

Le futur des énergies

I Introduction

1) Energie

Définition : L'énergie d'un système consiste en la quantité de de travail que peut fournir ce système au milieu extérieur...

L'énergie se conserve. Elle n'apparaît pas ni ne disparaît. Elle se transfère (d'un système à un autre, ou d'un système à « l'extérieur du système ») en changeant de forme.

Remarque : on peut très bien dire qu'un système échange une valeur négative d'énergie (s'il en perd...). S'il en gagne, on dira donc qu'il échange une valeur positive d'énergie... Nous comprenons ici que la définition du système est comme un choix de point de vue et conditionne les signes des valeurs d'énergies transférées.

Les différentes formes d'énergie :

- Energies mécaniques (Energie cinétique : énergie de mouvement et énergie potentielle : énergie de position d'un objet matériel sous l'action de certaines forces).
- Energie lumineuse.
- Energie thermique (macroscopique), chaleur.
- Energie acoustique, sonore.
- Energie électrique.
- Etc.

Notons que si nous nous plaçons à l'échelle microscopique (en gros, au niveau des atomes), nous pouvons décrire certaines formes d'énergie en termes d'énergies cinétique et potentielle.

2) Energie et puissance (rappel)

Vos professeurs vous présentent ces deux grandeurs depuis de nombreuses années...

L'énergie échangée, notée E ou ΔE , s'exprime en joules (J)

La puissance P s'exprime en watts (W) et représente l'énergie échangée/produite/consommée/etc . par unité de temps.

Si, donc, un procédé consomme l'énergie ΔE pendant une durée Δt , nous pouvons calculer la puissance consommée :

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{nous avons donc :} \quad \Delta E = P \times \Delta t$$

1 W représente donc 1 J/s (1 J.s⁻¹)

L'énergie pouvant être représentée par un produit puissance \times durée, nous rencontrerons souvent une unité d'énergie qui est en quelque sorte un produit d'unités de puissance et de durée : le kWh.

3) Conversions d'énergie

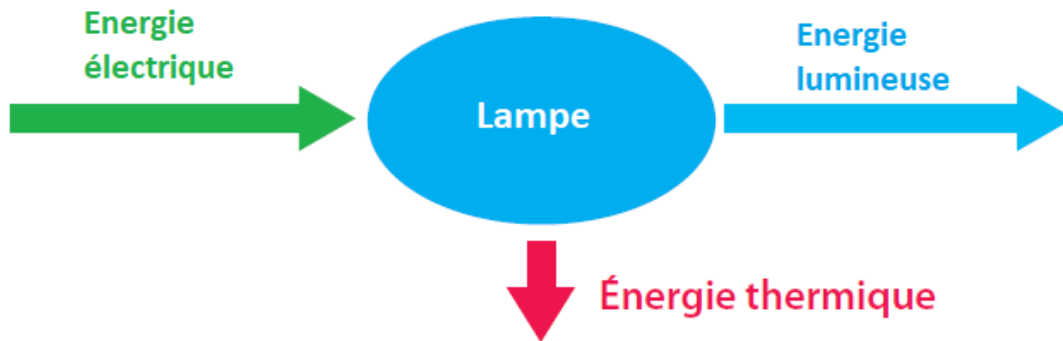
Quelques exemples de conversion :

- Je frotte ma main sur la table, la température augmente : de l'énergie mécanique est convertie en énergie thermique.
- Je mets ma main au soleil, elle s'échauffe : de l'énergie lumineuse ou apparentée (infra-rouge) est convertie en énergie thermique (chaleur)
- Je frappe dans mes mains : de l'énergie cinétique est convertie en énergie sonore
- J'allume une lampe : de l'énergie électrique est convertie en énergie lumineuse. La lampe s'échauffant, une partie de l'énergie électrique fournie s'est aussi convertie en chaleur.

Le schéma type de conversion d'énergie, est à connaître et à maîtriser :

- Au milieu, le système au sein duquel se réalise le procédé de conversion.
- A gauche, la source d'énergie et/ou sur une flèche la forme d'énergie apportée (d'où le sens de la flèche, de la source d'énergie vers le système)
- A droite la forme d'énergie convertie dite utile et le dispositif l'utilisant (dans une lampe, c'est l'énergie lumineuse) avec la flèche provenant du système responsable de la conversion.
- Sous le système, de nouveau sous la forme d'une flèche convenablement orientée (partant du système), l'énergie convertie sous une autre forme non souhaitée (le plus souvent il s'agit d'énergie thermique) que nous qualifierons d'énergie dissipée.

Schéma (cas de la lampe) :



Dans la mesure où l'énergie est une grandeur qui se conserve, la somme des énergies qui entrent dans le système est égale à la somme des énergies quittant ce système.

Ici nous avons donc : $E_{\text{élec}} = E_{\text{lum}} + E_{\text{th}}$

(D'autres exemples p119 dans le résumé du chapitre)

Remarque : rendement de conversion

Il s'agit tout simplement du quotient de l'énergie utile convertie sur l'énergie initialement apportée.

Ce rendement peut bien entendu se présenter sous la forme d'un quotient de puissances ($\frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{apportée}}}$), cela ne change rien au résultat.

Exemple :

Nous réalisons une mesure avec la lampe (cela suppose un dispositif dans lequel nous avons réussi à dévier toute la lumière produite afin de la concentrer sur le capteur du luxmètre, qui indique une valeur d'intensité lumineuse en lux. $1 \text{ W.m}^{-2} = 100 \text{ lux}$ en moyenne pour l'ensemble du spectre (car il y a de grosse variation selon les radiations) Nous ne réalisons pas cette expérience à la légère, nous retrouverons ces notions de rendement dans le cadre de l'étude des panneaux photovoltaïques.

La surface éclairée (circulaire) est mesurée, la puissance lumineuse reçue est calculée et, comparée à la puissance électrique de la lampe en calculant la valeur du quotient $\frac{P_{\text{lum}}}{P_{\text{élec}}}$, nous avons notre rendement...

4) Notre source énergétique au quotidien : l'énergie électrique

a. Introduction

Dans la mesure où nous sommes pleinement conscients de l'importance de l'énergie électrique dans notre vie quotidienne, nous devons nous poser les questions suivantes :

- Comment obtient-on de l'énergie électrique ?
- Comment stocke-t-on l'énergie électrique ?
- Comment transporte-t-on l'énergie électrique ?
- Quel est l'impact écologique ou environnemental des réponses technologiques que l'homme apporte aux trois questions précédentes ? Comment optimiser les procédés en conséquence ?

b. *Quelle(s) conversion(s) permettent d'obtenir de l'énergie électrique ? Quels dispositifs permettent ces conversions ?*

Réponses attendues :

- **Alternateurs** dans lesquels de l'énergie mécanique (cinétique, de mouvement) est convertie en énergie électrique (photos avec plusieurs exemples, la discussion ne porte pas sur la façon d'obtenir de l'énergie mécanique, mais on peut toutefois commenter les images qui défilent...)
- **Le panneau photovoltaïque** dans lequel de l'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique.

Une discussion annexe pourra s'amorcer autour de l'éclairage « électrique » : filament chauffé ou émissions par désexcitation ?

Mais comment en est-on arrivé là ?

Un alternateur, comment cela fonctionne ?

Et un panneau photovoltaïque ?

II Deux siècles d'énergie électrique

1) L'apport de l'électromagnétisme

a. L'électromagnétisme : qu'y a-t-il dans le mot ?

- Il y a « *électricité* » :
Les forces entre particules chargées (répulsives ou attractives selon les signes des charges électriques), sont décrites à l'aide d'un modèle présentant un champ électrique.
Ainsi, si une particule chargée se trouve dans un champ électrique elle est soumise à une force... Et se met en mouvement.

Le courant électrique, mouvement plutôt ordonné de particules chargées peut donc être associé à l'existence d'un champ électrique.

- Il y a « *magnétisme* » :
Certains matériaux ont des propriétés que nous qualifions, en simplifiant, de magnétiques. Nous trouvons ces matériaux dans les aimants.
Le modèle propose ici aussi un champ, le champ magnétique, qui peut être à l'origine de forces.
Une aiguille aimantée permet de détecter un champ magnétique, en s'orientant de façon privilégiée selon la direction que l'on décrit à l'aide de ce que l'on appelle une ligne de champ (qui va toujours du pôle nord vers le pôle sud de la source de champ magnétique).
Le champ magnétique le plus connu est le champ magnétique terrestre.

Expérience : lignes de champs d'un aimant droit (en visuel direct avec de la limaille de fer)

Le terme « électromagnétisme » indique donc un lien fort entre le monde de l'électricité et celui des aimants.

b. Historique : d'Oersted (expérience) à Maxwell (mise en équation)

i. Dates

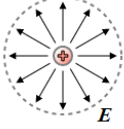
- 1820 : **Oersted** annonce qu'un courant électrique peut provoquer la déviation d'une aiguille aimantée. Le passage d'un courant électrique génère donc un champ magnétique à proximité. La découverte sera développée par Ampère puis Arago.

Expérience type Oersted

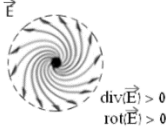
Expérience noyau de fer doux aimanté lors du passage du courant dans deux bobines entourant ce noyau...)

- **Faraday** : Un champ magnétique variable génère un courant électrique dans un circuit placé à proximité de la zone de variation du champ magnétique : l'induction magnétique est mise en évidence
- **Maxwell** met en équations l'électromagnétisme, c'est-à-dire un monde dans lequel, champ électrique et champ magnétiques sont étroitement liés (*Hors de question pour nous d'aborder ces équations, il s'agit juste de montrer aux plus curieux des outils mathématiques nouveaux...*) :

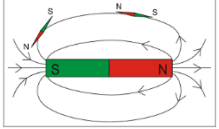
$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

(Maxwell-Gauss) 

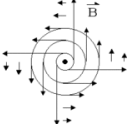
$$\operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

(Maxwell-Faraday) 

$$\operatorname{div}(\vec{B}) = 0$$

(Maxwell-Flux) 

$$\operatorname{rot}(\vec{B}) = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

(Maxwell-Ampère) 

ii. L'induction électromagnétique, source de l'industrie électrique

Pour obtenir un courant électrique (on peut aussi dire une tension électrique qui pourra provoquer le passage d'un courant), il suffit donc de modifier le champ magnétique qui règne autour du circuit conducteur fermé.

Comme Faraday, nous pouvons mener nos expériences :

Un circuit conducteur fermé est réalisé à l'aide d'une simple bobine de fil de cuivre. Un ampèremètre est associé au circuit afin d'indiquer le passage d'un courant dans la bobine.

En l'état, il n'y a aucun générateur, aucune pile, le courant ne passe pas.

Nous positionnons un aimant droit à proximité du circuit : toujours pas de courant.

Nous remarquons toutefois une indication sur l'ampèremètre lorsque nous déplaçons l'aimant (soit parce que nous l'approchons, soit parce que nous l'éloignons).

Si l'aimant est posé à côté du circuit, il règne près de celui-ci un champ magnétique constant. Et nous ne constatons aucun passage de courant électrique.

Si l'aimant est déplacé à proximité du circuit, nous faisons varier le champ magnétique et nous constatons l'apparition d'un courant électrique.

Le courant électrique est dit induit par la variation du champ magnétique à proximité du circuit.

Le phénomène observé est appelé induction magnétique.

Développons le dispositif : nous faisons tourner un aimant devant une bobine, ce qui modélise par exemple le mouvement que nous pourrions générer à l'aide de pales à l'aide d'un courant d'eau (torrent, rivière, etc.). Nous observons un signal électrique.

- *Ce signal est alternatif : selon que le pôle nord ou sud se présente devant le circuit, le sens du courant change. Nous comprenons plutôt : selon que le champ diminue ou augmente devant le circuit, le sens du courant électrique induit change.*
- *Ce signal est périodique : il se répète identique à lui-même au cours du temps. La durée d'un cycle de répétition est appelée la période (T).*

Nous avons fabriqué notre premier alternateur (le terme « alternateur » est cohérent)

Nous rappelons que notre électricité domestique de secteur est alternative et périodique (période 0,02 s, fréquence 50 Hz). Il tout à fait cohérent qu'au départ de la production, il y ait une source d'énergie mécanique permettant de faire tourner des aimants au sein de circuits conducteurs afin de produire l'électricité.

Nous convertissons donc l'énergie mécanique (de l'aimant en train de tourner) en énergie électrique (passage d'un courant, sous l'effet d'une tension).

Remarques :

- Cela fonctionne aussi dans l'autre sens : une circuit électrique parcouru par un courant génère autour de lui un champ magnétique (expérience bobine/limaille/lignes de champs).
- ***Enigme : nous déformons un circuit placé devant un aimant fixe. Nous constatons le phénomène d'induction (un courant circule brièvement dans le circuit).***

Qu'est-ce qui varie au juste, permettant de justifier à nouveau le phénomène d'induction ?

Le phénomène d'induction est donc logiquement qualifié d'électromagnétique (puisque le magnétisme induit de l'électricité et l'électricité induit du magnétisme)

Des photos ou films de ces expériences seront éventuellement rajoutés ultérieurement au document.

iii. Quelques dispositifs expérimentaux célèbres à base d'induction électromagnétique

1. La dynamo de vélo (démontée)

Nous y retrouvons clairement les éléments évoqués précédemment : un aimant permanent et une bobine de fil conducteur (reliée en circuit fermé à deux lampes) pouvant tourner l'un par rapport à l'autre.

2. La machine de Gramme

L'homme (Zénobe Gramme) :



La machine :



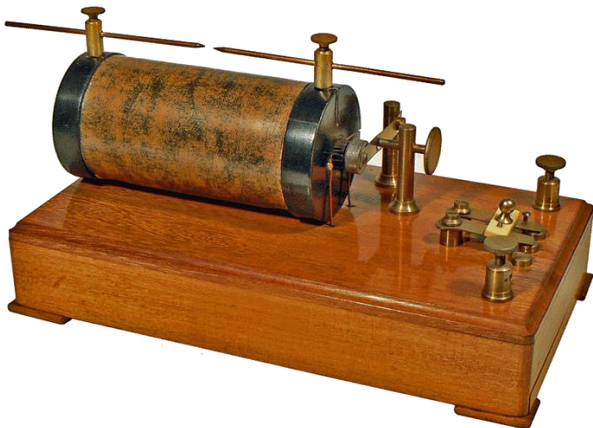
(Voir démonstration pendant la séance)

Question :

Alors que le fonctionnement dans le sens « énergie mécanique se convertit en énergie électrique » semble tout à fait cohérent avec la présentation de l'induction qui a précédé, comment expliquer le fonctionnement dans l'autre sens (un pile délivrant un courant continu déclenche la rotation de la manivelle) ?

(La lecture de l'exercice n°11 p 142 peut aider à la réflexion)

3. Les bobines de Ruhmkorff



Voir démonstration pendant la séance.

Voir diaporama Ruhmkorff.

Question :

pourquoi ce dispositif n'est-il pas hors sujet par rapport au thème traité alors qu'il ne contient pas d'aimant permanent ?

c. Production d'électricité à l'aide d'un alternateur industriel : rendement

Rendement d'un alternateur : Activité 3 p 131 du livre

Dans le même style : exercice corrigé n°9 p 141

d. Quelle source d'énergie au départ du procédé ?

(Comment obtient-on l'énergie mécanique nécessaire ?)

1^{ère} catégorie : L'énergie mécanique est naturellement disponible

- Courant d'eau naturel : chute d'eau, torrent, rivière, fleuve, marée.
- Courant d'eau maîtrisé : construction d'un barrage et ouverture pour circulation d'eau selon la demande.
- Courant d'air : éoliennes (1 p 128)
-

2^{ème} catégorie : L'énergie mécanique est produite par un courant de vapeur d'eau qui circule dans des turbines. La vapeur d'eau est produite en chauffant de l'eau afin de provoquer son ébullition. Il faut donc une source d'énergie permettant de produire la chaleur nécessaire.

- Energie de combustion (charbon, etc.)
- Energie nucléaire (2a p 129)
- La chaleur provenant du rayonnement solaire (2b p 129)

Discussion, débat, exposés : des groupes d'élève préparent un argumentaire en faveur et/ou en défaveur de chacune des techniques citées.

2) L'apport de la révolution quantique

Il est en fait délicat d'utiliser le terme « révolution »... Ne serait-ce que parce qu'il n'y a pas vraiment de date clé, mais comme souvent, un enchaînement de propositions fortes.

Lire « Histoire des Sciences » (CDI) de la page 176 à la page 178)

Quelques dates toutefois :

Max Planck 1900, Einstein 1905, Henri Poincaré 1912, Niels Bohr 1913, Louis de Broglie 1924, Heisenberg, Born, Schrödinger, 1925-1927, Dirac, Heitler, London, 1927, etc.

a. Vous avez dit « quantique » ? Vous voulez dire « quantifié » ?

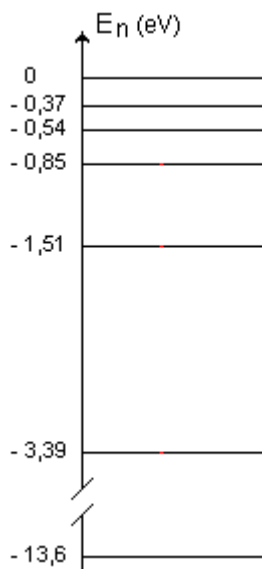
Quels résultats expérimentaux ont montré que l'énergie microscopique, par exemple celle des électrons d'un atome, ou celle d'un photon, ne pouvait pas avoir n'importe quelles valeurs ?

- Spectres de raies (spectres d'absorption, spectres d'émission)
Expérience : récupérer et projeter au tableau le spectre de raies (ou presque) de l'éclairage de la salle de classe....
- Effet photoélectrique
Discussion rapide

On a donc désigné cette énergie comme étant **quantifiée**.

On a qualifié les valeurs possibles d'énergie de discrètes (en opposition à « continues »)

Exemple d'un schéma de niveaux d'énergie (le plus connu, celui de l'électron d'un atome d'hydrogène isolé) :



Le domaine de la physique correspondant a été appelé physique quantique.

Quel rapport y a-t-il entre la physique quantique et la production d'électricité ?

b. Matériaux conducteurs, matériaux isolants, matériaux semi-conducteurs

Nous savons ce qui signifient les termes « conducteur » et « isolant » (électriques).

- Si nous imposons une tension électrique entre les deux extrémités d'un fil conducteur, nous constatons le passage d'un courant électrique, que nous interprétons en considérant le déplacement ordonné (on pourrait même dire macroscopique) d'électrons dans le fil (du pôle – de la tension imposée vers le pôle +).

Dans ce cas, les électrons, ou plutôt certains électrons ont pu facilement être arrachés au noyau de l'atome auquel ils appartenaient initialement.

- Si nous imposons la même tension électrique entre les deux extrémités d'un fil non conducteur, le courant ne passe pas. Nous sommes obligés de constater que malgré l'influence imposée (un pôle – d'un côté, un pôle + de l'autre) il n'y a aucun déplacement ordonné d'électrons. L'énergie n'est donc pas suffisante pour arracher les électrons à leur noyau.
- Dans un semi-conducteur, certains électrons pourront circuler, mais à condition de leur fournir un supplément d'énergie... (?)

Nous devons proposer une explication, nous allons être amenés à considérer le modèle dit « quantique » de la matière. Nous allons raisonner avec les niveaux d'énergie des électrons dans ces différents matériaux.

Comme nous considérons non pas des atomes isolés mais des associations de nombreux atomes liés les uns aux autres, les niveaux d'énergie se présentent en « bandes d'énergies possibles » (en réalité il s'agit d'ensembles de niveaux d'énergie, il y a toujours quantification).

Dans ces bandes d'énergies, nous distinguons deux zones :

- **La bande de valence** qui correspond aux états d'énergie des électrons de valence (électrons externes), c'est-à-dire les électrons de plus hautes énergies des atomes. Ce sont ces électrons qui sont les moins liés à leur noyau, qui sont les plus faciles à arracher à son influence. Mais cela ne veut pas pour autant dire qu'ils vont être arrachés et vont pouvoir se déplacer sous l'influence d'un champ électrique extérieur. Cela dépend du matériau.
- **La bande de conduction** : une zone de valeurs d'énergies possibles telles que le champ électrique appliqué (grâce à une tension électrique imposée) peut provoquer le déplacement des électrons correspondants.

Dans un conducteur, certains électrons de valence sont à des niveaux d'énergie correspondant à aux valeurs de la bande de conduction, ils peuvent donc circuler.

Dans un isolant, les électrons de valence occupent des niveaux d'énergie très bas par rapport au domaine de valeurs correspondant à la bande de conduction. Même l'énergie thermique de ces électrons ne leur permet pas de passer dans un état de la bande de conduction. Pas de circulation ordonnée d'électrons possible.

Entre les deux situations, il y a le cas des semi-conducteurs : Les bandes de valence et de conduction sont séparées mais la zone de séparation est plus étroite que pour les isolants. Il suffirait d'un complément d'énergie pour faire passer des électrons de valence dans un état d'énergie pour lequel la conduction serait possible.

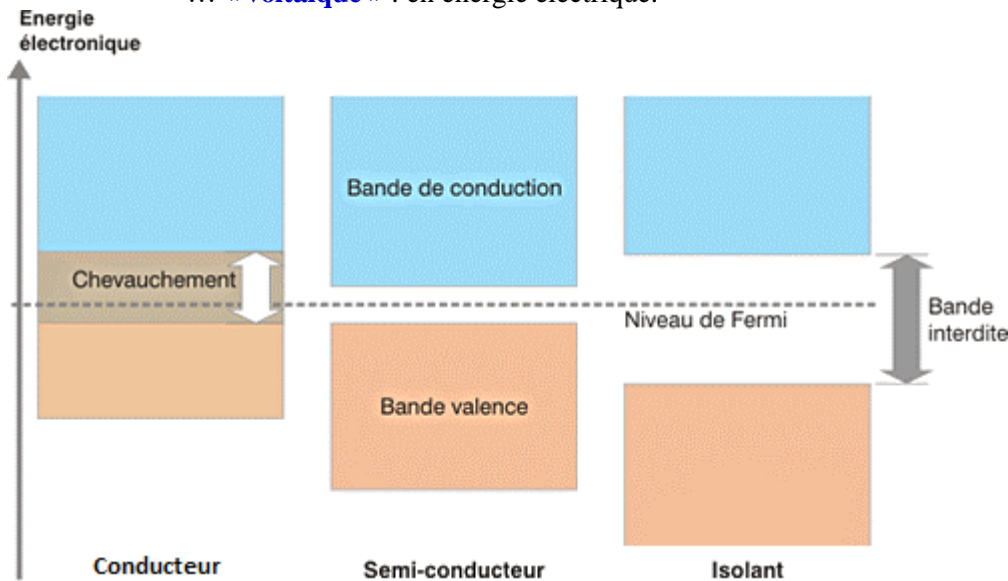
Par exemple en éclairant le matériau !

L'énergie des photons se transfère aux électrons, qui se trouvent alors dans un état de conduction possible (si on impose une tension électrique entre deux points du matériau : Le matériau devient conducteur.

Si nous n'éclairons pas, très peu d'électrons passeront dans un état de conduction, le matériau pourra être considéré comme isolant.

Nous venons à peine d'entrer dans le monde des semi-conducteurs (et nous n'irons pas plus loin) et nous venons toutefois de constater le principe d'un fonctionnement que nous pouvons qualifier de **photovoltaïque**.

- « **Photo** » : apport d'énergie lumineuse (électromagnétique), sous la forme d'un flux de photons.
- **Conversion de l'énergie électromagnétique...**
- ... « **voltaïque** » : en énergie électrique.



c. Exemple du silicium :

- Il absorbe fortement les rayonnements UV-visibles.
- Il entre dans la catégorie des semi-conducteurs.
- Il peut donc être utilisé comme matériau de base d'un dispositif photovoltaïque.

Activité p 114-115

Le spectre d'absorption du silicium atomique : **voir p 119.**

Remarque : on trouve le silicium dans le sable... L'élément silicium représente à lui seul 27,7 % de la croûte terrestre.

d. Rendement d'une cellule photovoltaïque (activité expérimentale)

Attention : par rapport à toute la proche générale qui a été proposée précédemment, la cellule photovoltaïque possède une propriété supplémentaire : elle joue elle-même le rôle de générateur.

Résumons :

- La cellule est constituée à partir de matériaux semi-conducteurs.
- Lorsqu'elle est éclairée des électrons passent dans les bandes de conduction.
- La cellule est constituée de telle sorte qu'elle peut alors jouer lui-même le rôle de générateur électrique : elle génère le déplacement ordonné d'électrons si elle est reliée à un circuit conducteur fermé. Elle peut donc alimenter une installation électrique.

De nouveau il s'agit de calculer un quotient $\frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie fournie}} = \frac{\text{énergie électrique}}{\text{énergie lumineuse}} = \frac{\text{puissance électrique}}{\text{puissance lumineuse}}$

Nous pouvons considérer l'activité du livre p 116-117.

Nous pouvons aussi réaliser toutes les mesures nous-mêmes...

Nous travaillons sur une cellule d'environ 1 dm^2 que nous éclairons avec une simple lampe. La cellule est reliée à un conducteur ohmique de résistance variable et l'ensemble constitue donc un circuit fermé.

Deux multimètres permettant de mesurer tension et intensités caractéristiques sont judicieusement intégrés au montage.

Nous commençons par mettre en œuvre une expérience très simple permettant de constater l'influence de l'éclairement (Cellule éclairée : le courant passe. Cellule non éclairée : pas de courant électrique).

La puissance lumineuse reçue par la va être mesurée grâce au luxmètre.

La résistance du conducteur ohmique peut être modifiée, ce qui nous permet d'obtenir plusieurs couples de valeurs de tension U et d'intensité I caractéristiques du comportement de la cellule photovoltaïque.

Avec tous ces couples de valeurs (U , I), nous pouvons tracer des graphes à deux dimensions (abscisse/ordonnée) assez représentatifs :

- Nous traçons $i = f(u)$

La puissance électrique va être calculée, c'est le produit (tension aux bornes de la cellule photovoltaïque) \times (intensité du courant électrique qui traverse la cellule), $P = U \times I$

- Nous traçons le graphe $P = f(R)$

Nous pouvons conclure...

Pour vous aider voici quelques questions permettant de guider votre progression (elles sont beaucoup plus détaillées que celles de l'activité du livre p 116-117)

1) La caractéristique $I = f(U)$ d'un récepteur passe par l'origine du repère, contrairement à celle d'un générateur. La cellule photovoltaïque est-elle un récepteur ou un générateur ?

2) On note I_{cc} l'intensité délivrée par une cellule en court-circuit (c'est-à-dire lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle). Que vaut la valeur de I_{cc} ?

3) On note U_{co} la tension en circuit ouvert aux bornes de la cellule (lorsque l'intensité est nulle). Quelle est la valeur de U_{co} ?

4) Utilisation de la courbe $P = f(U)$ (p 117) : quelle est la puissance maximale P_{max} que peut délivrer la cellule ?

5) Expliquer pourquoi la puissance lumineuse reçue par la cellule peut s'exprimer par la formule : $P_{lum} = E \times S$ (E étant l'éclairement en $W.m^{-2}$ (W/m^2) et S la surface de la cellule en m^2)

6) Calculer P_{lum} .

7) Déterminer le rendement de la cellule : $r = \frac{P_{max}}{P_{lum}}$.

Voir aussi l'exercice corrigé n°8 p 123

Remarque (question supplémentaire) :

Un panneau photovoltaïque est éclairé et produit de l'électricité avec un rendement de 20 %. L'électricité produite sert à faire fonctionner une lampe classique avec un rendement de 10 % (nous pouvons aussi traiter l'exercice avec une lampe à LED, rendement 40 %).

Que vaut le rendement global $\left(\frac{\text{énergie lumineuse produite par la lampe}}{\text{énergie lumineuse reçue du Soleil}} \right)$?

Voir aussi (même idée) l'exercice n°18 p 143

e. Comment associer plusieurs cellules pour obtenir un panneau ?

(Comment fournir suffisamment d'électricité)

- i. Association en série (schéma) : les tensions vont s'additionner
- ii. Association en dérivation (schéma) : les intensités vont s'additionner
- iii. Intérêt ?

Exercice 14 p 125

f. Remarque : la physique quantique à l'origine des sources de lumière nouvelle génération.

Qu'est-ce qui se cache derrière l'acronyme « LED » ?

Comment fonctionne une tube néon ?

(aide : exercice n°12 p 124)

(Demande d'exposés élèves)

g. A propos de physique quantique (pour les plus intéressés)

- **Article BUP : « Comprend-t-on vraiment la physique quantique ? ».**
- **Revue Pour la Science mars 2020.**
- **A propos des semi-conducteurs, au moins trois courts textes intéressants dans « Panorama de la Physique » (CDI).**

III Optimiser les atouts de l'électricité

1) Objectif : augmenter les rendements de conversion

Les rendements de conversion sont déjà bons pour certains modes de conversion (*rappel activité 3 p 123, cas d'une centrale hydroélectrique*)

C'est pour les dispositifs à faible impact environnemental que l'augmentation du rendement de conversion est un axe de recherche essentiel.

L'exemple le plus frappant est le panneau photovoltaïque :

- Le rendement d'un panneau photovoltaïque classique se situe aux alentours de 20 %.
- Le rendement d'une cellule photovoltaïque organique est autour de 5 %.

Augmenter le rendement signifie essentiellement minimiser la part de l'énergie dissipée.

Remarque : Nous verrons plus loin que le transport de l'électricité (le courant électrique) est lui-même étroitement associé à un phénomène de dissipation d'énergie.

2) Objectif : minimiser les impacts environnementaux

Nous avons listé les différentes conversions permettant d'obtenir notre énergie électrique, observons-les à nouveau et considérons avec soin les aspects écologiques et environnementaux qui accompagnent obligatoirement les technologies mises en œuvre.

- Une **centrale nucléaire** convertit l'énergie libérée par la fission nucléaire en :
 - o énergie thermique (ébullition d'eau)
 - o énergie mécanique (circulation de vapeur d'eau)

- énergie électrique (induction électromagnétique/rotation de la turbine d'un alternateur).

Problème : les déchets nucléaires.

- Une **centrale hydraulique** convertit l'énergie mécanique d'un courant d'eau (torrent, marée, courant de rivière, canalisation reliée à une retenue d'eau, ...) en énergie électrique (induction électromagnétique au niveau de l'alternateur traversé par la circulation d'eau).

Très bon rendement de conversion ().

Problème : ne produit pas d'électricité si l'eau vient à manquer.

- Une **éolienne** : son hélice est couplée à la turbine d'un alternateur et il y a conversion de l'énergie mécanique (vent) en énergie électrique.

Problème : ne produit pas d'électricité s'il n'y a pas de vent (intermittence du mode de production)

- La centrale thermique : la combustion d'un matériau convertit l'énergie chimique en énergie thermique. L'énergie thermique permet ensuite la production, par exemple, de vapeur d'eau qui est guidée vers un alternateur.

Problèmes :

- le bilan carbone. Toute combustion libère un gaz à effet de serre célèbre, le dioxyde de carbone CO_2 .
- La combustion mal contrôlée de substances telles que, par exemple, le charbon, libère aussi des gaz polluants et toxiques, des poussières, etc. l'impact environnemental d'une centrale thermique peut être énorme (à long terme comme à court terme).
- Une **pile ou une batterie** convertit l'énergie chimique en énergie électrique.

Le problème : le recyclage des constituants chimiques de la pile ou de la batterie lorsqu'elle ne fonctionne plus.

- Remarque : la pile du futur : la pile à hydrogène
 - **Le problème associé : l'obtention de dihydrogène H_2 .**
- Centrale solaire : l'énergie du rayonnement (infra-rouge) est convertie en énergie thermique, etc.

Le problème : intermittence du mode de production (ne fonctionne pas la nuit).

- Panneau photovoltaïque : L'énergie lumineuse est convertie en énergie électrique

Problèmes :

- Coût de fabrication, disponibilité des matières premières, bilan CO_2 lié à la fabrication des panneaux
- Recyclage
- Rendement faible

3) Objectif : Stocker l'énergie électrique

Pourquoi est-il nécessaire de maîtriser le stockage de l'énergie électrique ?

A cause de l'intermittence de certains modes de production de cette énergie. L'énergie électrique doit être disponible même lorsque le dispositif de conversion ne fonctionne pas (Centrale nucléaire à l'arrêt, pas de vent, courant d'eau asséché, ...)

Solutions : des stockages d'énergie sous les formes suivantes :

- *énergie potentielle chimique (accumulateurs) ;*
- *énergie potentielle mécanique (barrages) ;*
- *énergie potentielle électrostatique (super-capacités).*

Lectures p 130 à 135, exercices

III Optimisation du transport de l'électricité

1) Introduction

Considérons une puissance électrique P_0 produite à la sortie d'une centrale électrique.

Cette électricité doit maintenant être transportée et partagée pour différents usages quotidiens :

- Electricité domestique (basse tension « BTB » $U = 220$ V, alternative de fréquence 50 Hz)
- Electricité « industrielle »

Les questions qu'il faut tout de suite se poser :

- Question n°1 : le transport génère-t-il une perte de puissance ? La puissance électrique utile arrivée à destination est-elle égale à P_0 ?
- Question n°2 : si la tension à la sortie de la centrale vaut par exemple 10000 V, comment transforme-t-on le signal électrique de manière à obtenir 220 V aux bornes de nos prises électriques ?

Nous allons voir que les deux questions sont liées.

Avant de développer les problèmes et leurs solutions :

- rappelons la formule décrivant la puissance électrique :

$$P = U \times I$$

- P , en watts (W), est la puissance électrique
 - délivrée par une centrale de production
 - consommée par un appareil électrique domestique
 - etc.
- U en volts (V) est la tension aux bornes de l'installation.
- I en ampères (A) est l'intensité qui circule lorsque le dispositif est en fonctionnement.
- Rappelons la loi d'Ohm aux bornes d'un circuit simplement conducteur (on dit « conducteur ohmique ») de résistance R :

$$U = R \times I$$

(U en V, I en A, R en Ω)

2) L'effet Joule

Lorsque de l'électricité est transportée sous la forme d'un courant d'intensité I à travers un circuit conducteur de résistance R , ce circuit dissipe toute la puissance électrique consommée sous forme de chaleur.

$$P_{\text{dissipée}} = P_{\text{élec}} = U \times I = R \times I \times I = R \times I^2$$

L'effet Joule est utilisé pour de nombreux dispositifs de chauffage, mais il constitue un énorme problème dans le cadre du transport de l'électricité.

Considérons le conducteur électrique traditionnel le plus connu : le cuivre.

Il est utilisé parce qu'il est très peu résistant (et donc très bon conducteur)

La résistance d'un câble de cuivre de 1 m de long et de 1 cm de diamètre vaut $R_1 = 2,2 \times 10^{-4} \Omega$

Si nous déroulons ce câble sur 2 km entre deux pylônes d'une ligne électrique et qu'il est traversé par une intensité $I = 50 \text{ A}$, que vaut l'énergie dissipée par effet Joule en 1 heure ?

$$R = 0,44 \Omega$$

$$E_{\text{dissipée}} = RI^2\Delta t = 3,6 \times 10^6 \text{ J} = 1 \text{ kWh}$$

Que représente une telle valeur d'énergie dissipée ?

Quelques comparaisons ou effets :

- *Energie cinétique d'un minibus de 5 tonnes roulant à 140 km.h^{-1} .*
- *C'est l'énergie de 100 mL de carburant type essence.*
- *Echauffement du fil de cuivre (en supposant que la chaleur produite reste dans le cuivre...) : $6,7 \text{ }^\circ\text{C}$*

Ont servi pour les calculs : masse volumique du cuivre 8920 kg.m^{-3} ; capacité thermique massique du cuivre : $385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; résistivité du cuivre $1,7 \times 10^{-8} \Omega.m$

Nous comprenons que nous avons intérêt à transporter l'électricité à basse intensité si le parcours se fait sur de longues distances.

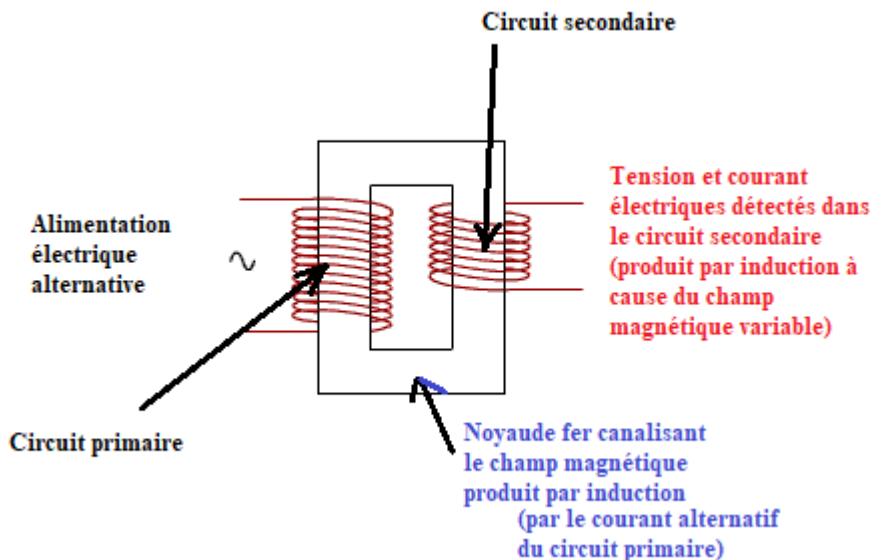
Autre solution ? Diminuer les valeurs de R ? (discussion)

- Et si nous avons besoin d'une forte intensité ?
(Décrire le procédé à l'œuvre dans l'aciérie de Tarnos)
- Et si, tout simplement, l'intensité produite à la sortie de la centrale électrique est élevée ?

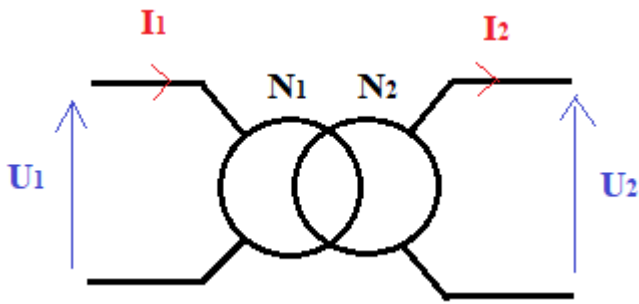
3) Le transformateur

Expérience

(Prérequis : courant alternatif, induction électromagnétique)



Symbole du transformateur :



Résultat : La puissance électrique $P = U_1 I_1$ du circuit alimenté par le générateur (le circuit primaire) se transmet intégralement par induction canalisée par le noyau de fer au circuit secondaire puisque l'on mesure une intensité I_2 le traversant et une tension U_2 à ses bornes, avec $U_2 I_2 = U_1 I_1$.

Mais l'expérience donne une information supplémentaire : selon le rapport des nombres de spires des bobines primaire et secondaire, nous maîtrisons les valeurs de U_2 par rapport à U_1 et par conséquent de I_2 par rapport à I_1 .

Si par exemple le nombre de spires N_2 dans la bobine du circuit secondaire est multiplié par 10 par rapport au nombre de spires N_1 dans le circuit primaire, U_2 est multipliée par 10 par rapport à U_1 (et I_2 est divisée par 10 par rapport à I_1).

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$$

Retour sur les bobines de Ruhmkorff : $U = 6 \text{ V}$, $I = 1 \text{ A}$ en entrée ; $U' = 20000 \text{ V}$, $I' = ?$ entre les deux pointes.

Activité 1 p 146-147

1. **Production, transport et répartition, distribution, fourniture**
2. **C'est le transformateur qui, grâce au phénomène d'induction électromagnétique, permet, à puissance constante et avec peu de pertes :**
 - Soit d'augmenter la tension aux bornes d'un dispositif (et cela s'accompagne d'une baisse d'intensité dans le circuit permettant le fonctionnement du dispositif)
 - Soit de diminuer la tension (et cela s'accompagne d'une augmentation d'intensité)
3. **Si la distance de transport est grande, l'intensité doit être faible afin de minimiser l'effet Joule. La tension doit donc être élevée (la puissance électrique $P = U \times I$ est, on le rappelle, considérée comme constante).**
Une fois arrivée en phase de distribution, ce sont les utilisations qui imposent les valeurs de tensions. Si la tension doit être abaissée, cela s'accompagnera obligatoirement d'une augmentation de l'intensité délivrée.
4. **Une partie de la puissance électrique transportée est convertie sous forme de chaleur simplement parce que le circuit permettant le transport possède une résistance électrique R , c'est l'effet Joule. L'expression de cette puissance électrique convertie en chaleur est donc :**

$$P_{\text{Joule}} \text{ (ou } P_J) = U \times I = R \times I \times I = R I^2$$

5. **$P_{\text{transportée}} = P_{\text{utile}} + P_J$**
6. **Dans la mesure où la tension aux bornes du câble de résistance $R_{\text{câble}}$ s'exprime selon la loi d'Ohm : $U = R_{\text{câble}} \times I$, la puissance dissipée par effet Joule aura donc pour expression :**

$$P_J = U \times I = R_{\text{câble}} \times I^2$$
Lorsque I augmente, P_J augmente aussi, mais ce n'est pas une augmentation linéaire, c'est une augmentation encore plus forte. P_J augmente plus fortement car elle est proportionnelle à I^2 et non pas proportionnelle à I .
7. **A puissance électrique transportée, $P_{\text{transportée}} = U \times I$, donnée (c'est-à-dire que l'on pourra la considérer comme constante), plus l'intensité I sera élevée, plus l'effet Joule et l'énergie dissipée seront importants. Nous avons donc intérêt à transporter l'électricité sous tension U très élevée, ce qui impliquera forcément une intensité I plus faible (puisque le produit $U \times I$ doit rester constant).**

Activité p 148-149 :

1.

	Mesures de U (en V) et de I (en mA)				Calculs de P (en mW)		
	U _G	U _L	U _R	I	P _G	P _L	P _{J totale}
Montage A	6,60	6,59		59	389	389	0 (0,6)
Montage B	6,60	3,75	1,45	43	284	161	?

Pour la dernière case, deux solutions :

- $P_J = P_G - P_L = 284 - 161 = 123 \text{ mW}$
- Nous déterminons d'abord U_R la tension « manquante » sur le schéma, aux bornes de la deuxième résistance en parcourant le circuit et en additionnant les tensions le total donnant la tension U_G délivrée par le générateur : $U_G = U'_R + U_L + U_R$
Nous avons donc $U'_R = U_G - U_L - U_R = 6,60 - 3,75 - 1,45 = 1,40\text{V}$
Nous effectuons le produit U_R×I et nous l'additionnons au produit U_R×I correspondant à l'autre résistance ; nous obtenons $1,40 \times 43 + 1,45 \times 43 = 123 \text{ mW}$

- Parce que l'intensité qui circule dans le circuit est plus faible (Les deux conducteurs ohmiques qui y ont été rajoutés font augmenter la résistance du circuit et donc provoque un abaissement de l'intensité électrique).
- Voir première méthode de calcul dans la question 1.
- Le schéma du protocole expérimental indique que pour ce premier transformateur, le rapport m est supérieur à 1. Ce premier transformateur provoque donc une augmentation de tension... Nous entrons dans la ligne haute tension. Le rapport de transformation du deuxième transformateur est inférieur à 1. La tension à la sortie (au niveau du circuit secondaire) de ce deuxième transformateur est abaissée, nous sortons de la ligne haute tension.
- (et 6.) Dans le montage C, les deux résistances sont soumises à la même tension U_R = 0,72 V et traversés par la même intensité I_R = 0,021 A La puissance totale dissipée par effet Joule dans ces deux résistances est donc :
 $P_J = 2 \times U_R \times I_R = 2 \times 0,72 \times 0,021 \approx 0,03 \text{ W}$
Seulement 30 mW de dissipés par effet Joule au lieu des 123 mW perdus dans le montage B. Le transformateur n°1 fait en sorte que l'intensité qui traverse maintenant les deux résistances est fortement abaissée, l'effet Joule est moins prépondérant.

4) Conséquences

Pour un transport d'électricité à puissance $P = U \times I$ donnée

- Transport de l'électricité sur de longues distances : sous haute tension (et donc basse intensité)
- Répartition des intensités, optimisation (minimisation) de la puissance consommée par effet joule

Nous considérons la situation décrite p 150.

Les intensités arrivant à destination ne peuvent pas être modifiées elles sont conditionnées par les installations en fonctionnement.

Quelles valeurs choisir pour les intensités d'origines (I₁ et I₂) afin de minimiser la puissance globale consommée par effet Joule (Cette puissance sera notée P_{J tot}) ?

- P_{utile 4} = 36,0 kW (document 1).

$$P_{J4} = \frac{6}{100} \times P_{\text{utile 4}} = 2,16 \text{ kW} = 2160 \text{ W}$$

Avec R₄ = 0,1 Ω et P_{J4} = R₄×I₄², nous pouvons exprimer puis calculer I₄ :

$$I_4 = \sqrt{\frac{P_{J4}}{R_4}} = 147 \text{ A}$$

- I₁ + I₂ = I₃ + I₄ (Loi des nœuds)

$$I_1 + I_2 = 27 + 147 = 174 \text{ A}$$

Nous aurons donc en permanence : $I_2 = 174 - I_1$

- Si l'éolienne ne fonctionne pas, $I_1 = 0$ A et $I_2 = 174$ A
- Si l'éolienne fonctionne à puissance maximale, $I_1 = 80$ A (voir calcul dans le doc. 3a)

Nous obtenons donc $I_2 = 174 - 80 = 94$ A

L'intervalle de valeurs possibles pour I_2 est bien [94 ; 174].

3. $P_{J \text{ totale}} = P_{J1} + P_{J2} + P_{J3} + P_{J4} = R_1 \times I_1^2 + R_2 \times I_2^2 + R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2$

4. Les valeurs de R_3, I_3, R_4, I_4 étant données (document 1), nous pouvons calculer $R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2 = 2520$ W
Nous pouvons exprimer, par exemple, $I_2 = 174 - I_1$.

Avec $R_1 = 14 \Omega$ et $R_2 = 5 \Omega$, nous obtenons finalement :

$$P_{J \text{ totale}} = 14 \times I_1^2 + 5 \times (174 - I_1)^2 + 2520$$

Nous aurions pu aussi exprimer $P_{J \text{ totale}}$ en fonction de I_2 en remplaçant I_1 par $174 - I_2$ et obtenir :

$$P_{J \text{ totale}} = 14 \times (174 - I_2)^2 + 5 \times I_2^2 + 2520$$

5.

Version pour spécialistes mathématiques et/ou physique : les fonctions $P_{J \text{ totale}}(I_1)$ et $P_{J \text{ totale}}(I_2)$ sont minimales lorsque les dérivées de ces fonctions sont nulles. Nous aurions pu exprimer ces dérivées, déterminer les valeurs d'intensités qui annulent les valeurs de ces dérivées, et enfin calculer les valeurs des puissances correspondantes (A vous de jouer chers spécialistes).

Version pour tous à l'aide des graphes du document 4 :

- Nous cherchons graphiquement les valeurs de I_1 et de I_2 pour lesquelles la puissance dissipée par effet Joule $P_{J \text{ totale}}$ est minimale :
 - $P_{J \text{ totale mini}} = 115000$ W (environ)
 - $I_1 = 45$ A ... I_1 est bien inférieure à 80 A
 - $I_2 = 129$ A ... I_2 est bien inférieure à 310 A
- Nous avons bien $45 + 129 = 174$, $I_1 = 174 - I_2$
- Nous retrouvons bien la valeur $174 = I_3 + I_4 = 27 + 147$
- Nous recalculons $P_{J \text{ totale}}$ à partir de la formule $P_{J \text{ totale}} = 14 \times I_1^2 + 5 \times (174 - I_2)^2 + 2520$:
 $P_{J \text{ totale}} = 14 \times 45^2 + 5 \times 129^2 + 2520 = 114000$ W

5) Bilan pour cette partie III, ce qu'il faut savoir

- Loi des nœuds (somme des intensités des courant qui arrivent en un nœud du circuit égale à la somme des intensité des courant qui en partent).
- Loi d'additivité des tensions le long d'une branche de circuit.
- Expression de la puissance dissipée par effet Joule lorsqu'un conducteur ohmique de résistance R est traversé par un courant d'intensité I.
- Maitriser le principe de fonctionnement d'un transformateur.
- Connaître le symbole d'un transformateur afin de le placer judicieusement sur un schéma électrique.
- Comprendre la nécessité du transport de l'électricité sous haute tension sur de longues distances.
- Savoir exploiter un graphe $P_J = f(I)$ afin de déterminer les valeurs optimales permettant de minimiser la dissipation par effet Joule.

Relecture des pages 152 et 153 du livre fortement conseillée.

Exercice résolu p 159

IV Choix énergétiques et impacts sur les sociétés

Organisation de débats et de discussions sur des sujets précisés :

- Consommation écoresponsable d'énergie, comment réussir la transition ?
- La pétrochimie a-t-elle un avenir ?
- Les énergies renouvelables peuvent-elles à elles seules subvenir aux besoins énergétiques de l'humanité ?
- Bilan carbone et impact environnemental d'un parc de panneaux solaires ou d'un parc éolien ?
- La ressource Hydrogène.
- Etc.

Lecture très enrichissante, même si l'ouvrage est désormais vieux de 10 ans :

« Vers une énergie durable » de Daniel Clément et Pierre Papon
(éditions le Pommier/ Universcience, 2010)

Le programme officiel :

Pour les sociétés, l'enjeu climatique et environnemental est celui d'une transition entre la situation actuelle et un développement fondé sur un régime durable de conversion et d'utilisation de l'énergie. La complexité de cette transition impose de connaître, comprendre et hiérarchiser les paramètres sur lesquels il est possible d'agir, individuellement et collectivement.

Savoirs

Pour que soit mise en œuvre une adaptation efficace aux changements inéluctables et qu'en soit atténué l'impact négatif, les choix énergétiques supposent une compréhension globale du système Terre. Ces choix doivent tenir compte de nombreux critères et paramètres : disponibilité des ressources et adéquation aux besoins, impacts (climatique, écologique, sanitaire, agricole), vulnérabilités et gestion des risques, faisabilité, conséquences économiques et sociales. L'analyse de ces éléments de décision conduit le plus souvent à une recherche de diversification ou d'évolution des ressources (mix énergétique). Les durées longues, liées à l'inertie de certains systèmes (infrastructures énergétiques, transports, production industrielle), sont à confronter à l'urgence de l'action. La transition écologique des sociétés repose sur la créativité scientifique et technologique, comme sur l'invention de nouveaux comportements individuels et collectifs (consommations, déplacements, relations Nord-Sud).

Savoir-faire

Analyser d'un point de vue global les impacts de choix énergétiques majeurs : exemple du nucléaire. Dans une étude de cas, analyser des choix énergétiques locaux selon les critères et les paramètres mentionnés.

Ce sous-thème est l'occasion de mettre en perspective l'ensemble des thématiques abordées dans les thèmes 1 et 2. La notion de risques naturels étudiée au collège et en classe de seconde (SVT) est mobilisée. À travers la diversité des exemples, les élèves comprennent l'unité du concept d'énergie.