CHAPITRE

7

Les circuits parfaits c'est bien joli mais ça n'existe pas. Tandis que les circuits réels, eux au moins... Attention, nous aurons besoin des circuits parfaits pour calculer les circuits réels. Si si!

Objectifs de ce chapitre :	• *Connaître la loi de Pouillet* • *Résoudre un exercice de niveau 10*

Les circuits réels

7.1. Introduction

Rappelez-vous, le but de ce cours est de comprendre et prédire le comportement des circuits électriques. Comprendre signifie pouvoir expliquer pourquoi cela se passe comme ceci et pas comme cela. Prédire signifie calculer la valeur chiffrée de ce qui va se passer ou de ce qui est nécessaire (section d'un câble, valeur d'une résistance, etc.). Si comprendre suffit au simple curieux, prédire est indispensable à tout technicien.

Ce chapitre est le dernier de ce cours sur les courants DC. On rentre (enfin!) dans le vif du sujet : les circuits réels. Cela ne veut pas dire que tout ce qui précède a été inutile, bien au contraire. Quasiment tout ce qui précède est indispensable pour maîtriser ce chapitre.

7.1.1. Qu'est-ce qu'un circuit réel ?

Les circuits réels sont les circuits électriques réellement présents dans nos appareils, villes, maisons ou appartements. Pour faire simple, on peut dire que ces circuits sont constitués de divers composants électriques reliés par des câbles. Des composants et des câbles qui sont forcément imparfaits, pour toute une série de raisons, essentiellement économiques.

Dans les cas les plus simples (lampe de poche, éclairage d'une pièce, etc.), ces imperfections peuvent être négligées et on peut considérer le circuit comme s'il était parfait. Voilà pourquoi nous avons quand-même pu comprendre et prévoir le comportement de plusieurs circuits électriques jusqu'ici.

Mais dans tous les autres cas (souvent les plus intéressants), ces imperfections ne peuvent pas être négligées. Car l'imperfection des composants et/ou des câbles devient trop importante par rapport à la grandeur qui nous intéresse. En guise d'introduction, voici deux exemples de circuits réels qui ne peuvent pas être considérés comme parfaits.

7.1.2. Deux circuits pas si "parfaits" que ça...

a) Des câbles voleurs de tension

Commençons par prendre le cas d'une ligne électrique, par exemple entre une centrale et un village comme illustré ci-dessous.

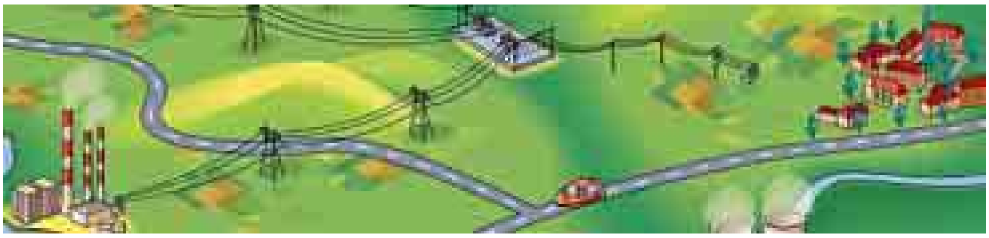


Fig. 92. Ligne de transport d'électricité entre une centrale électrique et un village. © EDF - www.edf.fr

En fait, à peu près n'importe quelle ligne de transmission pourrait également servir d'exemple dans ce cas-ci. Une liaison téléphonique ou un câble entre un ordinateur et une imprimante donnent lieu au même phénomène.

A priori, un tel circuit électrique se conçoit comme un dipôle générateur (la centrale) en parallèle avec un dipôle récepteur (le village).

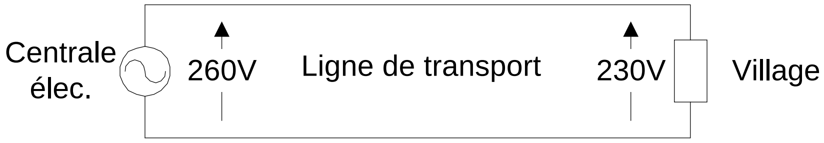


Fig. 93. Schéma (a priori) du circuit électrique de la figure 92.

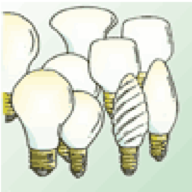
Nous savons, depuis le chapitre 3, que ces deux dipôles devraient avoir la même tension (230V). En réalité, la tension générée par la centrale doit être sensiblement supérieure à 230V pour obtenir une tension à l'entrée du village égale à 230V. Cela n'a rien à voir avec la problématique "haute tension". Cette différence est due à la "chute de tension en ligne" qui existe à cause de l'imperfection des conducteurs. Elle sera détaillée au § 7.3.1. p.156.

b) Une ampoule qui n'obéit pas à la loi d'Ohm

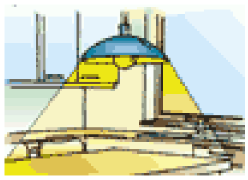
Autre exemple. Prenez n'importe quelle ampoule 60W classique (c'est-à-dire à incandescence) et mesurez sa résistance avec un ohmmètre.

éteinte **allumée**

Fig. 94. Il suffit d'une ampoule à incandescence pour contredire la loi d'Ohm... apparemment!
© Brico - www.brico.be



La loi d'Ohm n'est pas vérifié !?



R = 100Ω Mais U = 230V
I = 0,3A

Vous obtiendrez une résistance d'environ 100Ω. A priori, d'après la loi d'Ohm, cette ampoule, une fois soumise à 230V, devrait donc être traversée par un courant de 2,3A (I = 230V/100Ω = 2,3A). En réalité, le courant sera approximativement 10 fois plus faible. Il tournera autour de 0,3A, ce qui est plutôt une bonne nouvelle pour notre portefeuille mais qui nous fait douter de la loi d'Ohm.

La loi d'Ohm est-elle fausse pour autant? Non bien-sûr. Mais cela montre la limite de ce qui a été vu jusqu'ici. L'explication de ce phénomène sera donnée au § 7.3.2. p.158.

7.1.3. Un circuit parfait pour "modéliser" un circuit réel

Comment peut-on comprendre ou prédire le comportement d'un circuit réel à l'aide d'un circuit parfait? En *modélisant* le circuit réel par un circuit parfait. Cela signifie dessiner (et calculer) un circuit qui se "comporte" comme le circuit réel... sachant que le comportement d'un circuit parfait n'est que le résultat d'un ensemble de règles, les lois des circuits parfaits. Notez que le circuit parfait ne doit pas obligatoirement ressembler au circuit réel, on dit il doit être son modèle.

De manière générale, *un modèle est une idée que l'on se fait* de la réalité. Si cela nous permet de prédire ce qui va se passer dans la réalité c'est que notre modèle est correct ou, pour être plus précis, qu'il "dit quelque chose de la réalité". En fait, un modèle n'est jamais exact à 100%. C'est pourquoi, il est important de connaître les limites d'un modèle: Quand est-il valable? Quand n'est-il pas valable?

Pour mieux comprendre, pensez à l'histoire de la pomme de Newton. En 1684, Sir Isaac Newton, voyant tomber les pommes, en a conclu que les corps et les astres s'attirent en fonction de leur masse. Sa théorie (ou son modèle, sa vision de la réalité) était correcte... mais seulement dans certaines conditions. C'est Einstein qui l'a montré au XX^{ème} siècle.

Fig. 95. Newton a pensé un ***modèle*** de gravitation qu'il croyait universel. Par la suite, Einstein (entre autres) a montré les limites de son modèle.
© Encarta 2000

Ce qui est important c'est que le modèle de Newton disait bien quelque chose de la réalité puisqu'il a quand-même permis d'aller sur la lune. On dit qu'un modèle est bon lorsqu'il est validé expérimentalement.

Modéliser un phénomène scientifique, comme le comportement d'un circuit électrique, consiste le plus souvent à simplifier, à *idéaliser* le phénomène. Ainsi, dans le circuit de figure 93, il faudra *simplifier*, modéliser l'influence des câbles de la ligne. C'est ce qu'on fera au § 7.3.1. p.156.

7.2. Etude détaillée de la résistance

7.2.1. Les fausses suppositions des circuits parfaits

Lorsqu'un circuit réel ne se comporte pas comme prévu, c'est qu'on a fait toutes une série de suppositions dont certaines sont fausses. Parmi ces suppositions il y en a plusieurs qui reviennent souvent.

La première consiste à croire que la résistance de n'importe quel câble électrique est nulle. C'est vrai dans les circuits parfaits mais, en réalité, une résistance nulle... ça n'existe pas (sauf dans le cas tout à fait particulier d'un supraconducteur). Cette supposition est liée à celle qui consiste à croire que la résistance d'un dipôle est une caractéristique intrinsèque de ce dipôle. De nouveau, ce n'est pas tout à fait faux mais c'est oublier que cette caractéristique peut évoluer en fonction du temps ou de la température par exemple.

Il y a beaucoup d'autres suppositions, parmi celles que nous faisions, qui sont fausses. En particulier à propos des générateurs de tensions ou à propos des appareils de mesure. Mais celles-ci seront étudiées en détail dans le cours de 4ème année. Commençons par étudier tout ce qui influence la résistance d'un dipôle. Afin de faire simple et surtout utile, nous nous limiterons à la résistance d'un conducteur filiforme et homogène, autrement dit d'un câble, d'une piste de circuit imprimé, ou d'un morceau de silicium.

7.2.2. Définition de la résistivité ρ d'un matériau

Il y a des matériaux isolants et des matériaux conducteurs pour le courant mais les isolants ne sont jamais tout à fait isolants et les conducteurs ne sont jamais tout à fait conducteurs, on l'a déjà dit plus haut. Pour caractériser chaque matériau, on a défini une grandeur que l'on appelle la *résistivité ρ du matériau.* On utilise la lettre grec "rho" pour bien faire la différence avec la résistance R.

***Définition de la résistivité ρ d'un matériau* : mesure de la difficulté de circulation des charges libres dans le matériau.**

Attention, on ne parle pas de la résistivité d'un dipôle mais bien d'un matériau. La résistance R d'un câble dépend (entre autres) de la résistivité ρ du matériau qui le constitue. L'inverse n'est pas vrai. La résistivité ne dépend que du matériau (et de l'état dans lequel il se trouve, comme on le verra au point suivant).

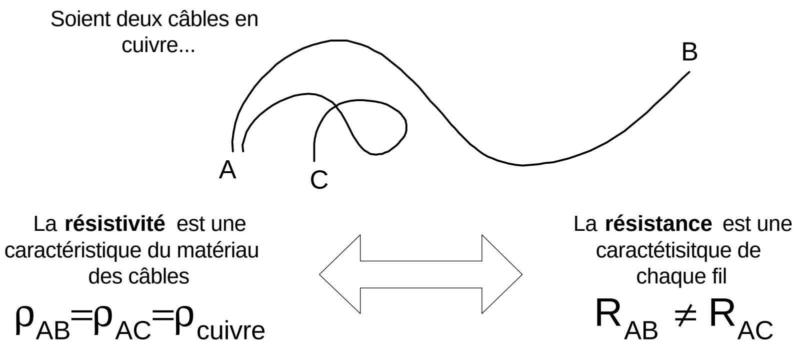


Fig. 96. Attention à ne pas confondre la résistivité ρ et résistance R. La résistivité est propre au matériau en général tandis que la résistance est propre à un câble en particulier.

Pour un matériau conducteur classique, ρ est de l'ordre de $10^{-8}[\Omega m]$ à la température de référence qui est de 0°C. Pour le carbone, ρ_0 tourne autour de $10^{-6}[\Omega m]$. Pour un isolant, ρ_0 est énorme, il peut atteindre $10^{13}[\Omega m]$.

Pour bien comprendre la notion de résistivité d'un matériau, on peut utiliser l'image de la densité (même si en réalité les choses sont bien plus complexes). Un matériau à faible résistivité aurait une densité faible c'est-à-dire beaucoup de place pour laisser circuler ses électrons libres. Tandis qu'un matériau à forte résistivité aurait une densité forte compliquant la circulation des électrons. A la limite, un isolant serait une jungle emprisonnante pour ses électrons qui ne sont alors pas libres.

Le graphique suivant indique la résistivité de quelques matériaux standards. On voit que la résistivité d'un isolant est énorme par rapport à la résistivité d'un conducteur. Les semi-conducteurs (cas particulier mais fondamental pour toute l'électronique) seront étudiés en 5ème année

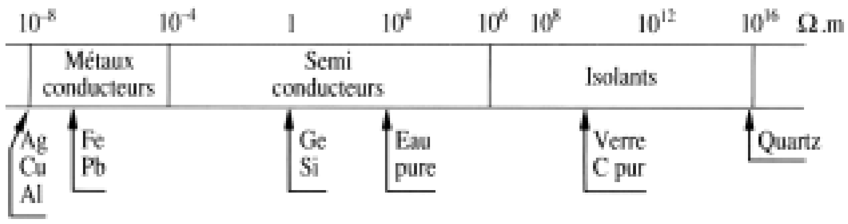


Fig. 97. Les conducteurs sont des matériaux dont la résistivité est faible (mais pas nulle). Les isolants ont une très forte résistivité (mais pas infinie). © Déplanche Y., *Mémo formulaire* 1991, Ed. Casteilla

7.2.3. De quoi dépend la résistivité? - la loi de Matthiessen

La résistivité d'un matériau dépend de sa constitution chimique, de son état et des influences qu'il subit (champ magnétique, pression, etc.). Toute une série de facteurs peuvent donc influencer la résistivité. Parmi ceux-ci, le facteur le plus évident est la température du matériau.

La température est une indication de l'agitation interne de la matière. Comparez un glaçon avec de l'eau bouillante. On peut donc imaginer que la résistivité du matériau augmentera avec la température. En effet, si les atomes sont très agités, leurs électrons auront plus de mal à voyager que s'ils sont relativement fixes les uns par rapport aux autres. Imaginez traverser une piste de danse endiablée puis la même piste lorsque tout le monde attend la prochaine chanson. Cette image convient bien dans le cas des conducteurs classiques c'est-à-dire les métaux, leur résistivité augmente effectivement avec la température. Mais cette image ne s'applique par exemple pas aux semi-conducteurs.

En fait, l'étude de la résistivité d'un matériau est extrêmement complexe et dépasse de loin le niveau de ce cours (et de son auteur). Nous nous contenterons donc d'une loi empirique appelée la loi de Matthiessen.

La loi de Matthiessen : **La résistivité d'un matériau varie avec sa température suivant la loi empirique de Matthiessen.**

EQ 17

$$\rho_T = \rho_0(1+\alpha.T)$$

ρ_T : Résistivité à la température T [Ωm]
ρ_0 : Résistivité à 0°C [Ωm]
α : Coef. de température du matériau [1/°C]
T : Température du matériau [°C]

Une loi est “empirique” si elle ne répond qu’à l’expérience et pas à une théorie ou un modèle particulier. Cela signifie qu’on a constaté que la formule de Matthiessen donnait de bons résultats dans la majorité des cas. Mais elle n’explique rien du tout. Elle permet de calculer la résistivité à une température T à partir de deux caractéristiques du matériau

- la résistivité du matériau à 0°C : ρ_0
- le coefficient de température du matériau : α

Ces deux chiffres, ρ_0 et α, doivent donc être déterminés pour chaque matériau. Ils sont repris dans le tableau ci-dessous. D’un livre à l’autre, ces valeurs varient assez bien. Les valeurs de ce tableau doivent donc être considérées comme des moyennes.

Fig. 98. Les matériaux dont la résistivité et le coefficient de température sont donnés dans ce tableau ont chacun leurs avantages.
N.B. Ces valeurs sont une moyenne entre plusieurs source.

Matériau	Résistivité ρ [Ω m] à 0°C	Résistivité ρ [Ω m] à 20°C	Coef. de temp. α [1/°C]	Remarque
Argent	$1{,}5.10^{-8}$	$1{,}6.10^{-8}$	$4{,}5.10^{-3}$	ρ inférieur au cuivre mais plus cher
Cuivre	**$1{,}6.10^{-8}$**	**$1{,}7.10^{-8}$**	**4.10^{-3}**	**Meilleur rapport résistivité/prix**
Aluminium	$2{,}6.10^{-8}$	$2{,}8.10^{-8}$	4.10^{-3}	Plus léger mais ρ plus grand
Tungstène	$4{,}8.10^{-8}$	$5{,}3.10^{-8}$	5.10^{-3}	Point de fusion est très élevé (3650°C)
Fer	$8{,}5.10^{-8}$	10.10^{-8}	6.10^{-3}	Lourd et piètre conducteur mais plus solide
Platine		10.10^{-8}	$3{,}6.10^{-3}$	ρ varie moins avec la temp. que le cuivre
Constantan		49.10^{-8}	$0{,}002.10^{-3}$	Alliage (Cu 60% - Ni 40%) - ρ insensible à la temp.
Carbone		1400.10^{-8}	$-0{,}5.10^{-3}$	Résistivité diminuant avec la temp (α<0)
Silicium	2400		-87.10^{-3}	Semi-conducteur

a) Quelques lignes sur les semiconducteurs

Les semiconducteurs, dont le plus important est le silicium, conduisent l'électricité. Comme leur nom l'indique, leur comportement est intermédiaire entre celui des métaux et celui des isolants. Ils possèdent des électrons libres qui peuvent assurer le passage du courant (comme les métaux), mais ceux-ci sont bien moins nombreux, d'où une résistivité plus élevée et, surtout, extrêmement sensible à toutes sortes de facteurs externes.

Leur résistivité est donc facilement contrôlable, ce qui permet de les utiliser comme organes de commande dans presque tous les circuits électriques. Ils sont à la base de toute l’électronique d’aujourd’hui puisqu’ils constituent les transistors et les diodes.

b) Quelques lignes sur les supraconducteurs

Bien que les applications se fassent attendre, il ne faut pas oublier cette forme très particulière de conduction par électrons qu'est la supraconductivité, Ce phénomène, connu depuis le début du siècle, se manifeste seulement aux très basses températures, pour autant que certaines conditions particulières soient respectées.

La matière ne peut...

- dépasser une certaine température critique T_c
- être traversée par un courant supérieur au courant critique
- être soumise à un champ magnétique supérieur au champ critique.

Dans ce cas, la résistivité du métal disparaît complètement, il n'y a plus d'effet Joule et un courant lancé dans une boucle peut y circuler indéfiniment.

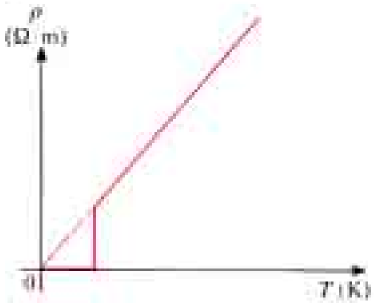


Fig. 99. La résistivité d'un matériau supraconducteur tombe à zéro en dessous d'une certaine température et sous certaines conditions.
©

Une expérience réalisée jadis au Massachusetts Institute of Technology illustre bien cette propriété des supraconducteurs : à partir d'une impulsion électrique de départ, on a réussi à faire circuler un courant électrique durant plus de 50 ans dans un circuit supraconducteur fermé, refroidi à l'azote liquide.

Les applications potentielles de la supraconductivité sont immenses, car bien des appareils électriques ont comme principale limitation l'échauffement causé par l'effet Joule engendré par la circulation de courants intenses. C'est le cas, en particulier, des alternateurs qui produisent l'électricité dans les centrales électriques.

Les supraconducteurs - Coup de froid sur les électrons

La supraconductivité a été découverte en 1911 au Pays-Bas par Heike ONNES. [...] Actuellement, en utilisant des alliages de synthèse (céramiques à base de niobium), on parvient à rendre des matériaux supraconducteurs à des températures supérieures à -140 °C. [...]
Étant donné les températures tout de même encore relativement basses auxquelles il faut recourir ainsi que les problèmes de fragilité, de malléabilité liés aux supraconducteurs, ceux-ci restent encore dans le domaine de la recherche. Mais de nombreuses applications industrielles sont actuellement à l'étude, par exemple dans les télécoms.
Il y a saturation des fréquences utilisées pour les réseaux GSM (ordre de grandeur: 900 MHz). On étudie dès lors la possibilité d'émettre à d'autres fréquences (ordre de grandeur : 1800 MHz). Cela est loin d'être évident : la puissance des émetteurs installés dans chaque station de base doit être augmentée ce qui entraîne malheureusement, si on utilise des conducteurs normaux, une augmentation du bruit de fond dans les communications téléphoniques. D'où l'intérêt d'utiliser des matériaux supraconducteurs qui eux, bien entendu, ne présentent pas cet inconvénient. [...]
© Verbist, Bribosia, Materne, Nachtergaele, Vanderperren, *Physique 5ème option de base,* De Boeck 1998

7.2.4. La loi de Pouillet

On s'en doute, la résistance d'un câble ne dépend pas que du matériau qui le constitue. Elle dépend aussi des dimensions du câble, c'est-à-dire de sa longueur et de sa section. Assez logiquement, plus un câble est long et fin, plus il sera résistant.

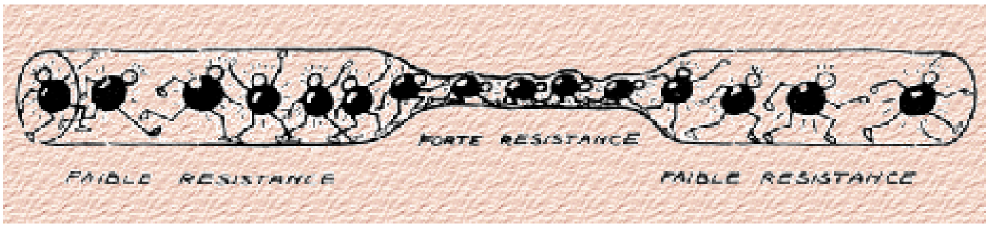


Fig. 100. Plus un câble électrique est fin, plus il est résistant. © www.ac-nice.fr\techno\elec

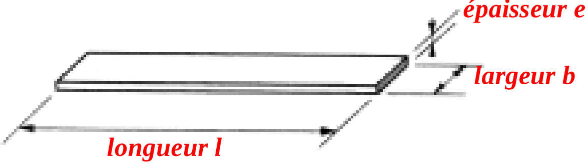
Mathématiquement on résume cela par la formule ci-dessous que l'on appelle la loi de Pouillet en hommage à Claude Pouillet (1790-1868), physicien français qui a beaucoup travaillé sur ces notions.

***La loi de Pouillet :* La résistance d'un conducteur filiforme et homogène augmente avec sa résistivité et sa longueur et diminue avec la section du conducteur.**

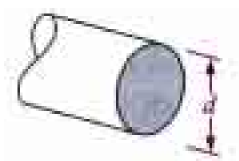
$$R_T = \rho_T \cdot \frac{l}{S}$$ EQ 18

R : Résistance du conducteur [Ω]
ρ : Résistivité du matériau [Ωm]
l : longueur du conducteur [m]
S : Section du conducteur [m^2]

Notez que la section S d'un câble peut avoir n'importe quelle forme même si en pratique elle est généralement rectangulaire dans le cas d'une piste de CI et circulaire dans le cas des câbles. Elle se calcule comme une surface.



$$S = e.b$$



$$S = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4}$$

Fig. 101. La section d'une piste de CI ou d'un câble se calcule à l'aide des formules classiques de surface.

Remarques :

- La loi de Pouillet à 0°C s'écrit

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$$ EQ 19

- A l'aide de la loi de Pouillet, on peut réécrire la loi de Matthiessen sous la forme suivante, plus usuelle.

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \quad \text{EQ 20}$$

- La loi de Pouillet peut être comparée à une association de résistances. Augmenter la longueur revient à ajouter des résistances en série et augmenter la section revient à ajouter des résistances en parallèle.

7.3. Les conséquences pratiques

7.3.1. La chute de tension en ligne (en DC)

La première conséquence à tirer de ce qui précède est que la résistance d'un câble n'est jamais nulle. Si ce câble est long ou très fin, cette résistance peut même devenir importante. Il faut donc en tenir compte. Repartons de l'exemple de la ligne entre la centrale et le village, p. 148, en supposant pour simplifier que le circuit fonctionne en DC

Le plus simple est de calculer la résistance totale de chaque câble, R_C, et de l'introduire dans le circuit parfait comme une résistance que nous aurions ajoutée. Ce circuit parfait devient alors le modèle qui permet de prédire le fonctionnement du circuit réel.

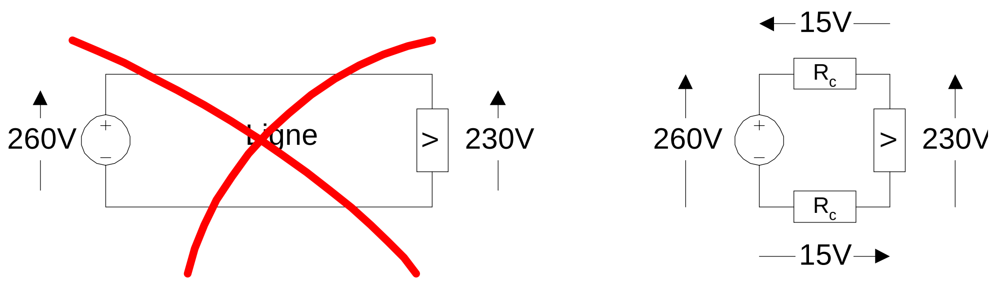


Fig. 102. Le circuit parfait qui permet de prédire la chute de tension en ligne ne ressemble pas tout à fait au circuit réel.

En effet, en utilisant les règles des circuits parfaits nous pouvons alors prédire qu'il y aura une "perte" de tension. Cette différence de tension entre le générateur et le récepteur s'appelle la *chute de tension en ligne*. Elle représente une perte (±10%) à minimiser. Comment? En augmentant la section des câbles par exemple.

a) La section optimale d'un câble.

Augmenter la section d'un câble est le meilleur moyen pour diminuer sa résistance et donc diminuer la chute de tension en ligne mais c'est aussi le meilleur moyen pour multiplier son prix. Le cuivre ayant un coût au kg. Alors, comme souvent, l'optimum résulte d'un équilibre entre coût de construction et coût des pertes. En gros, le coût de construction provient de l'achat du cuivre. II est donc proportionnel à la section. Le coût des pertes est proportionnel à la résistance, donc inversement proportionnel à la section. On obtient donc un optimum autour d'une section moyenne.

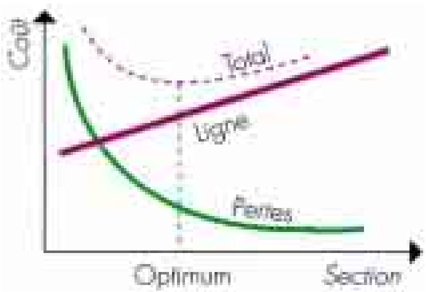


Fig. 103. La section optimale pour une ligne électrique dépend du compromis entre le coût du cuivre et le coût des pertes
© D. Fargue - Electricité, voyage au coeur du syst., Ed Eyrolles 2000

b) L'astuce des lignes HT (Haute Tension)

Une fois que la résistance des câbles (R_c) est fixée, on voit que la chute de tension en ligne ne dépend plus que du courant qui y circule : $U_c = R_c.I$.

Lorsque l'électricité est un vecteur d'énergie comme entre une centrale et une habitation, le but est de fournir une certaine puissance au consommateur. A tout moment, cette puissance est égale au produit de la tension de la ligne par le courant qui y circule (P=U.I).

Si on augmente la tension de la ligne sans modifier cette puissance, cela signifie que le courant diminue... et avec lui la chute de tension en ligne. Il suffirait donc de trouver un système qui augmente la tension d'une ligne pour minimiser ses pertes. C'est le principe des lignes HT (Haute Tension) Ce principe n'est possible qu'en AC car un transformateur ne fonctionne pas en DC (voir cours de 4ème).

Fig. 104. La tension est produite au niveau de la centrale en moyenne tension où elle est directement transformée en HT puis progressivement abaissée jusqu'à 230V.
© CPTE/Electrabel - Les liaisons HT, 1997

7.3.2. La lampe à incandescence

Une des grandes conquêtes de l'électricité est l'éclairage par lampes à incandescence. La lumière est émise grâce à l'élévation de température d'un filament de tungstène (à plus de 2500 °C), chauffé par effet Joule (le point de fusion du tungstène est à 3410°C).

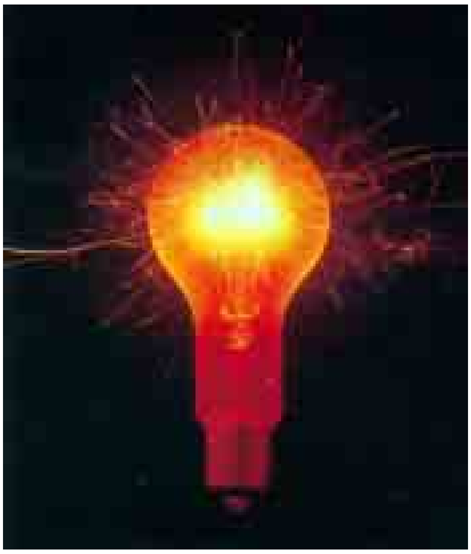


Fig. 105. Image trompeuse s'il en est car elle laisse croire que les électrons se transforment en lumière dans une ampoule. Les lignes lumineuses autour de l'ampoule ne sont que la matérialisation du trajet des ***poussières*** mis en mouvement par la chaleur dégagée par le filament à cause du mouvement de ses électrons.
© Histoire de l'électricité, Christine Blondel, Ed. Pocket, Coll. Explora, 1994

Mais pourquoi les lampes claquent à l'allumage? Parce qu'une lampe a une résistance à froid plus de 10 fois plus faible que lors de son fonctionnement. Cette propriété explique pourquoi les lampes à incandescence ne peuvent claquer, pratiquement, que lors de l'allumage: la résistance du filament étant plus faible à froid, l'appel de courant est beaucoup plus important au moment de la mise sous tension, et la puissance dissipée passe par un maximum, suffisant pour volatiliser un filament déjà usé par une longue utilisation.

Un peu d'histoire - L'invention de la lampe à incandescence

La lampe à arc, inventée par Davy en 1801, fut pendant environ 70 ans pratiquement le seul moyen d'éclairage électrique. Entre-temps, plusieurs essais avaient été faits afin de réaliser une lampe à filament incandescent, mais sans résultat. En 1878, le génial inventeur américain Edison se mit au travail dans son laboratoire de Menlo-Park avec la ferme volonté de résoudre le problème. Le problème était ardu et, de l'avis de la plupart des physiciens, insoluble. On savait en effet, depuis Davy, qu'un filament de platine, traversé par un courant électrique, devient incandescent et rayonne de la lumière; toutefois, il fallait pour cela chauffer le filament jusqu'au point de fusion du métal, de sorte que, dès que le rendement éclairant devenait suffisant, le métal entrait en fusion. Edison, aidé par ses assistants, se mit alors à la recherche d'une substance ayant un point de fusion assez élevé pour émettre de la lumière par incandescence, sans entrer en fusion.
Les recherches, poursuivies avec un courage et une ténacité admirables, durèrent plus d'un an. Des milliers d'essais furent tentés, soldés par autant d'échecs! Chaque substance essayée s'avéra trop fragile et se brisait au moment où le but paraissait atteint. Edison ne se découragea pas pour autant et son indomptable énergie reçut enfin sa récompense le 21 octobre 1879. Ce jour-là, Edison, qui avait eu l'idée d'employer un fil de coton carbonisé, enfermé dans une ampoule de verre vidée d'air (pour éviter la combustion du fil au contact de l'oxygène), essaya pour la tantième fois de brancher "sa lampe" sur le courant électrique et, cette fois, le miracle se produisit... le filament se mit à rougir, bientôt une belle lumière se répandit dans la pièce... et la lampe ne s'éteignît point.
Edison commente lui-même l'événement en ces mots : «Nous regardions, tandis que la lampe continuait de luire, et plus elle luisait, plus nous étions excités. Personne ne voulait se rendre au lit; pendant 40 heures, aucun de nous n'avait goûté une minute de sommeil. Nous regardions avec anxiété, mais ce fut bientôt de l'enthousiasme. La lampe tint bon durant 45 heures.» La lampe à incandescence était inventée et le «sorcier de Meno-Park» se mit aussitôt à la perfectionner. D'autres, d'ailleurs, ainsi qu'il arrive souvent, lui emboîtèrent le pas. Le filament de carbone fut remplacé après quelque temps par un filament de tungstène, métal très résistant dont le point de fusion est fort élevé (3650°C). Pour augmenter le rendement de la lampe, on remplit plus tard l'ampoule d'un gaz inerte (azote, argon, krypton...) qui freine la sublimation du métal provoquée par l'échauffement. Un autre perfectionnement consistait à utiliser un filament spiralé dans le but d'éviter une trop grande perte de chaleur et augmenter ainsi le rendement de la lampe.
© Delaruelle, Claes, Eléments de physique 3, Ed. Wesmael 1993

Les lampes économiques ne donnent pas toujours une lumière agréable de plus la durée de vie d'une ampoule dépend aussi du nombre d'allumages. Cela dit, le tableau de la figure suivante est parlant.

	11 W	60 W	15 W	75 W	20 W	100 W
durée de vie (1)	12.000 h	12.000 h	12.000 h	12.000 h	12.000 h	12.000 h
coût en lampes (2)	420 F	540 F	420 F	540 F	420 F	540 F
consommation en kWh	132	720	180	900	240	1.200
coût de consommation (3)	806 F	4.399 F	1.100F	5.499 F	1.466 F	7.332 F
coût total/12.000 heures	1.226 F	4.939 F	1.520 F	6.039 F	1.886 F	7.872 F
ECONOMIE NETTE par point lumineux	3.713 F		4.519 F		5.986 F	

Fig. 106. Comparaison des coûts d'éclairage sur 12.000h d'utilisation.
© Electrabel - Utiliser rationnellement l'énergie à la maison,

7.4. Le bilan énergétique d'un circuit

Dans un circuit électrique, on a distingué jusqu'ici les dipôles actifs et passifs. D'un point de vue énergétique, un dipôle actif est un dipôle qui transforme une énergie non électrique en une énergie électrique et un dipôle passif fait l'inverse.

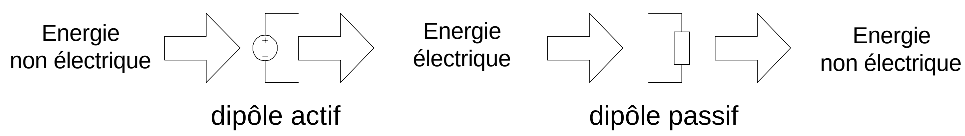


Fig. 107. Transformations d'énergie dans un circuit.

Ainsi, un moteur électrique transforme une énergie électrique en une énergie mécanique. Une pile transforme l'énergie chimique en énergie électrique.

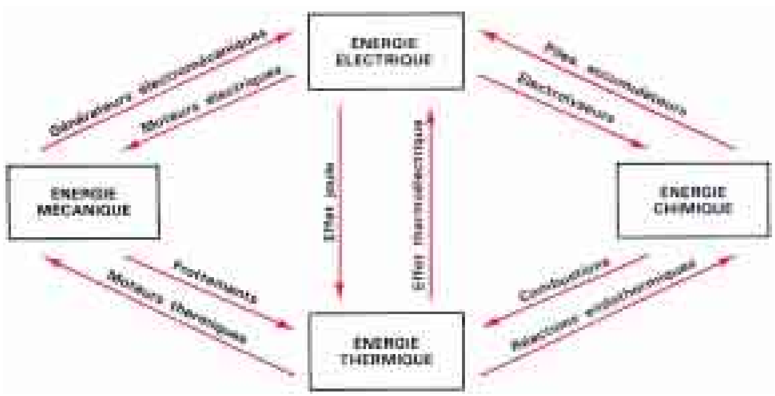


Fig. 108. Transformations d'énergie diverses.
© Niard, Antoine, Merat, *Courant Continu*, Ed Nathan 1981/

7.4.1. Le principe de dégradation.

Toutes les transformations d'énergie respectent deux principes fondamentaux. Au chapitre sur les puissances, nous avons vu le principe de conservation de l'énergie (§ 4.3.1. p.93) qui dit que rien ne se perd, rien ne se crée. Le deuxième dit qu'il y a toujours des pertes.

Principe de dégradation de l'énergie : **Au cours d'une transformation d'énergie, il y a toujours apparition d'énergie thermique même si cette forme d'énergie n'est pas souhaitée.**

Cela signifie que lors d'une transformation, l'énergie obtenue sous la forme désirée est toujours inférieure à l'énergie initiale. Cela ne contredit pas le principe de conservation car ce dernier se borne à constater une égalité entre énergies sans se préoccuper de la forme obtenue. Le principe de dégradation le complète en précisant qu'il est impossible d'obtenir une transformation totale dans la forme désirée.

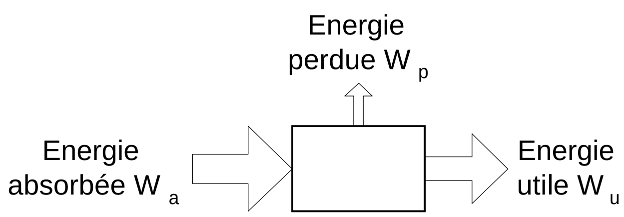
Le chauffage électrique est, en quelque sorte, l'exception qui confirme la règle. En effet, toute l'énergie mise en jeu est alors transformée en chaleur; il n'y a donc pas de forme d'énergie indésirable, ni de pertes ou plutôt les pertes constituent ici l'énergie utile.

7.4.2. Le rendement

a) Le rendement d'une transformation d'énergie

Dans toute transformation d'énergie, on peut écrire un bilan sous la forme suivante : Energie absorbée = Energie utile + Energie perdue.

Fig. 109. Quelle que soit la transformation d'énergie, le bilan est toujours le même : rien ne se perd, rien ne se crée.



$$W_a = W_u + W_p$$

Pour caractériser la qualité d'une transformation, on définit le rendement de la manière suivante. On utilise la lettre grecque “nu”.

Définition du rendement : **Le rendement d'une transformation d'énergie est le rapport de l'énergie utile sur l'énergie absorbée.**

EQ 21

$$\eta \triangleq \frac{W_u}{W_a}$$

η : Rendement de la transformation
W_u : Energie utile [J]
W_a : Energie absorbée [J]

Remarques :

- Le rendement est un rapport de deux grandeurs identiques. Il n'a donc aucune unité. Le rendement est un chiffre.
- L'énergie utile étant obligatoirement inférieure ou égale à l'énergie absorbée, on voit que η ne peut dépasser 1 : $0 \leq \eta \leq 1$
- Puisque le rendement est une fraction inférieure ou égale à 1, on peut l'exprimer en %. Par exemple $\eta = 0{,}89 = 89\%$
- Si l'on divise le numérateur et le dénominateur par le temps, on voit que le rendement est aussi égal au rapport des puissances.

$$\eta \triangleq \frac{P_u}{P_a}$$

EQ 22

b) Le rendement d'un dipôle électrique

dipôle actif		dipôle passif
$\eta \triangleq \frac{P_{élec}}{P_a}$	$P_{élec} = U.I$	$\eta \triangleq \frac{P_u}{P_{élec}}$

7.5. Le coût de l'électricité

7.5.1. Définition du kilowattheure [kWh]

Avant d'expliquer comment calculer le prix de l'électricité, il est nécessaire d'introduire une nouvelle unité d'énergie qui remplace le joule dans toutes les factures. Cette unité est donc une unité usuelle, beaucoup plus pratique que le joule. Exactement comme l'ampèreheure qui avait judicieusement remplacé le coulomb (voir § 2.2.6. p.47) pour les batteries. Cette unité s'appelle le kilowattheure et se note kWh. On montre facilement que 1[kWh]=3,6.[MJ].

Cette énergie W, dépend d'une part de la puissance des appareils et d'autre part du temps pendant lesquels on les utilise : W = P.t

Avec la même quantité d'énergie, on peut faire fonctionner un appareil plus ou moins longtemps selon ce qu'il consomme à chaque seconde, c'est-à-dire selon sa puissance.

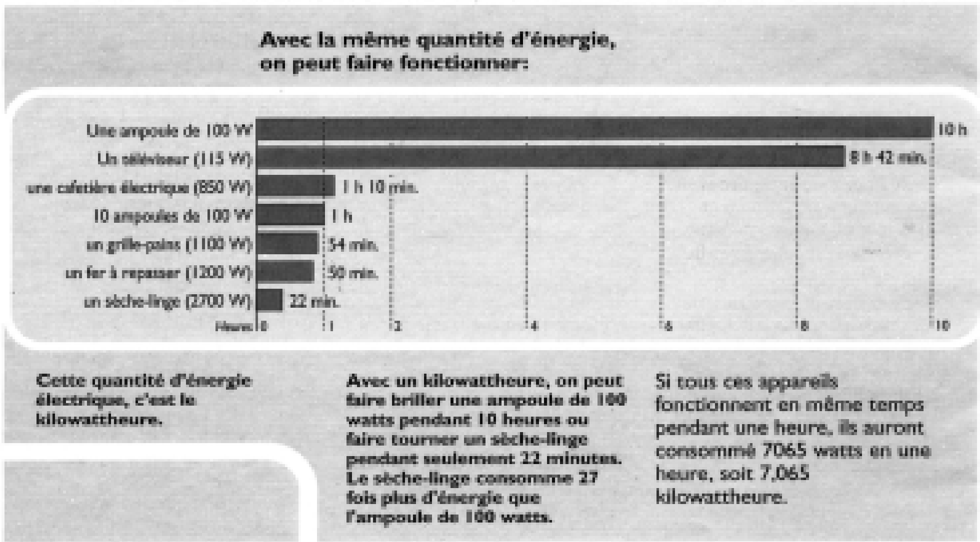


Fig. 110. Voilà ce que l'on peut faire fonctionner avec une énergie totale de 1kWh. © Hebdomadaire Tremplin n°20 du 19/01/

7.5.2. Comment calcule-t-on le prix total ?

On le sait depuis le chapitre 3, il faut de l'énergie pour produire de la tension. C'est donc cette énergie primaire et toute l'infrastructure nécessaire pour la transformer en énergie électrique que nous payons en utilisant la tension qui existe aux bornes de nos prises. Bref, ce qui coûte c'est l'énergie que l'on consomme.

On calcule le prix total de l'énergie consommée comme on le fait une pompe à essence. On détermine le prix de l'unité et on le multiplie ensuite par le nombre d'unités consommé. Dans une pompe à essence, on détermine le prix du litre d'essence et on le multiplie par le nombre de litres consomée. De même, en électricité, on détermine le prix du kilowattheure et on le multiplie par le nombre de kilowattheure consommé.

***Calcul du prix total PT :* Le prix total, PT, est égal à la quantité d'énergie consommée, W, fois le prix unitaire de l'énergie, PU.**

$$PT = W.PU$$

EQ 23

PT : Prix total [Fb]
W : Energie totale [kWh]
PU : Prix unitaire de l'énergie [Fb/kWh]

En Belgique, en 2001, l'électricité domestique coûte approximativement

$$PU = 6\left[\frac{Fb}{kWh}\right]$$

7.5.3. Le compteur d'énergie

Puisque c'est l'énergie que l'on paie à la fin du mois, c'est évidemment l'énergie totale consommée par notre habitation que Electrabel mesure à l'aide de son compteur d'énergie. Il est facilement identifiable par sa petite roulette horizontale qui tourne d'autant plus vite que la consommation d'énergie est importante.

Fig. 111. Le compteur d'énergie comptabilise les kWh entrant dans notre habitation. Chaque année, un employé d'Electrabel vient contrôler l'indice pour établir la facture finale.

Quel est le prix comparé des différentes énergies?

A l'heure où les pétroliers et les spéculateurs tentent de confisquer à leur seul profit les bénéfices de la croissance et avant de remplir nos cuves de mazout, il serait peut-être utile de comparer le prix des différentes énergies. Opération difficile s'il en est car si l'unité légale d'énergie est le joule et son multiple le mégajoule (MJ), on trouve sur nos factures ici des kWh, là des mètres cubes ou encore des litres.
Pour le gaz naturel au mois d'août; le prix de l'énergie par mégajoule est clairement annoncé à 0,32098 BEF/MJ ttc au tarif B (et 0,27 BEF au tarif C: chauffage collectif). Pour l'électricité, au tarif bihoraire de nuit, le kWh est à 2,84 BEF ttc sachant qu'1 kWh vaut 3,6 MJ on trouve rapidement 0,79 BEF par MJ. En tarif exclusif de nuit on arrive à 0,62 BEF par MJ. Et pour le mazout? Et bien c'est le flou le plus total. Essayez un peu pour voir: soit on ne saura pas vous répondre soit on vous annoncera des chiffres très optimistes et pratiquement invérifiables.
Il faut savoir que le pouvoir énergétique du mazout est calculé en kilo de combustible et pas en litre d'une part et que, d'autre part, tant ce pouvoir énergétique que la masse volumique du combustible varie suivant les provenances du brut. Avec un pouvoir optimiste de 43,5 MJ par kilo et une masse volumique très optimiste de 0,855 nous arrivons à 37,19 MJ par litre. A 20 francs ça nous donne 0,54 BEF par MJ. Mais en réalité le mazout est un sous produit du gazole routier, bourré de soufre et d'impuretés. Si nous calculons avec une approche plus réaliste de 0,82 comme masse volumique on tombe à 35,67 MJ par litre ce qui donne 0,56 BEF/MJ. En tablant sur un rendement moyen de chaudière de 90%. (Certains prétendent arriver à 100% du Pci avec des chaudières ultramodernes mais rares sont les cas où ça se vérifie) nous avons enfin un coût réel de l'énergie au mazout variant entre 0,60 et 0,62 BEF par mégajoule. Comparez! Alors le mazout, le chauffage bon marché?.(...)
© Dominique Denonne (par e-mail) Courrier des lecteurs du Soir le 25/9/2000

7.6. Exercices

Les réponses de ces exercices se trouvent à la page page 183.

• Connaissances minimales requises

Ce qu'il faut apprendre par coeur :

- la résistivité à 0°C, ρ_0, du cuivre
- la loi de Pouillet
- la loi de Matthiessen
- la définition du rendement η

Ce qu'il faut avoir compris :

- La différence entre la résistivité et la résistance
- Ce qu'est la chute de tension en ligne
- Comment on passe d'un joule à 1 kWh et inversement
- Comment calculer le prix d'une consommation électrique
- La notion de modèle

Ce qu'il faut savoir faire :

- Résoudre un exercice de niv. 10

• La loi de Pouillet

Lorsque la nature du conducteur n'est pas indiquée, considérer qu'il s'agit du cuivre.

Ex 7.1 : Calculer la résistance à 0°C d'un conducteur ayant une longueur de 2km et une section de 22mm². (niv. 5)

Ex 7.2 : Calculer la résistance à 0°C d'un fil de 0,517mm² de section en nichrome (ρ_0= $108.10^{-8}\Omega$m) ayant une longueur de 25m. (niv. 5)

Ex 7.3 : Jusqu'à quelle distance peut-on tirer un câble électrique de 3,2mm² pour que sa résistance ne dépasse pas 10mΩ? (niv. 5)

Ex 7.4 : Calculer la largeur d'une piste de CI de 100µm d'épaisseur et de 10cm de longueur pour que sa résistance soit égale à 1mΩ. (niv 8-)

Ex 7.5 : Sous une tension de 6V, on peut faire passer un courant de 2A dans un fil de matière inconnue qui a 40cm de long et une section de 2mm². Quelle matière est-ce? (voir tableaux des résistivités). (niv. 5)

Ex 7.6 : Calculer, à 0°C, la résistance d'un fil de cuivre de 2mm de diamètre et de 5km de longueur. On veut le remplacer par un fil d'aluminium de même longueur et de même résistance. Calculer le diamètre de ce nouveau fil. Comparer les masses de chaque fil. Les masses volumiques de l'aluminium et du cuivre valent respectivement 2700 kg/m^3 et 8900 kg/m^3. (niv. 8+)

Ex 7.7 : La résistance d'un câble électrique (S=35mm²) qui alimente votre maison depuis la centrale de Tihange, distante de 80km, est-elle plus grande que celle de votre grille-pain qui consomme 1,5A? (niv. 7)

Ex 7.8 : Une entreprise consommant une puissance de 5,5MW est alimentée par une ligne électrique de résistance R_c=2Ω (par fil). Si l'on désigne par U_e la tension aux bornes de l'entreprise, calculer la puissance dissipée par effet joule pour U_e=5,5kV et U_e=220kV. Que vaut-il mieux faire . (niv. 7)

Ex 7.9 : Nicolas, habitant au RDC d'un immeuble de 36 étages voudrait améliorer l'antenne de sa radio. Pour cela, il tire (discrètement) un câble dans la cage d'escalier jusqu'au toit de l'immeuble. Calculer la section du câble qu'il devra utiliser s'il désire limiter sa résistance à 1Ω. Le câble utilisé est en cuivre et chaque étage a 4m de hauteur. (niv 8-)

Ex 7.10 : Pour alimenter l'INRACI depuis la centrale (80km), on utilise un câble qui a une résistance de 10µΩ par mètre courant (10µΩ/m). Quelle tension doit générer la centrale pour obtenir 220V dans l'école en supposant qu'elle consomme 10A (ce qui est totalement en dessous de la réalité). (niv. 9-)

Ex 7.11 : En utilisant un fil de cuivre de 1mm² de section, à quelle distance d'une pile 6V faudrait-il placer une ampoule pour qu'elle ne s'allume plus? On suppose qu'à partir de 1V, l'ampoule ne s'allume plus. Le courant vaut alors 200mA. (niv. 9)

Ex 7.12 : Prouver que la section de la piste B doit avoir 1mm d'épaisseur et 5mm de largeur pour ne pas chauffer plus que la A, en sachant que... (niv. 9+ / Réponse : S_B=5mm² / niv. 8+)

- dans la piste A, passe un courant de 200µA
- la résistance de la piste A vaut 200mΩ
- dans la piste B, passe un courant de 4mA
- la longueur de la piste B vaut 10cm
- la résistivité du matériau utilisé vaut $2{,}5.10^{-8}$Ωm.

Ex 7.13 : Une centrale électrique produit une puissance de 40MW. La tension à la sortie de la centrale est de 4kV. On veut transporter cette énergie à une distance de 100km à l'aide de deux fils de cuivre. Quelle section minimum doivent avoir chacun des fils pour que la perte par effet Joule ne dépasse pas 10% de la puissance totale ? (niv. 9) ATTENTION : Valeurs pas réalistes!

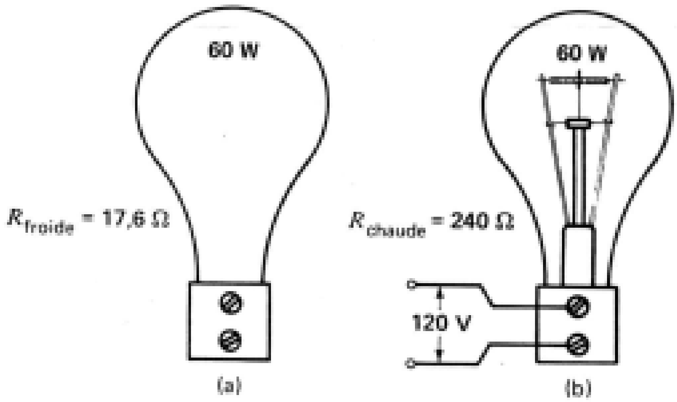
Ex 7.14 : Soit deux pistes de circuit imprimé. Prouver que la piste B soit avoir une largeur de 5mm sur une épaisseur de 1mm pour qu'elle ne chauffe pas plus que la piste A en connaissant les données suivantes : I_A=200mA, R_A=200mΩ, I_B=4mA, $long_B$=10cm, résistivité pistes $\rho = 2{,}5.10^{-8}$Ωm. (niv. 8+)

• La loi de Matthiessen

Ex 7.15 : Calculer la longueur du filament en tungstène d'une lampe de 100W, 220V sachant que la section du fil est $1{,}5.10^{-3}$mm² et que la résistivité, à la température de fonctionnement est $\rho=70.10^{-8}$Ωm. (niv. 8)

Ex 7.16 : Calculer la variation de résistance d'un mètre d'une ligne H.T. entre l'hiver et l'été, au Canada. On suppose que, là-bas, l'hiver, la température peut atteindre jusque -30°C et l'été +35°C. La résistance du câble vaut 100mΩ à 0°C. (niv. 8-)

Ex 7.17 : Une lampe à incandescence de 60W possède une résistance de 17,6Ω à 20°C. Si elle tire un courant de 0,5A sous une tension de 120V, quelle est la température du filament? (soit α = 0,0055 par °C pour le filament) (niv. 8).



Ex 7.18 : L'enroulement d'une machine a une résistance de 424mΩ à 15°C. Après 2h de fonctionnement, la résistance est de 520mΩ. Quelle est alors la température de l'enroulement si α=4.10^{-3}[°C^{-1}] ? (niv. 8)

• Rendement

Ex 7.19 : La chaleur massique de l'eau est de 4186 [J/kg.°C]. Cela signifie qu'il faut environ 4186 joules à 1 litre d'eau pour augmenter de 1 degré celsius. Sachant cela, calculer le rendement d'une bouilloire électrique portant les indications suivantes : 220V 1000W et qui nécessite 10 minutes pour porter à ébullition un litre d'eau prise à 20°C. (niv. 8)

Ex 7.20 : Désirant vérifier expérimentalement la réponse de l'exercice précédent, j'ai fait bouillir un litre d'eau pris à 20°C. Avec la bouilloire dont voici une copie de la plaque signalétique, cela a pris très exactement 5 min 20 sec. Quel est son rendement ? (niv. 8)

Ex 7.21 : On désire construire une bouilloire électrique qui donne un litre d'eau bouillante en 1 minute et 40 secondes. Pour bouillir, un litre d'eau a besoin de 55kJ. En supposant que le rendement du transfert de chaleur n'est que de 75%, calculer la résistance du serpentin nécessaire (niv. 9)

Ex 7.22 : On désire monter une charge (2kJ) avec un moteur DC 12V de voiture (η=80%). Quel sera alors le courant consommé pour y arrivé en 3 minutes?

• Coût de l'électricité

En 2001, en Belgique, 1 kWh coûte environ 6Fb.

Ex 7.23 : Un radiateur porte les indications “220V 500W”, calculer l'énergie consommée pendant 2h. Donner la réponse en kWh. (niv. 5)

Ex 7.24 : Soit une lampe de 60W allumée pendant toute une journée (10h).

- Calculer l'énergie totale nécessaire en kWh (niv. 5)
- Calculer ce que cela coûte. (niv. 5)

Ex 7.25 : Soit une télévision de 100W allumée pendant 3h.

- Calculer l'énergie totale nécessaire en kWh (niv. 5)
- Calculer ce que cela coûte. (niv. 5)

Ex 7.26 : Calculer combien de temps un SDF pourrait utiliser un chauffage électrique normal de 3kW avec 54Fb. (niv. 8-)

Ex 7.27 : En supposant, pour la facilité des calculs, que 1 kWh ne coûte aujourd'hui que 5Fb, combien de temps pourriez-vous regarder votre TV (40W) avec 1Fb ? (niv. 8-)

Ex 7.28 : Supposant qu'une installation de soirée dansante consomme 5W par dB, calculer le prix à payer à Electrabel pour écouter de la musique à 110dB pendant 2h. (niv. 8-)

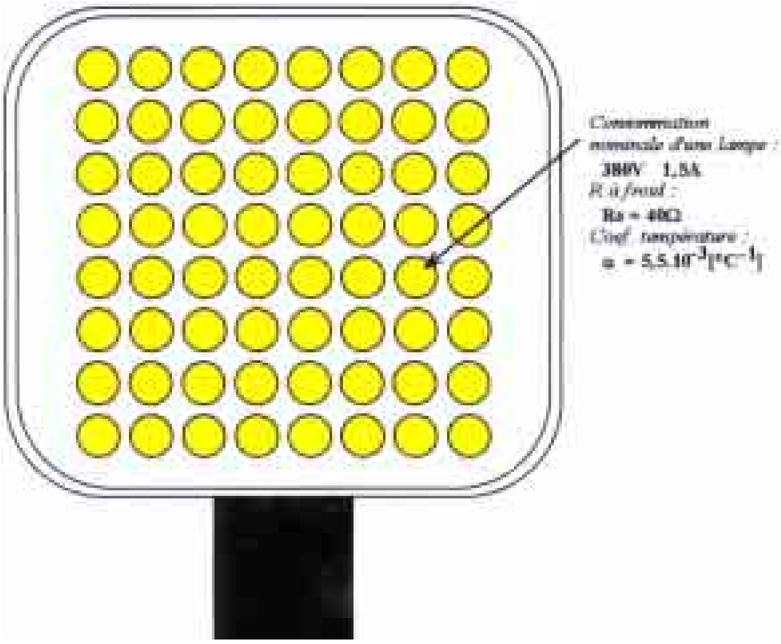
• Exercices combinés

Ex 7.29 : Un four européen avec ventilateur consomme une puissance de 2,2kW. Le ventilateur demande une puissance de 400W. Calculer la longueur du serpentin nécessaire de 5mm² de section ($\rho = 900.10^{-8}\Omega m$ / niv. 8)

Ex 7.30 : On veut faire tourner une hélice qui demande 2,5kW avec un moteur 220V (η=75%) alimenté par un groupe électrogène de 230V. Calculer à quelle distance maximale on peut placer le groupe électrogène du moteur en supposant que le câble électrique a une résistance de 1mΩ par mètre courant (1[mΩ/m]). (niv 9)

Ex 7.31 : Un village de 50 maisons consomme en moyenne ±0,5kA. Pour les alimenter, on utilise un câble qui a une résistance de 1$\mu\Omega$ par mètre de longueur. La centrale génère une tension de 240V. A quelle distance sera le village le plus éloigné en supposant qu'il doit recevoir un strict minimum de 210V ? (niv. 9)

Ex 7.32 : L'éclairage d'un stade de foot n'est jamais allumé en une fois. Il y a toujours, comme pour l'éclairage des autoroutes, un temps de préchauffage à tension réduite, nécessaire pour permettre au filament des lampes de chauffer et d'atteindre leur résistance nominale. Pour le panneau représenté ci-dessous, calculer les caractéristiques du préchauffage, c'est-à-dire sa durée et la tension alors appliquée aux lampes. N.B. Le panneau est protégé par un disjoncteur de 120A et, lors du préchauffage, la température du filament d'une ampoule augmente de 1°C/s. (niv 10)



Ex 7.33 : Désirant installer un éclairage de studio de 5000W, dans une cabane non fournie en électricité qui se trouve à 600m de la maison, vous tirez un câble depuis votre intérieur. Pour des raisons de sécurité évidentes et afin de perdre le minimum d'énergie, on désire limiter la résistance du fil à moins de 10% de la résistance nominale de l'éclairage. Quelle doit être alors la section minimum du câble électrique en tenant compte du fait que ce studio devra tourner toute l'année c'est-à-dire en hiver sous 0°C et en été, sous 30°C de température? (niv. 10)

• Divers

Ex 7.34 : Comment brancher une résistance de 100Ω 0,25W sur une alimentation qui doit débiter 20V et 150mA? (niv. 9)

Ex 7.35 : Vous disposez d'un nombre illimité de piles 1,2V 800mAh pour alimenter une TV 220V (on suppose qu'elle fonctionne en DC) qui consomme 3A. Si vous voulez regarder la TV pendant 3h, que devez-vous faire? (niv. 10)

• Questions des examens des années précédentes

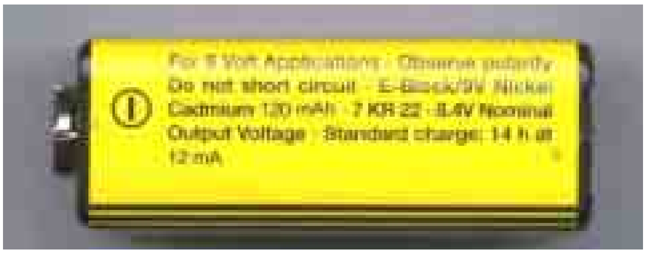
Ex 7.36 : (Juin 1999 - niv. 10-) On désire construire une bouilloire domestique qui donne un litre d'eau bouillante en 1 minute et 40 secondes. Pour bouillir, un litre d'eau a besoin de 55kJ. En supposant que le rendement du transfert de chaleur n'est que de 50% et que le serpentin a une section de 1cm², calculer la longueur du serpentin nécessaire ($\rho_{serpentin} = 4{,}4.10^{-2}\Omega m$)

Ex 7.37 : (Juin 1999 - niv. 10-) Pour s'enflammer, une cigarette a besoin de 480J. Quelle doit alors être la section du serpentin d'un allume-cigares ($l_{serpentin}$ = 10cm et $\rho_{serpentin} = 6.10^{-5}\Omega m$) de voiture s'il doit rougir en 20? Attention, le transfert de chaleur a un rendement de 50%.

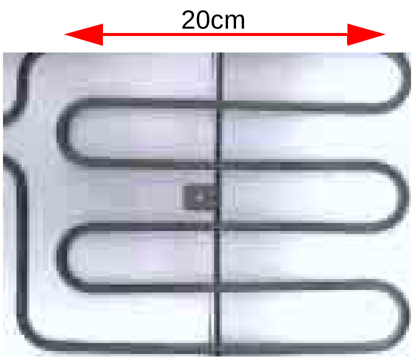
Ex 7.38 : (Juin 1999 - niv. 10) Les 2 ampoules 3W des phares d'un booster "kitté" tiennent peu longtemps. Normal, en tournant trop vite, l'alternateur fournit 37V au lieu des 12V nécessaires. Que faut-il ajouter dans le circuit électrique du booster pour obtenir 12V aux bornes des ampoules quand l'alternateur fournit 37V ? Comment faire si l'on ne dispose que de résistances de puissance de CI c'est-à-dire des résistances ne pouvant dissiper plus de 5W chacune ?

Ex 7.39 : (Juin 1999 - niv. 10) Les 2 ampoules 3W des phares et le Klaxon 6W d'un booster “kitté” tiennent peu longtemps. Normal, en tournant trop vite, l'alternateur fournit 62V au lieu des 12V nécessaires. Que faut-il ajouter dans le circuit électrique du booster pour obtenir 12V aux bornes des ampoules et du Klaxon quand l'alternateur fournit 62V ? Comment faire si l'on ne dispose que de résistances de puissance de CI c'est-à-dire des résistances ne pouvant dissiper plus de 5W chacune?

Ex 7.40 : (Juin 2000 - niv. 10) Comment faudrait-il faire pour décharger en ½ heure la pile ci-dessous en allumant une ampoule de 1,5V 75mW ? Vous disposez de kit complet de résistances ¼W.



Ex 7.41 : (Juin 2000 - niv. 10) Comment faire dissiper 1,8MJ en ½ heure par ce résistor (serpentin : diamètre=6mm, longueur=2m / $\rho=4{,}25.10^{-4}\Omega m$) en le branchant dans une prise 230V? Calculs approximatifs!



Ex 7.42 : (Juin 2000 - niv. 10) Comment faire dissiper 3,6kJ en ½ heure par le résistor de l’Ex 7.41 :avec uniquement des piles telles que celles de l’Ex 7.40 : ?