

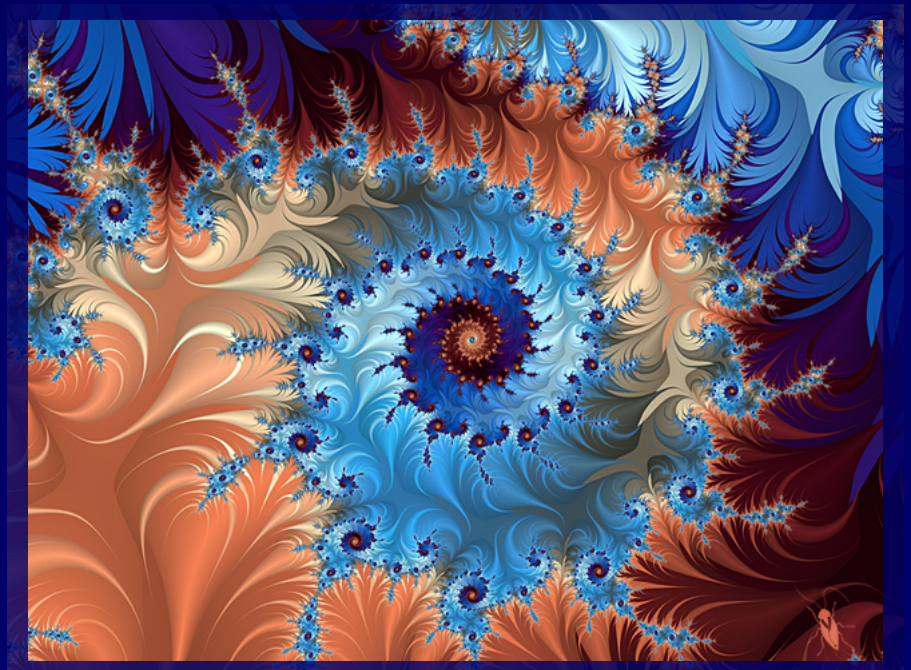
# **Enseignement scientifique**

## **Terminale**

### **Partie physique**

**Pierre-Henry SUET**

**24 août 2020**

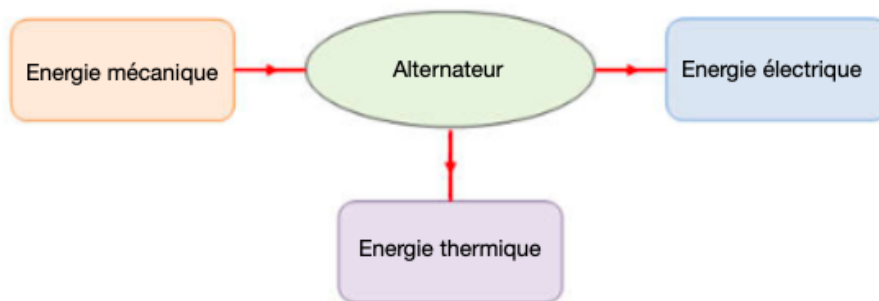


|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Deux siècles d'énergie électrique</b>                          | <b>3</b>  |
| I L'alternateur, un convertisseur d'énergie mécanique               | 3         |
| II Description quantique de l'atome                                 | 4         |
| III Le capteur photovoltaïque, un convertisseur d'énergie radiative | 5         |
| <b>2 Les atouts de l'électricité</b>                                | <b>7</b>  |
| I Formes et conversion d'énergie                                    | 7         |
| II Energie électrique   | 7         |
| 1 Obtenir de l'énergie électrique                                   | 8         |
| 2 Impacts des méthodes sans combustion                              | 8         |
| 3 Stockage de l'énergie   | 8         |
| <b>3 Optimisation du transport de l'électricité</b>                 | <b>9</b>  |
| I Réseau électrique et pertes par effet Joule                       | 9         |
| 1 De la production électrique à sa consommation                     | 9         |
| 2 Pertes par effet Joule  | 9         |
| II Modèle du réseau de transport électrique                         | 10        |
| 1 Modéliser une ligne à haute tension                               | 10        |
| 2 Modéliser et optimiser un réseau                                  | 10        |
| 3 Limitations des pertes et fonction à minimiser                    | 11        |
| <b>4 Choix énergétiques et impacts sur les sociétés</b>             | <b>12</b> |
| I Transition énergétique et diversification des ressources          | 12        |
| 1 L'évolution en France   | 12        |
| 2 Le mix énergétique à l'échelle mondiale                           | 12        |
| II Des choix en discussion  | 12        |
| 1 Energie nucléaire : avantages et inconvénients                    | 12        |
| 2 Energies renouvelables : avantages et inconvénients               | 13        |

## Deux siècles d'énergie électrique

### I L'alternateur, un convertisseur d'énergie mécanique

L'énergie électrique est la forme d'énergie la plus utilisée dans les objets du quotidien. Elle est obtenue par conversion d'énergie dans les centrales électriques.

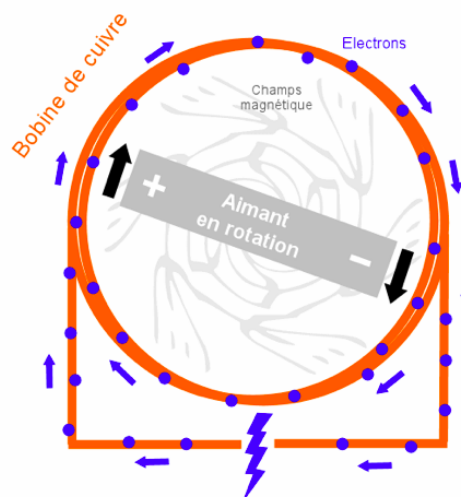


En 1831, Michael Faraday met en évidence le phénomène d'induction électromagnétique : lorsqu'une source de champ magnétique (un aimant par exemple) est mise en mouvement à proximité d'un matériau conducteur, ou lorsqu'un matériau conducteur est mis en mouvement à proximité d'une source de champ magnétique, une tension apparaît aux bornes du conducteur et un courant électrique le traverse. On dit qu'il est induit. Le physicien et mathématicien, James Clerk Maxwell, formule plusieurs années plus tard les lois mathématiques modélisant ce phénomène.

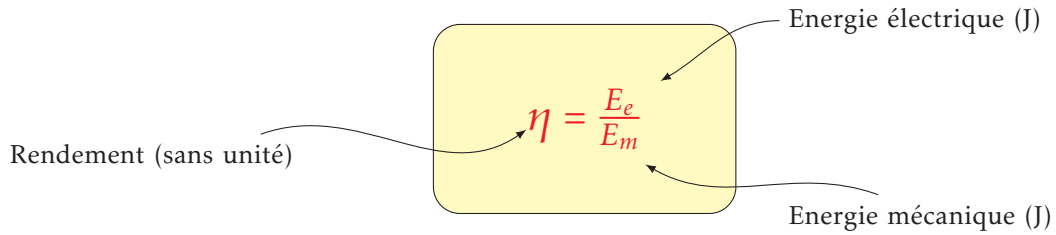
Un alternateur est un convertisseur d'énergie mécanique en énergies électriques et thermiques.

L'alternateur est composé :

- d'une partie mobile, le rotor. Le plus souvent, il porte la source de champ magnétique (aimant ou électroaimant) ;
- d'une partie fixe le stator. Le plus souvent, il porte les enroulements de cuivre dans lesquels apparaissent les tensions et les courants électriques induits par le rotor ;
- d'un système d'entraînement qui met le rotor en mouvement.



Le rendement de cette conversion est donnée par la relation :

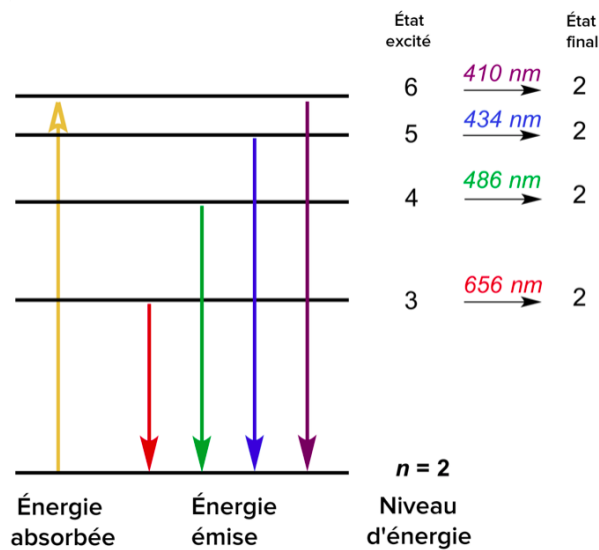


Le rendement des alternateurs utilisés dans les centrales électriques est en moyenne de 0,95, ce qui signifie que 95 % de l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique.

## II Description quantique de l'atome

Au début du 20ème siècle, la physique quantique a connu une révolution conceptuelle à travers la notion de comportement probabiliste de la Nature. Cela a permis, notamment, d'expliquer la structure des raies d'émission des atomes.

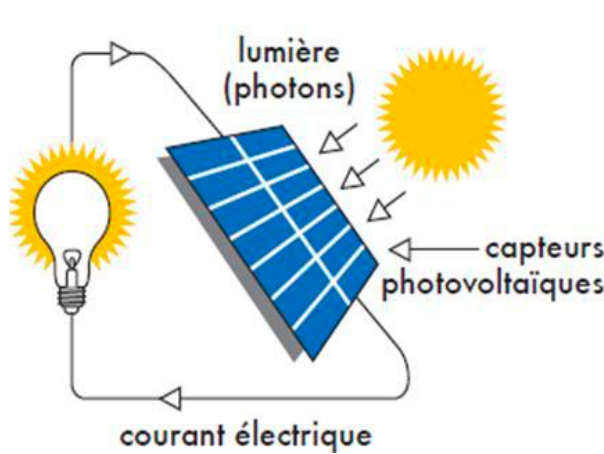
Un atome ne peut exister que dans des états d'énergie quantifiés et discontinus. Chaque raie d'émission correspond au passage de l'atome d'un état d'énergie à un état d'énergie inférieur. On dit que l'énergie est quantifiée. Parmi toutes les transitions possibles, seules certaines sont autorisées par les lois de la physique quantique et leur intensité lumineuse dépend de la probabilité de la transition.



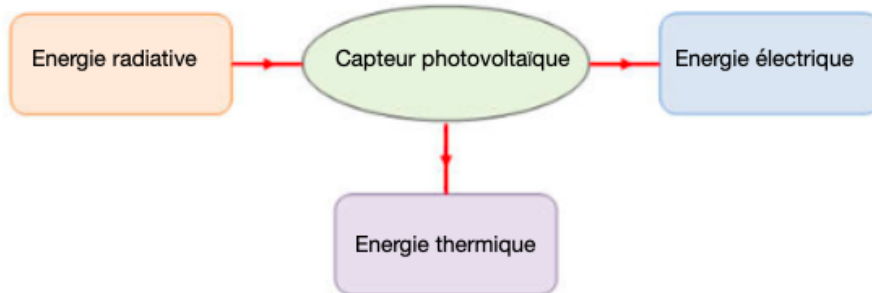
### III Le capteur photovoltaïque, un convertisseur d'énergie radiative

Le modèle quantique de l'atome a été un outil indispensable au développement de l'électronique, en particulier des semi-conducteurs.

Les matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, sont utilisés dans les capteurs photovoltaïques.



Ces capteurs absorbent l'énergie radiative et la convertissent en partie en énergie électrique.



Le rendement de cette conversion est donnée par la relation :

$$\eta = \frac{E_e}{E_r}$$

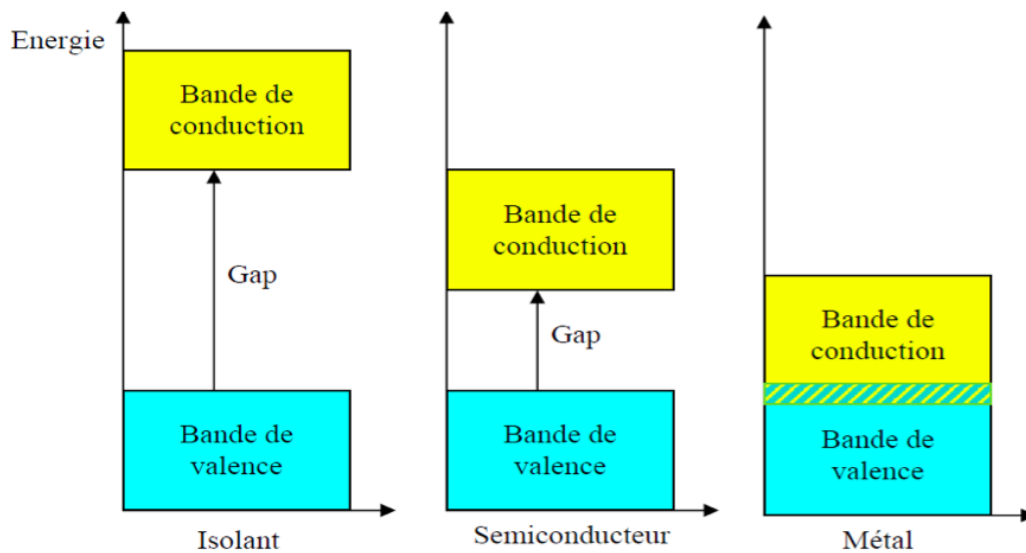
Rendement (sans unité)

Energie électrique (J)

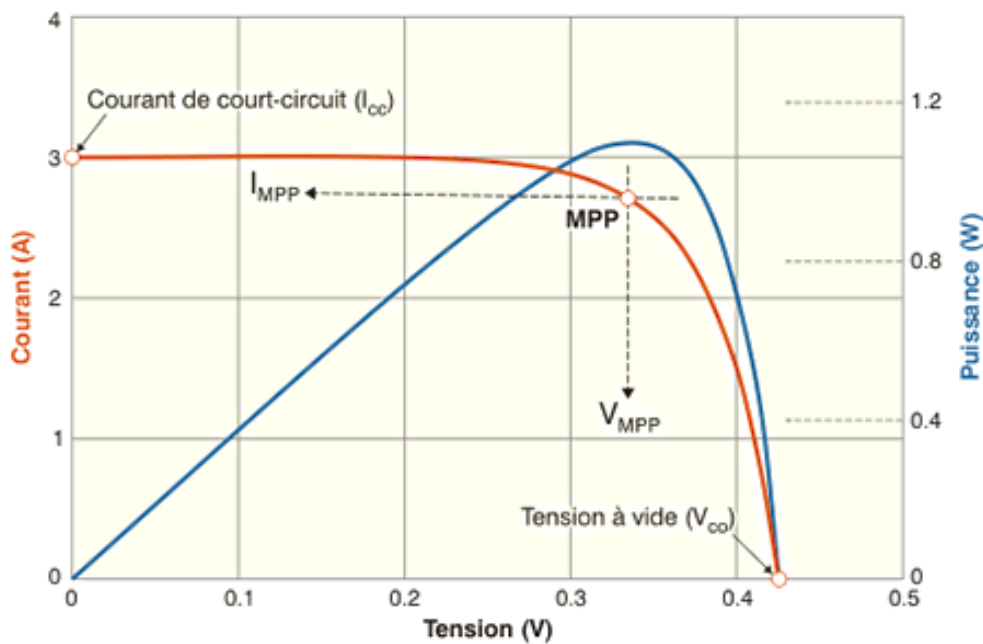
Energie radiative (J)

Les capteurs photovoltaïques nécessitent des semi-conducteurs à large spectre d'absorption afin d'absorber un maximum d'énergie radiative du Soleil et ainsi augmenter le rendement de conversion.

Sur leur diagramme d'énergie, les niveaux d'énergie possibles sont regroupés en bandes. Si un photon a une énergie supérieure à celle de la bande intermédiaire ou "gap", les électrons peuvent provoquer un courant électrique.



La caractéristique courant-tension permet de déterminer la puissance maximale qu'un capteur photovoltaïque peut délivrer et d'accéder à la résistance optimale du récepteur à utiliser avec le capteur photovoltaïque. Le fonctionnement optimal d'un capteur photovoltaïque vérifie ce graphique expérimental.



On peut relever points particuliers :

- tension à vide  $V_{C0}$  : tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle ne débite pas, donc lorsque le courant est nul
- intensité de court-circuit  $I_{cc}$  : courant maximal obtenu lorsque les deux bornes de la cellule sont reliés ensemble donc pour  $U = 0$  V
- point de fonctionnement maximal ( $I_{MPP}; V_{MPP}$ ) : couple conduisant à la puissance maximale. On en déduit la résistance qui permet de maximiser la puissance électrique par la relation  $R = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}}$ .

## Les atouts de l'électricité

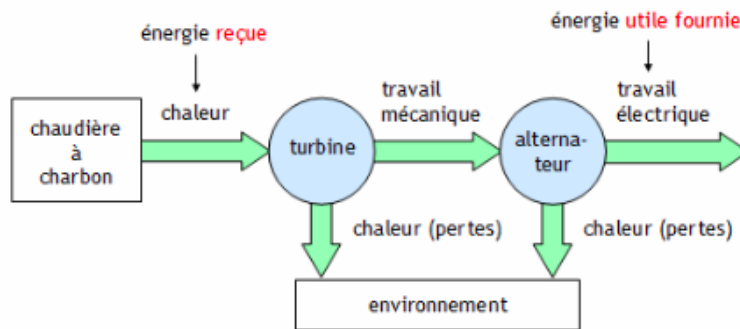
### I Formes et conversion d'énergie

L'énergie est disponible sous différentes formes : thermique, chimique, radiative, nucléaire, cinétique, potentielle, ... Un convertisseur permet de convertir une forme d'énergie en une autre forme d'énergie.

Les conversions d'énergie peuvent être représentées par des chaînes énergétiques. Ces schémas comprennent :

- les réservoirs d'énergie (dynamos, éoliennes, centrales, thermiques, géothermie...);
- les convertisseurs d'énergie qui assurent le passage d'une forme à une autre ;
- les formes d'énergie à l'entrée et à la sortie des convertisseurs.

**Exemple :** chaîne énergétique d'une centrale thermique



Pour évaluer l'efficacité d'une conversion d'énergie, on définit une grandeur sans dimension appelé rendement du convertisseur.

Le rendement est égal au rapport de l'énergie utile délivrée par le convertisseur sur l'énergie qu'il a reçue à l'entrée :

$$\eta = \frac{E_u}{E_r}$$

Rendement (sans unité)

Energie utile (J)

Energie reçue (J)

Le rendement peut également s'écrire comme un rapport de puissance :

$$\eta = \frac{P_u}{P_r}$$

### II Energie électrique

L'énergie électrique présente de nombreux avantages : la distribution en est aisée, sûre et à faible impact écologique. De nombreux dispositifs à bon rendement permettent de produire de l'énergie électrique ou de convertir de l'énergie électrique en d'autres formes d'énergie.

## 1 Obtenir de l'énergie électrique

Les dispositifs permettant d'obtenir de l'énergie électrique les plus répandus sur Terre sont basés sur la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz). Ces procédés ont de forts impacts environnementaux : épuisement de ressources fossiles, émissions de gaz à effet de serre, pollutions environnementales.

Le développement de **dispositifs d'obtention d'énergie électrique sans combustion** connaît un essor très significatif à travers le monde.

Trois méthodes permettent d'obtenir de l'énergie électrique sans nécessiter de combustion :

- la **conversion d'énergie mécanique**. Grâce à un alternateur, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique dans les centrales éoliennes, hydroélectriques, thermiques nucléaires, solaires thermiques et géothermiques ;
- la **conversion de l'énergie radiative**. Dans une centrale solaire, les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie radiative du Soleil en énergie électrique ;
- la **conversion électrochimique**. Les piles et accumulateurs sont le siège de conversions électrochimiques. Des transformations chimiques permettant de convertir l'énergie chimique contenue dans les réactifs en énergie électrique.

## 2 Impacts des méthodes sans combustion

Les méthodes de production d'énergie électrique sans combustion ont, par les techniques employées, une empreinte carbone nettement plus réduite que les dispositifs basés sur la combustion de matière carbonées. Ils ont néanmoins des impacts sur l'environnement et la biodiversité. En effet, la conception et la construction de ces dispositifs consomment :

- de l'énergie issue de sources non renouvelables carbonées ;
- des matières premières présentes en faibles quantités sur Terre et dont l'extraction est souvent polluante.

En outre, ces méthodes de production peuvent également présenter des risques spécifiques : pollution chimique, déchets radioactifs, accidents industriels...

## 3 Stockage de l'énergie

Les dispositifs d'obtention d'énergie électrique sans combustion sont basés sur l'exploitation de sources intermittentes en fonction des conditions météorologiques, des variations diurnes et saisonnières de la Terre, ... Les besoins des consommateurs sont également variables tout au long de la journée.

Toutefois, il n'est pas possible d'accumuler directement de l'énergie électrique. Elle doit être convertie en une autre forme d'énergie :

- chimique (accumulateurs au plomb, Li-ion, ...)
- potentielle (pompage-turbinage sur les barrages hydrauliques)
- électromagnétique (super-capacités, ...)

Ces dispositifs présentent des caractéristiques très différentes en termes de capacité de stockage, de durée, de masses mises en jeu et d'impact écologique.



## Optimisation du transport de l'électricité

### I Réseau électrique et pertes par effet Joule

#### 1 De la production électrique à sa consommation

Le transport de l'électricité des sites de production aux sites de consommation passe par un réseau électrique constitué de lignes aériennes, de câbles souterrains et de postes de transformation.

La transport à travers le réseau électrique est en revanche une activité régulée, assurée par Réseau Transport Electricité (RTE), filiale d'Enedis.

Deux niveaux de transport peuvent être distingués :

- Le réseau de grand transport sous très haute tension (THT) de 400 kV de grandes quantités d'énergie sur de longues distances avec un faible niveau de perte. Il permet de relier les pays et les régions entre eux, ainsi que d'alimenter les villes.

- Le réseau de répartition régionale et locale grâce à un ensemble de lignes à haute tension (HT) qui acheminent l'électricité aux industries lourdes et aux grands consommateurs électriques. Leur tension est de 225 kV, 90 kV ou 63 kV.

Le réseau de répartition régionale fait le lien avec le réseau de distribution. Le relais de distribution est assuré par deux types de lignes : le réseau moyenne tension (MT), qui alimente les petites industries, les petites et moyennes entreprises (PME et commerces avec une tension de réseau comprise entre 15 kV et 30 kV, et le réseau basse tension (BT) qui alimente les particuliers et les artisans avec une tension de réseau de 230 V. Enedis est chargée de la gestion de l'aménagement de la quasi-totalité du réseau de distribution d'électricité en France dans une activité régulée.

#### 2 Pertes par effet Joule

Le réseau de distribution transporte l'énergie électrique dans des câbles où une partie de la puissance transportée est dissipée par effet Joule. Ces pertes dépendent de la résistance  $R$  du câble et de l'intensité du courant  $I$  qui y circule.

$$P = U \times I = R \times I^2$$

Pour calculer l'énergie électrique transportée pendant une durée  $\Delta t$ , on utilise la relation

$$E = P \times \Delta t$$

Pour minimiser ces pertes, l'énergie électrique est transportée à haute tension. L'élévation de la tension d'alimentation du câble entraîne une diminution de l'intensité du courant électrique, réduisant ainsi la puissance dissipée par effet Joule.

Les transformations élèvent la tension électrique pour le transport puis l'abaissent pour la rendre utilisable par tout usager.

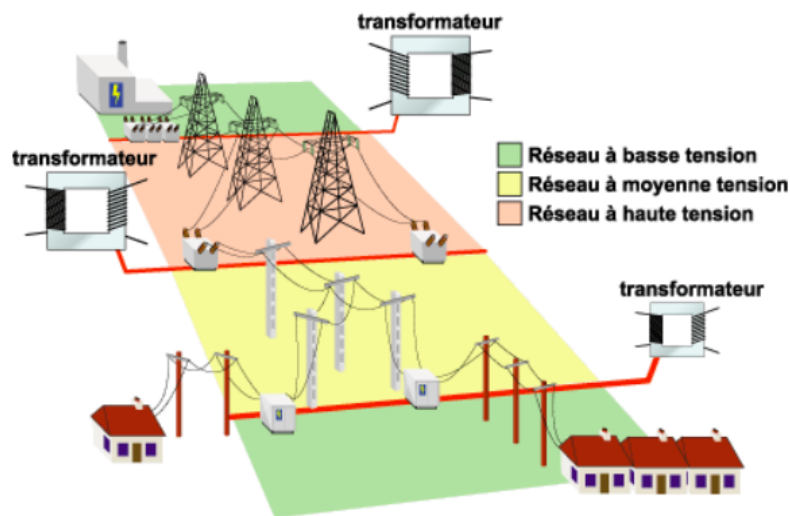
## II Modèle du réseau de transport électrique

### 1 Modéliser une ligne à haute tension

Une ligne à haute tension peut être modélisée expérimentalement par un circuit électrique avec les correspondances suivantes.

Le transformateur élévateur permet d'obtenir une tension supérieure à celle du générateur (modélisation de la haute tension). Comme l'intensité du courant qui parcourt les résistances est alors plus faible, la puissance dissipée par effet Joule est moindre.

La transformateur abaisseur permet ensuite à l'utilisateur de disposer d'une tension adéquate.



### 2 Modéliser et optimiser un réseau

Un réseau de distribution électrique peut être modélisé par un graphe orienté sur lequel chaque arc est associé à une ligne électrique.

Optimiser l'acheminement de l'énergie électrique signifie minimiser les pertes par effet Joule sur l'ensemble du réseau, en respectant des contraintes naturelles (production des sources, besoin des cibles, conservation de l'intensité au nœud intermédiaire).

Dans ce modèle, l'objectif est de minimiser les pertes par effet Joule sur l'ensemble du réseau sous les contraintes suivantes :

- l'intensité totale sortant d'une source est limitée par la puissance maximale distribuée

$$P_S = UI_S \leq P_{S,max}$$

- l'intensité totale entrant dans chaque nœud intermédiaire est égale à l'intensité totale qui en sort.

$$I_{S1} + I_{S2} + \dots = I_{C1} + I_{C2} + \dots$$

- l'intensité totale arrivant à chaque cible est imposée par la puissance qui y est utilisée :

$$I_C = \frac{P_C}{U}$$

L'étude du graphe orienté permet d'exprimer la fonction objectif, puis de déterminer les valeurs des intensités distribuées par les sources pour lesquelles les pertes sont minimales.

### 3 Limitations des pertes et fonction à minimiser

Les pertes par effets Joule sont à minimiser le long des lignes THT et HT de transport électrique. Pour cela, il suffit d'exprimer mathématiquement les contraintes à partir de la représentation en graphe orienté et de définir la fonction à minimiser.

La fonction  $f(x)$  à minimiser a pour variable  $x$ . Cette dernière correspond en général à la puissance produite par une des sources.

Dans le cas d'un graphe orienté avec deux sources, deux cibles et une seul nœud intermédiaire, on peut montrer (voir exercice en cours) que la fonction à minimiser est de la forme  $f(x) = ax^2$  avec  $x$  la puissance produite par l'une des deux sources et  $a > 0$  un coefficient dépendant de la résistance de l'arc orienté issu de cette source et la puissance maximale qu'elle produit.

# Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

## I Transition énergétique et diversification des ressources

### 1 L'évolution en France

Depuis les années 1980, la production d'électricité a évolué du fait des décisions politiques, et de contraintes économiques, techniques et environnementales. Elle a augmenté (de 250 à plus de 550 TWh), et les sources utilisées ont varié.

La part des énergies fossiles a diminué au cours des années 1980-1990, puis est restée sensiblement constante en quantité, d'où une baisse de son importance relative. La part du nucléaire a augmenté (environ 75 % de la production d'électricité française), même si elle stagne - voire diminue- depuis une dizaine d'années.

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie électrique d'origine hydraulique garde la même importance en quantité, mais diminue en proportion depuis les années 1980. S'il ne reste plus beaucoup de cours d'eau à exploiter, l'énergie marémotrice peut encore être développée. Enfin, d'autres énergies renouvelables sont apparues à partir des années 2010, principalement l'éolien (le plus ancien) et le solaire, progressent de façon modérée depuis une décennie. A l'horizon 2050, l'Ademe prévoit pour la France une production d'électricité issue à 100 % d'énergies renouvelables.

### 2 Le mix énergétique à l'échelle mondiale

La comparaison du mix énergétique en France et dans le reste du monde montre des différences considérables dans les sources énergétiques utilisées.

Si le nucléaire domine en France, dans le reste du monde, c'est l'énergie thermique à flamme, produite essentiellement à partir de la combustion d'hydrocarbures fossiles, avec comme conséquence une production de gaz à effet de serre bien plus importante.

Néanmoins, les problèmes posés par une source unique d'énergie largement majoritaire incitent à développer de nouvelles sources énergétiques.

## II Des choix en discussion

### 1 Energie nucléaire : avantages et inconvénients

La production d'énergie à partir de la fission d'éléments radioactifs permet d'obtenir des rendements bien supérieurs à ceux d'une centrale thermique.

Aussi, un recours à l'énergie nucléaire diminue-t-il l'utilisation des ressources naturelles (pétrole, gaz, charbon), et contrairement aux centrales thermiques, les centrales nucléaires ne rejettent pas de CO<sub>2</sub>. Par ailleurs, leur coût de fonctionnement est inférieur. Les ressources en uranium sont quasi inépuisables, elles pourraient même devenir renouvelables si le processus de recyclage, déjà appliqué et réutilisé dans des centrales spécifiques, pouvait être amélioré.

Cependant, les opposants au nucléaire avancent des arguments. Pour éviter un accident, catastrophique, un système de contrôle élaboré et sans faille est nécessaire, et le risque zéro n'existe pas. Le stockage des déchets radioactifs pose problème et provoque l'hostilité des populations concernées. Enfin, le nucléaire freine le développement des énergies renouvelables, car il est moins coûteux.

## 2 Energies renouvelables : avantages et inconvénients

Les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique ...) sont en théorie inépuisables, contrairement aux énergies fossiles. En revanche, leur disponibilité est intermittente, leur répartition à la surface du globe inégale et leur capacité de production inférieure.

Ainsi, le soleil disparaît une partie de la journée et de longs mois dans les régions de latitude élevée, et son intensité est faible une partie de l'année.

La production des centrales hydrauliques fluctue d'une année à l'autre selon les précipitations.

Les éoliennes fonctionnent environ 80 % du temps, mais avec une puissance très variable.

En revanche, l'utilisation de ces énergies est très sûre et génère peu de déchets. Elles rejettent très peu de CO<sub>2</sub> de par leur fonctionnement, mais leur construction est coûteuse en matériaux (ciment, métaux divers ...), ressources épuisables dont l'extraction et la fabrication génèrent une libération de CO<sub>2</sub>.