
Chapitre 2 Matériaux conducteurs

2. Matériaux conducteurs

Les matériaux conducteurs les plus utilisés en électrotechnique sont le cuivre et l'aluminium. On utilise le cuivre dans la plupart des applications magnétiques pour sa faible résistivité (e.g. moteurs électriques, alternateurs, transformateurs). Dans les lignes à haute tension, on utilise l'aluminium pour son faible poids (e.g. lignes 735 kV).

Dans ce chapitre, il sera d'abord question de la physique des matériaux conducteurs. Cette analyse permettra de décrire ce qui, au niveau de l'atome, distingue les conducteurs des isolants. Ces notions seront aussi utiles lors de l'étude des isolants électriques couverts au chapitre 4.

En second lieu, le chapitre 2 traitera de la répartition du courant dans les applications en courant alternatif. Les notions d'effet de peau et de proximité seront discutées.

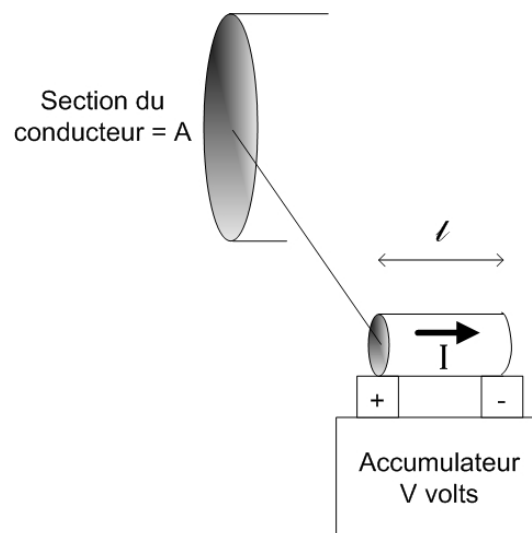
En troisième lieu, il sera question de l'application des conducteurs aux lignes de haute tension dans un réseau électrique. Les aspects mécaniques des conducteurs seront discutés.

En quatrième lieu, ce chapitre traitera de l'utilisation de conducteurs dans les dispositifs usuels de l'électrotechnique, par exemple les machines électriques et les transformateurs. Il sera alors question des classes de conducteurs, de leur isolation, de leur vieillissement et des méthodes usuelles de test.

Finalement, le chapitre 2 traitera des matériaux supraconducteurs, des aspects de base de leur physique et des applications principales.

2.1 Physique des matériaux conducteurs

L'expérience nous enseigne que la plupart des métaux (cuivre, aluminium, fer, zinc, etc.) possèdent une habileté à porter un courant électrique I lorsqu'on applique un voltage V entre deux points de leur surface, tel qu'illustré à la figure suivante.



Cette habileté est ce qu'on appelle la conductivité électrique des métaux et elle a d'abord été décrite par Ohm en 1826 sous la forme bien connue

$$V = RI$$

où R est la résistance du conducteur (Ω)

En outre, la résistance du conducteur R dépend des dimensions du conducteur et du matériau dont il est constitué. La loi d'Ohm peut donc être aussi formulée sous la forme suivante :

$$V = \rho \frac{l}{A} I$$

où ρ est la résistivité du matériau ($\Omega\cdot m$)
 l est la longueur du conducteur (m)
 A est la section du conducteur (m^2)

C'est seulement à partir du XX^{ième} siècle qu'on a pu décrire avec précision les processus atomiques qui permettaient d'expliquer et de prédire ce comportement conducteur ou isolant des matériaux. C'est également le sujet de la section 2.1.

2.1.1 Niveaux électroniques d'un atome seul

La connaissance actuelle que nous avons de l'atome est qu'il est constitué d'un noyau positivement chargé et d'électrons négativement chargés qui circulent autour du noyau. Le numéro atomique Z détermine le nombre de protons (et donc de charges positives) contenus dans le noyau.

En ce qui concerne les électrons, ceux-ci sont répartis autour du noyau sur des couches électroniques distinctes. La physique quantique nous a appris que chaque couche est constituée d'orbitales, qui constituent en fait une zone où la probabilité de trouver un électron est élevée. Aussi, les orbitales sont de types s, p, d, f, et sont respectivement au nombre de 1, 3, 5, 7. Chacune des orbitales peut contenir 0, 1 ou 2 électrons. Le tableau suivant résume la répartition des électrons sur les diverses couches et orbitales.

Couche électronique	Identifications des orbitales localisées sur chaque couche	Nombre maximal d'électrons admissible sur chaque couche
1ère couche	orbitale 1s	2 électrons max.
2 ^{ème} couche	orbitales 2s,2p	8 électrons max.
3 ^{ème} couche	orbitales 3s, 3p, 3d	18 électrons max.
4 ^{ème} couche	orbitales 4s, 4p, 4d, 4f	32 électrons max.
5 ^{ème} couche	orbitales 5s, 5p, 5d, 5f	32 électrons max.
6 ^{ème} couche	orbitales 6s, 6p, 6d	18 électrons max.
7 ^{ème} couche	orbitale 7s	2 électrons max.

Il est important de noter que plus le numéro de la couche électronique est faible (e.g. couche 1), plus les électrons sont localisés près du noyau et plus difficile il sera d'arracher l'électron à l'attraction de son noyau. Aussi, il est important de noter que les couches électroniques et les orbitales sont remplies successivement dans l'ordre 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 4p, 4d, etc.

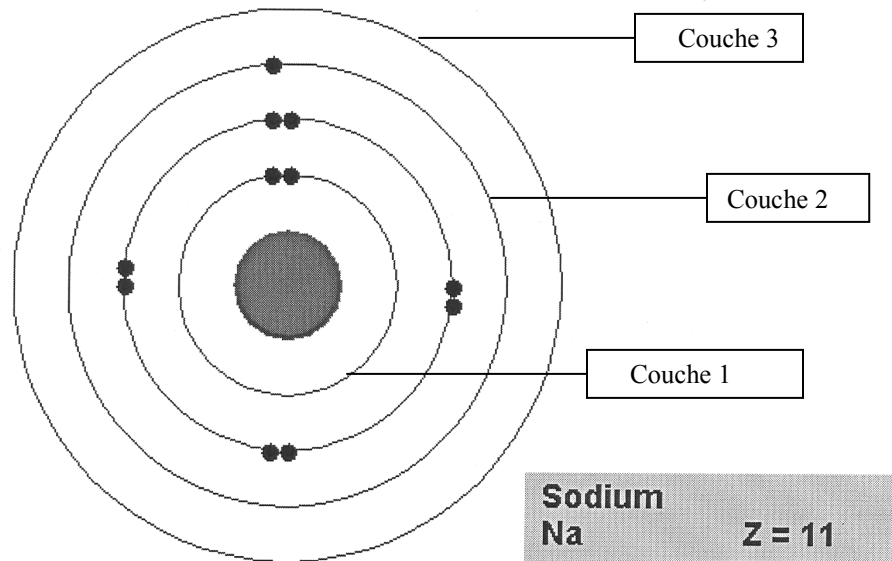
Par exemple, l'atome de cuivre possède 29 électrons et les orbitales suivantes sont remplies, tel que l'indique le tableau suivant.

Couche électronique	Identifications des orbitales localisées sur chaque couche	Nombre maximal d'électrons admissible sur chaque couche
1ère couche	orbitale 1s	2 électrons
2 ^{ème} couche	orbitales 2s,2p	8 électrons
3 ^{ème} couche	orbitales 3s, 3p	8 électrons
4 ^{ème} couche	orbitales 4s, 4p, 4d	11 électrons
TOTAL		29 électrons

Répartition des électrons dans l'atome de cuivre.

Un autre exemple. On prend un atome de sodium (Na) et on suppose que cet atome de sodium est localisé à une distance suffisante de toute particule, tel qu'il ne subisse aucune interaction électromagnétique avec d'autres atomes.

Les électrons seront répartis comme suit :



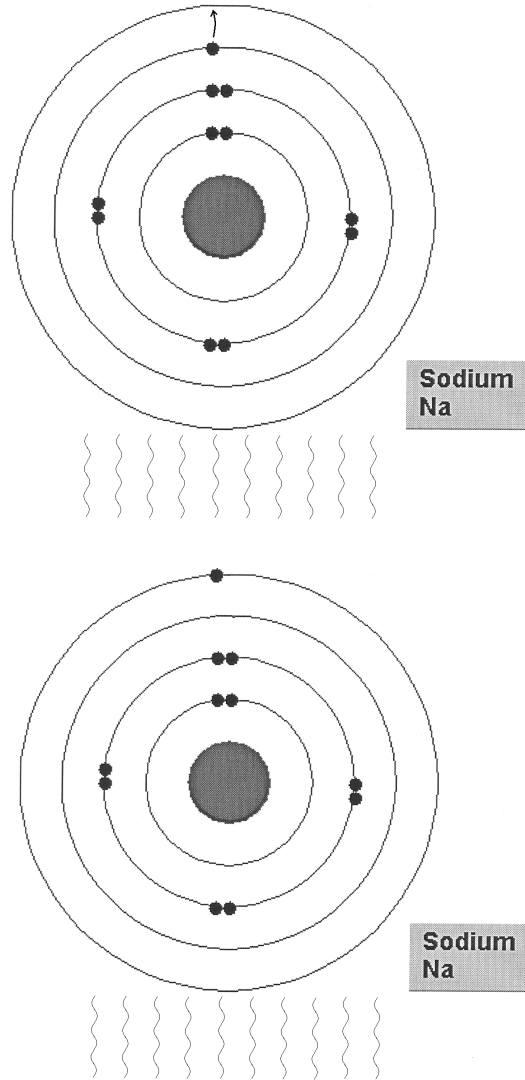
2.1.2 Excitation, électrons de valence et niveaux d'énergie

Tel que mentionné plus tôt, les électrons localisés sur les couches internes sont situés plus près du noyau et sont donc plus fortement liés au noyau par l'attraction électrique entre le noyau et l'électron. Au contraire, les électrons situés sur la dernière couche électronique sont plus distants du noyau et plus faiblement attachés à l'atome.

Les électrons de valence sont définis comme étant les électrons localisés sur la dernière couche électronique de l'atome. Ainsi, l'atome de cuivre comporte 11 électrons de valence et l'atome de sodium en possède un seul. Les électrons de valence seront en général les plus faciles à détacher de la structure atomique.

Posons maintenant qu'une source d'énergie extérieure transfère de l'énergie à un des électrons situés sur la couche extérieure. Tous les électrons augmenteront alors leur énergie cinétique. Si cette énergie cinétique est suffisamment élevée, un ou des électrons de valence pourront passer sur une couche électronique plus élevée.

Supposons que cet apport d'énergie est obtenu en chauffant l'atome :

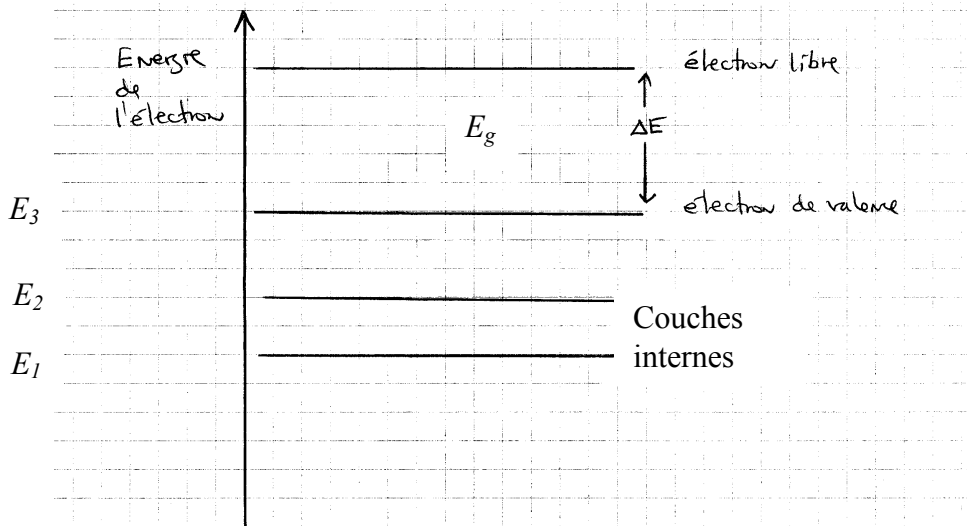


En retirant la source externe d'énergie, la force attraction du noyau ramène l'électron vers le noyau. L'énergie de l'électron est dissipée sous forme électromagnétique, par l'émission d'un photon.

Un atome seul permet des niveaux d'énergies discrets uniques. C'est ce qui donne les raies spectrales qui sont des signatures caractéristiques pour chaque élément du tableau périodique.

Si la quantité d'énergie transférée à un électron de valence est suffisamment élevée, il sera possible d'arracher complètement l'électron à l'influence du champ d'attraction électrique de son noyau. Il possédera alors une énergie cinétique suffisante pour ne pas revenir vers l'atome. C'est ce qu'on appelle un "électron libre".

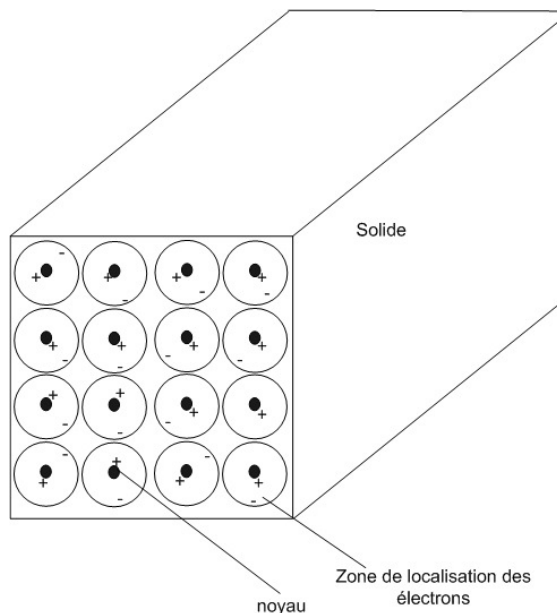
Pour qu'un électron de valence puisse passer de la couche de valence vers l'état d'électron libre, il lui faudra acquérir une énergie cinétique additionnelle E_g . La figure suivante illustre une répartition typique des niveaux d'énergie cinétique propre à un atome seul.



2.1.3 Bandes électroniques dans un solide

L'analyse du phénomène de conduction électrique fait intervenir des atomes qui sont agencés en un cristal compact, plutôt qu'en un gaz ou en atomes individuels. Or, le rapprochement des atomes, comme c'est le cas avec un conducteur, modifie le nombre des niveaux d'énergie disponibles pour les électrons autour du noyau.

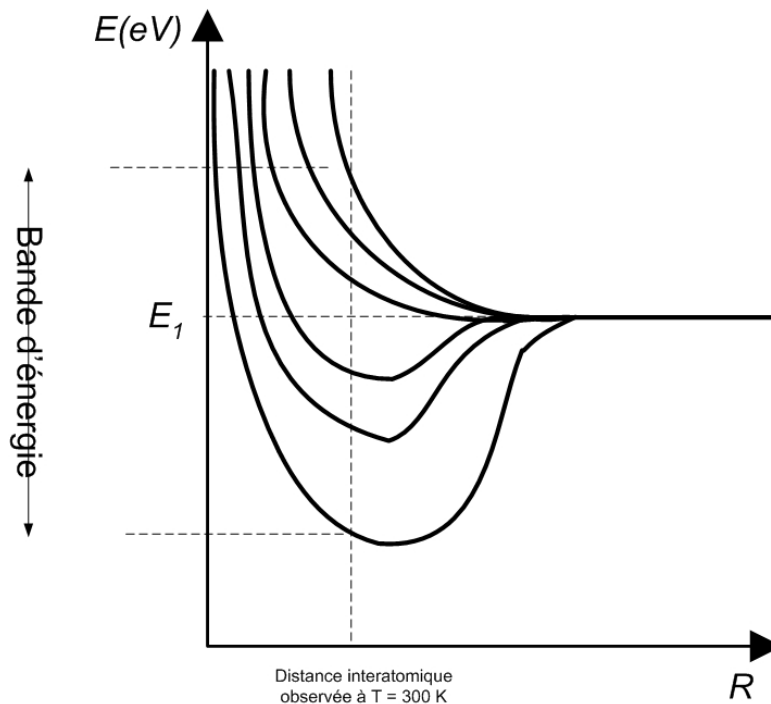
Posons un solide avec des milliards d'atomes identiques fixes, tel qu'illustré à la figure suivante.



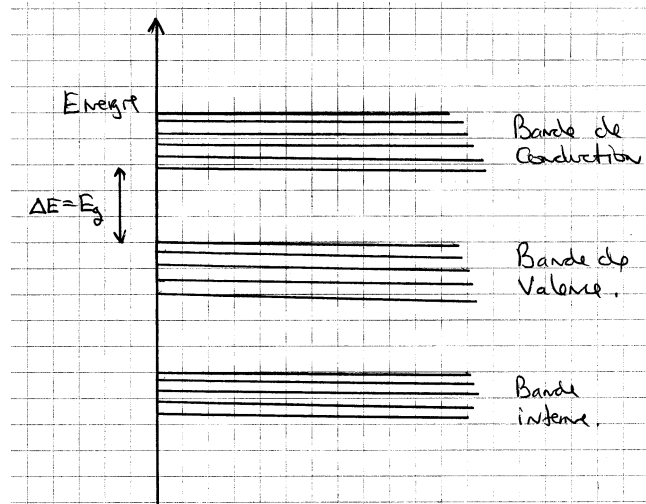
L'influence des atomes les uns sur les autres tend à modifier les niveaux d'énergie disponibles. Ainsi, les répulsions et attractions entre électrons voisins doivent être prises en considération pour établir l'énergie nécessaire pour pousser un électron au niveau d'énergie supérieure. Le nombre de niveaux discrets disponibles devient dépendant :

- du nombre d'atomes dans le solide,
- de la distance interatomique.

La figure suivante illustre l'effet du rapprochement atomique sur la multiplication des niveaux d'énergie dans le cas d'un cristal composé de six atomes. Selon cette figure, pour une distance interatomique R faible, les niveaux sont distribués de part et d'autre de E_1 leur nombre est multiplié par le nombre d'atomes présents dans le cristal.



Lorsque le cristal est composé de milliards d'atomes, comme c'est le cas en pratique, une infinité de niveaux d'énergie sont possibles pour les électrons. Les électrons voient leur niveau d'énergie cinétique non plus distribué sur des états discrets, comme c'était le cas pour des atomes individuels, mais plutôt sur des "bandes" discrètes d'énergie. Les niveaux d'énergie électronique des solides sont donc concentrés dans des "bandes d'énergie", tel que l'illustre la figure suivante.



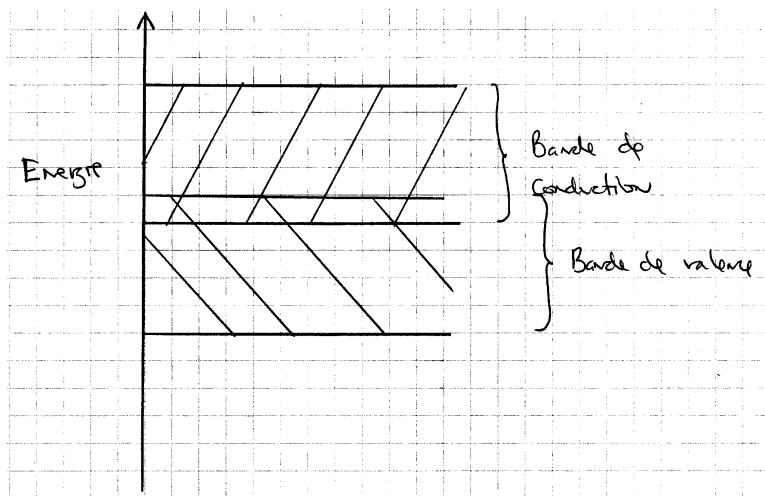
La séparation d'énergie E_g entre la bande de conduction et la bande de valence détermine si le solide se comporte en conducteur, en isolant ou en semiconducteur. Dans un solide, un électron libre est un électron qui possède suffisamment d'énergie cinétique pour être arraché à l'influence de son atome initial et circuler librement vers un autre atome. Au niveau énergétique, l'électron libre possède un niveau d'énergie cinétique correspondant à la bande de conduction.

Le phénomène de conduction se produit lorsqu'un électron libre passe d'un atome à un autre. Pour obtenir ce phénomène, il est nécessaire qu'un électron possède suffisamment d'énergie cinétique pour entrer dans la bande de conduction. La conduction peut être grande, partielle ou nulle, suivant la quantité d'énergie cinétique E_g requise pour passer de la bande de valence à la bande de conduction.

Cas 1) Conducteurs : $E_g = 0$ eV

Les électrons passent de la bande de valence à la bande de conduction sans difficulté. C'est le cas des conducteurs.

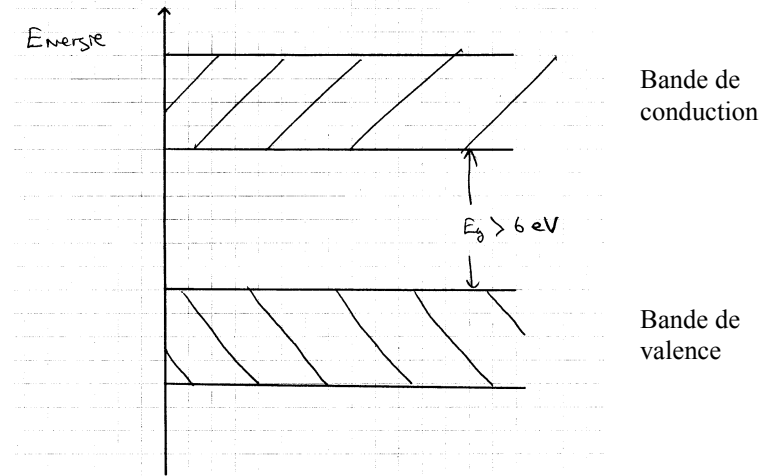
Ex : Cu, Fe, Al



Cas 2 Isolants : $E_g > 6 \text{ eV}$

Les électrons sont presque absents de la bande de conduction. Ils sont prisonniers de leur atome.

Exemple : Soufre, Phosphore, Chlore



Cas 3 Semi-conducteurs : $0 \text{ eV} < E_g < 5 \text{ eV}$

Exemple : silicium, germanium.

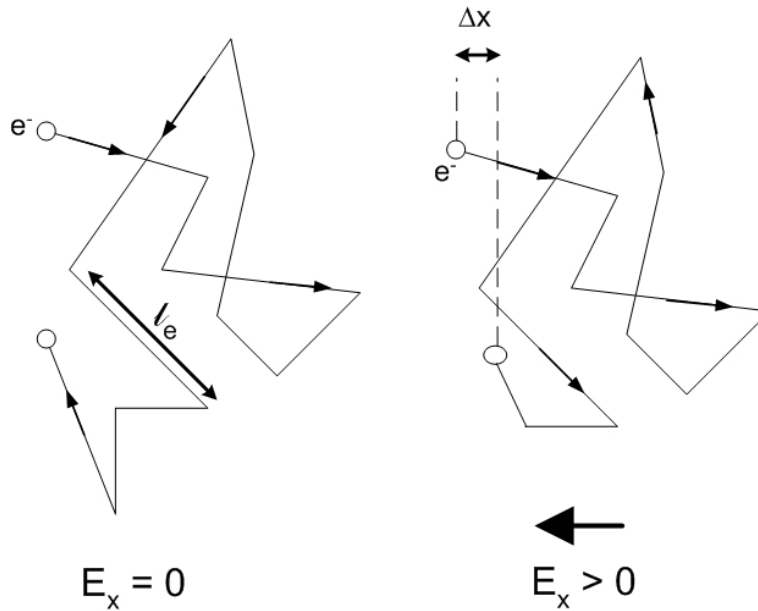
2.1.4 Comportement des électrons libres dans un solide conducteur

Au niveau macroscopique, le phénomène de conduction électrique est quantifiable par la conductivité σ d'un solide, ou par son inverse, i.e. la résistivité ρ . Dans cette section, ces deux quantités seront exprimées en fonction des paramètres microscopiques qui définissent le comportement des électrons libres dans le solide conducteur.

En l'absence de champ électrique externe ($E_x = 0$), le mouvement des électrons libres est aléatoire à l'intérieur du solide. Les électrons libres se déplacent alors à une vitesse moyenne v_{therm} , laquelle est une conséquence de l'agitation thermique du solide. Cette vitesse varie avec la température du solide et est indépendante du champ électrique externe appliqué.

L'électron libre se déplace sous l'influence de l'agitation thermique, mais son mouvement est limité par les collisions avec les autres atomes du solide. À chaque collision, l'électron libre perd son énergie cinétique, laquelle est transformée en radiation thermique par l'émission d'un photon.

On définit l_e comme étant la distance moyenne parcourue par l'électron libre entre chaque collision. La figure suivante illustre le mouvement aléatoire de l'électron libre dans le solide.



La fréquence moyenne f_{coll} des collisions pour un électron libre sera donc définie par :

$$\bar{f}_{coll} = \frac{\bar{v}_{therm}}{l_e}$$

Si un voltage V est appliqué aux bornes du solide conducteur, résultant en un champ électrique E_x à l'intérieur du solide, on observera un déplacement moyen Δx des électrons libres sur une période de temps Δt . En plus de son mouvement thermique habituel, chaque électron libre dérivera d'une distance moyenne l_d dans la direction parallèle à l'orientation du champ électrique E entre chacune des collisions.

Chaque électron libre sera soumis à une force électrique eE_x dans la direction du champ électrique appliqué, laquelle engendrera une accélération a_x , tel que :

$$F = m_e a_x = eE_x$$

- où m_e est la masse de l'électron ($0,911 \times 10^{-30}$ kg)
 e est la charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C),
 E_x est le champ électrique imposé par une source externe (V/m)

La vitesse moyenne de déplacement des électrons dans la direction du champ électrique est la vitesse de dérive :

$$v_d = l_d f_{coll}$$

La vitesse de dérive v_d sera en général beaucoup plus faible que la vitesse v_{therm} résultant de l'agitation thermique. Par exemple, la vitesse moyenne de dérive des électrons libres du cuivre soumis à un champ électrique de 10 V/m à $T = 273$ K sera égale à $v_d = 4,7$ cm/s, alors que l'agitation thermique engendrera une vitesse v_{therm} dont l'ordre de grandeur sera de 1000 km/s. Il est donc raisonnable d'affirmer que la vitesse de dérive des électrons n'affecte en rien la fréquence des collisions à l'intérieur du solide et que seule la température affecte la fréquence de ces collisions.

On exprime la vitesse de dérive en fonction de l'accélération a_x . Selon la mécanique classique :=

$$v_d(t) = \int_0^t a_x dt = a_x t$$

Et la vitesse moyenne de dérive sur le parcours de l'électron libre entre deux collisions est donnée par :

$$\bar{v}_d = \bar{f}_{coll} \int_0^{1/\bar{f}_{coll}} v_d(t) dt$$

$$\bar{v}_d = \bar{f}_{coll} \int_0^{1/\bar{f}_{coll}} a_x t dt = \frac{a_x}{2\bar{f}_{coll}}$$

Et donc,

$$\bar{v}_d = \frac{eE_x \bar{l}_e}{2m_e \bar{v}_{therm}}$$

On définit la *mobilité des électrons* μ_e comme :

$$\mu_e = \frac{e \bar{l}_e}{2m_e \bar{v}_{therm}}$$

Les unités de la mobilité des électrons sont les $m^2/V-s$

Et donc,

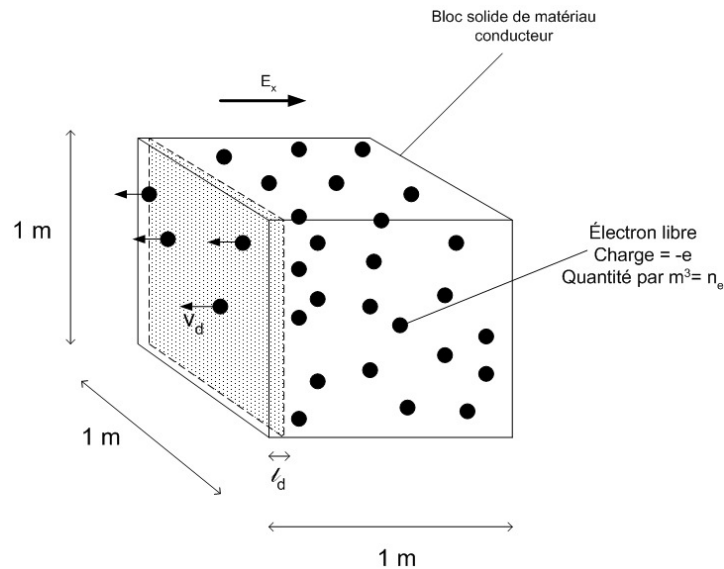
$$\bar{v}_d = \mu_e E_x$$

À partir de la vitesse moyenne de dérive des électrons libres, il est possible de déterminer une expression décrivant directement la densité de courant surfacique j en fonction du champ électrique appliqué E sous la forme bien connue de la loi d'Ohm:

$$j = \sigma E$$

où j est la densité de courant par unité de surface (A/m^2)

Pour ce faire, on pose un volume de matériau conducteur de dimensions $1m \times 1m \times 1m$, composé de n_e électrons libres.



Si un champ électrique E_x est appliqué à l'intérieur du volume, la quantité d'électrons libres qui traverseront la surface du volume pendant un laps de temps égal à l'intervalle entre deux collisions électroniques sera égale à $n_e \cdot (l_d/1\text{mètre})$. Par conséquent, le courant par unité de surface sera :

$$j_x = en_e l_d f_{coll}$$

ou encore

$$j_x = en_e \bar{v}_d$$

Or, on a vu que la vitesse moyenne de dérive v_d était proportionnelle à l'intensité du champ électrique E_x dans le conducteur. On obtient ainsi une relation liant la densité de courant j_x à l'intensité du champ électrique E_x :

$$j_x = en_e \mu_e E_x$$

Ce qui est l'expression de la loi d'Ohm pour :

$$\sigma = en_e\mu_e$$

où n_e est le nombre d'électrons libres par unité de volume.

Le nombre d'électrons libres n_e par unité de volume varie d'un matériau à un autre. Il est donné au tableau suivant pour différents métaux.

	$n_e (m^{-3})$	$\mu_e (m^2/V-s)$ @ 0°C	$\sigma (x 10^6)$ S/m @ 0°C
Argent (Ag)	$7,4 \times 10^{28}$	$5,73 \times 10^{-3}$	67,9
Cuivre (Cu)	$11,3 \times 10^{28}$	$3,59 \times 10^{-3}$	64,9
Acier	--	--	2,2
Aluminium	$20,7 \times 10^{28}$	$1,23 \times 10^{-3}$	40,9
Zinc (Zn)	$18,8 \times 10^{28}$	$0,61 \times 10^{-3}$	18,3
Cadmium	$10,3 \times 10^{28}$	$0,80 \times 10^{-3}$	13,2
Lithium (Li)	$3,7 \times 10^{28}$	$2,00 \times 10^{-3}$	11,9
Beryllium	$2,6 \times 10^{28}$	--	30,4
Sodium (Na)	$2,5 \times 10^{28}$	$4,59 \times 10^{-3}$	18,4
Potassium	$1,5 \times 10^{28}$	$5,87 \times 10^{-3}$	14,1

2.1.5 Effet de la température sur la conduction dans les solides

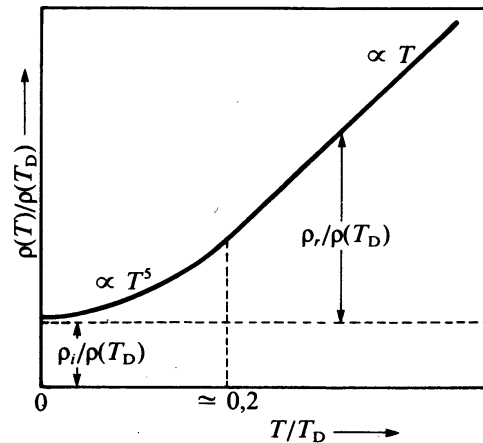
Les conducteurs sont le siège de collisions entre les électrons libres et les atomes environnants. Tel qu'indiqué précédemment, chaque collision entraîne une émission d'un photon. Lorsque le solide est en équilibre thermique, i.e. qu'il est à la même température que l'air ambiant et qu'aucun champ électrique externe n'est imposé, l'énergie des photons expulsés vers l'extérieur du conducteur est exactement compensée par l'apport énergétique de l'air ambiant sur le conducteur. En d'autres termes, il y a autant d'énergie qui entre dans le conducteur que d'énergie qui en ressort.

Lorsqu'un champ électrique externe E_x est appliqué, la vitesse de dérive entraîne une très légère augmentation de la fréquence des collisions électrons-atomes. Quoique très légère, cette augmentation du nombre des collisions est suffisante pour créer un échauffement supplémentaire dans le solide. Cette augmentation de la puissance dissipée est évidemment exprimée par l'équation classique :

$$P = Ri^2 \quad \text{et son équivalent} \quad P = V_{cond}\sigma j^2$$

où V_{cond} est le volume du conducteur

L'augmentation de l'agitation thermique successive à l'augmentation de la température interne du conducteur augmente la vitesse v_{therm} des électrons libres et la fréquence f_{coll} des collisions. Selon l'équation (), ceci a pour conséquence une diminution de la mobilité μ_e des électrons libres et de la conductivité σ du conducteur (donc une augmentation de la résistivité ρ). La figure suivante illustre la variation de la résistivité ρ d'un conducteur en fonction de la température.



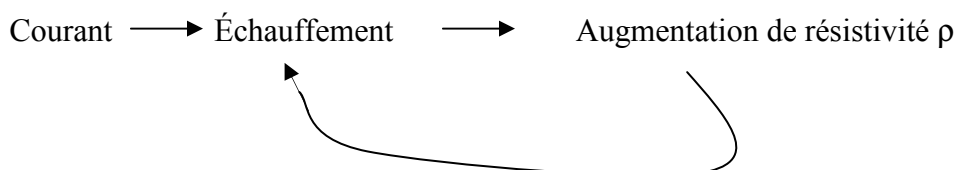
Aux températures près de l'ambient, la résistivité d'un conducteur peut s'exprimer par la formule suivante :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T)$$

- où ρ est la résistivité du conducteur;
- ρ_0 est la résistivité du conducteur à 0 °C;
- α est le coefficient de variation de la résistivité en fonction de la température;
- ΔT est l'élévation de la température du conducteur par rapport au 0°C.

	α ($^{\circ}C^{-1}$)
Argent (Ag)	0,00400
Cuivre (Cu)	0,00427
Aluminium	0,00429

Donc, un conducteur parcouru par un courant i s'échauffera. Or, cette augmentation de température entraînera une augmentation de la résistivité, amplifiant ainsi le phénomène d'échauffement du conducteur. Il s'agit donc d'une réaction en chaîne :



La température du conducteur se stabilisera lorsqu'un nouvel équilibre thermique sera atteint, où l'énergie thermique additionnelle fournie au conducteur sera égale à l'énergie thermique transmise à l'air ambiant environnant le conducteur. Cet équilibre entraînera inévitablement une augmentation de la température interne du conducteur.

Les températures internes du conducteur seront donc dépendantes des conditions de refroidissement auxquels ce conducteur est soumis.

2.2 Matériaux conducteurs dans le réseau électrique

Les conducteurs du réseau électrique font partie de notre paysage quotidien. Les pylônes de très haute tension (THT) supportent les conducteurs sur des milliers de kilomètres entre les points de productions électriques (centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires, éoliennes) jusqu'aux postes de transformation localisés près des centres de consommation de l'électricité.

De même, les poteaux de bois supportent les conducteurs entre les postes de transformation et les résidences. Dans certains cas, les câbles sont enfouis et ne sont donc pas visibles dans l'environnement urbain.

Dans la section 2.2, il sera question des conducteurs dans les trois applications suivantes:

- conducteurs aériens dans le réseau de transport;
- conducteurs aériens dans le réseau de distribution;
- conducteurs enfouis dans le réseau de distribution;

2.2.1 Réseau de transport

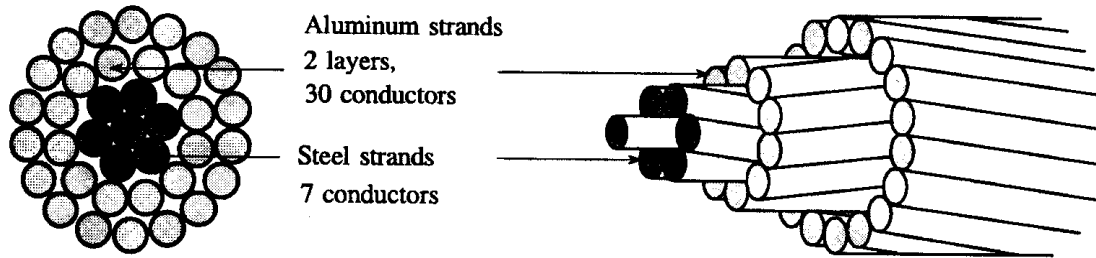
Le réseau de transport est constitué de conducteurs électriques ayant un voltage dont la valeur efficace se situe entre 49 kV et 765 kV. Généralement, les conducteurs du réseau de transport sont regroupés de telle sorte que les trois phases électriques sont transportées ensemble. Les conducteurs électriques des trois phases sont habituellement supportés mécaniquement par une suite de pylônes en acier, où chacun des pylônes supporte les conducteurs des trois phases ainsi regroupées.

Étant donné les hautes tensions impliquées dans le transport de l'électricité, l'utilisation d'isolant autour de ces conducteurs n'est pas un choix techniquement et économiquement intéressant. L'épaisseur des isolants requis augmenterait significativement le poids, le coût et l'encombrement de ces câbles et amènerait des difficultés de refroidissement importantes de ces conducteurs ce qui, comme on l'a vu, engendrerait des échauffements additionnels significatifs de ces conducteurs. Par conséquent, les conducteurs du réseau de transport sont aériens et inaccessibles. Ils sont situés à une hauteur suffisante pour éviter tout danger d'électrocution pour les personnes. Il n'est donc pas nécessaire que ces conducteurs possèdent une gaine isolante. On les laisse à nu.

Les matériaux conducteurs utilisés dans le réseau de transport sont :

- l'aluminium seul (AAC – "All Aluminium Conductor");
- l'aluminium et l'acier (ACSR – "Aluminium Conductor Steel Reinforced").

Les câbles conducteurs du réseau de transport sont généralement de section circulaire et sont composés de multiples conducteurs plus petits, tel que l'illustre la figure suivante.



Chacun des sous-conducteurs est disposé en spirale autour du centre du câble. La longueur de chaque sous-conducteur enroulé est de :

$$l_{cond} = l_{câble} \sqrt{1 + (2\pi n_{spirale} r_{couche})^2}$$

- où
- l_{cond} est la longueur d'un sous-conducteur enroulé en spirale;
 - $l_{câble}$ est la longueur du câble en ligne droite;
 - $n_{spirale}$ est le nombre de tours de spirale par mètre de câble;
 - r_{couche} est la distance du sous-conducteur par rapport au centre du câble.

Selon la loi d'Ohm, chacun des sous-conducteurs possède une résistance par mètre de câble R_{cond} tel que :

$$R_{cond} = \frac{\rho}{A_{cond}} \sqrt{1 + (2\pi n_{spirale} r_{couche})^2}$$

- où
- A_{cond} est la section d'un sous-conducteur enroulé en spirale;
 - ρ_{cond} est la résistivité du matériau formant le sous-conducteur;

et la résistance du câble par mètre de câble est la mise en parallèle de tous les sous-conducteurs

$$R_{câble} = \frac{1}{\sum_{cond_n=1}^{n_{cond}} \frac{1}{R_{cond_n}}}$$

Exemple :

Soit un câble aérien en aluminium renforcé en acier (ACSR). Le câble contient 52 conducteurs répartis sur 3 couches.

- couche du centre en acier comportant 7 sous-conducteurs (1);
- couche du milieu en aluminium comportant 12 sous-conducteurs;
- couche extérieure en aluminium comportant 33 conducteurs.

La section de chaque sous-conducteur est la même, i.e. $A_{cond} = 8,6 \text{ mm}^2$ et tous les sous-conducteurs sont enroulés en spirales autour du centre à raison d'un tour par mètre de câble.

Déterminer la résistance par mètre de ce câble.

Résistance du sous-conducteur central en acier:

$$R_{cond1} = \frac{\rho_{acier}}{A_{cond}} = 53 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

Résistance du sous-conducteur latéral en acier:

$$R_{cond2} = \frac{\rho_{acier}}{A_{cond}} \sqrt{1 + (2\pi r_{couche1})^2}$$
$$r_{couche1} = 2 \sqrt{\frac{A_{cond}}{\pi}} = 3,3 \text{ mm} \text{ -----} \rightarrow R_{cond2} = 53 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

Résistance du sous-conducteur d'aluminium de la couche 2:

$$R_{cond3} = \frac{\rho_{Al}}{A_{cond}} \sqrt{1 + (2\pi r_{couche2})^2}$$
$$r_{couche2} \cong 2r_{couche1} \text{ -----} \rightarrow R_{cond3} = 2,8 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

Résistance du sous-conducteur d'aluminium de la couche 3:

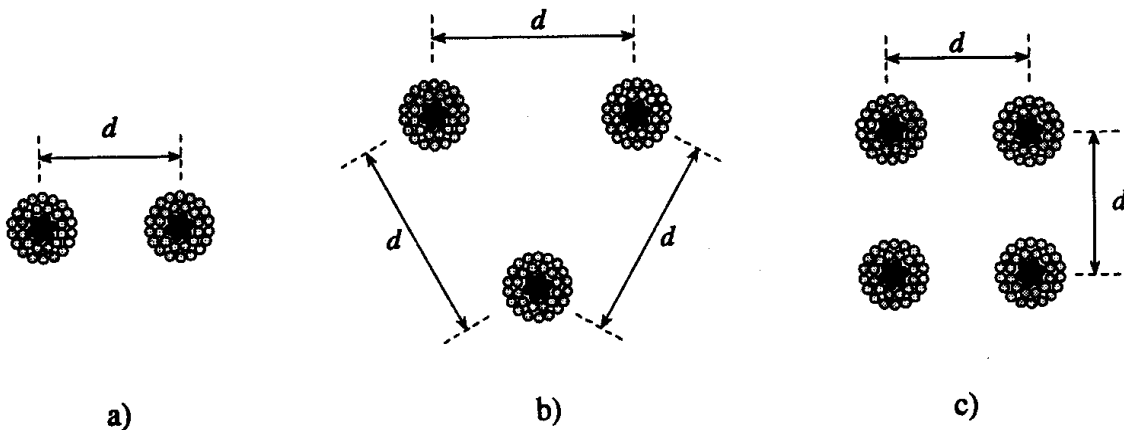
$$R_{cond4} = \frac{\rho_{Al}}{A_{cond}} \sqrt{1 + (2\pi r_{couche3})^2}$$
$$r_{couche3} \cong 3r_{couche1} \text{ -----} \rightarrow R_{cond4} = 2,8 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

Donc la résistance totale du câble est :

$$R_{c\grave{a}ble} = \frac{1}{\frac{1}{R_{cond1}} + \frac{6}{R_{cond2}} + \frac{12}{R_{cond3}} + \frac{33}{R_{cond4}}} = 61,7 m\Omega / km$$

Augmentation du nombre des conducteurs d'une même phase

Dans le réseau de transport, il est courant de transporter l'électricité sur plusieurs conducteurs éloignés d'une distance d , tel qu'illustré à la figure suivante.



Cette augmentation du nombre de conducteurs par phase permet :

- d'augmenter le diamètre apparent du conducteur;
- d'augmenter la surface de conducteurs en contact avec l'air ambiant.

Le premier effet permet de réduire l'intensité du champ électrique près de la ligne, ce qui réduit l'effet couronne.

Le second effet permet de mieux refroidir les conducteurs et il en résulte une capacité en courant plus élevée que pour un seul câble de section plus grande.

À la section 2.1, nous avons étudié l'effet de l'augmentation de température sur la résistivité des conducteurs. L'élévation en température du conducteur permet de déterminer sa capacité en courant. Les tableaux suivants présentent les caractéristiques des câbles de lignes ACSR et AAC utilisés dans l'industrie, incluant leur capacité en courant. L'analyse de la capacité en courant et du refroidissement des câbles sera abordée au chapitre 5 (Refroidissement des matériaux) de ce cours.

TABLE 4.10b Characteristics of All-Aluminum Conductors (AAC)

Code	Cross-Section Area		Stranding	Diameter (mm)	Layers	Approx. Current-Carrying Capacity (Amp.)*	Resistance (mΩ/km)				60-Hz Reactances (Dm = 1 m)		
	(mm ²)	kcmil or AWG					DC 25°C	AC (60 Hz) 25°C	50°C	75°C	GMR (mm)	X _L (Ω/km)	X _C (MΩ/km)
EVEN SIZES													
Bluebonnet	1773.3	3500	7	54.81	6		16.9	22.2	23.6	25.0	21.24	0.290	0.172
Trillium	1520.2	3000	127	50.75	6		19.7	24.6	26.2	27.9	19.69	0.296	0.175
Lupine	1266.0	2499	91	46.30	5		23.5	27.8	29.8	31.9	17.92	0.303	0.180
Cowslip	1012.7	1999	91	41.40	5		29.0	32.7	35.3	38.0	16.03	0.312	0.185
Jessamine	887.0	1750	61	38.74	4		33.2	36.5	39.5	42.5	14.94	0.317	0.188
Hawkweed	506.7	1000	37	29.24	3	1030	58.0	60.0	65.5	71.2	11.22	0.339	0.201
Camelia	506.4	999	61	29.26	4	1030	58.1	60.1	65.5	71.2	11.31	0.338	0.201
Snapdragon	456.3	900	61	27.79	4	970	64.4	66.3	72.5	78.7	10.73	0.342	0.204
Cockscomb	456.3	900	37	27.74	3	970	77.4	78.9	86.4	93.9	9.78	0.349	0.208
Cartail	380.1	750	61	25.35	4	870	77.4	78.9	86.4	93.9	9.72	0.349	0.208
Petunia	380.2	750	37	23.85	3	870	83.0	84.4	92.5	100.6	9.45	0.352	0.210
Flag	354.5	700	61	24.49	4	810	83.0	84.4	92.5	100.6	9.39	0.352	0.210
Verbena	354.5	700	37	24.43	3	810	96.8	98.0	107.5	117.0	8.69	0.358	0.214
Meadowswee	303.8	600	37	2.63	3	740	116.2	117.2	128.5	140.0	7.92	0.365	0.218
Hyacinth	253.1	500	37	20.65	3	690	116.2	117.2	128.5	139.9	7.80	0.366	0.218
Zinnia	253.3	500	19	20.60	2	690	129.0	129.9	142.6	155.3	7.41	0.370	0.221
Goldentuft	228.0	450	19	19.53	2	640	165.9	166.6	183.0	199.3	6.52	0.379	0.227
Daffodil	177.3	350	19	17.25	2	580	193.4	194.0	213.1	232.1	6.04	0.385	0.230
Peony	152.1	300	19	15.98	2	490	232.3	232.8	255.6	278.6	5.52	0.392	0.235
Valerian	126.7	250	19	14.55	2	420	232.2	232.7	255.6	278.4	5.21	0.396	0.235
Sneezewort	126.7	250	7	14.40	1	420	232.2	232.7	255.6	278.4	5.21	0.396	0.235

Source: Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 2nd ed., Electronic Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1987. With permission.

TABLE 4.9a Characteristics of Aluminum Cable Steel Reinforced Conductors (ACSR)

Code	Cross-Section Area		Stranding		Diameter		Approx. Current-Carrying Capacity (Amp.)*	Resistance (mΩ/km)			60-Hz Reactances (Dm = 1m)			
	Total (mm ²)	Aluminum (kcmil)	Al/Steel	Conductor (mm)	Core (mm)	Layers		DC 25°C	AC (60 Hz) 25°C	50°C	75°C	GMR (mm)	X _i (Ω/km)	X _c (MΩ/km)
—	1521	2776	1407	84/19	50.80	13.87	4	21.0	4.5	26.2	28.1	20.33	0.294	0.175
Joree	1344	2515	1274	76/19	47.75	10.80	4	22.7	26.0	28.0	30.0	18.93	0.299	0.178
Thrasher	1235	2312	1171	76/19	45.77	10.34	4	24.7	27.7	30.0	32.2	18.14	0.302	0.180
Kiwi	1146	2167	1098	72/7	44.07	8.81	4	26.4	29.4	31.9	34.2	17.37	0.306	0.182
Bluebird	1181	2156	1092	84/19	44.75	12.19	4	26.5	29.0	31.4	33.8	17.92	0.303	0.181
Chukar	9767	1781	902	84/19	40.69	11.10	4	32.1	34.1	37.2	40.1	16.28	0.311	0.186
Falcon	908	1590	806	54/19	39.24	13.08	3	35.9	37.4	40.8	44.3	15.91	0.312	0.187
Lapwing	862	1590	806	45/7	38.20	9.95	3	36.7	38.7	42.1	45.6	15.15	0.316	0.189
Parrot	862	1510	765	54/19	38.23	12.75	3	37.8	39.2	42.8	46.5	15.48	0.314	0.189
Nuthatch	818	1510	765	45/7	37.21	9.30	3	38.7	40.5	44.2	47.9	14.78	0.318	0.190
Plover	817	1431	725	54/19	37.21	12.42	3	39.9	41.2	45.1	48.9	15.06	0.316	0.190
Bobolink	775	1431	725	45/7	36.25	9.07	3	35.1	42.6	46.4	50.3	14.39	0.320	0.191
Martin	772	1351	685	54/19	36.17	12.07	3	42.3	43.5	47.5	51.6	14.63	0.319	0.191
Dipper	732	1351	685	45/7	35.20	8.81	3	43.2	44.9	49.0	53.1	13.99	0.322	0.193
Pheasant	726	1272	644	54/19	35.10	11.71	3	44.9	46.1	50.4	54.8	14.20	0.321	0.193
Bittern	689	1272	644	45/7	34.16	8.53	3	45.9	47.5	51.9	56.3	13.56	0.324	0.194
Grackle	681	1192	604	54/19	34.00	11.33	3	47.9	49.0	53.6	58.3	13.75	0.323	0.194
Bunting	646	1193	604	45/7	33.07	8.28	3	48.9	50.4	55.1	59.9	13.14	0.327	0.196
Finch	636	1114	564	54/19	32.84	10.95	3	51.3	52.3	57.3	62.3	13.29	0.326	0.196
Bluejay	603	1113	564	45/7	31.95	8.00	3	52.4	53.8	58.9	64.0	12.68	0.329	0.197
Curlew	591	1033	523	54/7	31.62	10.54	3	56.5	57.4	63.0	68.4	12.80	0.329	0.198
Ortolan	560	1033	523	45/7	30.78	7.70	3	56.5	57.8	63.3	68.7	12.22	0.332	0.199
Merganser	596	954	483	30/7	31.70	13.60	2	61.3	61.8	67.9	73.9	13.11	0.327	0.198
Cardinal	546	954	483	54/7	30.38	10.13	3	61.2	62.0	68.0	74.0	12.31	0.332	0.200
Rail	517	954	483	45/7	29.59	7.39	3	61.2	62.4	68.3	74.3	11.73	0.335	0.201
Baldpate	562	900	456	30/7	30.78	13.21	2	65.0	65.5	71.8	78.2	12.71	0.329	0.199
Canary	515	900	456	54/7	29.51	9.83	3	64.8	65.5	72.0	78.3	11.95	0.334	0.201
Ruddy	478	900	456	45/7	28.73	7.19	3	64.8	66.0	72.3	78.6	11.40	0.337	0.202
Crane	501	875	443	54/7	29.11	9.70	3	66.7	67.5	74.0	80.5	11.80	0.335	0.202
Willet	474	874	443	45/7	28.32	7.09	3	66.7	67.9	74.3	80.9	11.25	0.338	0.203

TABLE 4.9a (continued) Characteristics of Aluminum Cable Steel Reinforced Conductors (ACSR)

Code	Cross-Section Area			Diameter		Approx. Current-Carrying Capacity (Amp.)*	Resistance (mΩ/km)				60-Hz Reactances (Dm = 1m)					
	Total (mm ²)	Aluminum (kcmil) (mm ²)		Stranding Al/Steel	Conductor (mm)		Core (mm)	Layers	DC 25°C	AC (60 Hz)		50°C	75°C	GMR (mm)	X _i (Ω/km)	X _c (MΩ/km)
		Al/Steel	Al/Steel							25°C	50°C					
Skimmer	479	795	403	30/7	29.00	12.40	2	73.5	74.0	74.0	81.2	88.4	11.95	0.334	0.202	
Mallard	495	795	403	30/19	28.96	12.42	2	73.5	74.0	74.0	81.2	88.4	11.95	0.334	0.202	
Drake	469	795	403	26/7	28.14	10.36	2	73.3	74.0	74.0	81.2	88.4	11.43	0.337	0.203	
Condor	455	795	403	54/7	27.74	9.25	3	73.4	74.1	74.1	81.4	88.6	11.22	0.339	0.204	
Cuckoo	455	795	403	24/7	27.74	9.25	2	73.4	74.1	74.1	81.4	88.5	11.16	0.339	0.204	
Tern	431	795	403	45/7	27.00	6.76	3	73.0	74.4	74.4	81.6	88.8	10.73	0.342	0.205	
Coot	414	795	403	36/1	26.42	3.78	3	73.0	74.4	74.4	81.5	88.6	10.27	0.345	0.206	
Buteo	447	715	362	30/7	27.46	11.76	2	81.8	82.2	82.2	90.2	98.3	11.34	0.338	0.204	
Redwing	445	715	362	30/19	27.46	11.76	2	84.0	82.2	82.2	90.2	98.3	11.34	0.338	0.204	
Starling	422	716	363	26/7	26.7	9.82	2	81.5	82.1	82.1	90.1	98.1	10.82	0.341	0.206	
Crow	409	715	362	54/7	26.31	8.76	3	81.5	82.2	82.2	90.2	98.2	10.67	0.342	0.206	

Source: Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 2nd ed., Electronic Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1987. With permission.

TABLE 4.9b Characteristics of Aluminum Cable Steel Reinforced Conductors (ACSR)

Code	Cross-Section Area			Stranding		Diameter		Approx. Current-Carrying Capacity (Amp.)*	Resistance (mΩ/km)				60-Hz Reactances (Dm = 1m)		
	Total (mm ²)	Aluminum (kcmil)		A1/Steel	Conductor (mm)	Core (mm)	Layers		DC 25°C	AC (60 Hz)			GMR (mm)	X _i (Ω/km)	X _c (MΩ/km)
		25°C	50°C							75°C					
Sift	410	716	363	24/7	26.31	8.76	2	840	81.5	82.2	90.2	98.1	10.58	0.343	0.206
Grebe	388	716	363	45/7	25.63	6.4	3	840	81.5	82.5	90.4	98.4	10.18	0.3446	0.208
Gannet	393	666	338	26/7	25.76	9.5	2	800	87.6	88.1	96.6	105.3	10.45	0.344	0.208
Gull	382	667	338	54/7	25.4	8.46	3	800	87.5	88.1	96.8	105.3	10.27	0.345	0.208
Flamingo	382	667	338	24/7	25.4	8.46	2	800	87.4	88.1	96.7	105.3	10.21	0.346	0.208
Scoter	397	636	322	30/7	25.88	11.1	2	800	91.9	92.3	101.4	110.4	10.70	0.342	0.207
Egret	396	636	322	30/19	25.88	11.1	2	780	91.9	92.3	101.4	110.4	10.70	0.342	0.207
Grosbeak	375	636	322	26/7	25.15	9.27	2	780	91.2	92.2	101.2	110.3	10.21	0.346	0.209
Goose	364	636	322	54/7	24.82	8.28	3	770	91.8	92.4	101.4	110.4	10.06	0.347	0.208
Rook	363	636	322	24/7	24.82	8.28	2	770	91.7	92.3	101.3	110.3	10.06	0.347	0.209
Kingbird	340	636	322	18/1	23.88	4.78	2	780	91.2	92.2	101.1	110.0	9.27	0.353	0.211
Swirl	331	636	322	36/1	23.62	3.38	3	780	91.3	92.4	101.3	110.3	9.20	0.353	0.212
Wood Duck	378	605	307	30/7	25.25	10.82	2	760	96.7	97.0	106.5	116.1	10.42	0.344	0.208
Teal	376	605	307	30/19	25.25	10.82	2	770	96.7	97.0	106.5	116.1	10.42	0.344	0.208
Squab	356	605	356	26/7	25.54	9.04	2	760	96.5	97.0	106.5	116.0	9.97	0.347	0.208
Peacock	346	605	307	24/7	24.21	8.08	2	760	96.4	97.0	106.4	115.9	9.72	0.349	0.210
Duck	347	606	307	54/7	24.21	8.08	3	750	96.3	97.0	106.3	115.8	9.81	0.349	0.210
Eagle	348	557	282	30/7	24.21	10.39	2	730	105.1	105.4	115.8	126.1	10.00	0.347	0.210
Dove	328	556	282	26/7	23.55	8.66	2	730	104.9	105.3	115.6	125.9	9.54	0.351	0.212
Parakeet	319	557	282	24/7	23.22	7.75	2	730	104.8	105.3	115.6	125.9	9.33	0.352	0.212
Osprey	298	556	282	18/1	22.33	4.47	2	740	104.4	105.2	115.4	125.7	8.66	0.358	0.214
Hen	298	477	242	30/7	22.43	9.6	2	670	122.6	122.9	134.9	147.0	9.27	0.353	0.214
Hawk	281	477	242	26/7	21.79	8.03	2	670	122.4	122.7	134.8	146.9	8.84	0.357	0.215
Flicker	273	477	273	24/7	21.49	7.16	2	670	122.2	122.7	134.7	146.8	8.63	0.358	0.216
Pelican	255	477	242	18/1	20.68	4.14	2	680	121.7	122.4	134.4	146.4	8.02	0.364	0.218
Lark	248	397	201	30/7	20.47	8.76	2	600	147.2	147.4	161.9	176.4	8.44	0.360	0.218
Ibis	234	397	201	26/7	19.89	7.32	2	590	146.9	147.2	161.7	176.1	8.08	0.363	0.220
Brant	228	398	201	24/7	19.61	6.53	2	590	146.7	147.1	161.6	176.1	7.89	0.365	0.221
Chickadee	213	397	201	18/1	18.87	3.78	2	590	146.1	146.7	161.0	175.4	7.32	0.371	0.222
Oriole	210	336	170	30/7	18.82	8.08	2	530	173.8	174.0	191.2	208.3	7.77	0.366	0.222

TABLE 4.9b (continued) Characteristics of Aluminum Cable Steel Reinforced Conductors (ACSR)

Code	Cross-Section Area			Stranding Al/Steel	Diameter			Approx. Current- Carrying Capacity (Amp.)*	Resistance (mΩ/km)				GMR (mm)	60-Hz Reactances (Dm = 1m)	
	Total (mm ²)	Aluminum			Conductor (mm)	Core (mm)	Layers		DC 25°C	AC (60 Hz)				X _L (Ω/km)	X _C (MΩ/km)
		(kcmil)	(mm ²)							25°C	50°C	75°C			
Linnet	198	336	170	26/7	18.29	6.73	2	530	173.6	173.8	190.9	208.1	7.41	0.370	0.224
Widgeon	193	336	170	24/7	18.03	6.02	2	530	173.4	173.7	190.8	207.9	7.5	0.371	0.225
Merlin	180	336	170	18/1	16.46	3.48	2	530	173.0	173.1	190.1	207.1	6.74	0.377	0.220
Piper	187	300	152	30/7	17.78	7.62	2	500	195.0	195.1	214.4	233.6	7.35	0.370	0.225
Ostrich	177	300	152	26/7	17.27	6.38	2	490	194.5	194.8	214.0	233.1	7.01	0.374	0.227
Gadwall	172	300	152	24/7	17.04	5.69	2	490	194.5	194.8	213.9	233.1	6.86	0.376	0.227
Phoebe	160	300	152	18/1	16.41	3.28	2	490	193.5	194.0	213.1	232.1	6.37	0.381	0.229
Junco	167	267	135	30/7	16.76	7.19	2	570	219.2	219.4	241.1	262.6	6.92	0.375	0.228
Partridge	157	267	135	26/7	16.31	5.99	2	460	218.6	218.9	240.5	262.0	6.61	0.378	0.229
Waxwing	143	267	135	18/1	15.47	3.1	2	460	217.8	218.1	239.7	261.1	6.00	0.386	0.232

* For conductor temperature at 75°C, air at 25°C, wind speed at 1.4 mi/hr, frequency at 60 Hz.

Source: *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, 2nd ed., Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1987. With permission.

TABLE 4.10a Characteristics of All-Aluminum Conductors (AAC)

Code	Cross-Section Area		Stranding	Diameter (mm)	Layers	Approx. Current-Carrying Capacity (Amp.)*	Resistance (mΩ/km)			60-Hz Reactances (Dm = 1 m)			
	(mm ²)	kcmil or AWG					DC 25°C	AC (60 Hz) 25°C	50°C	75°C	GMR (mm)	X _s (Ω/km)	X _c (MΩ/km)
Coreopsis	806.2	1591	61	36.93	4	1380	36.5	39.5	42.9	46.3	14.26	0.320	0.190
Gladiolus	765.8	1511	61	35.99	4	1340	38.4	41.3	44.9	48.5	13.90	0.322	0.192
Caranation	725.4	1432	61	35.03	4	1300	40.5	43.3	47.1	50.9	13.53	0.324	0.193
Columbine	865.3	1352	61	34.04	4	1250	42.9	45.6	49.6	53.6	13.14	0.327	0.196
Narcissus	644.5	1272	61	33.02	4	1200	45.5	48.1	52.5	46.7	12.74	0.329	0.194
Hawthorn	604.1	1192	61	31.95	4	1160	48.7	51.0	55.6	60.3	12.34	0.331	0.197
Marigold	564.2	1113	61	30.89	4	1110	52.1	54.3	59.3	64.3	11.92	0.334	0.199
Larkspur	524	1034	61	29.77	4	1060	56.1	58.2	63.6	69.0	11.49	0.337	0.201
Bluebell	524.1	1034	37	29.71	3	1060	56.1	58.2	63.5	68.9	11.40	0.337	0.201
Goldenrod	483.7	955	61	28.6	4	1010	60.8	62.7	68.6	74.4	11.03	0.340	0.203
Magnolia	483.6	954	37	28.55	3	1010	60.8	62.7	68.6	74.5	10.97	0.340	0.203
Crocus	443.6	875	61	27.38	4	950	66.3	68.1	74.5	80.9	10.58	0.343	0.205
Anemone	443.5	875	37	27.36	3	950	66.3	68.1	74.5	80.9	10.49	0.344	0.205
Lilac	403.1	796	61	26.11	4	900	73.0	74.6	81.7	88.6	10.09	0.347	0.207
Arbutus	402.9	795	37	26.06	3	900	73.0	74.6	81.7	88.6	10.00	0.347	0.207
Nasturtium	362.5	715	61	24.76	4	840	81.2	82.6	90.5	98.4	9.57	0.351	0.209
Violet	362.8	716	37	24.74	3	840	81.1	82.5	90.4	98.3	9.48	0.351	0.209
Orchid	322.2	636	37	23.32	3	780	91.3	92.6	101.5	110.4	8.96	0.356	0.212
Mistletoe	281.8	556	37	21.79	3	730	104.4	105.5	115.8	126.0	8.38	0.361	0.215
Dahlia	281.8	556	19	21.72	2	730	104.4	105.5	115.8	125.9	8.23	0.362	0.216
Syringa	241.5	477	37	20.19	3	670	121.8	122.7	134.7	146.7	7.74	0.367	0.219
Cosmos	241.9	477	19	20.14	2	670	121.6	122.6	134.5	146.5	7.62	0.368	0.219
Canna	201.6	398	19	18.36	2	600	145.9	146.7	161.1	175.5	6.95	0.376	0.224
Tulip	170.6	337	19	16.92	2	530	172.5	173.2	190.1	207.1	6.40	0.381	0.228
Laurel	135.2	267	19	15.06	2	460	217.6	218.1	239.6	261.0	5.70	0.390	0.233
Daisy	135.3	267	7	14.88	1	460	217.5	218	239.4	260.8	5.39	0.394	0.233
Oxlip	107.3	212 or (4/0)	7	13.26	1	340	274.3	274.7	301.7	328.8	4.82	0.402	0.239
Phlox	85	168 or (3/0)	7	11.79	1	300	346.4	346.4	380.6	414.7	4.27	0.411	0.245
Aster	67.5	133 or (2/0)	7	10.52	1	270	436.1	439.5	479.4	522.5	3.81	0.40	0.25
Poppy	53.5	106 or (1/0)	7	9.35	1	230	550	550.2	604.5	658.8	3.38	0.429	0.256
Pansy	42.4	#1 AWG	7	8.33	1	200	694.2	694.2	763.2	831.6	3.02	0.438	0.261
Iris	33.6	#2 AWG	7	7.42	1	180	874.5	874.5	960.8	1047.9	2.68	0.446	0.267
Rose	21.1	#3 AWG	7	5.89	1	160	1391.5	1391.5	1528.9	1666.3	2.13	0.464	0.278
Peachbell	13.3	#4 AWG	7	4.67	1	140	2214.4	2214.4	2443.2	2652	1.71	0.481	0.289

* For conductor at 75°C, air at 25°C, wind speed at 1.4 mi/hr, frequency at 60 Hz.
 Source: Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 2nd ed., Electronic Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1987. With permission.

2.2.2 Réseau de distribution

Le réseau de distribution se subdivise en deux catégories :

- le réseau de distribution à moyenne tension (entre 2,4 kV et 69 kV);
- le réseau de distribution à basse tension (entre 120 V et 600 V).

Réseau de distribution à moyenne tension (entre 2,4 kV et 69 kV)

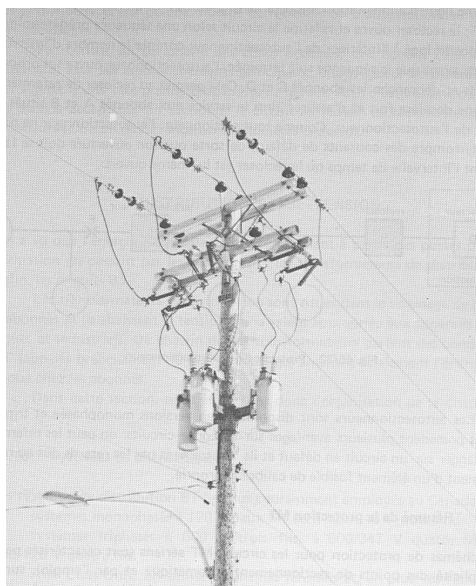
Sur le réseau de distribution à moyenne tension, les câbles peuvent être

- aériens;
- enfouis.

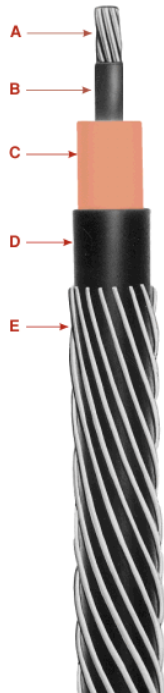
Il est à noter que, contrairement au réseau de transport, les trois phases du réseau de distribution ne sont pas systématiquement regroupées. Dans le cas du réseau résidentiel, par exemple, il est courant que chacune des trois phases alimente un quartier d'habitation. Dans ce cas, la distance entre les lignes de distribution (dont la tension habituelle est 13,8 kV) séparant chacune des phases peut atteindre plusieurs kilomètres et dépend de la configuration du quartier à desservir et de sa consommation électrique.

Il est à noter qu'il est tout aussi fréquent que les trois phases du réseau de distribution moyenne tension soient regroupées afin d'alimenter des industries qui exigent l'utilisation d'une tension triphasée afin d'alimenter des charges rotatives ou d'autres types de charges triphasées.

Tel que l'illustre la figure suivante, lorsque les conducteurs sont aériens, on utilise des câbles nus, i.e. sans isolants de mêmes types que ceux identifiés dans le tableau de la section précédente.



Lorsqu'ils sont enfouis, comme c'est le cas dans certaines zones résidentielles, les conducteurs moyenne et basse tension doivent être isolés électriquement par une gaine. La figure suivante illustre un exemple de câble de distribution de 15 kV utilisé pour l'enfouissement direct ou la mise en conduits.



- A Conducteur d'aluminium multi-brins
 - B Écran protecteur de caoutchouc (protection mécanique)
 - C Isolation diélectrique (épaisseur 5,6 mm / 15 kV)
 - D Écran protecteur de caoutchouc (protection mécanique)
 - E Spirale de cuivre (mise à la terre) (Optionnel)
- Température d'opération = 105 degrés C continu

Le tableau suivant illustre les divers calibres de câbles sous-terrains pour l'exemple illustré ci-haut.

Calibre de câble (AWG)	Nombre de brins d'Al	Diamètre extérieur (pouces)	Nombre de brins de cuivre extérieurs	Poids (lbs/1000')	Capacité (enfouiss. direct) (A)	Capacité (en conduit) (A)
2	7	0.98	10 x 14	481	170	120
1	19	1.02	14 x 14	555	195	135
1/0	19	1.06	16 x 14	635	220	155
2/0	19	1.13	14 x 12	746	250	175
3/0	19	1.18	16 x 12	867	285	200
4/0	19	1.28	14 x 10	1035	325	230

Dans la première colonne, les calibres des câbles sont exprimés en AWG ("American Wire Gage"). Le AWG est la nomenclature américaine qui caractérise les câbles électriques par leur section. Selon le standard AWG, les sections de câbles conducteurs sont répertoriés de la plus petite section (calibre AWG 40) à la plus grosse section (calibre AWG 0000 ou AWG 4/0), tel que l'illustre le tableau suivant.

Calibre (AWG)	Version multi-brins		Câble nu		Résistance mΩ/m (25°C)		
	No. de fils	Diamètre chaque fil (mm)	Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Cuivre		Aluminium
					Nu	Étamé	
40	—	—	0,08	0.0049	3610		
39	—	—	0,09	0.0062	2820		
38	—	—	0,10	0.0081	2170		
37	—	—	0,11	0.0103	1710		
36	—	—	0,13	0.0127	1390		
35	—	—	0,14	0.0159	1110		
34	—	—	0,16	0.0201	873		
33	—	—	0,18	0.0255	689		
32	—	—	0,20	0.0324	541		
31	—	—	0,23	0.0401	440		
30	—	—	0,25	0.0507	348		
29	—	—	0,29	0.065	272		
28	—	—	0,32	0.080	218		
27	—	—	0,36	0.102	172		
26	—	—	0,40	0.128	137		
25	—	—	0,45	0.162	108		
24	—	—	0,51	0.205	86,0		
23	—	—	0,57	0.259	67,9		
22	—	—	0,64	0.324	54,1		
21	—	—	0,72	0.411	42,6		
20	—	—	0,81	0.517	33,8		
19	—	—	0,91	0.654	26,9		
18	—	—	1,02	0.821	21,4	22,271	35,096
17	—	—	1,15	1,04	16,9		
16	—	—	1,29	1,31	13,448	13,973	22,042
15	—	—	1,45	1,65	10,6		
14	—	—	1,63	2,08	8,43	8,790	13,842
13	—	—	1,83	2,63	6,69		
12	—	—	2,05	3,31	5,31	5,510	8,725
11	—	—	2,30	4,17	4,23		
10	—	—	2,59	5,27	3,34	3,477	5,478
9	—	—	2,89	6,59	2,67		
8	—	—	3,25	8,30	2,10	2,162	3,444
7	—	—	3,66	10,5	1,67		
6	7	1,55	4,11	13,30	1,35	1,401	2,211
5	—	—	4,62	16,8	1,05		
4	7	1,96	5,18	21,10	0,850	0,882	1,391
3	7	2,20	5,83	26,6	0,672	0,699	1,102
2	7	2,47	6,54	33,6	0,531	0,554	0,872
1	19	1,69	7,35	42,4	0,423	0,440	0,692
0	19	1,89			0,335	0,348	0,551
00	19	2,13			0,266	0,277	0,436
000	19	2,39			0,211	0,219	0,344
0000	19	2,68			0,167	0,172	0,274

Pour des sections de conducteurs supérieures à 107 mm², on n'utilise plus la nomenclature AWG, mais plutôt la nomenclature MCM, tel qu'indiqué au tableau suivant.

Calibre (MCM)	Version multi-brins		Conducteur nu		Résistance mΩ/m (25°C)		
	No. de fils	Diamètre chaque fil (mm)	Diamètre (mm)	Section (mm ²)	Cuivre		Aluminium
					Nu	Étamé	
250	37	2,09	14,61	167,74	0,141	0,147	0,232
300	37	2,29	16,00	201,29	0,118	0,123	0,194
350	37	2,47	17,30	234,84	0,101	0,105	0,166
400	37	2,64	18,49	268,39	0,089	0,091	0,145
500	37	2,95	20,65	334,84	0,071	0,073	0,116
600	61	2,52	22,68	403,87	0,059	0,061	0,097
700	61	2,72	24,49	470,97	0,051	0,052	0,083
750	61	2,82	25,35	504,52	0,047	0,049	0,077
800	61	2,91	26,16	537,42	0,044	0,046	0,072
900	61	3,09	27,69	601,93	0,039	0,040	0,065
1000	61	3,25	29,21	670,32	0,035	0,036	0,058
1250	91	2,98	32,74	841,93	0,028	0,029	0,047
1500	91	3,26	28,96	1007,09	0,024	0,024	0,039
1750	127	2,98	38,76	1180,00	0,020	0,021	0,033
2000	127	3,19	41,40	1346,45	0,018	0,018	0,029

Les nomenclatures AWG et MCM sont utilisées aussi bien pour les conducteurs du réseau de distribution, que pour les conducteurs industriels et les bobinages de machines électriques et de transformateurs, comme nous le verrons à la section 2.3.

Dans les deux tableaux précédents, la deuxième colonne spécifie le nombre de fils mono-brins par câble lorsque le câble est un câble en toron (ou multi-brins). Pour des câbles de forte section, les conducteurs en toron sont préférés aux câbles mono-brins pour leur plus grande souplesse. La souplesse des câbles est un facteur mécanique important lorsque les câbles doivent être enroulés, déroulés et courbés lors de l'installation.

Il est à noter, cependant, qu'il peut arriver que des câbles de fort calibre (AWG 6 par exemple) soient fabriqués à partir d'un seul fil, comme c'est parfois le cas dans les machines électriques. Ils sont alors beaucoup moins souples, mais offrent une plus grande concentration de matériau conducteur pour une même section de câble et par conséquent une plus faible résistance électrique.

Réseau de distribution à basse tension (entre 120 V et 600 V)

Le réseau de distribution à basse tension (entre 120 V et 600 V) est celui qui est en contact avec les activités humaines des résidences, industries, commerces. Ces conducteurs sont donc toujours recouverts d'une gaine isolante. Comme dans le cas du réseau de distribution à moyenne tension, ces conducteurs peuvent être aériens ou enfouis.

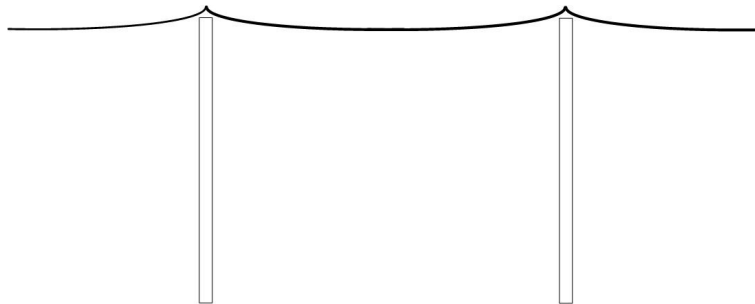
Étant donné que les voltages en jeu sont plus faibles que dans le cas du réseau à moyenne tension, les courants y sont donc plus forts. Par conséquent, on utilise le plus souvent des conducteurs ronds en cuivre. Le cuivre est préféré à l'aluminium pour sa plus faible résistivité électrique.

2.2.3 Propriétés mécaniques des conducteurs

À la section 2.2.1, il a été question des câbles ACSR et AAC pour le réseau de transport. L'utilisation d'acier dans les câbles ACSR est justifiable par leur résistance mécanique à la traction, qui est nettement supérieure à celles de l'aluminium et du cuivre. Le tableau suivant illustre des données typiques pour l'acier, le cuivre et l'aluminium. Il est à noter que, pour l'acier, ces valeurs varieront en fonction du pourcentage de carbone contenu dans le matériau.

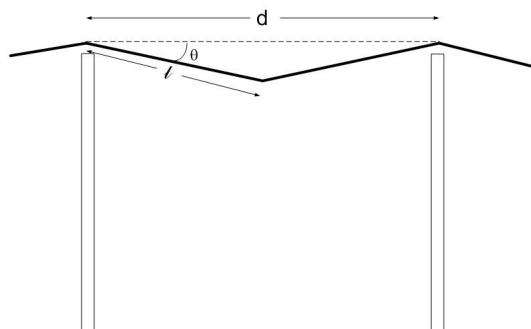
	Acier	Cu	Al
Résistance à la traction (rupture)	1300 MPa	470 MPa	62 MPa
Limite élastique	1170 MPa	410 MPa	21 MPa
Masse spécifique, 20 °C	7930 kg/m ³	8930 kg/m ³	2699 kg/m ³
Résistivité électrique, 20 °C	45,2 μΩ-cm	1,67 μΩ-cm	2,66 μΩ-cm

Soit une ligne de transport aérienne constituée d'un seul câble tel qu'illustré à la figure suivante.



Afin de faciliter l'analyse mathématique des forces, on suppose que chacun des câbles suit une trajectoire rectiligne formant un angle θ avec l'horizontal, tel qu'illustré à la figure suivante.

La distance entre deux pylônes est d et la longueur des câbles entre le pylône et le point le plus bas de la ligne est l .



La masse du câble entre le pylône et le point verticalement le plus bas de la ligne est

$$m_{cable} = \rho_m \pi r_{cable}^2 l$$

où ρ_m est la masse volumique du matériau conducteur;
 r_{cable} est le rayon du câble.

La force de traction sur le câble au point le plus haut du câble sera de

$$F_{cable(1côté)} = m_{cable} g \sin \theta$$

dans la direction parallèle au câble.

Sachant que

$$l = \frac{d}{2 \cos \theta}$$

on obtient la force de traction $(F/A)_{cable}$ par unité de surface

$$(F/A)_{cable1côté} = \rho_m \frac{d}{2} g \tan \theta$$

Sur un pylône soutenant un câble sur deux côtés, comme c'est généralement le cas, cette traction sera appliquée de chaque côté et la traction résultante sera deux fois plus grande.

$$(F/A)_{cable2côtés} = \rho_m d g \tan \theta$$

Exemples,

On pose une ligne AAC (tout en aluminium) où la distance entre les pylônes est de 30 mètres et où la ligne pend avec un angle de 10 degrés.

On obtient une force surfacique de

$$\begin{aligned} (F/A)_{cable2côtés} &= (2699 \text{ kg} / \text{m}^3)(10 \text{ m})(9,8 \text{ ms}^{-2}) \tan(10^\circ) \\ &= 46,6 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Dans un tel cas, il n'y a donc aucun problème à utiliser une ligne AAC. Même avec une charge de glace additionnelle, la force de traction surfacique sera bien en dessous de la limite élastique de l'aluminium, qui est 21 MPa.

On pose maintenant une ligne AAC où la distance entre les pylônes est de 400 mètres et où la ligne pend avec un angle de 30 degrés.

On obtient une force surfacique de

$$\begin{aligned} (F/A)_{\text{cable 2 côtés}} &= (2699 \text{ kg/m}^3)(400 \text{ m})(9,8 \text{ ms}^{-2}) \tan(30^\circ) \\ &= 6,1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Cela ne laisse qu'un facteur de sécurité de 3, ce qui est insuffisant si on tient compte des charges de glace additionnelles qui peuvent s'ajouter en hiver. Dans ce cas, il sera pertinent d'utiliser un câble ACSR avec un cœur en acier.

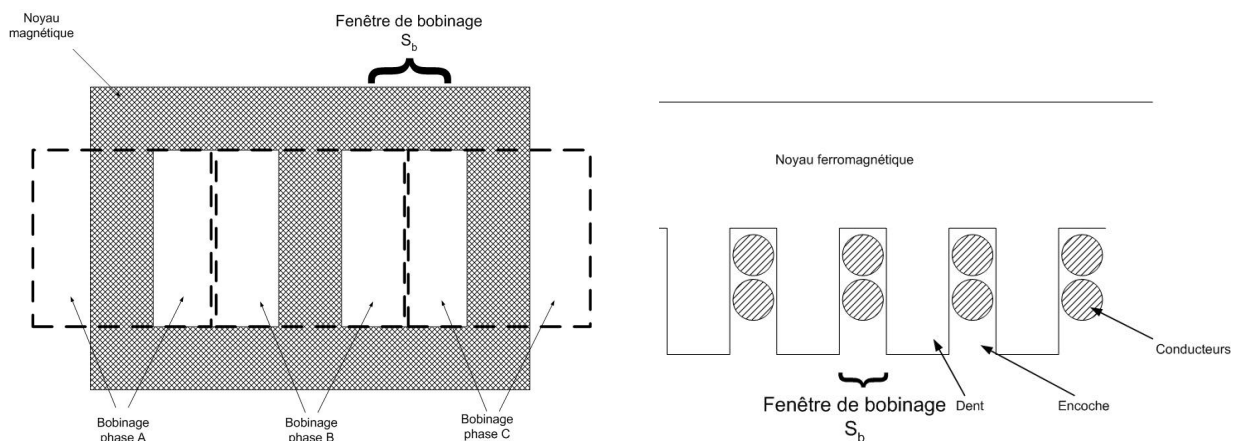
2.3 Matériaux conducteurs dans les transformateurs et les machines électriques

Les machines électriques et transformateurs comportent des enroulements faits de matériaux conducteurs de courant électrique. Ces conducteurs sont cependant assujettis à des contraintes de dimensionnement qui sont différentes de celles utilisées pour les conducteurs des lignes de transport et de distribution.

Les contraintes principales sont les suivantes :

- section de bobinage limitée par la "fenêtre de bobinage";
- grande proximité entre les noyaux ferromagnétiques et les conducteurs.

Par "fenêtre de bobinage", on entend une surface délimitée par des parties magnétiques, où les conducteurs peuvent être disposés. La figure ci-dessous illustre la fenêtre de bobinage S_b (unités m^2) que l'on rencontre typiquement dans les transformateurs et les machines électriques.



Afin de réduire les pertes ohmiques, il est souhaitable de maximiser la section des conducteurs et par conséquent de remplir au maximum la fenêtre de bobinage S_b avec les conducteurs. Pour ce faire, l'épaisseur de la gaine de chaque conducteur doit être la plus mince possible. L'utilisation d'isolant organique, du type vernis, permet de réduire l'épaisseur de l'isolation à moins de 1 mm, tel que l'illustre la figure suivante.



On définit le facteur de remplissage α du bobinage comme étant :

$$\alpha = \frac{nS_{Cu}}{S_b}$$

où S_{Cu} = Section d'un fil de cuivre
 n = nombre de conducteur traversant la fenêtre de bobinage

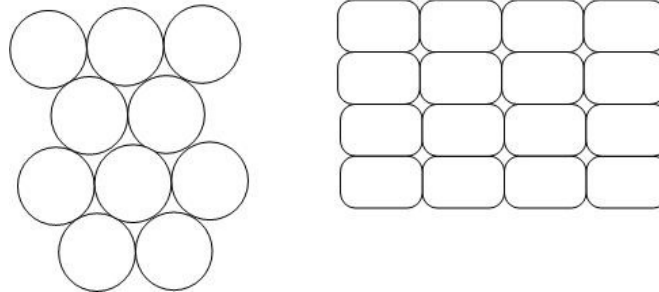
Une faible épaisseur d'isolation permet donc d'augmenter le facteur de remplissage α du bobinage et donc de faire une utilisation maximale de la fenêtre de bobinage S_b .

2.3.1 Calibres et types de conducteurs

Pour les fils vernis, on utilise la même nomenclature AWG que pour les fils conventionnels. Le tableau suivant illustre les principales dimensions et caractéristiques des fils vernis utilisés dans les machines électriques et les transformateurs. Dans ce tableau, l'isolant utilisé est un isolant organique (un vernis) de type "Heavy build", qui est commun pour les machines électriques.

AWG	Propriétés du fil rond en cuivre sans isolation									Propriétés du fil rond avec isolation "Heavy Build"					
	Diamètre à nu (mm)			Section (mm ²)	Masse (g/km)	Résistance @ 20°C (ohms/km)			ohms/g	Épaisseur minimale d'isolation (mm)	Diamètre total (mm)			Masse (m/g)	ohms/g
	Min.	Nom.	Max.	Nom.	Nom.	Min.Dia.	Nom.Dia.	Max.Dia.	Nom.		Min.	Nom.	Max.	Nom.	Nom.
0	8,171	8,252	8,334	53,456	475298	0,3286	0,3222	0,3159	0	0,052	8,275	8,367	8,458	0,00209	0
1	7,275	7,348	7,422	42,383	376845	0,4147	0,4064	0,3984	0	0,051	7,376	7,457	7,544	0,00264	0
2	6,477	6,543	6,609	33,603	298784	0,5231	0,5126	0,5024	0	0,050	6,576	6,652	6,728	0,00332	0
3	5,768	5,827	5,885	26,649	236948	0,6595	0,6464	0,6336	0	0,048	5,865	5,933	6,002	0,00419	0
4	5,138	5,189	5,240	21,136	187933	0,8311	0,815	0,7992	0	0,047	5,232	5,281	5,329	0,00529	0
5	4,575	4,620	4,666	16,755	148981	1,048	1,028	1,008	0	0,046	4,666	4,709	4,755	0,00667	0
6	4,072	4,115	4,155	13,290	118167	1,322	1,296	1,27	0,00001	0,044	4,163	4,201	4,244	0,0084	0,00001
7	3,630	3,665	3,701	10,544	93756	1,665	1,633	1,602	0,00001	0,043	3,713	3,752	3,787	0,01058	0,00001
8	3,231	3,264	3,297	8,362	74348	2,102	2,06	2,019	0,00002	0,042	3,315	3,348	3,383	0,01334	0,00002
9	2,878	2,906	2,934	6,627	58927	2,649	2,599	2,549	0,00004	0,041	2,959	2,990	3,020	0,01682	0,00004
10	2,563	2,588	2,614	5,258	46753	3,341	3,276	3,212	0,00007	0,039	2,642	2,667	2,695	0,02118	0,00006
11	2,281	2,304	2,327	4,166	37040	4,218	4,135	4,054	0,00011	0,038	2,357	2,383	2,408	0,02671	0,00011
12	2,032	2,052	2,073	3,306	29396	5,315	5,21	5,108	0,00017	0,037	2,106	2,129	2,151	0,03363	0,00017
13	1,811	1,829	1,847	2,625	23341	6,691	6,561	6,436	0,00028	0,036	1,882	1,902	1,923	0,04231	0,00027
14	1,613	1,628	1,643	2,080	18500	8,436	8,279	8,126	0,00044	0,041	1,694	1,713	1,732	0,05318	0,00044
15	1,435	1,450	1,466	1,651	14680	10,65	10,43	10,21	0,00071	0,038	1,511	1,529	1,547	0,06698	0,00069
16	1,278	1,290	1,303	1,307	11619	13,44	13,18	12,92	0,00113	0,037	1,351	1,368	1,384	0,08447	0,00111
17	1,138	1,151	1,163	1,039	9239	16,94	16,57	16,21	0,00179	0,036	1,209	1,224	1,240	0,106	0,00175
18	1,013	1,024	1,034	0,822	7312	21,36	20,94	20,53	0,00286	0,033	1,080	1,095	1,110	0,1338	0,0028
19	0,901	0,912	0,922	0,652	5803	26,99	26,39	25,81	0,00454	0,032	0,965	0,979	0,993	0,1684	0,00444
20	0,805	0,813	0,820	0,519	4610	33,85	33,21	32,6	0,0072	0,029	0,864	0,877	0,892	0,2115	0,00702

Au tableau précédent, le fil de cuivre qui y est présenté est rond. Il est cependant assez commun dans les transformateurs et les machines d'utiliser des fils de cuivre vernis de forme carrée. La figure suivante illustre des empilements de conducteurs de section ronde et carrée.



Les conducteurs ronds sont plus malléables que les conducteurs carrés. Ils se courbent plus aisément. Par contre, l'espace d'air entre chacun des conducteurs empilés est plus grand pour les conducteurs ronds. De plus, les conducteurs ronds situés sur une couche supérieure risquent plus aisément de se glisser entre deux conducteurs d'une couche inférieure, ce qui contribue à rendre le bobinage irrégulier. En somme, les conducteurs carrés permettent d'obtenir un facteur de remplissage α de l'ordre 0,6 – 0,7 et donc d'obtenir une plus grande section de cuivre à l'intérieur de la fenêtre de bobinage S_b que pour des conducteurs ronds dont le facteur de remplissage α se situe habituellement entre 0,4 et 0,6. Il en résulte des pertes Joule inférieures et une meilleure évacuation de ces pertes avec des conducteurs carrés au détriment d'un coût de fabrication plus élevé que pour des conducteurs ronds.

Le tableau suivant illustre les principales caractéristiques géométriques des conducteurs carrés usuels.

AWG	Propriétés du fil carré en cuivre								Dimensions du fil carré avec isolation "Heavy Build"				Dimensions du fil carré avec isolation en Dacron double		Dimensions du fil carré avec isolation en Dacron simple sur isolation Heavy Build		Dimensions du fil carré avec isolation en Dacron doublé sur isolation Heavy Build	
	Diamètre du fil nu (mm)		Rayon de coin	Section (mm ²)		Masse (kg/km)		Résistance @ 20 °C (ohms/km)		Ohms /kg	Épaisseur minimale isolant (mm)		Diamètre total (mm)		Épaisseur minimale isolant (mm)		Diam. total (mm)	
	Nom.	Max.	Nom.	Nom.	Nom.	Nom.	Nom.	Max.	Nom.		Nom.	Max.						
0	8,25	8,33	1,02	52,760	598,2	0,26	0,25	0,0004	0,0762	8,354	8,461	0,305	8,738	0,229	8,661	0,381	8,865	
1	7,35	7,42	1,02	41,687	472,8	0,32	0,32	0,0007	0,0762	7,450	7,549	0,305	7,823	0,229	7,747	0,381	7,950	
2	6,54	6,61	1,02	32,908	373,2	0,41	0,40	0,0011	0,0762	6,645	6,736	0,305	7,010	0,203	6,909	0,381	7,137	
3	5,83	5,89	1,02	25,954	294,3	0,52	0,51	0,0018	0,0762	5,928	6,012	0,305	6,299	0,203	6,198	0,381	6,426	
4	5,19	5,24	1,02	20,441	231,8	0,66	0,65	0,0029	0,0762	5,291	5,367	0,305	5,639	0,203	5,563	0,381	5,766	
5	4,62	4,67	1,02	16,061	182,1	0,84	0,83	0,0046	0,0762	4,722	4,793	0,279	5,055	0,203	4,978	0,356	5,182	
6	4,11	4,16	0,81	12,845	145,7	1,05	1,03	0,0072	0,0762	4,216	4,282	0,279	4,547	0,203	4,445	0,356	4,674	
7	3,67	3,70	0,81	10,099	114,6	1,34	1,31	0,0117	0,0762	3,767	3,828	0,254	4,064	0,203	3,988	0,330	4,191	
8	3,26	3,30	0,81	7,917	89,8	1,71	1,67	0,0190	0,0762	3,366	3,424	0,229	3,632	0,203	3,581	0,305	3,759	
9	2,91	2,93	0,66	6,334	71,8	2,14	2,09	0,0297	0,0762	3,007	3,061	0,229	3,277	0,203	3,226	0,305	3,404	
10	2,59	2,61	0,66	4,965	56,3	2,73	2,67	0,0484	0,0762	2,690	2,741	0,203	2,921	0,178	2,870	0,279	3,048	
11	2,30	2,33	0,51	3,992	45,3	3,39	3,31	0,0748	0,0762	2,405	2,456	0,203	2,616	0,178	2,591	0,279	2,743	
12	2,05	2,08	0,51	3,133	35,5	4,32	4,21	0,1215	0,0762	2,154	2,205	0,203	2,362	0,178	2,337	0,279	2,489	
13	1,83	1,85	0,41	2,514	28,5	5,38	5,23	0,1887	0,0762	1,930	1,981	0,203	2,134	0,178	2,134	0,279	2,261	
14	1,63	1,65	0,41	1,969	22,4	6,87	6,65	0,3075	0,0762	1,730	1,781	0,203	1,930	0,178	1,930	0,279	2,057	

2.3.2 Classes d'isolation

Objectif de l'isolation des conducteurs :

- empêcher la circulation de courant électrique entre les conducteurs de voltage différents;
- empêcher la circulation de courant électrique entre les conducteurs et les parties en acier.

Facteurs déterminant le choix du matériau isolant :

- température maximale d'opération;
- voltage d'opération;
- courant d'opération.

Température d'opération

La norme internationale IEC-85 définit les classes d'isolation électriques pour des conducteurs selon leur température maximale d'opération. Le tableau suivant fait la liste des codes utilisés en fonction de leur température correspondante.

<i>Classe (IEC-85)</i>	<i>Température maximale d'opération (°C)</i>
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

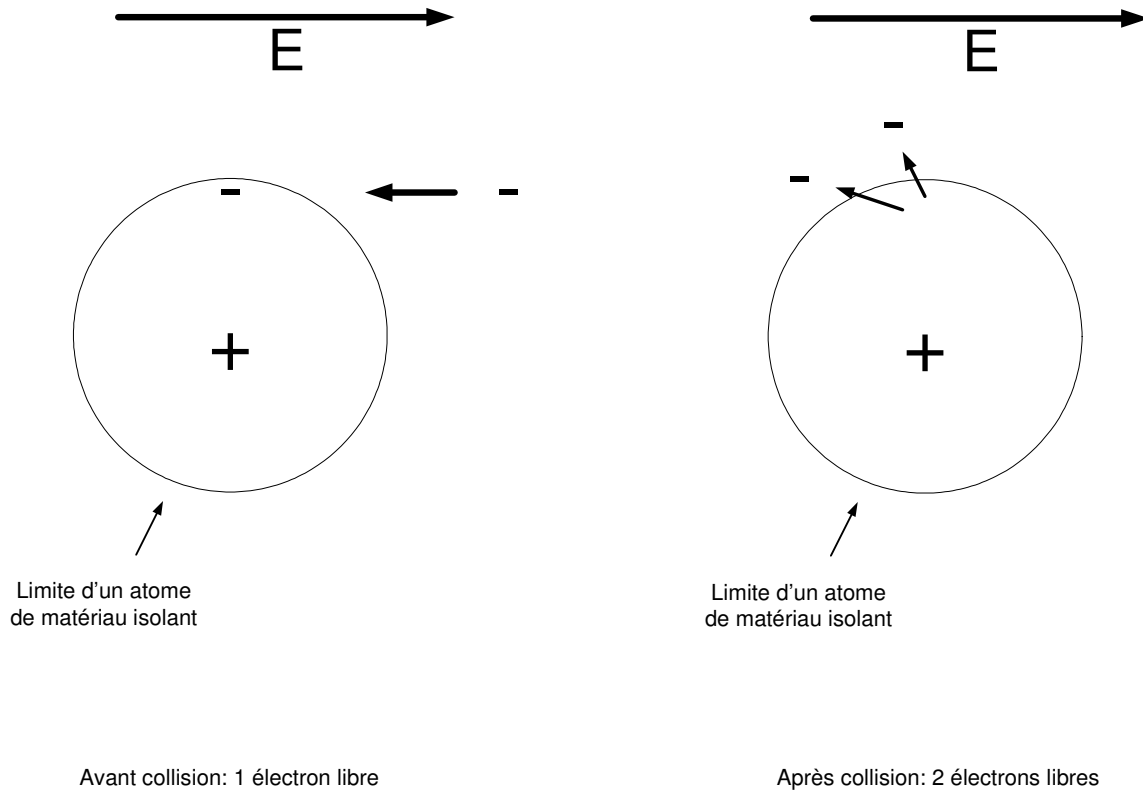
Voltage d'opération et matériaux isolants

Le voltage d'opération des machines électriques et des transformateurs est un facteur déterminant dans le choix de la méthode d'isolation des conducteurs ainsi que des matériaux isolants utilisés.

La *rigidité diélectrique* d'un matériau détermine la différence de potentielle maximale qu'on peut appliquer sur un matériau isolant entre deux points distants de 1 mm avant qu'il n'y ait *claquage*.

Claquage : phénomène par lequel un matériau isolant devient conducteur électrique. Le claquage survient lorsque les collisions entre électrons libres et électrons de valence du matériau sont suffisamment violentes pour ioniser les atomes tout en maintenant les électrons libres dans leur état de conduction. Une réaction en chaîne se produit entraînant un échauffement et une dégradation rapide du matériau.

La figure suivante illustre le phénomène de claquage.



Un matériau possédant une bonne rigidité diélectrique est donc souhaitable afin de minimiser l'épaisseur de matériau isolant requis. Le tableau suivant illustre les propriétés de divers matériaux isolants.

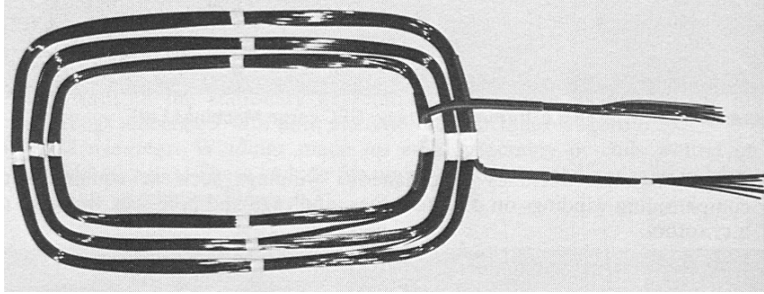
	<i>Matériau</i>	<i>Rigidité diélectrique (kV/mm)</i>	<i>Température maximale d'opération (°C)</i>
Vernis			
	Polytetrafluoroéthylène (PTFE)	20 – 28	200
	Polyester	16 - 20	155
	Polyimide	120 - 160	200
	Epoxy	12 - 24	155
	Silicone	6 - 16	180
	Polyvinyle acétal		105
	Polyurethane		130
Rubans			
	Film de polyester	80 - 120	Classe B
	Tissu de fibre de verre tissé / adhésif de silicone	28 - 36	Classe H
	Film de polyimide / adhésif de silicone	120 - 160	Classe H
	Film de polyimide / adhésif en acrylique	120 - 160	Classe F
	Film de Polytetrafluoroéthylène (PTFE) / adhésif de silicone	20 - 28	Classe H
	PVC / adhésif de caoutchouc	18 - 20	Classe Y
	Papier Aramid	20 - 32	Classe H
	Papier Mica / adhésif en époxy	25 - 70	Classe F

Tel que mentionné plus haut, le type de matériau utilisé dans l'isolation des conducteurs dépend en grande partie du voltage d'opération utilisé dans l'application.

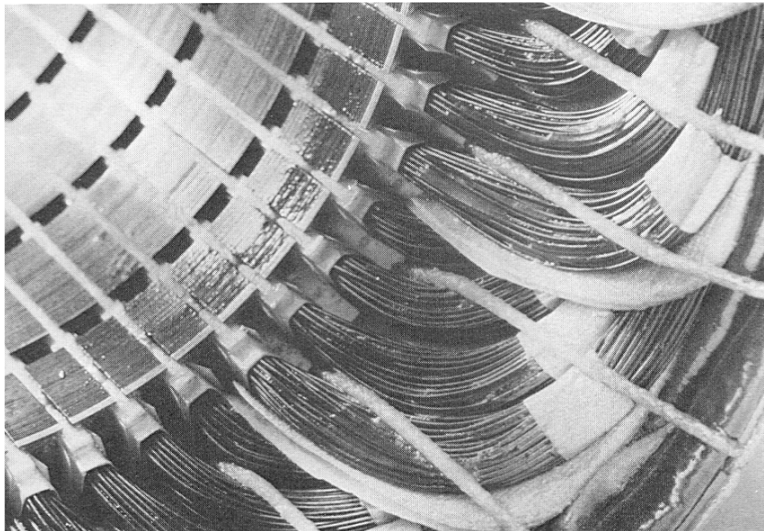
Isolants pour machines et transformateurs bas voltage

Dans les applications bas voltage (inférieur à 1 kV efficace), il est généralement suffisant d'utiliser les vernis seuls pour bien isoler électriquement les conducteurs. Dans ces applications, on choisit habituellement une épaisseur de vernis permettant de maintenir le champ électrique à des valeurs inférieures à 1 kV/mm entre les conducteurs.

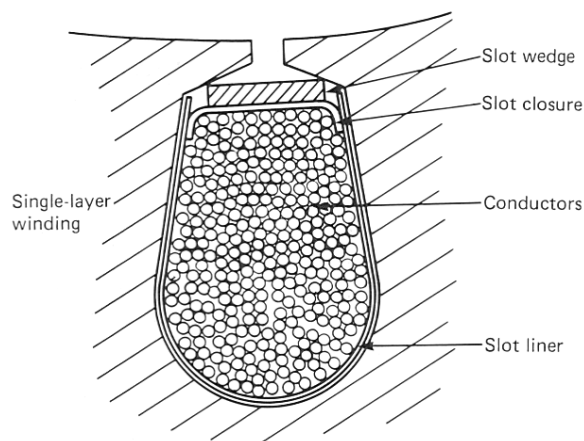
Dans le cas des machines électriques, on utilisera des enroulements en bobines. Ces bobines seront pré enroulées tel que l'illustre la figure suivante,



et seront ensuite insérées à l'intérieur des encoches du stator, tel qu'illustré à la figure suivante.



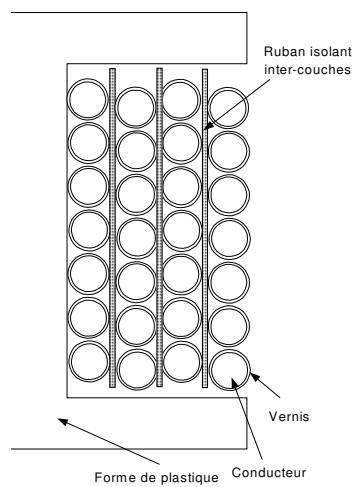
Dans le cas des enroulements en bobine, les conducteurs sont insérés manuellement un à un à l'intérieur de chacune des encoches du stator. Il est donc possible dans ce cas, d'utiliser des encoches presque fermées. La figure suivante illustre une encoche d'un stator après insertion des conducteurs.



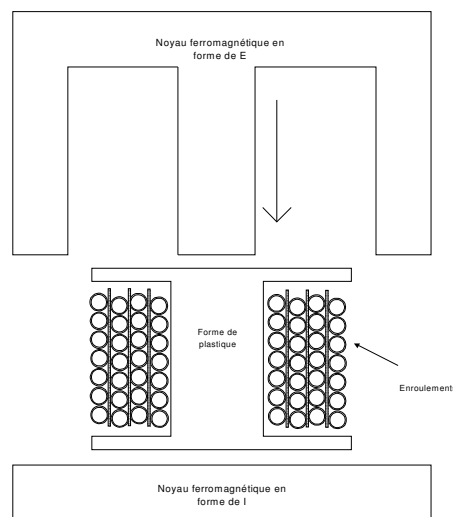
Tel qu'indiqué à la figure ci-haut, l'isolation entre les conducteurs et le noyau magnétique du stator n'est pas assurée par le vernis, mais plutôt par un feuillard de plastique flexible épousant la forme de l'encoche. Il est à noter que le calcul du facteur de remplissage de l'encoche doit inclure tous les éléments d'isolation: feuillard, vernis et air entre les conducteurs.

En ce qui concerne les transformateurs de bas voltage, la méthode de fabrication consiste à enrouler le primaire autour d'une forme de plastique isolant, tel que l'illustre la figure suivante.

Chacune des couches de bobinage est isolée de la précédente par un ruban isolant, tel que l'illustre la figure suivante. Le secondaire est isolé du primaire par un ruban isolant du même type et ses conducteurs sont enroulés couche par couche par-dessus les couches du primaire de la même manière qu'au primaire.

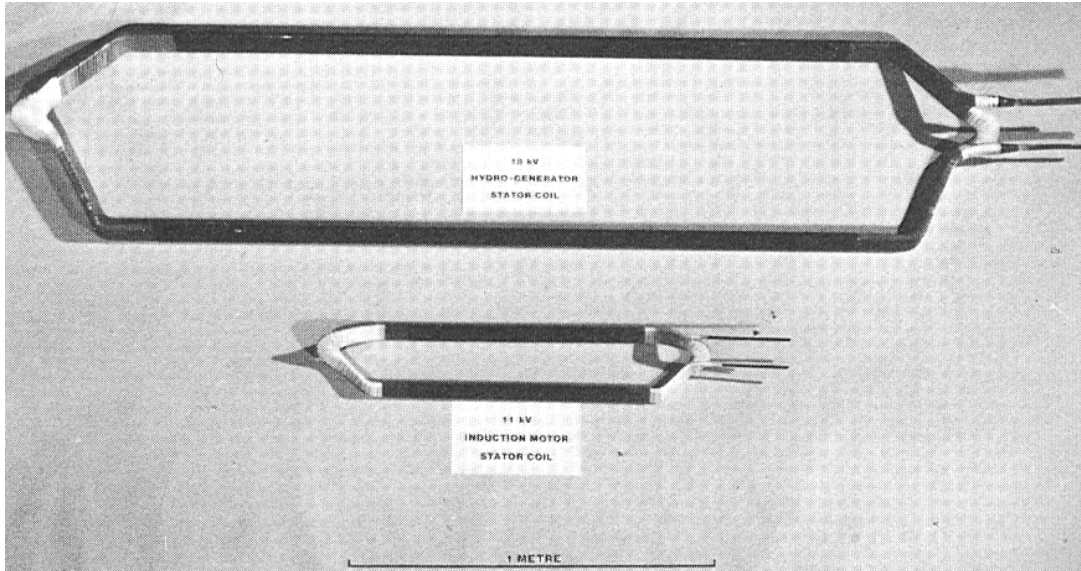


Une fois le bobinage terminé, le noyau magnétique est inséré à l'intérieur de la forme de plastique, tel qu'illustré ici-bas.

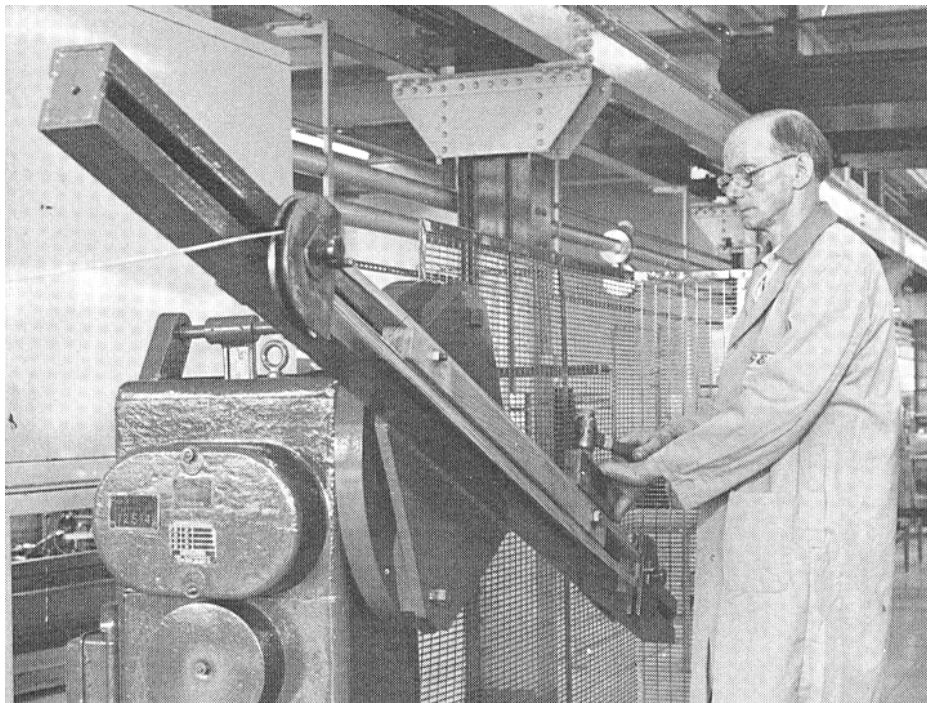


Isolants pour machines et transformateurs haut voltage

La conception des machines électriques et des transformateurs de fortes puissances où les voltages sont supérieurs à 1 kV, est différente de celle discutée plus haut. Au lieu des bobinages, les enroulements de conducteurs sont disposés en *barres* rigides, tel qu'illustré à la figure suivante.



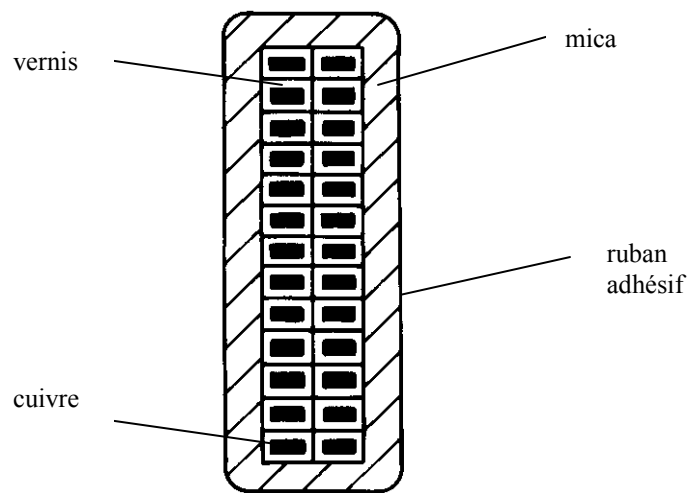
Ces barres sont constituées à partir de conducteurs vernis de forme carrée qui sont empilés les uns sur les autres en forme d'ovale très mince à l'aide de machines dédiées à cette fonction. L'ovale est ensuite transformé en une forme de diamant à l'aide d'une plieuse.





L'assemblage de conducteurs est ensuite recouvert d'une bonne épaisseur de papier de mica, qui constitue la partie la plus importante de l'isolation électrique. L'épaisseur de mica dépend du voltage d'opération requis. Afin de minimiser l'épaisseur de mica, on tolère des champs électriques de l'ordre de 2 kV/mm pour les machines à haut voltage (e.g. 13,8 kV). Par exemple, une machine électrique de 13,8 kV requiert une isolation de mica dont l'épaisseur est de 7 mm.

Le mica est finalement recouvert d'une mince couche de ruban adhésif qui permet de conserver une bonne tenue mécanique de l'isolation.



Finalement, les barres ainsi constituées sont insérées dans les encoches du stator de la machine électrique. Il est à noter que plus le voltage d'opération est élevé, plus le facteur de remplissage est faible, à cause de l'espace occupé par l'isolation.

Alors que les enroulements en bobines permettaient l'utilisation d'encoches semi-fermées, on remarque que dans le cas des machines de forte puissance, l'utilisation de barres rigides exige que les encoches soient complètement ouvertes afin de permettre l'insertion des barres.

2.3.3 Tests d'isolation – Instrumentation - Méthode des décharges partielles –

2.3.4 Normes CEI et IEEE

2.3.5 Vieillessement des conducteurs

2.4 Effet de peau dans les matériaux conducteurs

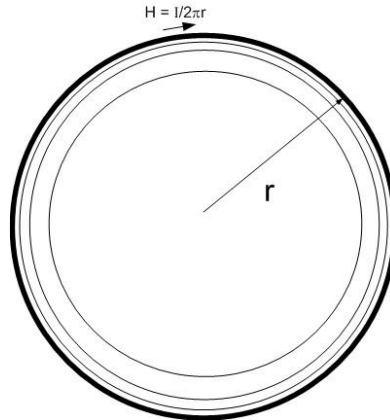
Dans cette section, il est question de la répartition du courant dans un conducteur lorsque ce courant varie dans le temps. Comme on le verra, le changement dans la répartition du courant engendre des pertes additionnelles dans le conducteur. La formulation de ces pertes varie selon que le courant est purement sinusoïdal, comme c'est le cas pour les lignes de transport de l'électricité, ou carré, comme c'est le cas dans les convertisseurs statiques.

2.4.1 Effet de peau : principes généraux

Selon la loi d'Ohm, les pertes par conduction varient selon le carré du courant circulant dans un conducteur et proportionnellement à la résistance de ce conducteur, laquelle suppose le courant uniformément réparti sur sa section. La répartition uniforme du courant sur la section du conducteur est valable pour des courants continus.

En courant alternatif, la répartition du courant change. Au fur et à mesure que la fréquence du courant augmente, le courant tend à se répartir à la surface du conducteur. Ce phénomène est une conséquence directe des équations de Maxwell. C'est l'effet de peau, tel qu'illustré à la figure suivante.

Il est à noter que, peu importe la répartition radiale à l'intérieur du conducteur, le champ magnétique H à la surface du conducteur demeure égal à $I/2\pi r$, pour autant que la répartition du courant soit symétrique à l'intérieur du conducteur.



La section totale πr^2 de ce conducteur est traversée par un courant I . On segmente la section du conducteur en une infinité de sections infinitésimales de surface ds et on détermine la valeur du courant dI qui traverse ds . On appelle "densité de courant" le rapport $j = dI/ds$ et sa valeur à l'intérieur du conducteur nous indique la répartition du courant.

On peut exprimer les pertes par conduction P_{cond} en fonction de la densité de courant j selon l'expression suivante :

$$P_{cond} = \frac{1}{\sigma} \iiint_{V_{cond}} j^2 dv$$

où V_{cond} est le volume total du conducteur.

Localement, les pertes varient selon le carré de la densité de courant j . Par conséquent, une répartition non-uniforme de j sur la section du conducteur entraînera une augmentation des pertes totales.

Dans cette section, la répartition de j sera déterminée à partir des équations de Maxwell. On pose le matériau conducteur comme ayant une perméabilité magnétique μ_0 et une conductivité σ :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (1)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

La loi de Faraday s'écrit sous forme différentielle de la manière suivante:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

On insère les relations (1), (2) dans (3). On obtient :

$$\nabla \times \vec{j} = -\sigma\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4)$$

Également, la quatrième équation de Maxwell s'écrit sous forme différentielle :

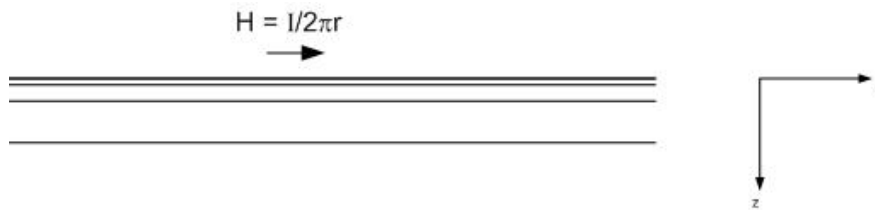
$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5)$$

On pose ici comme hypothèse que le courant de déplacement est négligeable par rapport à j (i.e. que la variation de l'induction électrique D dans le temps est négligeable). La relation (5) s'écrit alors :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (6)$$

L'équation (6) est en fait la loi d'Ampère écrite sous forme différentielle.

Afin de simplifier le traitement mathématique, nous allons supposer dans ce qui suit que la profondeur de pénétration du courant est beaucoup plus faible par rapport au rayon r du conducteur. On traite alors le problème comme si le conducteur était infiniment large et infiniment profond, tel que l'illustre la figure suivante.



Pour que l'expression de j demeure valide, nous devons conserver la même condition aux limites que dans le cas du conducteur circulaire, i.e. que le champ H à la surface du conducteur est égal à :

$$H_y = \frac{I}{2\pi r}$$

Dans le cas du conducteur plan, il est raisonnable de supposer que :

$$j_y = j_z = 0$$

$$H_x = H_z = 0$$

(4) devient alors

$$\frac{\partial j_x}{\partial z} = -\sigma\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (7)$$

(6) devient

$$j_x = -\frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (8)$$

On insère l'équation (8) dans l'équation (7). On obtient l'équation différentielle partielle du second ordre.

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = \sigma\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (9)$$

2.4.2 Pertes en courant alternatif : effet de peau en régime sinusoïdal

Si le courant $i(t)$ circulant dans le conducteur varie sinusoïdalement dans le temps avec une fréquence angulaire ω , tel que :

$$i(t) = Ie^{j\omega t}$$

le champ magnétique $H_y(z,t)$ variera également dans le temps de manière sinusoïdale, selon

$$H_y(z,t) = H_y(z)e^{j\omega t} \quad (10)$$

où $H_y(z)$ est l'amplitude du champ magnétique en chaque point du conducteur.

On insère (10) dans (9)

$$\frac{\partial^2 H_y(z)}{\partial z^2} = j\omega\sigma\mu_0 H_y(z) \quad (11)$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$H_y(z) = Ae^{-Bz} \quad (12)$$

En dérivant (12) deux fois par rapport à z, (11) devient :

$$AB^2e^{-Bz} = j\omega\sigma\mu_0 Ae^{-Bz}$$

(12) est vérifiée pour

$$B = \sqrt{j\omega\sigma\mu_0} \quad (13)$$

Comme on a

$$\sqrt{j} = \frac{1+j}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad \omega = 2\pi f$$

(12) devient

$$H_y(z) = Ae^{-(1+j)\sqrt{\pi f\sigma\mu_0}z} \quad (14)$$

On pose $\delta = \sqrt{\pi f\sigma\mu_0}$

(14) devient

$$H_y(z) = Ae^{-z/\delta}e^{-j/\delta} \quad (15)$$

On détermine A à partir des conditions aux limites. Pour $z = 0$, le champ magnétique $H_y(0)$ est égal à $I/2\pi r$, tel que défini par la loi d'Ampère. L'équation (15) devient :

$$H_y(z) = \frac{I}{2\pi r} e^{-z/\delta} e^{-j/\delta}$$

Et selon (8), la densité de courant j_x devient :

$$j_x(z) = \frac{I}{2\pi r\delta} e^{-z/\delta} e^{-j/\delta} \quad (16)$$

La densité de courant j_x sera donc égale à $I/2\pi r\delta$ à la surface du conducteur. Elle sera égale à 37% de cette valeur à une profondeur de δ et de 5% de cette valeur à une profondeur de 3δ .

Multiplying Factors for Converting Resistance to 60-Hertz AC Resistance

Size	Multiplying factor			
	For nonmetallic sheathed cables in air or nonmetallic conduits		For metallic sheathed cables or all cables in metallic raceways	
	Copper	Aluminum	Copper	Aluminum
Up to 3 AWG	1.000	1.000	1.00	1.00
Up to 2 AWG	1.000	1.000	1.01	1.00
Up to 1 AWG	1.000	1.000	1.01	1.00
0	1.001	1.000	1.02	1.00
00	1.001	1.001	1.03	1.00
000	1.002	1.001	1.04	1.01
0000	1.004	1.002	1.05	1.01
250 MCM	1.005	1.002	1.06	1.02
300 MCM	1.006	1.003	1.07	1.02
350 MCM	1.009	1.004	1.08	1.03
400 MCM	1.011	1.005	1.10	1.04
500 MCM	1.018	1.007	1.13	1.06
600 MCM	1.025	1.010	1.16	1.08
700 MCM	1.034	1.013	1.19	1.11
750 MCM	1.039	1.015	1.21	1.12
800 MCM	1.044	1.017	1.22	1.14
1000 MCM	1.067	1.026	1.30	1.19
1250 MCM	1.102	1.040	1.41	1.27
1500 MCM	1.142	1.058	1.53	1.36
1750 MCM	1.185	1.079	1.67	1.46
2000 MCM	1.233	1.100	1.82	1.56

2.4.3 Pertes dans les conducteurs soumis à des créneaux carrés

→ Cette section sera traitée en cours.

2.4.4 Effet de proximité

→ Cette section sera traitée en cours.

2.5 Matériaux supraconducteurs

→ Cette section sera traitée en cours.