs étant nus, la distance entre les lignes et avec le sol assure leur isolation par l'air et, ainsi, la sécurité des personnes et des structures avoisinantes. La hauteur des pylônes est donc proportionnelle à la tension appliquée sur la ligne. Pour les lignes à très haute tension, des pylônes en treillis d'acier sont



installés puis, avec des tensions plus basses, des pylônes en béton et en bois.

La jonction entre les câbles et les pylônes est assurée par des isolateurs en verre, en céramique ou en matière synthétique. Sur les lignes à haute et très haute

Production et consommation

575 TWh
(milliards de watts)

Production brute d'électricité en France en 2005.

452 TWh
provenant de source nucléaire.

58 TWh de source hydraulique, éolienne et photovoltaïque.

65 TWh de source thermique classique.

482 TWh
Consommation d'électricité primaire en France en 2005 (448 TWh livrés par le réseau et 34 TWh de pertes de transport).

424 TWh
Consommation finale d'électricité en France en 2005.

10 TWh pour la sidérurgie.

126 TWh pour l'industrie.

273 TWh pour le résidentiel et le tertiaire.

3 TWh pour l'agriculture.

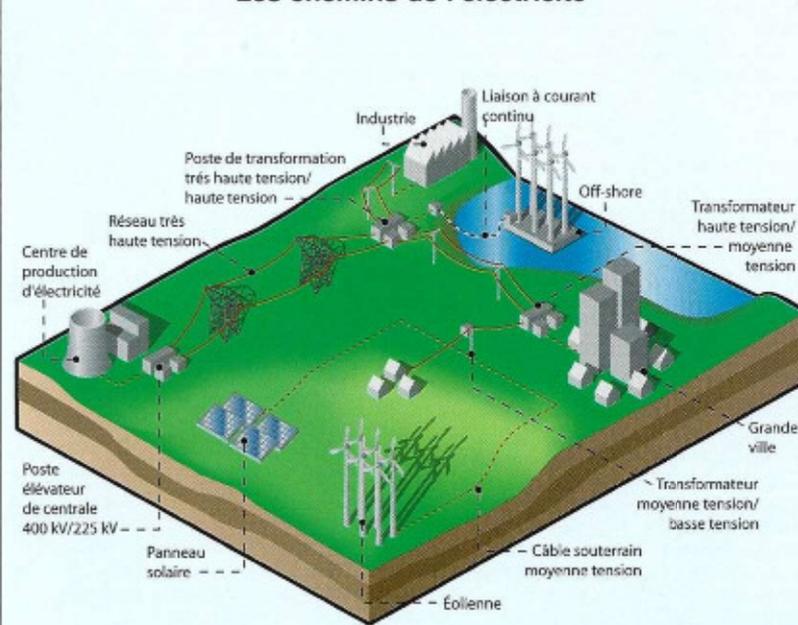
12 TWh pour le transport.

Les lignes à très haute tension



400 000 volts

Les chemins de l'électricité



Les tensions les plus élevées

tion, des câbles de garde (non conducteurs) sont installés : ils améliorent la tenue des pylônes et protègent les lignes contre la foudre.

Lignes souterraines

La ligne souterraine offre un intérêt évident par rapport à un ouvrage aérien : son impact visuel et écologique est fortement limité. D'autre part, ces lignes sont bien protégées contre les intempéries (foudre, tempête...) et ont une fiabilité plus grande. En revanche, leur réparation est plus complexe. Enfin, leur coût de maintenance et de construction (environ 5 fois supérieur) sont bien plus élevés.

Ce montant d'investissement est un des freins majeurs à leur développement, notamment pour les lignes à très haute tension (400 kV). Néanmoins, à moyen et long termes, ce peut plus présenter une rentabilité intéressante et finir par se généraliser. Ainsi, à ce jour, ces lignes souterraines sont principalement dédiées aux réseaux à haute et moyenne tension. La technologie mise en œuvre est également différente puisque l'air ne peut plus jouer ici son rôle d'isolant : les câbles conducteurs des lignes souterraines doivent donc être gainés dans des isolants synthétiques avec une exigence particulière sur les limites thermiques des conducteurs.

Lignes sous-marines

La ligne sous-marine présente des caractéristiques similaires à la ligne souterraine. Cependant, elle nécessite généralement de couvrir une très grande distance. Dans ce cas, le courant continu (et non alternatif) est souvent utilisé, notamment parce qu'il offre une solution plus économique, qu'il peut transporter une tension efficace plus grande qu'un courant alternatif et que les longueurs d'aptitude au transport sont bien plus importantes.

LES POSTES ÉLECTRIQUES

Pour assurer une distribution électrique efficace et sûre, une interconnexion de ces lignes est réalisée à l'aide de postes électriques. Leur rôle est de transformer le courant électrique à différents niveaux de tension, de réguler la répartition de l'électricité sur les réseaux et de protéger les installations. Les appareillages présents dans les postes électriques effectuent ces différentes opérations.

Transformateur

Le **transformateur** est l'équivalent d'un convertisseur qui change le niveau



de tension et d'intensité d'un courant alternatif. Des sites produisant l'électricité aux consommateurs, en passant par les différents réseaux de transport, les valeurs de tensions exploitées ne sont pas les mêmes et demandent donc des ajustements. C'est là qu'interviennent les transformateurs. Par exemple, ils haussent la tension à la

sortie des centrales de production pour le transport en 400 kV et l'abaissent en palier jusqu'à la distribution sur le réseau domestique à 220 V.

Disjoncteur

Le disjoncteur est un élément de sécurité automatique qui permet d'ouvrir ou de fermer un circuit. Il se déclenche en particulier lorsqu'un courant de court-circuit se manifeste. Un court-circuit est un contact, opportun ou non, entre deux conducteurs. Lorsqu'il n'est pas prévu (la foudre tombant sur une ligne, le contact entre une ligne et un arbre, une défaillance technique...), celui-ci peut engendrer une augmentation de l'intensité du courant et de la température des conducteurs, et ainsi endommager les éléments du réseau. Fonctionnant sur le même principe que les fusibles, un disjoncteur n'est cependant pas détérioré durant cette opération et peut être réarmé.

Sectionneur

Le sectionneur est en quelque sorte un interrupteur permettant d'isoler une portion de réseau. Il n'est donc pas en soi un élément de protection automatique mais doit être activé. Il est notamment utilisé lors des opérations de maintenance des lignes électriques en confinant un circuit (ou une partie de circuit) par une mise hors tension. L'ensemble des lignes étant divisé en plusieurs sections, l'**intervention** sur



un tronçon donné est possible sans avoir à interrompre l'exploitation d'une ligne complète. Son autre utilité est de répartir l'électricité sur le réseau. Cela peut être comparé à la gestion du trafic sur un réseau ferroviaire. La gestion des sectionneurs permet de choisir les « voies » sur lesquelles l'électricité est transportée ou distribuée.

Systèmes de mesure

Enfin, le poste électrique est équipé de plusieurs systèmes de mesure et d'automatismes, assurant le suivi de son fonctionnement et une intervention à distance.

Les postes électriques ont des configurations différentes selon leur situation géographique et leur fonction de répartition : les postes « en plein air » en milieu rural utilisent le principe de l'isolation par l'air et les postes en bâtiment dans les zones périurbaines et urbaines une isolation gazeuse dite « blindée » (les conducteurs sont gainés dans une enveloppe métallique renfermant un gaz).

LES CENTRES DE CONTRÔLE

Enfin, l'ensemble du réseau électrique est coordonné par des centres régionaux et un centre national. Leur rôle est triple :

- anticiper la demande en électricité grâce à des prévisions de consommation (par exemple, en hiver, lorsqu'une vague de froid est annoncée et va engendrer une forte hausse de la

consommation électrique) ;

- planifier la production au niveau des centrales et les apports extérieurs nécessaires en fonctions de ces simulations ;
- répartir l'électricité sur le réseau, en tenant compte des opérations de maintenance, des défaillances techniques et des pics de consommation géographiques et/ou temporels.

EXIGENCES DES CONSOMMATEURS

La place prise par l'électricité dans la vie quotidienne des particuliers comme des entreprises et des industries est si importante qu'elle impose des conditions de fourniture très exigeantes.

- La sécurité d'approvisionnement désigne une continuité dans la fourniture en électricité en quantité suffisante pour répondre à la demande des consommateurs ; le système électrique doit donc disposer de

centrales de production en réserve pour pallier d'éventuelles pannes, d'une interconnexion adéquate pour prévenir les **défaillances** d'une ligne de transport et d'un système de sécurité évitant les coupures brèves.

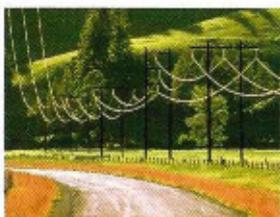
- La fréquence du courant doit être constante et maintenue dans une fourchette étroite. En effet, ses variations modifient la vitesse de rotation des machines tournantes et perturbent le fonctionnement des horloges.

- La tension du courant doit également être constante afin d'alimenter les appareils dans de bonnes conditions.

- Enfin, le réseau doit présenter un faible taux d'harmoniques (émis notamment par les appareils domestiques tels que les téléviseurs). Les effets de ces harmoniques peuvent être la destruction des condensateurs et des disjoncteurs, l'apparition de vibrations et de bruits sur les machines tournantes ou de perturbations électromagnétiques diverses, ou encore l'échauffement des câbles et des transformateurs. Des filtres permettent de limiter cet impact.

ENVIRONNEMENT ET SANTÉ

Les lignes aériennes (en particulier les lignes à très haute tension) ont un impact direct sur l'environnement :



- **impact visuel** sur les paysages (implantation des pylônes et création de tranchées de déboisement) ;

- impact écologique sur les écosystèmes ;
- impact écologique sur l'**avifaune**.



Un ensemble de mesures ont été établies pour limiter ces nuisances : l'enfouissement des lignes, la concertation sur les tracés, la limitation des saignées forestières ou des implantations en zone sensible, la mise en place de dispositifs de dissuasion pour les oiseaux...

D'autre part, les appareils ou les lignes électriques produisent des champs électromagnétiques (CEM) dont l'intensité est proportionnelle à la tension du courant. Ces CEM sont caractérisés par leur fréquence : elle est inférieure à 300 Hz pour les CEM de fréquence extrêmement basse.

Ces champs magnétiques vont agir en induisant des courants électriques dans le corps, qui peuvent, en atteignant une intensité suffisante, stimuler les nerfs ou générer divers effets biologiques. L'exposition à des CEM de très forte intensité est évidemment dangereuse pour la santé. Cependant, les niveaux d'intensité auxquels nous sommes exposés quotidiennement n'ont pas d'effet nocif sur notre santé.

Actuellement, les études médicales portent sur l'incidence de ces expositions à long terme et, en l'état actuel des connaissances, rien n'indique d'effets sanitaires préjudiciables. Des normes ont été recommandées pour limiter d'éventuels risques, en attendant des investigations plus poussées.

ET DEMAIN ?

CONDUCTEURS À ISOLATION GAZEUSE

La technologie à isolation gazeuse (ou « blindée ») n'est pas à proprement parler une innovation. Elle est en effet déjà employée depuis 30 ans, mais elle est une des voies de développement à moyen terme pour le transport de l'électricité en souterrain.

Comme son nom l'indique, cette technologie utilise un gaz ou un mélange à base d'azote pour isoler le conducteur. L'ensemble (câbles, gaz et isolateurs) est protégé par une

enveloppe en aluminium et un revêtement anticorrosion. Cette technologie peut, à la différence des câbles à isolation synthétique, être aisément appliquée aux liaisons à très haute tension, tout en offrant un encombrement restreint, un faible rayonnement électromagnétique et, surtout, une réduction des pertes d'énergie.

LA SUPRACONDUCTIVITÉ

À une température très basse, certains conducteurs laissent passer le courant électrique sans résistance, et donc sans perte d'énergie : c'est le phénomène de la supraconductivité, découvert en 1911. Son fonctionnement repose sur des principes de physique quantique : un métal est constitué d'atomes structurés entre eux, ces atomes vibrant proportionnellement à l'élévation de la température. Cette oscillation va interférer sur le déplacement des électrons : c'est ce que l'on appelle la résistance, qui engendre le dégagement de chaleur et la dissipation d'énergie. Dans le cas d'un matériau supraconducteur, l'application d'une très basse température limite ces vibrations et, par là même, la résistance du conducteur.

D'autres matériaux supraconducteurs ont été identifiés en 1986 : les supraconducteurs à haute température critique qui fonctionnent à des températures bien plus élevées (plus exactement moins basses), d'où une mise en œuvre beaucoup plus aisée. Les perspectives d'applications sont phénoménales. Concernant le transport d'électricité, les lignes à supraconducteurs ont la capacité d'acheminer des courants élevés et à basse tension, sans perte d'énergie, sans dégagement thermique et sans rayonnement de champs électromagnétiques. En parallèle, la supraconductivité offre pour la première fois une solution efficace de stockage de l'électricité. Il existe actuellement deux technologies développées, présentant des caractéristiques différentes et adaptées à des applications spécifiques :

- les câbles à diélectrique chaud pour lequel seul le supraconducteur est refroidi à la température cryogénique (actuellement de l'azote liquide à -196°C) ;
- les câbles à diélectrique froid qui offrent de meilleures performances, mais qui impliquent que tous les composants du câble soient refroidis à température cryogénique.

Conducteur à isolation gazeuse

