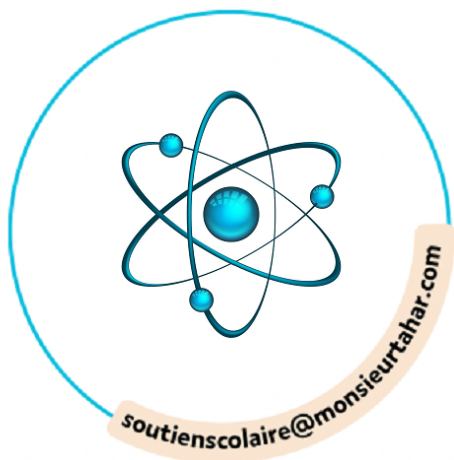


ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE



PHYSIQUE - CHIMIE

CHAPITRE 1

Transporter l'électricité

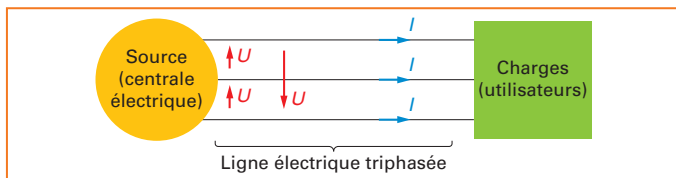


Les réseaux électriques, via les lignes à haute tension, ont à la fois un rôle de transport de l'électricité vers le consommateur final et un rôle d'échange entre grandes régions et entre pays.

I Les lignes, voies de transport de l'électricité

■ Pour pouvoir circuler entre une source (centrale électrique) et une ou des charges (utilisateurs), le courant électrique a besoin d'un **circuit fermé**. Une ligne électrique doit donc être constituée d'au moins deux **câbles conducteurs**. Toutefois, pour faciliter la production et optimiser le poids des lignes, on utilise le plus souvent un système de tensions et de courants **alternatifs triphasés**, c'est-à-dire possédant trois conducteurs ou trois groupes de câbles conducteurs par circuit.

DOC. 1. Transport de l'électricité en triphasé



■ La **tension** de la ligne est la tension électrique efficace U présente entre les câbles conducteurs. La tension U se mesure **en volts** (symbole : V).

Pour un bon fonctionnement du réseau, cette tension, imposée par la source en amont, doit avoir une valeur quasiment constante, quelle que soit la puissance transportée par la ligne. En France, les lignes à haute tension ont une tension comprise entre 63 000 et 400 000 V.

Mots clés

- La **tension** est la différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit, permettant de mettre en mouvement les électrons.
- L'**intensité** correspond au flux (au débit) d'électrons dans le circuit.

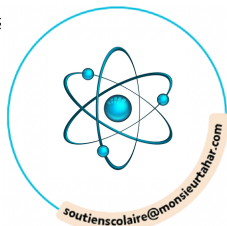
■ L'**intensité** efficace du courant électrique I parcourant chaque conducteur est déterminée par la consommation des utilisateurs en aval. Contrairement à la tension U , l'intensité I est donc, a priori, variable.

L'intensité I se mesure **en ampères** (symbole : A).

■ La **puissance électrique** se mesure **en watts** (symbole : W).

La puissance P transportée par une ligne électrique aérienne est fonction de la tension U et de l'intensité I :

- dans le cas d'une **ligne monophasée** (2 câbles), $P = U \times I$;
- dans le cas d'une **ligne triphasée** (3 câbles), $P = U \times I \times \sqrt{3}$.



II Les réseaux en France métropolitaine

■ Le réseau électrique français de métropole est architecturé selon deux niveaux :

- le réseau de transport, dont le rôle est d'acheminer la production des grandes centrales vers les grands centres urbains, d'interconnecter les régions et de permettre les échanges avec les pays limitrophes ;
- le réseau de distribution, dont le rôle est d'amener l'électricité à l'échelle locale vers chaque utilisateur final.

■ Le **réseau de transport** français est constitué de plus de 100 000 km de **lignes à très haute tension** (400 kV, 225 kV, 90 kV et 63 kV), qui permettent d'acheminer de grandes puissances sur de longues distances avec des pertes minimales

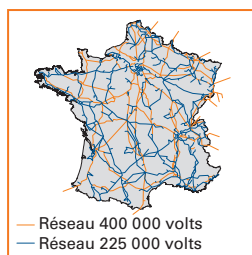
Il comprend également plus de 2 700 **postes électriques**, dont le rôle est d'ajuster la puissance sur le réseau en fonction de la production et des besoins, et de convertir la tension d'une valeur à une autre entre deux lignes si nécessaire.

Le réseau de transport français est développé, entretenu et opéré par un gestionnaire unique : RTE (Réseau de transport d'électricité).

■ Le **réseau de distribution** est constitué de plus de 600 000 km de **lignes à moyenne tension** (20 kV), de plus de 700 000 km de **lignes à basse tension** (230/400 V), et de plus de 700 000 **postes de distribution**.

Le réseau de distribution appartient aux collectivités locales. Il est opéré pour très grande partie par Enedis.

DOC. 2. Réseau de grand transport en France



À noter

Dans certains pays où l'électricité est transportée sur de très longues distances, on peut trouver des lignes à 800 000 V, voire à 1 100 000 V.

Limitier les pertes en ligne par échauffement



Réduire l'échauffement des câbles lors du transport de l'électricité est un enjeu économique, mais aussi technique, car l'échauffement est une limite à la puissance transportée.

I L'effet Joule, à l'origine des échauffements

1 L'effet Joule provoque une perte de puissance

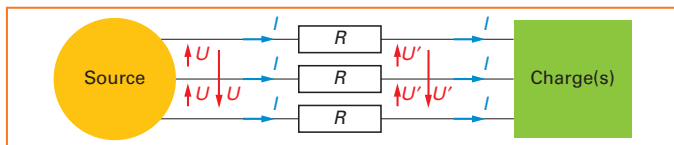
● La **résistance** d'un conducteur électrique au passage du courant se mesure en **ohms** (symbole : Ω). La résistance d'un câble de ligne électrique est très faible, mais pas totalement nulle. Il en résulte un **échauffement** lorsque le courant circule dans le câble : c'est l'**effet Joule**.

● La puissance électrique convertie en puissance thermique par effet Joule P_J (puissance perdue), dans un conducteur de résistance R , parcouru par une intensité de courant I , a pour expression : $P_J = R \times I^2$.

À noter

Les pertes Joule P_J sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant transporté : doubler l'intensité multiplie l'échauffement – et donc les pertes – par 4.

DOC. Schéma électrique simplifié d'une ligne à haute tension



● L'**intensité** du courant électrique est **conservative** : elle reste la même d'un bout à l'autre de la ligne indépendamment de la résistance des câbles. En revanche, la **puissance perdue** par effet Joule (ici, $P_J = 3 \times R \times I^2$ pour les trois câbles) provoque une légère **chute de tension** entre le départ et l'arrivée ($U > U'$).

● Les pertes Joule ont donc un coût financier et écologique, car la source doit produire une puissance légèrement supérieure à celle consommée par la charge.

À noter

En France, les pertes par effet Joule représentent un peu moins de 10 % de la puissance totale.

2 L'effet Joule limite la puissance maximale des lignes

L'effet Joule a aussi des conséquences physiques néfastes pour les lignes. L'échauffement provoque une dilatation des matériaux et un **allongement des câbles** ; les points bas des lignes aériennes se rapprochent alors trop du sol entre les pylônes. Sur les lignes enterrées, l'échauffement cause un **vieillissement accéléré de l'isolant**.

II L'influence de la tension sur l'échauffement

● Partons de la puissance transportée : $P = U \times I \times \sqrt{3} \Leftrightarrow I = \frac{P}{U \times \sqrt{3}}$

Pour une ligne à trois conducteurs, les pertes Joule sont :

$$P_J = 3 \times R \times I^2 = 3 \times R \times \left(\frac{P}{U \times \sqrt{3}} \right)^2 = \frac{R}{U^2} \times P^2$$

● L'expression ci-dessus montre que les **pertes Joules P_J** sont **inversement proportionnelles au carré de la tension U** (doubler la tension divise les pertes par 4). Il est donc particulièrement intéressant de choisir une forte valeur de tension de ligne pour diminuer les pertes et l'échauffement.

Cependant, pour une ligne aérienne, une tension plus élevée impose d'espacer les câbles et de les placer plus loin du sol pour éviter le risque d'**arc électrique**, ce qui signifie, en contrepartie, des pylônes plus grands et moins facilement acceptés.

À noter

Les choix de tensions utilisées sur le réseau ► **FICHE 27** résultent de compromis, en fonction de la distance à franchir et de la puissance à transporter.

Par ailleurs, les **lignes souterraines ou sous-marines** en courant alternatif sont limitées en tension et en longueur. Pour contourner ce problème, on peut utiliser du **courant continu**, mais il faut alors des installations de conversion à chaque extrémité de la ligne, qui engendrent d'autres types de pertes.

● Certains matériaux, dits « **supraconducteurs** », ont une résistance totalement nulle au-dessous d'une certaine température, et permettent de fabriquer des lignes électriques sans pertes Joule, mais il faut les refroidir à l'azote liquide.

À encombrement égal, ce type de lignes peut transporter cinq fois plus de puissance qu'une ligne classique. Elles pourraient être utilisées en environnement urbain, lorsqu'une grande puissance doit être transportée dans un espace restreint, par exemple pour alimenter en sous-sol des bornes de recharge automobiles.

Optimiser les réseaux de transport d'électricité



Dans un contexte de transition vers les énergies renouvelables et de croissance du parc de véhicules électriques, les opérateurs de réseaux doivent faire face à une production fluctuante et à de nouveaux besoins.

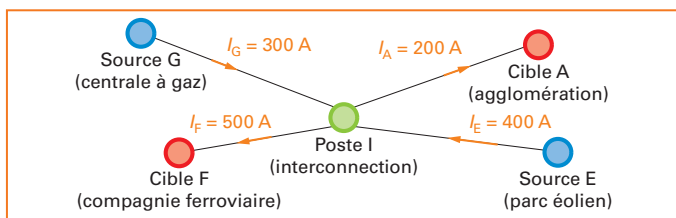
I La modélisation du réseau

Un graphe de transport (ou graphe de flot) est composé d'un ensemble de **sommets** (représentés par des cercles sur le doc.), reliés par des **arêtes** (ou **arcs**). Un sommet auquel aboutissent plusieurs arêtes est aussi appelé **nœud** (cercle vert sur le doc.).

Pour un réseau électrique, les sommets représentent :

- **les sources**, c'est-à-dire les installations de production électrique ;
- **les postes électriques**, installations de commutation et d'aiguillage ;
- **les cibles destinataires**, c'est-à-dire les sites de consommation ou les passerelles vers d'autres réseaux.

DOC. Graphe de transport d'un réseau électrique simple



Les arêtes entre les sommets représentent les lignes électriques qui les relient. La valeur de l'intensité empruntant une ligne peut être indiquée. Le sens des transferts est indiqué par des flèches.

Le graphe doit être réaliste du point de vue de la physique. La somme des intensités sortant d'une source correspond à sa production. La somme des intensités entrant dans une cible correspond à sa consommation. À tension inchangée, la somme des intensités entrant dans un poste électrique doit être égale à la somme des intensités qui en ressortent. La production totale des sources doit équilibrer à chaque instant la consommation totale des cibles, car l'électricité ne peut pas être stockée en tant que telle.

II Rendre égales la production et la consommation

Historiquement, les gestionnaires de réseaux ont toujours plutôt adapté la production à la consommation, ce qui nécessite d'avoir des centrales électriques **pilotables**, c'est-à-dire dont on peut ajuster la production facilement.

À l'heure où l'essor des véhicules électriques engendre une consommation supplémentaire, une part de plus en plus importante d'énergies renouvelables (**EnR**) solaire et éolienne est introduite dans le réseau. Ces productions, qui dépendent de l'heure et de la météo, sont **intermittentes** et **non-pilotables**.

Pour en intégrer une proportion croissante dans le **mix électrique**, il faudra donc désormais pouvoir agir aussi sur les consommations, car l'équilibrage ne peut plus se faire par la régulation des seuls moyens de production.

Ainsi, un **réseau électrique intelligent (REI** ou « **smart grid** ») peut, en cas de besoin, « **effacer** » les consommations de certains équipements industriels ou domestiques (par exemple ballons d'eau chaude, chargeurs de véhicules électriques, électro-ménager lourd, etc.). Cela consiste à commander à distance ces équipements, afin d'en décaler le fonctionnement dans le temps ou même de le supprimer pour les utilisateurs qui l'autorisent. Cette ingénierie est rendue acceptable par une contrepartie financière (tarif attractif).

De plus, un tel réseau peut gérer au mieux la répartition de la puissance, de façon à minimiser les pertes en ligne par effet Joule.

À noter

On qualifie de « fatales » les sources d'énergie qui dépendent de facteurs extérieurs non maîtrisables, comme le solaire et l'éolien (à rapprocher de l'anglais *fate*, dans le sens de « destin »).



ZOOM

Smart Grids : des réseaux en partie réversibles

