

Généralités sur les matériaux

1. Introduction

L'électrotechnique est la science qui traite de la production, du transport, de la conversion et de l'utilisation de l'énergie électrique. Différents matériaux sont utilisés:

- les matériaux conducteurs pour véhiculer le courant électrique;
- les isolants pour isoler les conducteurs électriques;
- les matériaux magnétiques pour créer ou canaliser l'induction magnétique,
- les matériaux semi-conducteurs pour la fabrication des interrupteurs électroniques de puissance....

Matériaux utilisés: conducteurs électriques, matériaux magnétiques, isolants électriques, acier en carbone, acier structural, bois, semi-conducteurs, fibre de verre, liquide de refroidissement, gaz fluorescents ou halogènes, métaux pour électrodes (procédés électrochimiques), composés électrolytiques (stockage), hydrogène,...

2. Propriétés électromagnétiques des matériaux

2.1. Conductivité σ et résistivité électrique ρ

tension appliquée v aux bornes d'un conducteur, la loi d'Ohm s'écrit

$$v = R \cdot i \quad \text{avec} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

l : longueur (m) S : section (m^2) ρ :résistivité du matériau ($\Omega.m$)

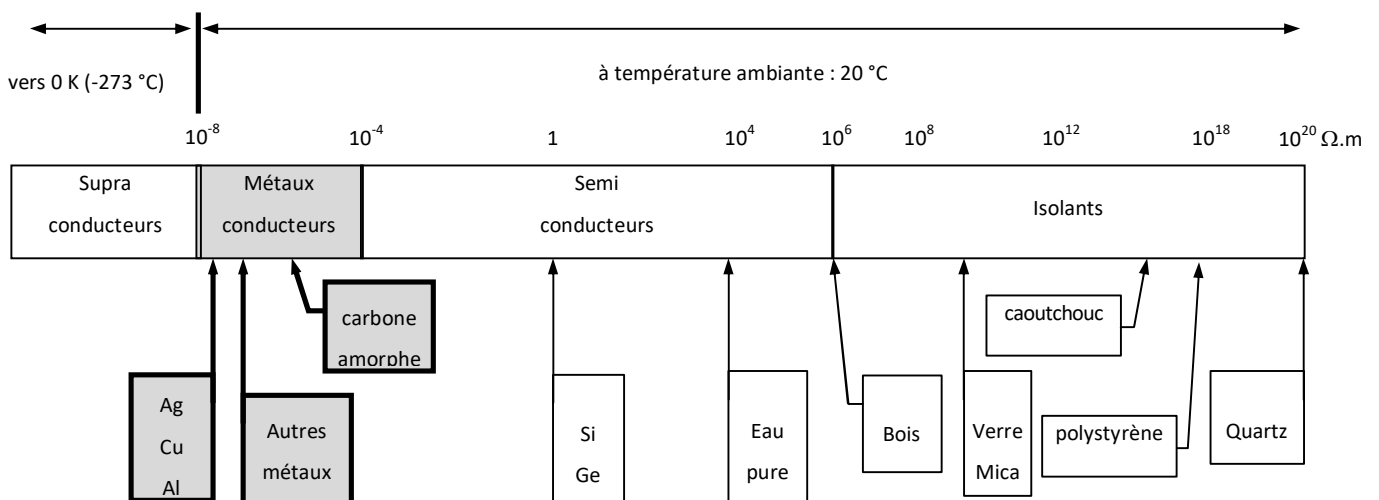
Exemple: Soit un conducteur en Cu avec $l = 10m$ et $S = 1mm^2$

à $T=20^\circ C$, on mesurera $R = 0,167\Omega \rightarrow \rho = 1,67\mu\Omega.cm$

Si on refait la même expérience avec Al, Ag, Fe,...on obtient d'autres valeurs de ρ .

La conduction : $\sigma = 1/\rho$

Echelle des résistivités:



2.2. Perméabilité magnétique μ

Si on place une inductance aux bornes d'une source alternative de fréquence f et de tension sinusoïdale de valeur efficace V , on obtiendra un courant efficace tel que

$$V = 2\pi f L I \quad I: \text{déphasé de } 90^\circ \text{ par rapport à } V$$

si cette inductance est constituée par une bobine de n spires enroulées autour d'un noyau de fer, on observera:

$$L = \mu n^2 \frac{S}{l}$$

n : nombre de spires enroulées autour du circuit magnétique

l : longueur du circuit magnétique (m)

S : section du circuit magnétique (m^2)

μ : perméabilité du matériau magnétique

Exemple: circuit magnétique en Fe avec $n = 100tr$; $l = 1m$; $S = 10cm^2$

à $T=20^\circ C$ $V = 120V$, $f = 50Hz$ $\rightarrow I = 6A$

$$L = \frac{V}{2\pi f I} = 64mH \rightarrow \mu = \frac{Ll}{n^2 S} = 6,4 \cdot 10^{-3} H/m$$

On sait, par des expériences antérieures, pour le vide $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$

donc la perméabilité magnétique relative du fer utilisé est $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \approx 5000$

Si on remplace le circuit magnétique de Fer par un autre en alliage Fer-Nickel avec les mêmes dimensions et même nombre de tours et qu'on tente la même expérience, on notera les résultats:

$I = 350mA$, $L = 900mH$ (donc augmente) et $\mu_r = 70000$

d'où l'importance du matériau sur les comportements magnétiques observables dans la nature.

2.3. Permittivité électrique ϵ

Soient deux plaques métalliques parallèles de surface S distancées d'un espace d . On observe que sur la plaque supérieure une charge électrique $+q$ s'installe et que sur la plaque inférieure, une charge $-q$ s'installe de manière à obéir à la loi $q = CV$.

Si on tente différentes expériences du même genre avec S et d différents, on notera que C varie selon

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

On tente l'expérience dans le vide absolu avec les paramètres: $S = 1m^2$; $d = 1mm$; $V = 12V$.

On mesurera une charge $q = 106nC$

$$\rightarrow \epsilon_0 = \frac{1mm \times 106nC}{1m^2 \times 12V} = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$$

Si on insère un matériau entre les deux plaques, céramique par exemple, on notera immédiatement une augmentation de la charge électrique sur chacune des plaques. La valeur de ϵ est donc une caractéristique du matériau.

Historiquement, on a normalisé $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ et pour le céramique $\epsilon_r = 9,6$

Si le matériau que l'on insère entre les deux plaques est un bloc de cuivre, on notera que la charge accumulée sur chacune des plaques est nulle.

→ distinction entre isolants et conducteurs

Les isolants permettent d'accumuler une charge électrique q sur les deux plaques alors que les conducteurs ne le peuvent pas.

3. Propriétés mécaniques et thermiques

3.1. Masse spécifique

	Cu	Al
Masse spécifique à 20°C (kg/m ³)	8930	2699
Résistivité ρ à 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	1,67	2,66

L'Al est choisi pour le transport électrique à cause de sa légèreté malgré sa résistivité plus élevée (pylônes, coûts,...)

3.2. Dilatation thermique

Les dimensions de tous les matériaux changent avec la température.

Coefficient de dilatation thermique acier: 12ppm/°C Al: 23ppm/°C

Exemple: L'entrefer entre le rotor et le stator typiquement 1000 fois plus petit que le diamètre de la machine à la température de la pièce. A sa puissance nominale, la température des parties métalliques (Cu, Fe) augmentera et l'entrefer sera modifié par l'expansion thermique des matériaux.

3.3. Conductivité thermique

Tous les matériaux ont des propriétés de stockage thermique et de conductivité thermique. les métaux sont de bons conducteurs thermiques.

Pour éviter une augmentation des températures internes des équipements électriques, il est important de prévoir un refroidissement adéquat.

3.4. Résistance mécanique à la flexion, à la compression et à la traction

Les matériaux ont des propriétés de résistance mécanique à la flexion, à la compression et à la traction qui varient d'un matériau à l'autre. Les champs électromagnétiques engendrent des forces électromagnétiques qui sollicitent les matériaux qui les supportent.

Matériaux conducteurs

1. Matériaux usuels

Métaux:

Al aluminium, **Ag** argent, **Cr** chrome, **Co** cobalt, **Cu** cuivre, **Sn** étain, **Fe** fer, **Hg** mercure, **Mo** molybdène, **Ni** nickel, **Au** or, **Pt** platine, **Pb** plomb, **W** tungstène, **Zn** zinc

Non métaux:

C carbone, **Ge** germanium, **O** oxygène, **P** phosphore, **Si** silicium

Alliages:

fontes: fer (92%) + 2 à 5% de C + impuretés

aciers: fer (97% min) + 0.05 à 1.5% de C + traitements thermiques

bronzes: cuivre + ≈10% de Sn

laitons: cuivre + ≈50% de Zn

constantan: Cu + Ni

2. Propriétés physiques

Les conducteurs électriques sont essentiellement des métaux ou des alliages métalliques. Ils possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes:

- faible résistivité électrique: $<10^{-6} \Omega \cdot m$ (1 million de milliard fois plus pour les isolants)
- bonne conductivité thermique: $\approx 100 W/m^{\circ}C$ (≈ 500 fois moins pour les isolants)
- solide de grande dureté sauf pour le mercure (liquide), le sodium et le plomb
- densité élevée: ≈ 10 sauf pour Al (2.6), pour Au, Pt et W (≈ 20)
- influence importante de la température sur la résistivité (40% en plus pour $100^{\circ}C$ d'élévation) et sur la dilatation linéique (qq mm/m pour $100^{\circ}C$ d'élévation).
- influence importante de la fréquence sur la résistivité (effet de peau): en alternatif, le courant n'utilise pas la totalité de la section du conducteur mais a tendance à circuler sur sa périphérie. Ce phénomène se traduit par l'augmentation de la résistance du conducteur. C'est la raison pour laquelle on fractionne le câble en plusieurs brins (fil de Litz en HF).

3. Densité de courant

Densité de courant: $J = I/S$ [A/mm²]

avec I : courant S : section du conducteur

Densité volumique de pertes Joule: $P_j = \rho J^2$ [W/m³] avec ρ en $\Omega \cdot m$

Les pertes sont la principale limitation des systèmes électromécaniques.

Densités de courants admissibles

Matériau	Densité volumique	Résistivité à $20^{\circ}C$ ($10^{-8} \Omega m$)
Cu	8.96	1.7
Al	2.6	2.6
Ag	10.5	1.6
Laiton (Cu-Zn-Mn)	8.5	7.2

La résistivité est en général une fonction croissante de la température:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \text{pour Cu: } \alpha = 39.10^{-4} K^{-1}$$

Les valeurs typiques des densités de courant:

$$J = \begin{matrix} 3 \text{ à } 5 \text{ A/mm}^2 & \text{normal} \\ 10 \text{ A/mm}^2 & \text{refroidissement à eau} \\ 20 \text{ A/mm}^2 & \text{refroidissement très étudié} \end{matrix}$$

Les pertes sont un phénomène volumique alors que leur évacuation est surfacique. Par conséquent, plus la section sera élevée, plus la densité de courant admissible diminuera.

Exemple: câble triphasé Cu à isolant PVC dans l'air

Section (mm ²)	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
I (A)	18.5	25	34	43	60	80	101	126	153	196	238	276
J (A/mm ²)	12.3	10	8.5	7.2	6	5	4	3.6	3.1	2.8	2.5	2.3

Exemple: lignes aériennes électriques

Dans le cas des lignes aériennes électriques, les densités de courant optimales (coût du conducteur et supports plus capitalisation des pertes) sont plus faibles que les valeurs ci-dessus. Elles sont comprises entre 0.6 et 0.8 A/mm² en fonction du coefficient d'utilisation de la ligne (répartition de sa charge en cours d'année). Les contraintes sont:

- Technique: limite d'échauffement du conducteur (60°C par exemple) compte tenu des conditions extérieures (saison, vent, ...)

Section (mm ²)	I _{max} (A)		J _{max} (A/mm ²)	
	Eté	Hiver	Eté	Hiver
228	510	640	2.22	2.81
841	1100	1400	1.31	1.66

- Economique: capitalisation des pertes sur la durée de vie de la ligne
 - Sécurité: possibilité de report d'une ligne à une autre

d'où la densité de courant économique $J < 1 \text{ A/mm}^2$ (0.6 à 0.8).

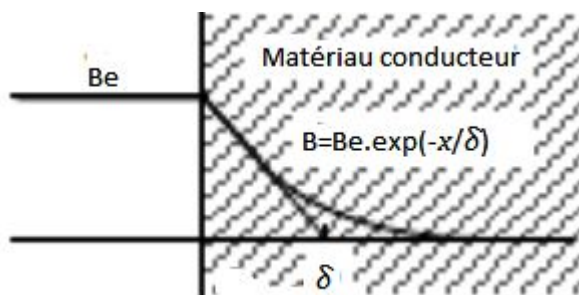
4. Effet de peau

Lorsqu'un matériau conducteur est soumis à une induction magnétique variable, il a tendance à s'opposer à ces variations en développant des courants induits ou courants de Foucault. C'est la loi de Lenz. Ce phénomène d'écrantage est appelé aussi effet de peau.

Pour résoudre le problème d'électromagnétisme, il faut utiliser les équations de Maxwell et les relations des matériaux (du milieu) dans les différentes régions considérées.

$$\text{Maxwell: } \begin{cases} \vec{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J} \end{cases} \quad \text{Milieu: } \begin{cases} \vec{E} = \rho \vec{J} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases}$$

L'induction décroît et est déphasée dans le matériau. Cette décroissance se fait sur la longueur caractéristique δ , l'épaisseur de peau.



Induction à travers un conducteur soumis à une induction variable

De manière analogue, le courant ne pénètre pas dans un conducteur de forte section (rayon par rapport à δ). Le courant se concentre à la surface.

Comme conséquence, la résistance "apparente" augmente et le conducteur est mal utilisé; une solution est de subdiviser le conducteur.

Pour un conducteur en Cu de diamètre 30mm (3δ), 50Hz, la diminution est d'environ 10%.

5. Domaines d'application

5.1. Bobinages de machines et câbles électriques

Les moins résistifs et les plus économiques sont le cuivre et l'aluminium. Ce dernier, étant quasiment 2 fois plus résistif mais 3 fois plus léger, est utilisé pour les lignes de transport HT.

5.2. Amélioration des contacts électriques

Le platine, l'or et surtout l'argent, qui ont une très bonne résistivité, et qui sont difficilement altérables (par choc, par corrosion ou par arc électrique) sont déposés en surface du cuivre ou de l'aluminium pour améliorer les résistances de contact et la durée de vie des fusibles, des bras de sectionneurs HT, des contacteurs...

5.3. Câblage et soudure

l'étain et le plomb, grâce à leur faible température de fusion sont utilisés pour le câblage des circuits imprimés.

En micro-électronique, on utilise l'argent pour braser les "puces", et l'or ou l'aluminium pour effectuer le câblage par fils de très faible diamètre (bondings de 10 à 500 μ).

5.4. Contacts glissants

Le carbone amorphe (le charbon) entre dans la constitution des balais de machines à cc et de machines synchrones ou asynchrones. Malgré sa résistivité médiocre, il n'altère pas les bagues ou collecteurs tournants et présente une bonne résistance de contact.

Le bronze est utilisé dans les contacts avec les caténaires.

5.5. Résistances bobinées

Il faut une résistivité plus élevée que pour les câbles ($\approx 100 \cdot 10^{-8}$). On les atteint avec des alliages: FeCuNi (mallechort), NiCr, FeNiCr, FeCrAl.

5.6. Lampes à incandescence

Le tungstène, grâce à sa température de fusion élevée (3400°C), constitue le filament des lampes à incandescence.

5.7. Lampes à décharges

Le mercure et le sodium, sous forme de vapeur, émettent un rayonnement lumineux.

5.8. Sondes de température

Thermocouple: plages de $[-185^{\circ}\text{C}, 300^{\circ}\text{C}]$ à $[20^{\circ}\text{C}, 2300^{\circ}\text{C}]$. La jonction de 2 métaux différents (fer, cuivre, platine...) génère une tension fonction de la température.

Thermo-résistance: plages de $[0^{\circ}\text{C}, 200^{\circ}\text{C}]$ à $[600^{\circ}\text{C}, 850^{\circ}\text{C}]$. Le plus souvent en fil de platine (sonde Pt 100). La résistance, parcourue par un courant connu, génère une tension fonction de la température.

6. Supraconducteurs

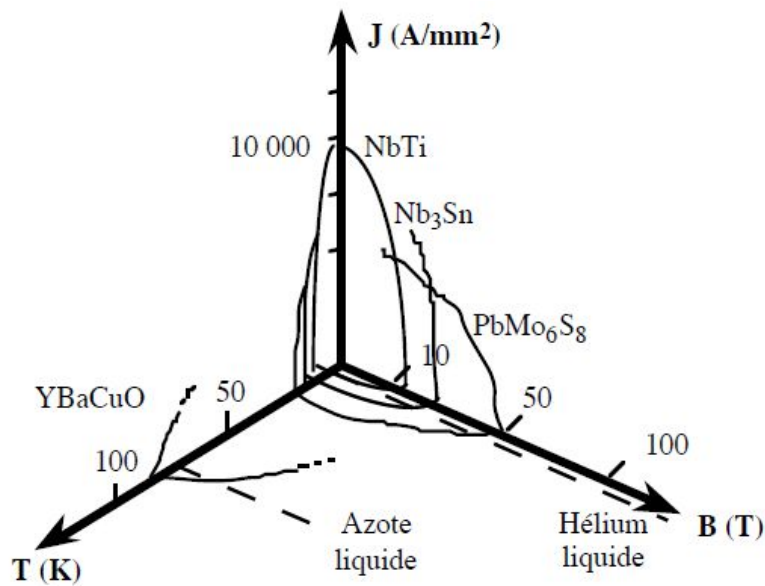
$\rho = 0$: possible avec les *matériaux supraconducteurs* ($\rho < 10^{-24} \Omega\text{m}$).

Avec une telle résistivité, mesurée, le courant dans une bobine court-circuitée ne décroît de 63 % qu'après 120 000 années (!).

Découverte en 1911, la supraconductivité a vu ses premières applications dans les années 60. Elle reste néanmoins encore aujourd'hui cantonnée dans des niches bien spécifiques comme l'imagerie médicale ou la physique des hautes énergies. Certains supraconducteurs présentent cependant des propriétés extrêmement intéressantes pour le génie électrique, à savoir des densités de courant beaucoup plus élevées que dans les conducteurs résistifs (centaines d'A/mm² au lieu de quelques A/mm²) et une absence de pertes lorsque l'induction magnétique ne varie pas dans le temps. Les supraconducteurs offrent en outre de nouvelles possibilités comme l'apparition ultra rapide d'une résistance par dépassement d'un certain courant ou d'un champ. Ces performances exceptionnelles n'apparaissent qu'en dessous d'une certaine température dite critique. Celle-ci est inférieure à 20K environ pour les supraconducteurs conventionnels dits "**bas T_c**" et de l'ordre de 100K pour certains oxydes supraconducteurs appelés "**hauts T_c**". Cela implique que les dispositifs supraconducteurs doivent être refroidis. L'élément supraconducteur est inséré à l'intérieur d'un cryostat qui assure une isolation thermique très poussée. La cryogénie reste une technologie complexe mais parfaitement maîtrisée et utilisable par des non-spécialistes.

Un matériau supraconducteur est dans un état non dissipatif lorsque les grandeurs températures (T), densité de courant (J) et champ magnétique (H) sont inférieures aux valeurs critiques T_c, J_c et H_c. Ces trois grandeurs sont reliées et elles définissent une surface critique dans l'espace (T, H, J) (figure).

Les pertes dans un supraconducteur ne sont nulles que lorsque son environnement électromagnétique est constant. Dès que celui-ci varie dans le temps, des pertes, dites pertes a.c., existent. La relation de Maxwell-Faraday ($\vec{\text{rot}}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$) nous indique en effet qu'un champ électrique apparaît dès que l'induction magnétique (extérieure ou liée au courant de transport) est variable. Ce champ électrique est à l'origine de la dissipation en régime variable. Compte tenu du coût énergétique important d'extraction des pertes à basse température (formule de Carnot), les pertes ac doivent être maintenues à un niveau extrêmement faible pour que la solution supraconductrice en alternatif soit viable. Ceci est obtenu par une structure particulière du fil supraconducteur. Les supraconducteurs peuvent être décomposés en deux grandes classes : les supraconducteurs à basse température critique (bas T_c) et ceux à haute température critique (haut T_c).



- Bas T_c : matériaux conventionnels (NbTi, Nb₃Sn, ...)

Ce sont des matériaux industriels (NbTi : 1000 tonnes de conducteur par an), performants en termes de propriétés de transport (3000 A/mm^2 , 5 T, 4.2 K). Ils doivent être par contre maintenus à très basse température, typiquement 4.2 K (Hélium liquide à pression atmosphérique) pour présenter leurs propriétés exceptionnelles.

Cela nécessite un environnement cryogénique donc une complexité technologique. C'est pourquoi ils sont utilisés seulement lorsqu'on ne peut pas faire autrement ou si ils surclassent très nettement les systèmes conventionnels (imagerie et spectrométrie médicales, physiques des hautes énergies, tokamaks, ...).

- Haut T_c : matériaux de type oxydes intermétalliques (YBaCuO, BiCaSrCuO, TlBaCaCuO, HgBaCaCuO, ...)

Ces matériaux, découverts en 1986, sont encore au stade du développement, voire de la recherche. Leurs performances sont encore modestes ou sont obtenues sur des dimensions réduites. Ce sont des matériaux de type céramique qui posent des grandes difficultés pour leur mise en œuvre sous forme de conducteur de grande longueur. Leurs températures de fonctionnement sont nettement plus élevées, donc plus facilement accessibles, comparé aux supraconducteurs conventionnels, les rendant donc extrêmement attrayants et ils sont promis un bel avenir. Les recherches, très importantes, concernent les matériaux, leurs procédés d'élaboration et les applications. Des conducteurs en longueur kilométrique sont d'ores et déjà commercialisés avec des performances suffisantes pour des démonstrateurs. Les premières réalisations, dont certaines d'envergure (MVA), commencent à apparaître.

Matériaux magnétiques

1. Rappels

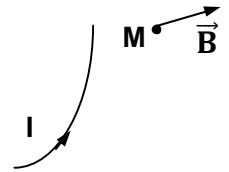
1.1. Induction \vec{B} et excitation \vec{H}

Dans le vide, l'induction \vec{B} est créée par un circuit électrique parcouru par un courant I . En un point donné M de l'espace, on a toujours une relation du type :

$$\|\vec{B}\| = B_M = \mu_0 \times kI \quad \text{---> } \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ est la perméabilité du vide}$$

Le produit « kI » caractérise l'action en M du circuit électrique parcouru par le courant I . On dit que le milieu magnétique caractérisé par μ_0 , est excité par le circuit électrique « kI » et on définit ainsi le vecteur excitation magnétique \vec{H} qui vérifie la relation :

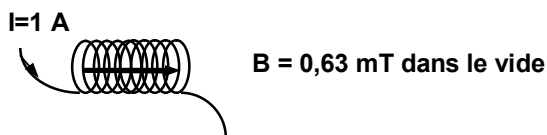
$$\vec{B} = \mu_0 \times \vec{H} \quad \text{---> } B \text{ en tesla et } H \text{ en A/m}$$



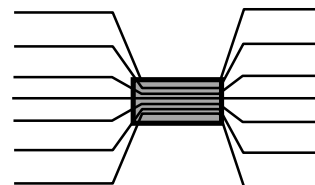
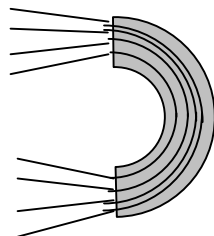
1.2. Substance ferromagnétique

Certaines substances dites **ferromagnétiques**, très souvent à base de fer, ont une perméabilité très élevée : $B = \mu H$ avec perméabilité relative $\mu_R = \mu/\mu_0 \approx 10^3 \text{ à } 10^5$.

exemple : solénoïde de 500 spires / m

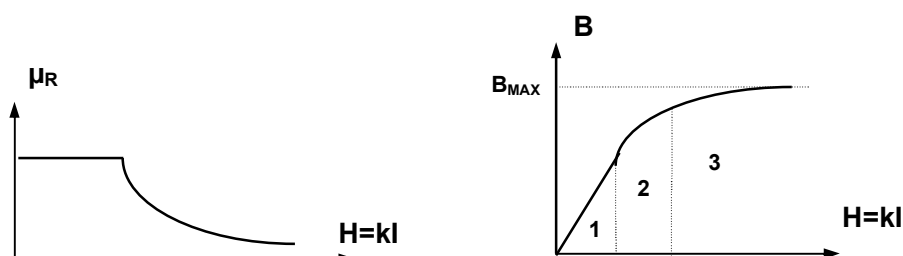


➤ Ces matériaux canalisent les lignes de champs



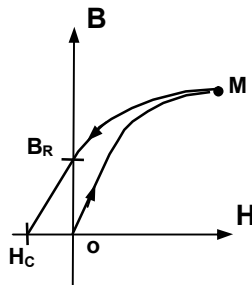
- Ils perdent leurs propriétés magnétiques au-dessus de la température de Curie : (70°C pour le fer)
- Leur perméabilité relative diminue fortement quand H augmente - **saturation** - et dépend des états magnétiques antérieurs - **hystérésis magnétique**.

1.3. Saturation du circuit magnétique



Les machines électriques fonctionnent dans la zone utile « 2 » (légèrement saturée). En zone saturée « 3 », le courant I créant B est trop élevé (échauffement de la machine). En zone linéaire « 1 », le champ B est trop faible.

1.4. Hystérésis du circuit magnétique



L'induction B présente dans un matériau ferromagnétique dépend des états magnétiques antérieurs :

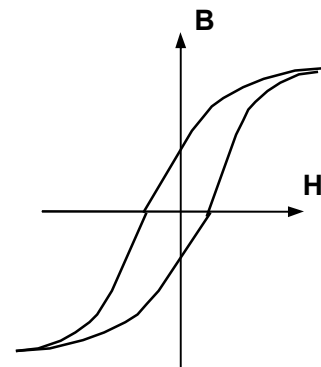
- après une première aimantation « OM », le circuit magnétique reste aimanté : **induction rémanente B_R** .
- Il faut lui appliquer une excitation H_C négative pour annuler à nouveau B : **H_C = excitation coercitive**

Cycle d'hystérésis - pertes par hystérésis

Si on applique à un matériau magnétique une excitation H alternative, on obtient dans le plan « B, H » un **cycle d'hystérésis**.

La surface du cycle rend compte de la difficulté à ré-aimanter le circuit magnétique. Cela se traduit par des pertes proportionnelles à la fréquence f de l'excitation H :

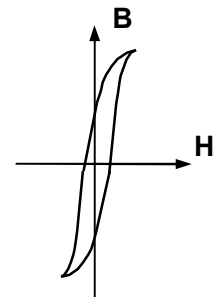
$$\text{pertes par hystérésis} \rightarrow p_h = k_1 f B_{\max}^2$$



Remarques :

- k_1 dépend du matériau et est proportionnel à la surface du cycle : pour diminuer les pertes, il faut diminuer la surface du cycle :
- > **utilisation de matériaux doux**
- ex : acier au silicium
- Dans les aimants permanents, on recherche des valeurs importantes de B_R et H_C : il faut donc augmenter la surface du cycle :

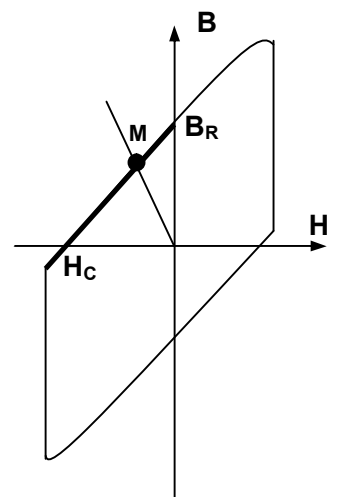
---> **utilisation de matériaux durs**



Remarque :

Les aimants n'étant pas soumis à une excitation H variable, le point de fonctionnement M est fixe (la caractéristique utile est en trait fort).

Le point M ne se déplace pas suivant le cycle d'hystérésis, et bien que la surface de ce dernier soit importante, **les pertes par hystérésis sont nulles**.



1.5. Courants induits - pertes par courants de Foucault

Le circuit magnétique de la plupart des machines électriques « voit » une induction ***B variable*** (alternative). Les matériaux utilisés, très souvent métalliques (essentiellement du fer), sont aussi conducteurs de l'électricité.

Ainsi, d'après ***la loi de Faraday***, des courants induits i_F , appelés ***courants de Foucault***, prennent naissance et génèrent dans le matériau des pertes par effet joule $r \times i_F^2$:

$$\text{pertes par courants de Foucault} \rightarrow p_c = k_2 \times \frac{(e \cdot f \cdot B_{MAX})^2}{\rho}$$

Remarques:

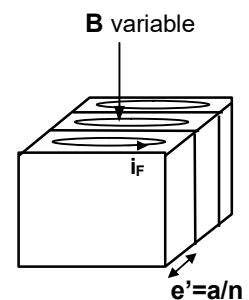
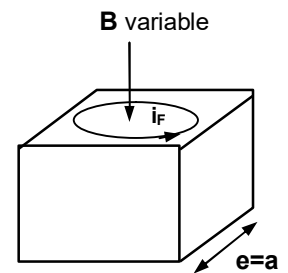
Pour réduire les pertes par courants de Foucault, on peut :
 ---> diminuer l'épaisseur ***e*** en utilisant un assemblage de tôles de faible épaisseur (35/100 ou 50/100) isolées entre elles :

- ***circuit magnétique feuilleté***

---> utiliser des matériaux magnétiques à résistivité plus élevée :

- ***tôles d'acier au silicium***

- ***ferrites*** (à fréquence élevée)



1.6. Pertes magnétiques ou pertes fer

Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault prennent naissance à l'intérieur du matériau. Elles sont très souvent cumulées et prénommées « ***pertes magnétiques ou pertes fer*** » :

$$\text{pertes fer} = C_{FER} \times \left(\frac{f}{f_0} \right)^k \times \left(\frac{B}{B_0} \right)^2 \times M$$

C_{FER} : coefficient de pertes fer en W/kg (donnée constructeur)

M : masse du circuit $f_0 = 50 \text{ Hz}$ $B_0 = 1 \text{ T}$, $1,5 < k < 2$

2. Matériaux magnétiques doux

Matériaux à cycle d'hystérésis étroit pour minimiser les pertes par hystérésis, ils sont en général feuilletés et à base de fer (le fer pur a une résistivité trop importante). On distingue essentiellement:

- les aciers électriques (au silicium) --> basses fréquences : $f = 50 \text{ Hz}$
- les alliages fer nickel ou cobalt --> moyennes fréquences : $f < 100 \text{ kHz}$
- les ferrites (oxydes de fer) --> hautes fréquences : $f < 1000 \text{ kHz}$

2.1. Aciers électriques

Ils sont essentiellement utilisés, dans les machines électriques travaillant aux fréquences industrielles (transformateurs et machines tournantes).

Ils sont constitués de tôles en acier allié à du silicium (1 à 5 %), ce qui a l'avantage d'augmenter la résistivité mais l'inconvénient de rendre les tôles cassantes.

On distingue :

- les tôles classiques à grains non orientés $C_{FER} \approx 5 \text{ W / kg}$

Elles sont obtenues par un laminage à chaud suivi d'un décapage chimique, d'un dernier laminage à froid et d'un traitement thermique.

Elles sont essentiellement utilisées dans les machines tournantes et les transformateurs de faible puissance (< 100 kW).

- les tôles à grains orientés $C_{FER} \approx 1 \text{ W / kg}$

Le procédé de fabrication est plus complexe et comporte un laminage à chaud suivi de plusieurs laminages à froid et traitements thermiques intermédiaires.

Des propriétés magnétiques optimales sont obtenues, mais uniquement dans le sens du laminage : forte perméabilité, induction à saturation importante, très faibles pertes fer.

Elles sont essentiellement utilisées dans les transformateurs de forte puissance (> 1 MW).

2.2. Alliages Fe/Ni ou Fe/Co

Le nickel et surtout le cobalt sont des métaux onéreux et sont alliés au fer dans des proportions importantes (30 à 80 %) ce qui rend ces alliages beaucoup plus chers que les aciers électriques.

Ils sont essentiellement utilisés en moyenne fréquence (< 100 kHz) et généralement dans des domaines où la puissance mise en jeu est plutôt faible :

- électrotechnique miniaturisée (appareils de mesure, tachymètres, certains relais...)
- téléphonie
- dispositifs de sécurité (disjoncteurs différentiels, blindage magnétique)

2.3. Ferrites douces

Elles sont très utilisées en Electronique de Puissance et plus particulièrement dans les alimentations à découpage où la fréquence de fonctionnement est élevée ($f > 100 \text{ kHz}$).

Ce sont des céramiques ferromagnétiques à base d'oxydes de fer ($X.Fe_{12}O_{19}$ -- $X = \text{Mn ou Ni, Zn}$).

Elles sont fabriquées sous atmosphère inerte : Après mélange et broyage des composants, les poudres sont assemblées par frittage à haute température ($\approx 1200^\circ\text{C}$). On obtient ainsi un matériau de grande résistivité, massif, mais malheureusement très cassant.

Guide de choix des matériaux doux

Forme de l'induction	Objectifs de choix	Matériau						Données économiques	utilisations
		Exemples	B_{max} (T)	Champ coercitif H_c (A/m)	μR pour $B=1$ T	Résistivité ($\Omega \cdot m \times 10^{-8}$)	Pertes (W/kg)	Production t/an Prix en F/kg	
constante	Rechercher une induction B maximale avec un champ H le plus faible possible, d'où une perméabilité élevée	Fe pur Acier doux (0,1 % de C)	1,6 1,2	4	10 000 1 500	10 10	$B=1,5$ T $f=50$ Hz ≈ 10	5 000 000 4 à 8	Pôles inducteurs de machines à courant continu. Electroaimant de contacteurs alimentés en courant continu Rotor en acier forgé de turboalternateur de forte puissance
Variable $f=50$ ou 60 Hz	Rechercher de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis tout en conservant une très bonne perméabilité, d'où un matériau à cycle étroit	Tôle laminée à grains non orientés acier+1 à 4%Si	1,7	24 à 72	6 000 à 9 000	15 à 60	$B=1,5$ T $f=50$ Hz ép. $\frac{35}{100}$: 2,3 ép. $\frac{65}{100}$: 9,5		Circuits magnétiques des machines à courant alternatif : transformateurs moteur asynchrone, synchrone
		Tôle à grains orientés acier+3,5 %Si	2	5,6	65 000	48	$B=1,5$ T $f=50$ Hz ép. $\frac{27}{100}$: 0,89 ép. $\frac{35}{100}$: 1,11	1 000 000 8 à 16	Electroaimant de contacteurs alimentés en courant alternatif
Variable $f > 60$ Hz	Rechercher une perméabilité importante aux hautes fréquences avec de faibles pertes par courant de Foucault et hystérésis	Ferrites $MF_e_2O_3$	0,4	? à ?	7000	Isolant : 10^{16}	$B=0,2$ T $f=100$ kHz 100	150 000 30 à 300	M=Zn et/ou Mn ($f < 1,5$ MHz) M=Zn et/ou Ni ($f < 200$ MHz) Alimentation à découpage, filtre haute fréquence
		Alliage de fer-nickel	0,8 à 1,6	0,4 à 55	6000 à 220000	35 à 60	$B=0,2$ T $f=100$ kHz 100	10 000 150 à 400	Circuits magnétiques des composants utilisés à moyenne et haute fréquence : - transformateurs - bobines de couplage
		Alliage de fer-cobalt	0,6 à 1,2	35 à 150	5000 à 12 000	15 à 40	$B=0,2$ T $f=100$ kHz 40	Faible 800 à 2000	- inductances - filtres - blindages

3. Matériaux magnétiques durs

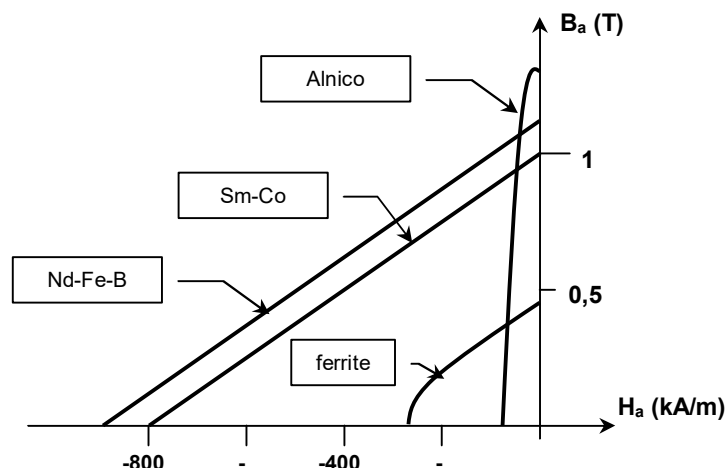
Ces matériaux sont utilisés pour la réalisation d'aimants permanents. Ils possèdent une induction rémanente importante et un champ coercitif élevé.

Ils sont en général massifs et à base de fer ou de terres rares (Sm : samarium - Nd : Néodyme).

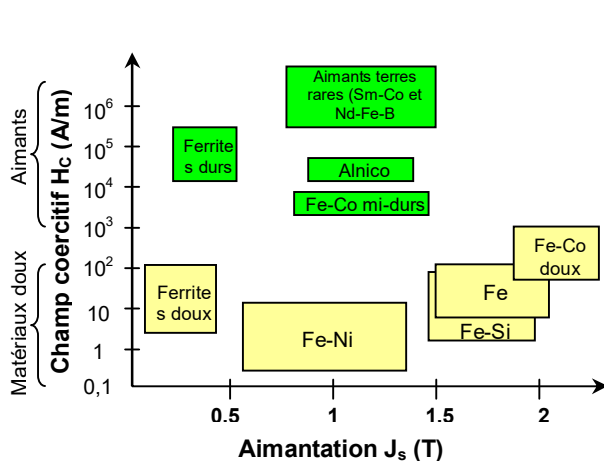
Ils sont souvent associés à du fer doux qui canalisent les lignes d'induction et sont aimantés lors du procédé de fabrication.

On distingue essentiellement, aujourd'hui :

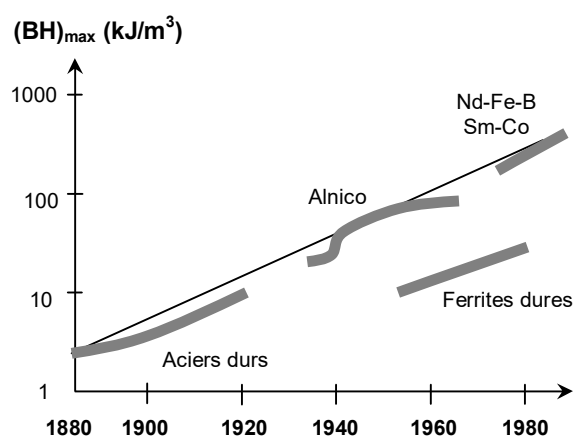
- les **ferrites dures** --> moins cher et le plus utilisé
- les **alliages à base de terres rares** --> très performants et en expansion
- les « **alnico** » (alliages fer + Al Ni Co) --> en perte de vitesse



Courbes de désaimantation pour les grandes familles de matériaux magnétiques durs (aimants permanents)



Comparaison matériaux doux /durs



Evolution historique des aimants

3.1. Alnico

Les Alnico ont été les premiers aimants fabriqués artificiellement. Ils sont aujourd'hui en perte de vitesse derrière les ferrites et les aimants à base de terres rares.

Ce sont des alliages de fer, d'aluminium, de nickel et de cobalt (les meilleures performances sont obtenues pour des alliages riches en cobalt).

Ils sont obtenus par moulage à haute température, suivi de divers traitements thermiques et magnétiques, ou alors par frittage suivi d'une rectification et d'une découpe.

Ils ont une très bonne tenue en température (maintien des performances magnétiques), ainsi qu'une bonne solidité mécanique. Leur induction rémanente est assez élevée (1,2T), mais leur aimantation chute très rapidement de manière irréversible en présence d'un champ H démagnétisant (augmentation brutale de l'entrefer).

Ils sont surtout utilisés en métrologie ou dans des applications où les aimants sont exposés à des sollicitations mécaniques.

3.2. Ferrites dures

Ce sont des céramiques à base d'oxydes ferriques (Fe_2O_3) associées à du Baryum (Ba) ou du Strontium (Sr).

Elles sont obtenues après plusieurs étapes :

- broyage fin des différents constituants puis mélange à 1200°C pour former la ferrite.
- broyage de la ferrite en présence d'eau pour obtenir une poudre très fine ($0,5\mu$).
- compression avec un liant dans des moules de forme adaptées, en présence d'un champ magnétique.
- frittage haute température (1200°C), suivi d'un refroidissement contrôlé.

Elles présentent le meilleur rapport qualité/prix . Par contre, leur induction rémanente est assez modeste ($< 0,5 \text{ T}$), et leur aimantation chute aussi rapidement de manière irréversible en présence d'un champ H démagnétisant (idem alnico). De plus, les céramiques obtenues sont très dures et cassantes ce qui interdit l'usinage des produits finis.

3.3. Aimants à base de terres rares

Assez récemment, des alliages à base de terres rares sont apparus. Ils possèdent d'excellentes propriétés magnétiques :

- densité d'énergie spécifique de 350 kJ/m^3 (50 kJ/m^3 pour les alnico), ce qui permet une diminution importante du poids et du volume à induction et entrefer donnés.
- champ coercitif très élevé avec une aimantation quasi constante ce qui rend très difficile une désaimantation de l'aimant.

On trouve 2 alliages : Samarium-cobalt ou Néodyme-fer-bore. Comme pour les ferrites, ils sont obtenus par frittage de poudres.

Ces produits sont relativement chers et n'ont pas une bonne tenue en température. Ils sont réservés à des applications spécifiques où l'encombrement est le paramètre majeur.

3.4. Domaines d'applications des aimants permanents

- inducteur de machines tournantes de faible puissance (< 10 kW) (machine à courant continu, synchrone, à aimants permanents).
- haut-parleur et microphone
- détecteur magnétique
- compteur -- freins magnétiques – tachymètre
- appareil de mesure

Guide de choix des matériaux durs

		Caractéristiques					Données économiques en 1995 (sous toutes réserves)	utilisations
Matériau		B_r (T)	Champ coercitif H_c (kA/m)	$(BH)_{max}$ kJ/m ³	Température de Curie T_c (°C)	Température d'utilisation max (°C)	Production t/an Prix en F/kg	
AlNiCo		0,7 à 1,4	50 à 60	13 à 60	860	450	12 000 250	Appareils de mesures Capteurs Pièces exposées aux chocs
Ferrites		0,4	250	27	460	400	320 000 35	Moteurs, accouplements Répulsion, aimants minces
Terres rares	SmCo ₅	1	750	190	730	200	1 300 2 500	Matériel embarqué Microélectronique Moteur synchrone
	Nd-Fe-B	1,3	950	360	310	150	1 900 1 500	Répulsion, aimants minces Accouplements

Critères de choix

Chaque famille d'aimants présente un défaut :

- **AlNiCo** : faible champ coercitif (attention à la désaimantation)
- **Ferrites** : faible induction rémanente
- **Sm-Co** : technologie onéreuse
- **Nd-Fe-B** : faible température d'utilisation due à l'instabilité thermique des propriétés thermiques

On choisira telle ou telle famille selon les impératifs suivants :

- **Ferrites** : faible coût de revient
- **Terres rares** : volume et poids réduits
- **AlNiCo** : solidité mécanique et bonne tenue en température

Matériaux diélectriques

1. Définition

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à $10^{16} \Omega.m$ car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en courant continu doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif.

Les isolants sont utilisés pour :

- assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés → protection des personnes et des équipements ;
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

2. Caractéristiques des isolants

Les isolants électriques possèdent tous à peu près les caractéristiques suivantes :

- mauvaise tenue en température $< 200^\circ\text{C}$ en général (sauf pour l'amiante, le verre et le mica)
- rigidité électrique élevée : $\approx 10 \text{ kV/mm}$
- très forte résistivité électrique : $> 10^6 \Omega.m$
- constante diélectrique relative $\epsilon_r > 1$ (≈ 2 à 8)
- mauvaise conductivité thermique : isolant thermique
- Solide, liquide ou gaz
- densité voisine de 1

2.1. Permittivité relative

La permittivité absolue d'un isolant est : $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
où $\epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F/m}$ est la permittivité absolue du vide.
La permittivité relative est donc $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$.
Pour l'air, les gaz et le vide : $\epsilon_r = 1$.
Pour tous les autres isolants : $\epsilon_r > 1$.

2.2. Rigidité diélectrique

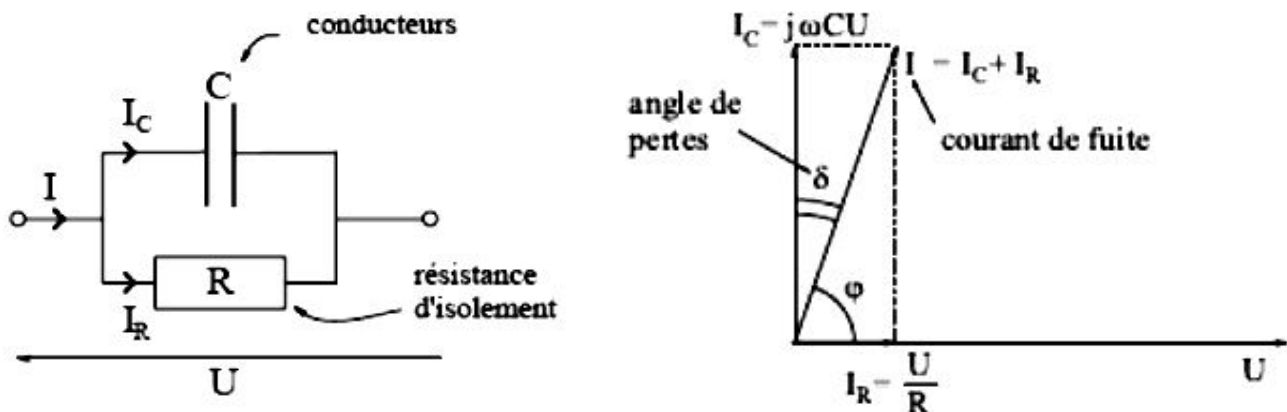
Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui même. Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage et destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

2.3. Facteur de dissipation diélectrique

Les pertes diélectriques sont une grandeur à considérer essentiellement lorsque le champ électrique varie. Pour un condensateur, elles sont données par l'angle de pertes δ . La tension et le courant ne sont pas parfaitement en quadrature mais déphasés d'un angle $\pi/2 - \delta$.

Circuit équivalent d'une isolation en courant alternatif

Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent suivant :



C représente la capacité entre les deux conducteurs et la résistance R est la résistance d'isolement de l'isolant, elle est toujours $\geq 10^{12}$.

Calcul de l'angle de pertes diélectriques

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite I traversant l'isolant.

On a :

$$\tan\varphi = \frac{CU\omega}{\frac{U}{R}} = RC\omega \quad \Rightarrow \quad \tan\delta = \frac{1}{\tan\varphi} = \frac{1}{RC\omega}$$

La valeur $\tan\delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique.

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- bon isolant \rightarrow résistance d'isolement R élevée ou δ faible ;
- mauvais isolant $\rightarrow R$ faible ou δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan\delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} .

2.4. Influence de la température sur les isolants

Une élévation de température contribue à diminuer la durée de vie d'un isolant :

- diminution de la résistance d'isolement (les isolants ont généralement un coefficient de température négatif) ;
- diminution de la rigidité diélectrique ;
- oxydation ;
- ramollissement pouvant atteindre la fusion.

Loi expérimentale de vieillissement des isolants

Une augmentation de 10°C de la température d'un isolant conduit à doubler sa vitesse de vieillissement. L'élévation de température est provoquée par les pertes diélectriques et l'échauffement des conducteurs. La chaleur est difficilement évacuée par les isolants car ceux-ci ont une conductivité thermique très faible.

3. Classification

Plusieurs méthodes peuvent être adoptées pour classer les isolants.

Classification en fonction de la tenue en température (Tableau 1) :

Les isolants sont classés suivant la température maximale en dessous de laquelle ils ont une durée de vie d'une dizaine d'années. Les normes définissent des classes d'isolant selon leur tenue en température, qui dépend de la matière isolante, mais aussi des matières d'agglomération et d'imprégnation.

Classification en fonction de l'état physique (Tableau 2):

- solide : mica, bois, céramiques, plastiques ...
- liquide : huiles, pyralène, vernis...
- gaz : air sec, azote, SF₆...

Classification en fonction de l'origine (Tableau 2) :

- minérale : mica, porcelaine, verre, amiante,...
 - organique : bois, papier, coton, soie, caoutchouc (latex),...
 - synthétique : plastiques (thermoplastiques ou thermodurcissables), silicones
- silicones : molécules dont les atomes de carbone ont été remplacés par du silicium.
- thermoplastiques: plastiques ramollis à chaud (il peut alors être moulé, formé ou extrudé), et durci à froid. Le processus est réversible.
- thermodurcissables: plastiques durcis par un procédé thermique. Le processus est irréversible.

4. Types d'isolants utilisés dans l'industrie électrique

4.1. Isolants solides

1) Isolants naturels

a) Minéraux :

- **Verres** : sable siliceux + chaux + soude. Utilisés pour les isolateurs. Résistent à la chaleur et aux agents chimiques.

Propriétés : T_{max} = 400 à 500 °C ; G ≈ 7 kV/mm ; tanδ = 0,02 à 0,04 ; ε_r = 7.

- **Céramiques** : argile + quartz + fondants + oxydes métalliques. Utilisées dans les isolateurs de lignes aériennes et d'antennes, les supports d'inductances HF et UHF, les condensateurs HF, les composants piézo-électriques.

Propriétés : T_{max} = 200 à 500 °C ; G ≈ 10 à 20 kV/mm ; tanδ = 5.10⁻⁴ à 1,2.10⁻² ; ε_r = 10 à 3000.

- **Mica et produits micacés** : silicates hydrates de métaux alcalins. Utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs de composants de puissance (feuilles de mica).

Propriétés : T_{max} = 500 à 1000 °C ; G ≈ 210 à 240 kV/mm ; tanδ = 3.10⁻⁴ à 26.10⁻⁴ ; ε_r = 6 à 7.

b) Organiques :

- **Papiers** : cellulose extraite du bois ou de l'alfa. Imprégnés de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau, ils sont utilisés dans les transformateurs secs et les condensateurs.

Propriétés : T_{max} = 105 °C ; G ≈ 50 à 80 kV/mm (papier sec) ; 100 kV/mm (papier imprégné d'huile); tanδ = 2.10⁻³ à 4.10⁻³ ; ε_r = 4 à 6.

- **Textiles** : coton, soie naturelle, fibres artificielles. Rubans, toiles pour l'isolation, de conducteurs de faible diamètre, bobines.

Propriétés : T_{max} = 90 à 120 °C ; G ≈ 5 à 10 kV/mm ; ε_r = 3.

- **Caoutchouc** : résine naturelle, latex de l'hévéa. Isolation de conducteurs et de câbles.

Propriétés : $T_{max} = 60\text{ °C}$; $G \approx 20 \text{ à } 30\text{ kV/mm}$; $\epsilon_r = 3$.

2) Isolants synthétiques : matières plastiques

Une matière plastique est le résultat d'un mélange qui comprend :

- une résine de base ou polymère, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de polymérisation effectuées sur des matières de base;
- dérivés du pétrole ou du charbon ;
- calcaires, sable, fluorures, sels marins ;
- bois.

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées.

a) Caractéristiques des matières plastiques :

- très bonne rigidité diélectrique : toujours $\geq 10\text{ kV/mm}$;
- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$;
- faibles pertes diélectriques ;
- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

b) Matières plastiques utilisées en électrotechnique

Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.

4.2. Isolants liquides

Les isolants liquides présentent l'avantage de se régénérer après un claquage ; ils servent aussi au refroidissement par convection ou par évaporation (les isolants liquides ont généralement une bonne conductivité thermique). Ils sont utilisés seuls ou bien ils imbibent un isolant solide dont ils remplissent les vides.

1) Huiles minérales

Dérivées du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles.

Propriétés :

- rigidité diélectrique : $G \approx 9 \text{ à } 10\text{ kV/mm}$
- facteur de dissipation : $\tan\delta = 4.10^{-4}$
- permittivité relative : $\epsilon_r = 4 \text{ à } 6$.

2) Huiles synthétiques

Huiles chlorées : ininflammables (pas de risque d'incendies), utilisées pour les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs.

Huiles silicones : résistent à des températures élevées, prix élevés.

Huiles végétales (ricin) : plastifiant dans la fabrication des vernis et des résines.

3) Vernis

Ce sont des associations résine + solvant + siccatif. Utilisés pour l'imprégnation des bobinages.

5. Domaines d'application

5.1. Bobinages de machines

- basse tension : fils conducteurs émaillés
- haute tension : barres conductrices isolées par du papier, mica, verre, bakélite, résine (enrobage, imprégnation).

5.2. Câbles électriques

Un câble est constitué d'une âme conductrice métallique (Cu ou Al) recouvert d'un isolant, d'un écran et d'un revêtement extérieur, complété si besoin par une gaine d'étanchéité et par une « armure ».

L'enveloppe isolante, mais aussi les gaines et revêtement extérieur sont constitués de matières synthétiques (thermoplastiques et élastomères) :

- PVC : Polychlorure de vinyle
- PE : Polyéthylène
- PR : Polyéthylène réticulé
- EPR : Ethylène-propylène
- caoutchouc silicone

5.3. Condensateurs

Schématiquement, un condensateur est formé d'un diélectrique ($\epsilon_r > 1$) serré entre deux électrodes. Les diélectriques isolants utilisés sont suivant les technologies en céramique, papier, verre, mica ou plastique.

5.4. Isolateurs

Ils sont en verre ou en porcelaine et sont utilisés pour isoler :

- les bornes de sortie des appareillages haute tension (sectionneur, disjoncteur, transformateur, matériel roulant...).
- les câbles haute tension des pylônes de transport d'énergie électrique

5.5. Appareillage haute tension

L'isolement interne est renforcé par un isolant supplémentaire :

- solide : résine, élastomère (électronique, haute tension).
- liquide : huile minérale, askarel (interdit depuis 1986) dans les transformateurs de puissance.
- gaz : SF₆ dans les disjoncteurs haute tension.

Tableau 1: classification en fonction de la température

Classe	Matières Isolantes	Matières d'agglomération	Matières d'imprégnation
Y 90°C max	coton, soie, papier et dérivés, fibre d'acétate, bois, polyéthylène, polystyrène, PVC, Caoutchouc	Pas de matières d'agglomération ou d'imprégnation. Classe peu utilisée.	
A 105°C max	Isolants de classe Y imprégnés par un diélectrique liquide.		Vernis à base de résines naturelles Huiles isolantes Solutions cellulosiques
	Toile vernie Papier verni	Vernis à base de résines	
	Stratifié bois	Résines phénoliques	
	Emaux aux résines polyamides Résines polyesters Film d'acétate		
E 120°C max	Emaux aux résines polyvinyles Polyuréthane, époxyde		
	Résines moulées avec charge cellulosique Stratifiés coton, papier	Résines mélanines	
	Résines polyesters Film de cellulose ou de polyéthylène		
B 130°C max	Amiante, fibre de verre, émaux aux résines formal, polyvinyle		Asphaltes Résine synthétique avec huile Résines polyesters Résines époxydes
	Tissu de verre imprégnée Amiante imprégnée	Vernis à base de résines synthétiques et d'huile	
	Mica aggloméré	Résines synthétiques époxydes	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante	Résines mélanines	
F 155°C max	Fibre de verre Amiante		polyesters, polyuréthanes
	Tissu de verre imprégnée Amiante imprégnée Mica aggloméré	Résines alkyles, époxydes, Silicone - alkyles	
	Stratifié ou tissu de fibre de verre Stratifié d'amiante		
H 180°C max	Fibre de verre		Résine silicone sélectionnée
	Tissu de fibres de verre et d'amiante imprégnés Elastomère de silicone Fibre de polyamide	Résines et élastomères de silicone	
	Mica aggloméré Stratifié de tissu de verre	Résine silicone sélectionnée	
C > 180°C	Polytetrafluoréthylène (250°C)		Résine silicone stable jusqu'à 225°C
	Mica aggloméré Tissu de verre ou d'amiante traité		
		Mica, porcelaine, céramiques, verre, quartz	

Tableau 2: classification en fonction de l'état physique

DESIGNATION			Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_R	PROPRIETES	EMPLOIS
UNITES			kg/m ³	°C	N/mm ²	Ωm	kV/mm			
ISOLANTS SOLIDES	Origine minérale	MICA Feuilles minces à l'état naturel	3000	200		10^{13}	100 à 200	6 à 7	Très grande Rigidité diélectrique	Agglomérés à des résines d'où : micanites, rubans micacés, micafolium
		VERRE Sable de silice + chaux + soude	2500	>180		10^{10} à 10^{17}	25 à 45	6	Grande résistance mécanique mais très fragile	Isolateurs de lignes aériennes Fibre et tissus de verre
		PORCELAINE Argile + quartz + émail	2500	>180	100	10^{12}	16	5	Résiste aux chocs thermiques et à la chaleur	Isolateurs H.T. Support de résistances électriques. Pièces moulées
		AMIANTE Silicate de chaux + magnésie	1800 à 2200	>180		10^9	3	2	bonne résistance à la chaleur et au feu mais craint l'humidité	Support de résistances. Isolant de conducteurs. En plaques, rubans, cordons
	Origine organique	BOIS Imprégné de bakélite	600 à 900	105	140	10^4	5	9	Très léger. Peu coûteux	Poteaux, tableaux, moulures, cales isolantes, panneaux
		PAPIER Cellulose agglomérée et imprégnée	800 à 1300	60	70 à 120	10^{10} à 10^{16}	60 à 80	6	Très sensible à l'humidité. souple	Rubans imprégnés pour câbles haute tension. Cartons, rubans, produits stratifiés
		CAHOUTCHOUC Résine naturelle Latex de l'hévéa	960	60	32	10^{14}	20 à 30	3	Elastique. Attaqué par les huiles. Vulcanisées par addition de soufre	Produits en bande ou moulés. Isolation des conducteurs et câbles
		COTON Fibres imprégnées		90 à 120	50 à 100	10^9	5 à 10	3 à 4	Très souple, économique et bonne résistance à la traction	Fils, rubans, toile. Isolation en bobinage avec imprégnation
ISOLANTS LIQUIDES	HUILE MINERALE Distillation du pétrole brut		850 à 950	145		10^{13}	9 à 10	2	Rigidité diélectrique chute avec la présence d'humidité	Isolation des transformateurs
	ASKARELS diélectriques chlorés (pyralène)		1300 à 1500			10^{10}	20	5	Ininflammable.	Interdit depuis 1990
ISOLANTS GAZEUX	AIR SEC					10^{14}	3	1	Rigidité très élevée à la pression de 10 bars : 225 kV/mm	Isolation des lignes aériennes. Interrupteurs, disjoncteur pneumatique
	SF6 Hexafluorure de soufre						7,5	1	Rigidité diélectrique égale à 2,5 fois celle de l'air	Disjoncteurs haute tension

Tableau 2: classification en fonction de l'état physique (suite)

DESIGNATION		Masse volumique	Température max	Résistance à la rupture	Résistivité	Rigidité diélectrique	Constante diélectrique ϵ_R	PROPRIETES	EMPLOIS
UNITES		kg/m ³	°C	N/mm ²	Ωm	kV/mm			
THERMODURCISSABLES	BAKELITE Résine phénolique + farine de bois	1400	150 à 170	3 à 5	10^{10} à 10^{12}	10 à 20	5 à 9	Résiste à la chaleur, couleur sombre	Poudre à mouler, résine, vernis. Très utilisé en produits en plaques et appareillage
	FORMICA Résine aminoplaste + charge cellulosique	1400	100 à 120	4 à 8	10^{10}	10 à 15	7 à 10	Transparent, se colore facilement	Poudre à mouler, résine, vernis. Produits stratifiés, pièces d'appareillage
	ARALDITE Résine époxy	1200	110 à 120	6,5	10^{14} à 10^{15}	70	4,5	Très bonne rigidité électrique	Résine à couler, vernis, colle, pièces isolantes moulées
	POLYESTER Résine alkyles	1200	120	4,5	10^{13}	13 à 22	2,5 à 4	Très utilisé en stratifié avec fibre de verre	Résine, poudre, pièces moulées. Produits stratifiés
	SILICONE carbone remplacé par du silicium	1800	180	40 à 80	10^{14} à 10^{16}	300	2,5	excellentes propriétés électrique et mécanique, mais coûteux	Huiles, graisses, caoutchouc Poudre à mouler, résine, vernis.
THERMOPLASTIQUES	PVC Polychlorure de vinyle	1400	60	4	10^{12}	35	5	Le plus utilisé, peut se coller facilement, très souple	Isolation et gaines pour conducteurs et câbles, feuilles plaques, tubes
	POLYSTYRENE	1000	80	5	10^{15}	25	2,5	Transparent, léger, n'absorbe pas l'humidité	Moulage de pièces isolantes
	PLEXIGLAS	1200	80	7	10^{16}	15	4	Transparence parfaite	Plaques, résine à mouler, supports et boîtiers transparents
	NYLON-RILSAN Polyamides	1100	100 à 150	6	10^{11}	14	5	Très résistant à l'usure, s'obtient en fils très fins	Fils et tissus de guipage de fils Pièces isolantes d'appareillage
	TEFLON Fluoréthène	2200	250	3	10^{17}	18	2	Bonnes propriétés électrique et mécanique, à haute température, mais coûteux	Rubans, stratifiés Utilisations spéciales
	CAHOUTCHOUC Néoprène	1240	70	4	10^{10}	14	7	Très élastique, résiste aux huiles et aux solvants	Isolement des fils et des câbles

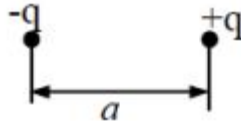
6. Polarisation diélectrique

6.1. Moment électrique d'un dipôle

Un dipôle est formé de deux charges égales et de signes opposés. La valeur du moment électrique d'un dipôle est $p_0 = q \cdot a$

où q est la charge positive (ou la valeur absolue de la charge négative) et a la longueur du dipôle. Il va de soit que pour les molécules où $a = 0$, le moment dipolaire est nul.

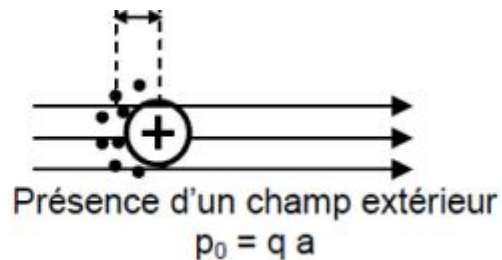
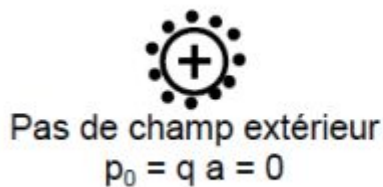
Remarque : jusqu'à présent, les scientifiques ne se sont pas mis d'accord quant au sens à donner au dipôle électrique, de la charge positive vers la charge négative ou vice versa.



6.2. Description de la polarisation

La propriété la plus importante d'un diélectrique est la polarisation sous l'action d'un champ électrique externe.

A l'échelle atomique : en l'absence d'un champ électrique, le moment électrique est nul car la somme algébrique des charges dans toutes les molécules dans un volume donné est nulle, du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident. Lors de l'application d'un champ électrique, les centres de gravité ne coïncident plus et les particules (atomes et molécules) sont alignées suivant la direction de E et acquièrent un moment p_0 (voir figure).



A l'échelle macroscopique : le diélectrique aura un moment diélectrique P .

La polarisation est souvent proportionnelle au champ électrique qui l'a créée (ce cas est dit linéaire):

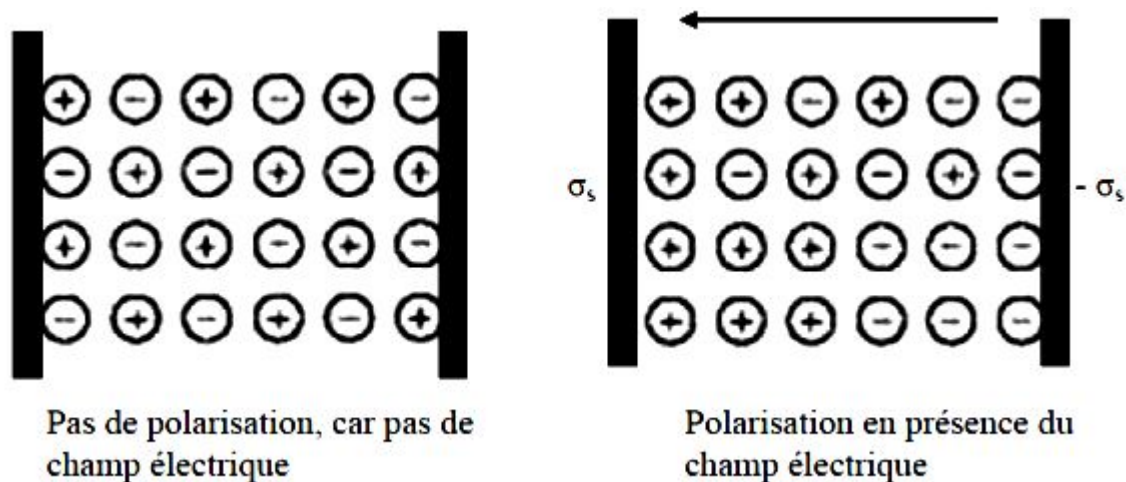
$$P = \chi \epsilon_0 E$$

χ : susceptibilité diélectrique

Considérons simplement un condensateur plan de surface S et d'épaisseur a (figure ci-dessous). Posons que la charge de polarisation apparaissant à chaque surface du condensateur est σ_s [C/m²]. Comme la charge totale à l'intérieur est compensée et donc nulle, le moment diélectrique total est : $\sigma_s S \cdot a$

En divisant par le volume $V = Sa$, nous obtenons la polarisation P : $P = \sigma_s$

Conclusion : la polarisation P est égale à la densité de charge apparaissant à la surface.



6.3. Diélectriques polaires et non polaires

Tous les diélectriques peuvent être divisés en deux catégories : diélectriques polaires et diélectriques non polaires

La somme totale des charges dans une molécule est nulle, mais l'arrangement (la structure) de ces charges peut être différente d'une matière à une autre.

Les centres de gravité peuvent coïncider ou ne pas coïncider :

- dans le 1^{er} cas : la molécule est non polaire.
- dans le 2^{ème} cas : la molécule (et donc la matière en question) est dite polaire. Même en l'absence de champ électrique externe, la molécule possède un moment dipolaire.

Il est clair que les molécules arrangées de façon symétrique (qui possèdent un centre de symétrie) sont non polaires du moment que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident avec le centre de symétrie. Par contre, les molécules asymétriques sont polaires.

Les molécules monoatomiques (He, Ne, Ar, Kr, Xe) et les molécules formées de deux atomes identiques (H₂, N₂, Cl₂, etc...) sont non polaires. Par contre, les molécules à composition ionique telles que l'iode de potassium KI ont un moment dipolaire élevé.

Différence entre la polarisation et la conduction

1. Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. Par contre, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances, qui se libèrent et quittent les particules.
2. La conduction dans les diélectriques est pratiquement assurée par les impuretés se trouvant dans l'isolant et non pas due à sa structure de base. La polarisation peut donc être représentée comme un grand nombre de charges se déplaçant sur de très petites distances, sans jamais quitter les molécules. Tandis que la conduction dans les diélectriques comme le déplacement d'une petite quantité de charges mais sur de larges distances.
3. la polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît, les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction.
4. Tandis que la conduction se produit tant que la tension continue est appliquée, la polarisation ne se produit que lors de l'application ou de la suppression de la tension. La polarisation, et donc le courant capacitif, ne subsistent que lorsqu'il s'agit d'une tension alternative.

6.4. Types de polarisation

1) polarisation électronique : due au déplacement du nuage d'électrons par rapport au noyau positif, sous l'action d'un champ E . Dans ce cas, la polarisation se produit rapidement durant un bref moment (de l'ordre de 10^{-15} s). Elle se produit dans les atomes et les ions.

Le processus de la polarisation électronique peut être compris en considérant l'atome le plus simple, à savoir l'atome d'hydrogène (1 électron en orbite d'un noyau contenant un proton). Après polarisation, on a un déplacement d'orbite d'une distance a . Durant la polarisation, l'atome acquiert un dipôle $p = e a$.

2) Polarisation ionique : due au déplacement mutuel des ions formant ainsi une molécule asymétrique. Le temps requis pour ce déplacement, afin d'assurer la polarisation est de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-13} s.

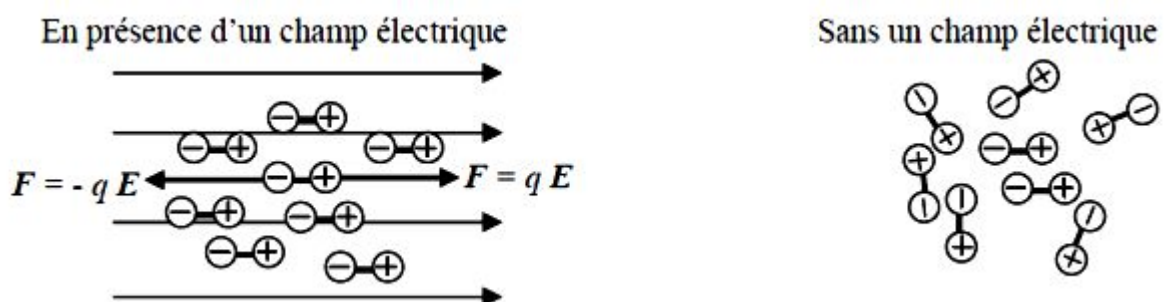
Les polarisations électronique et ionique ont beaucoup en commun. Dans les deux cas, il s'agit de déplacement de charges (et non pas rotation) dans la direction du champ électrique.

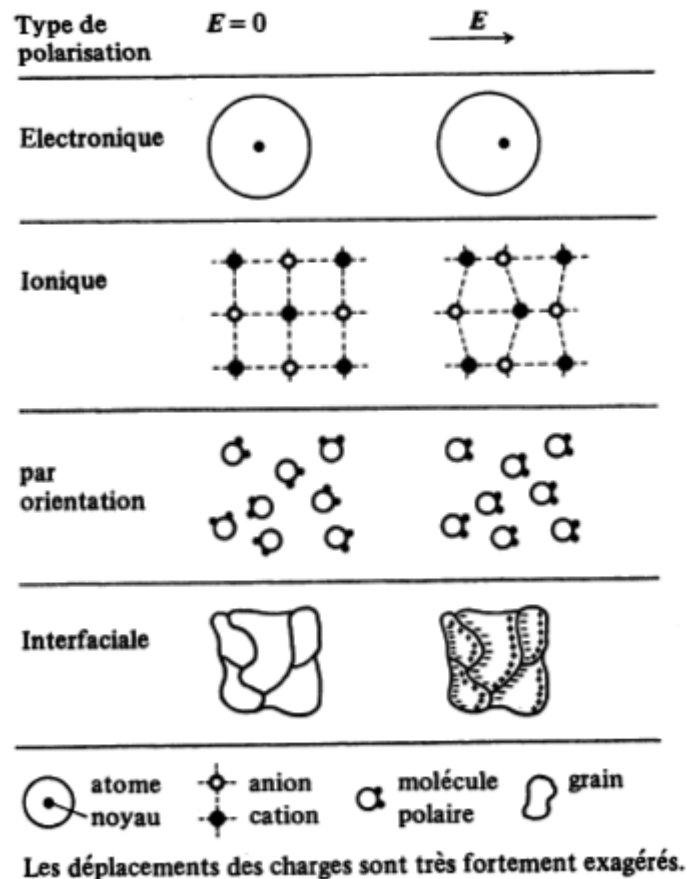
3) Polarisation macroscopique : due à des déplacements de charges dans l'ensemble du matériau.

4) Polarisation dipolaire (d'orientation) : Elle est spécifique aux diélectriques polaires, les dipôles s'orientent suivant la direction du champ électrique appliqué (voir figure). En l'absence de champ, les dipôles sont orientés de façon désordonnée, de telle façon que la polarisation globale est pratiquement nulle. Pour cette raison, la polarisation d'orientation est influencée et liée avec l'agitation thermique des molécules, la température exerce un effet appréciable sur ce type de polarisation.

La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont "figés" et ne peuvent être orientés.

Un dipôle placé dans un champ électrique est soumis à un couple qui tend à l'aligner suivant la ligne de ce champ.





Remarque :

Tous les types de polarisation provoquent des pertes diélectriques sous forme de chaleur suite aux frottements. En tension alternative les pertes sont beaucoup plus grandes qu'en tension continue. Par conséquent, la tension thermique de claquage est généralement plus faible pour les champs alternatifs, et elle diminue avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée.

6.5. Diélectriques linéaires et diélectriques non linéaires

Les diélectriques linéaires sont caractérisés par une relation linéaire entre la polarisation et le déplacement avec le champ électrique.

$$P = \chi \epsilon_0 E$$

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E$$

Pour certains matériaux "non linéaires" ces relations ne sont plus linéaires, la permittivité dépend alors du champ E . Ce type de diélectrique est utilisé dans certaines applications spécifiques.

Généralités sur la HT

1. Définition

une **haute tension** est toute tension qui engendre, dans les composants d'un système, des champs électriques suffisamment intenses pour modifier, de manière significative, les propriétés de la matière, en particulier des matériaux isolants.

Les systèmes à haute tension sont souvent le siège de phénomènes non linéaires ou se produisant à partir d'un seuil. Exemple : l'arc électrique.

Seuils de tensions :

Basses tensions : au-dessous de 1 kV.

Moyennes tensions : 1 ~ 33 kV.

Hautes tensions : 33 ~ 230 kV

Très hautes tensions : 230 ~ 800 kV

Ultra hautes tensions : au-dessus de 800 kV

En électronique, on parle de transistor à haute tension à partir de 5 V.

Réseaux électriques:

Le développement des réseaux électriques a constitué la première utilisation, à grande échelle, des hautes tensions.

Pour augmenter la puissance transportée, on peut :

→ augmenter le **courant** :

augmentation de l'échauffement (maximum admis: 60°C)

augmentation de la section

augmentation du poids

→ augmenter la **tension** :

augmentation du champ électrique

augmentation des distances d'isolement

apparition de phénomènes potentiellement perturbants

2. Perturbations dues à la haute tension

Différents phénomènes potentiellement perturbants sont propres à la haute tension (champs électriques élevés) :

- **Claquage diélectrique:** Détérioration provisoire ou définitive des spécifications de l'isolant.

Une isolation est dite auto-régénératrice si elle retrouve ses propriétés isolantes à peu près intactes après le claquage. Ce n'est pas le cas des solides qui, une fois perforés, doivent être remplacés. Les isolations au papier imprégné d'huile sont aussi auto-régénératrices, car l'huile va remplir un éventuel trou provoqué par un claquage à travers le papier.

- **Effet de couronne:** Perturbations sonores, rayonnement électromagnétique, perte d'énergie active, production d'ozone.

- **Décharges partielles:** Détérioration des isolants.

- **Dangers des tensions et des champs électriques pour l'être humain.**

3. Systèmes sous haute tension

En haute tension, les problèmes pratiques se posent comme suit :

- Étant donné une configuration de corps isolants et de corps conducteurs, en quel point du système le champ électrique est-il maximal ?
- Quelle est cette valeur maximale du champ électrique, pour des potentiels électriques donnés ?
- Pour quelles valeurs des potentiels le champ électrique maximal atteint-il un seuil de claquage ?
- Comment modifier la géométrie du système et la nature des matériaux isolants, pour pouvoir abaisser ou augmenter les potentiels utiles ?

Le but de l'étude peut être :

- *de pouvoir appliquer à l'objet un potentiel aussi élevé que possible.*
- *obtenir un claquage avec le minimum de potentiel.*
- *optimiser le coût de production de l'objet.*

Les problèmes électrostatiques sont souvent posés en termes de distribution de charges. Mais dans la pratique, on dispose de générateurs qui permettent de contrôler le potentiel. On ne contrôle ni la quantité de charges ni la manière dont elles se répartissent

4. Effet de pointe

densité surfacique de charge :

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

et pour une pointe :

$$S \approx 0 \Rightarrow \sigma \gg \Rightarrow E \gg$$

Sur les régions à faible rayon de courbure (pointe) le champ devient très intense. Cela représente un danger en HT (risque de claquage) mais aussi un avantage (paratonnerre...). Le pouvoir de pointe explique qu'en Haute Tension tous les appareils ont de grands rayons et sont munis d'anneaux de répartition du champ. En HT on doit éviter les pointes à la surface de conducteurs. Par contre, quand on désire un champ élevé on utilise un conducteur pointu.

Du point de vue du champ électrique maximal, la géométrie d'un intervalle isolant peut être caractérisée en première approximation par un nombre : **le facteur de Schwaiger**.

Dans un intervalle isolant, compris entre deux électrodes réelles, le champ n'est pas uniforme: il atteint un maximum en un certain point. Le facteur de Schwaiger d'un tel intervalle est défini par:

$$\beta = \frac{U}{d \times E_{max}}$$

U : tension entre électrodes; d : distance inter-électrodes

5. Rigidité diélectrique

La **rigidité diélectrique** est le champ électrique maximal que peut supporter un isolant avant que se produise une décharge disruptive.

La rigidité diélectrique se mesure en kV/mm ou kV/cm.

Les publications américaines donnent souvent des valeurs en V/mil.

1 mil = 1/1000° de pouce, soit 25,4µm \Rightarrow 1 kV/mm = 25,4 V/mil

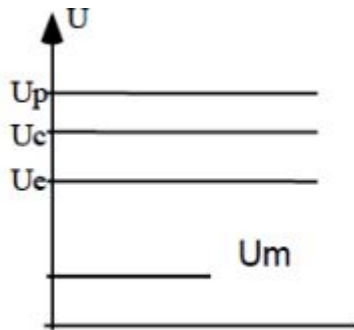
6. Coordination de l'isolement

On entend par coordination de l'isolement, l'ensemble des mesures qui sont prises pour éviter des décharges disruptives de perforation ou de contournement dans le matériel des installations.

Ces conditions sont obtenues en respectant des tensions de tenue minimales pour les diverses parties des installations. Il s'est donc avéré nécessaire de fixer des règles internationales et nationales (Commission Electrotechnique Internationale - CEI -). Ces règles définissent d'une part les tensions d'essais du matériel électrique et, d'autre part, les conditions dans lesquelles ces essais doivent être effectués. Par une gradation des tensions d'essai, on obtient ainsi une coordination de l'isolement correcte.

Les systèmes d'isolation peuvent être composés des trois états de la matière : **solide, liquide et gazeux**. Les caractéristiques diélectriques doivent répondre aux sollicitations maximales, à long terme. La valeur du champ maximum juste avant un claquage définit la **rigidité diélectrique** du matériau. **Cette valeur est différente pour les ondes de choc et les ondes alternatives.**

Les appareils dont la coordination de l'isolement est correcte, présentent les niveaux de tension de la figure ci-dessous.



U_p : tension de perforation (isolation interne)

U_c : tension de contournement (isolation externe)

U_e : tension d'essai fixée par les règles de coordination des isollements (prescriptions CEI).

U_m : tension de service la plus élevée

Tension de perforation ou de claquage

La tension de perforation ou de claquage est celle qui conduit à la perforation ou percement de l'isolation interne: décharge complète et destructive au travers de l'isolant. Cette tension doit être évidemment plus grande que la tension de contournement de l'appareil.

Tension de contournement, tension de cheminement

La tension de contournement est la tension disruptive, qui produit une décharge dans l'air, le long de l'isolation externe de l'appareil. Cette tension doit être plus élevée que la tension d'essai. En effet, selon les règles précitées, l'appareil soumis à la tension d'essai ne doit présenter aucun contournement au cours des essais.

Tension d'essai

La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement.

Quelques définitions complémentaires:

On appelle **tension de tenue à fréquence industrielle** la valeur efficace la plus élevée de la tension à la fréquence de service que le matériel doit supporter pendant une minute entre sa partie active et la masse, sans qu'il ne se produise de décharge disruptive de perforation ou de contournement.

On appelle **tension de tenue au choc** la valeur de crête de la tension de choc en onde pleine de forme normalisée que le matériel doit supporter dans des conditions spécifiées.

Le **niveau d'isolement** d'un matériel donné est défini par les valeurs de tenue à fréquence industrielle et de tenue au choc.

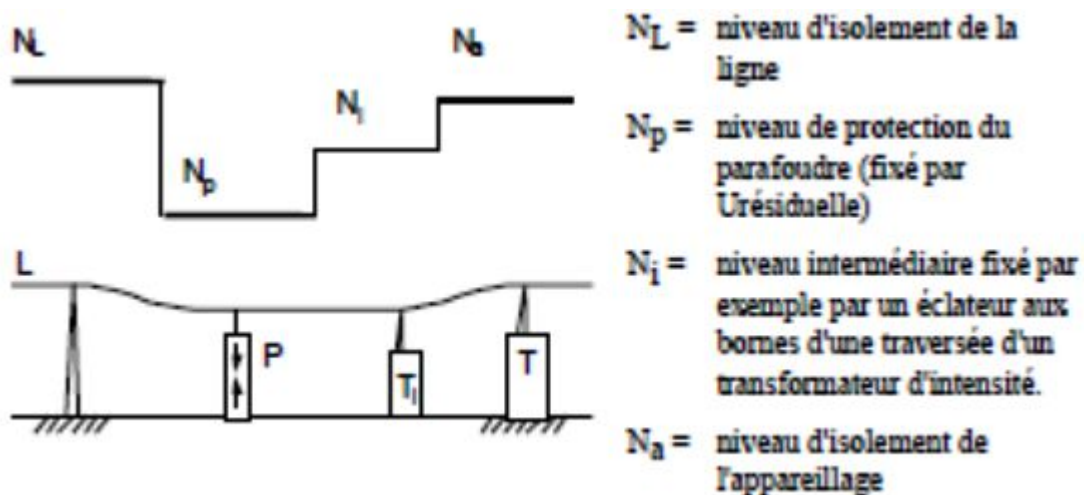
Le **niveau de protection au choc** d'un dispositif de protection est la valeur de crête la plus élevée de la tension qui peut exister entre ses bornes lors de l'application d'une onde de choc normalisée. Pour un parafoudre à résistance variable, ce sera la tension résiduelle correspondant à l'intensité de décharge la plus élevée à laquelle on puisse s'attendre. Il est clair qu'il faudra veiller à ce qu'une relation convenable existe entre ce niveau de protection et le niveau d'isolement du matériel. Roth recommande un niveau de protection d'environ 25% au-dessous du niveau d'isolement.

Gradation des niveaux d'isolement dans un réseau

Il est pratiquement impossible, pour des raisons économiques d'isoler, parfaitement un réseau. Des surtensions très fortes créeront ainsi des perturbations, d'où les dispositions suivantes :

- Limiter l'importance de ces perturbations, si possible pas d'interruption de service.
- Limiter les dégâts à des parties secondaires facilement accessibles et remplaçables.
- Les lignes, étant peu accessibles, seront bien isolées. Dès 30 kV, fil de garde.
- Les sous-stations étant bien surveillées, les surtensions peuvent être bien contrôlées.

De ces principes, on comprend que la gradation des niveaux d'isolement des diverses parties est indispensable.



Décharge électrique

1. Définitions

Une **décharge électrique** est un canal conducteur se formant, sous certaines conditions, entre deux électrodes, à travers un milieu normalement isolant.

Une décharge est dite **non autonome** lorsque l'émission des électrons doit être provoquée par apport d'énergie thermique (cathode chauffée) ou par irradiation. La décharge non autonome cesse en l'absence de l'agent ionisant extérieur.

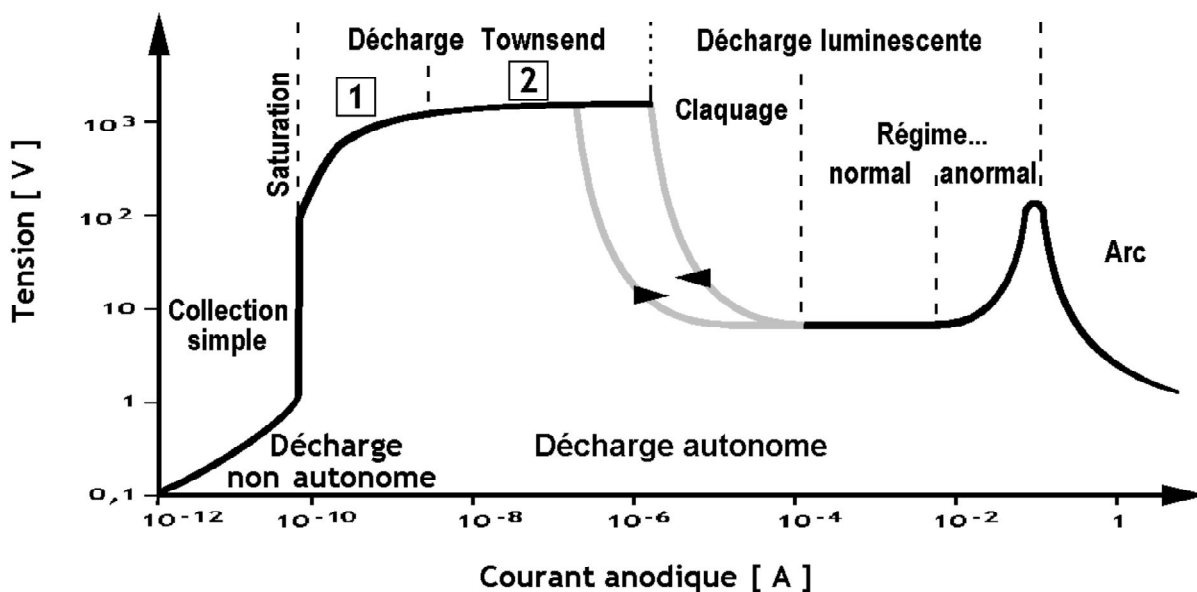
Dans certaines configurations, il se peut que l'irradiation naturelle (par les rayons cosmiques ou les rayons UV) suffise à obtenir la décharge non autonome.

La décharge est dite **autonome** lorsqu'elle se maintient sans agent ionisant extérieur.

La décharge autonome est aussi appelée décharge indépendante.

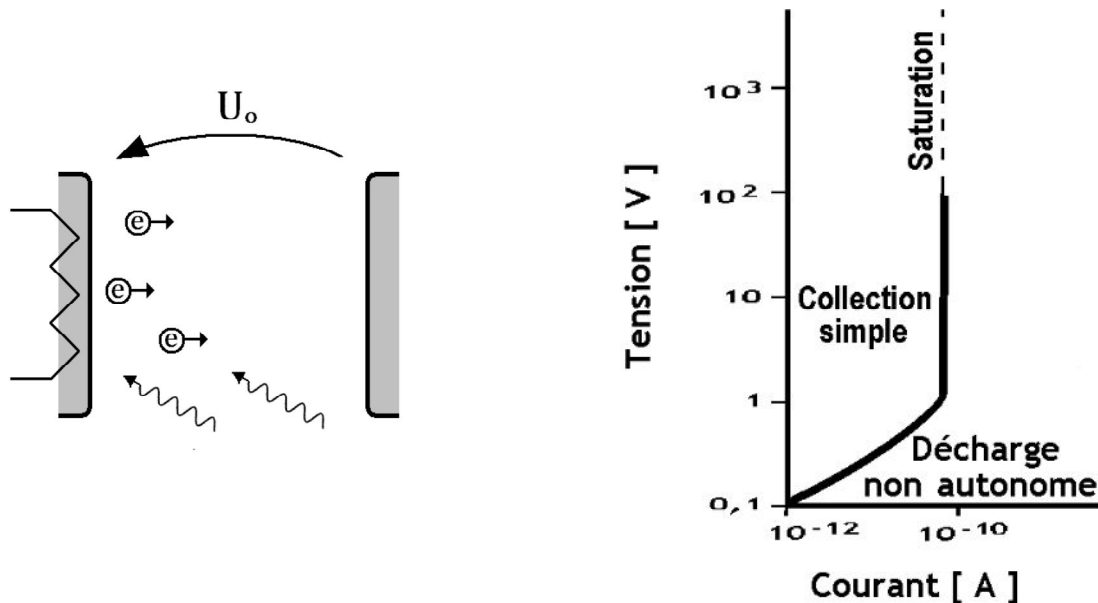
2. Mécanismes de décharge dans les gaz

Divers phénomènes se produisent entre deux électrodes séparées par un intervalle de gaz et soumises à une différence de potentiel.



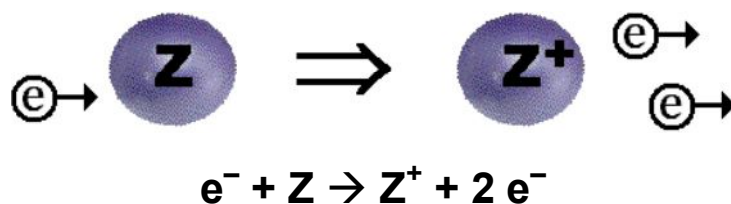
2.1. Décharge de collection simple

Soit deux électrodes baignant dans un gaz et soumises à une différence de potentiel U_0 . En l'absence de production d'électrons, aucun courant ne circule. Mais si, par exemple, la cathode est chauffée ou si un rayonnement provoque une ionisation du gaz, alors un courant I commence à circuler, selon une loi du type $I = (U_0)^\theta$ avec $\theta = 1, 5 \sim 2$ (selon la pression du gaz). Le courant est limité par la quantité d'électrons produits par unité de temps.



Ce type de décharge est invisible.

2.2. Décharge avec multiplication



Le mécanisme décrit ici est principalement valable dans les gaz comme l'azote ou le CO_2 , qui ne sont pas trop fortement électronégatifs.

L'énergie des électrons accélérés devient suffisante pour ioniser le gaz, d'où une multiplication d'électrons disponibles pour contribuer au courant d'anode. On a alors une avalanche exponentielle d'électrons.

2.3. Premier coefficient de Townsend

Le phénomène de l'avalanche conduit à la relation suivante entre le courant émis par la cathode, I_0 , et le courant obtenu à l'anode, I_{an} :

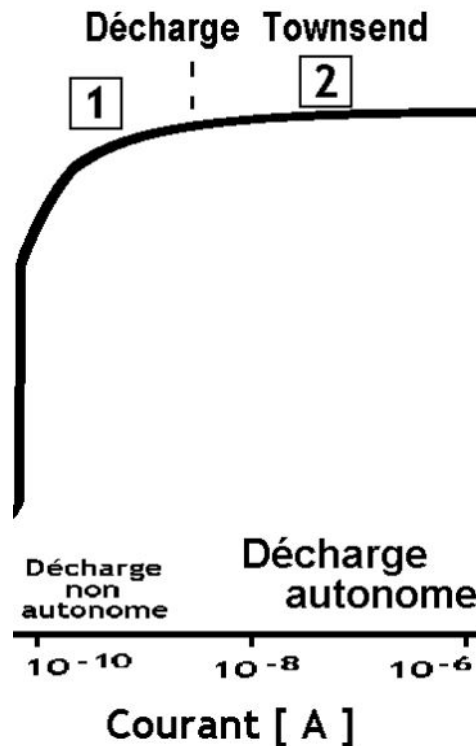
$$I_{an} = I_0 e^{\alpha d}$$

Le paramètre α est le premier coefficient de Townsend, il vaut le nombre d'électrons engendrés par électron incident et par unité de longueur.

Ce coefficient peut-être relié au libre parcours moyen $\bar{\lambda}$ des électrons:

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\bar{\lambda}}$$

La tension de seuil d'apparition de l'avalanche, U_s , est proportionnelle au produit: pression du gaz x distance inter-électrodes (p.d).



Capture électronique

Dans les gaz fortement électronégatifs, comme l'hexafluorure de soufre (SF_6), un électron peut être capturé par une molécule du gaz pour former un ion négatif stable:



Dans ces conditions, les électrons disponibles pour produire l'avalanche sont un peu moins nombreux que dans le cas précédent, une certaine fraction η d'entre eux étant capturée par les molécules du gaz.

η est appelé **coefficient d'attachement** et le courant à l'anode est donné par la relation :

$$I_{an} = I_0 \left[\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right]$$

2.4. Décharge avec émission secondaire

L'émission secondaire est une émission d'électrons à la cathode, due au bombardement par les ions positifs.

Pour une tension assez élevée, les ions formés au cours des collisions avec les électrons sont accélérés en direction de la cathode, avec une énergie suffisante pour provoquer l'émission d'un nouvel électron, dit *électron secondaire*.

Pour que des électrons quittent la cathode, il faut qu'ils reçoivent suffisamment d'énergie pour franchir la barrière énergétique que constitue la frontière avec le milieu extérieur.

Avec le processus d'émission secondaire, le courant à l'anode est donné par :

$$I_{an} = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

γ est le **second coefficient de Townsend** ; il dépend principalement de la nature du gaz et de l'état de surface des électrodes.

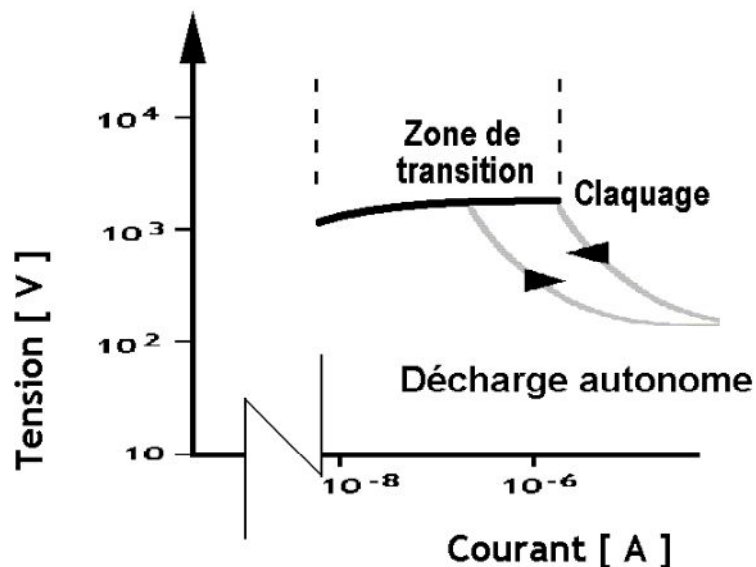
2.5. Décharge disruptive

Lorsqu'on cherche à imposer une tension croissante, on aboutit à une **décharge disruptive** ou **claquage diélectrique**.

En pratique, on observe une brusque augmentation du courant et une chute de la tension: l'impédance du milieu gazeux s'effondre.

Ce phénomène crée un canal ionisé à travers le matériau et s'accompagne de divers effets lumineux, sonores, chimiques, etc.

Dans les gaz ou les liquides, l'apparition d'une décharge disruptive est souvent appelée claquage ou amorçage.



2.6. Loi de Paschen

La limite à laquelle le courant d'anode tend vers l'infini correspond à la rupture diélectrique du gaz (ou claquage).

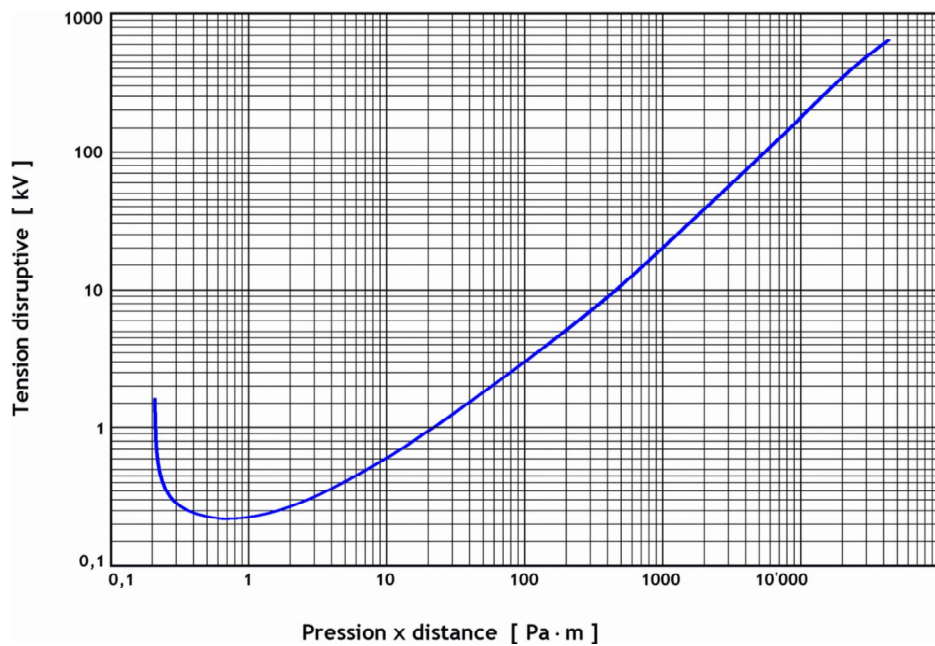
Lors du claquage, la décharge devient fortement lumineuse et l'impédance du canal ionisé tombe subitement : le courant augmente fortement et la tension s'effondre.

Compte tenu de la relation donnant α à partir de la théorie cinétique des gaz, on obtient la **Loi de Paschen** donnant la tension disruptive en fonction du produit de la pression p du gaz par l'écartement d des électrodes :

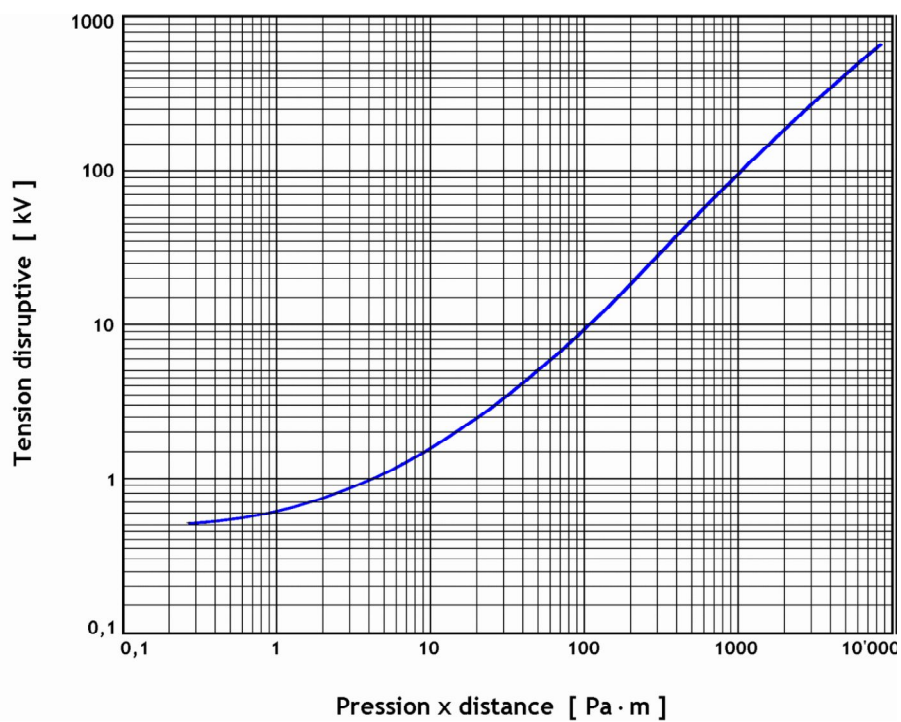
$$U_d = k \frac{(p \times d)}{\ln[A(p \times d)] - C}$$

k , A et C : constantes dépendant du gaz et de la température.

Courbes de Paschen



Courbe de Paschen dans l'air

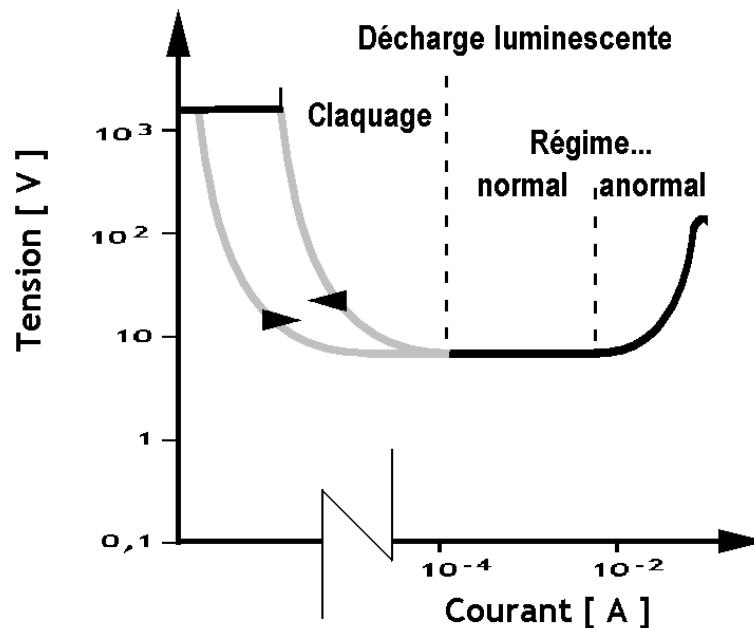


Courbe de Paschen dans le SF₆

2.7. Décharge lumineuse

Dans un tube fluorescent (gaz à basse pression, entre 100 et 5000 Pa) ou dans les ampoules à gaz à haute pression (xénon, krypton, mercure, sodium : $10^5 - 10^6$ Pa), le dépassement de la limite disruptive conduit à une décharge lumineuse, caractérisée par:

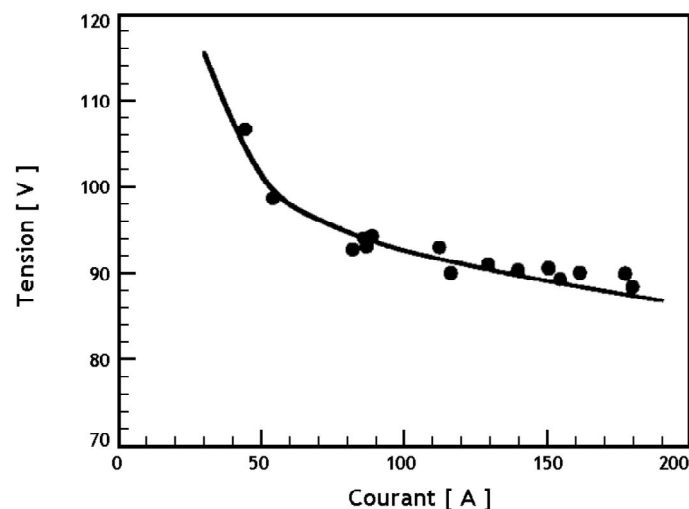
- l'augmentation du courant
- l'augmentation de la surface émissive de la cathode (régime normal), puis...
- l'augmentation de la tension lorsque toute la surface cathodique est devenue émissive (régime anormal).



Dans la décharge lumineuse, la cathode reste froide.

2.8. L'arc électrique

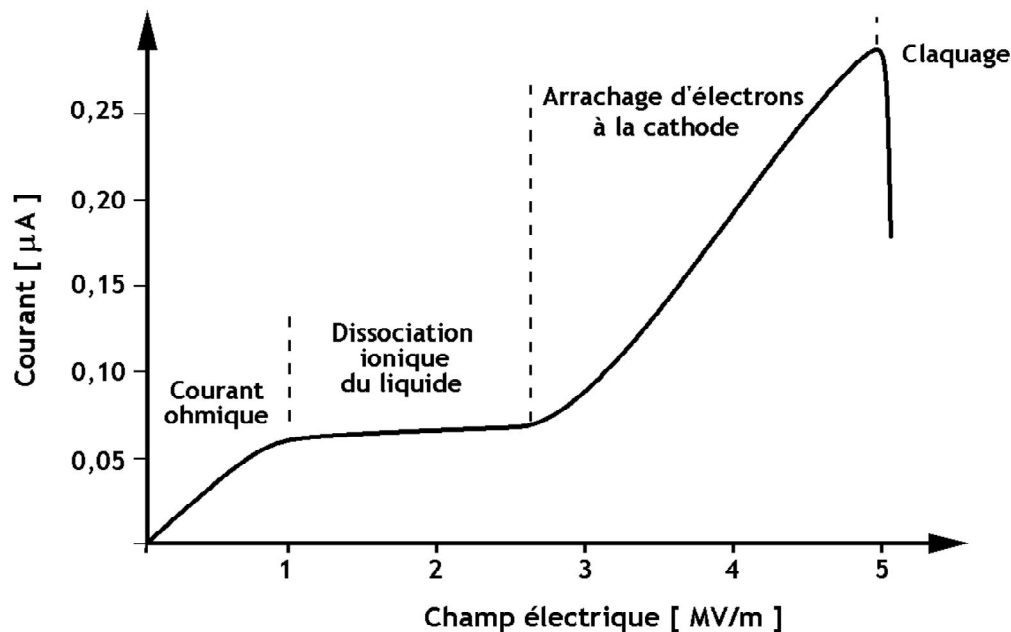
L'arc électrique est une décharge électrique autonome transportant un fort courant sous une faible différence de potentiel. Avec l'arc, la cathode devient chaude.



Caractéristique I-U d'un arc dans l'azote à 2,2 atm.
entre des électrodes en cuivre distantes de 3 mm

3. Claquage dans les liquides

Le courant qui s'établit dans un liquide isolant, en fonction de la tension (ou du champ E) passe schématiquement par 3 étapes, avant le claquage.



Le courant ohmique qui s'établit à faible champ est essentiellement tributaire des impuretés présentes dans le liquide.

Il n'existe pas de « Loi de Paschen » dans les liquides.

4. Claquage dans les solides

Divers processus peuvent conduire au claquage dans un solide.

Le **claquage thermique** dû à l'élévation de la température par effet Joule (à basse fréquence) ou par résonance avec la polarisation par orientation (autour du MHz).

Le **claquage électromécanique** dû aux forces de compression provoquée par le champ électrique.

Le **claquage par streamer** dû au déclenchement d'une avalanche électronique.

Le **claquage par érosion** dû essentiellement à l'effet des décharges partielles sur le long terme.

Dans les isolants solides, la décharge disruptive est appelée :

perforation, lorsqu'elle traverse le matériau en y produisant souvent des dégâts irréversibles.

contournement, lorsque l'arc ne traverse pas l'isolant mais suit sa surface externe ou un chemin extérieur.

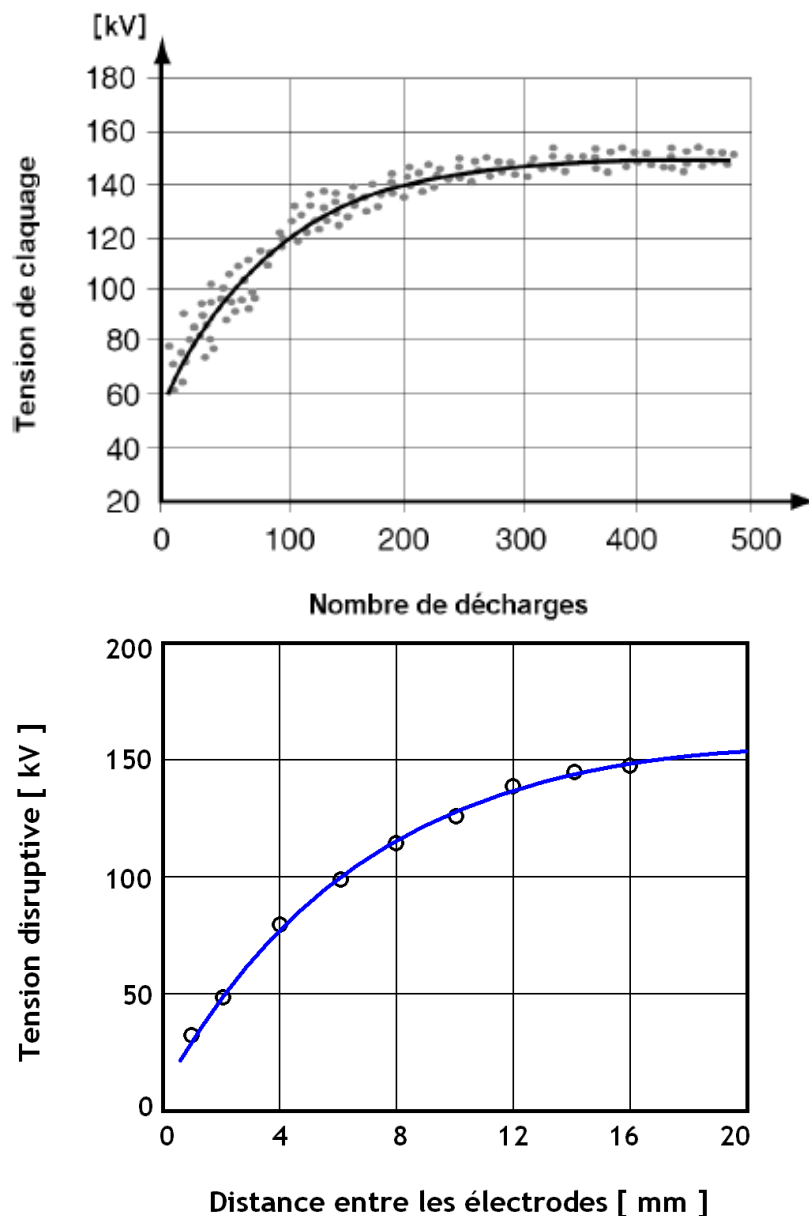
5. Claquage dans le vide

Des intervalles «vides» soumis à des hautes tensions sont utilisés dans différents domaines : dispositifs de coupure sous vide, séparateurs, purificateurs, tubes à rayons X, spectromètre, accélérateurs de particules, canons à électrons, microscopes électroniques, tubes à vide,...

La tension de claquage d'un intervalle «vide» dépend de nombreux facteurs : le type et la pression des gaz résiduels, les matériaux et l'état de surface des électrodes, leur température et les impuretés qui s'y trouvent, la nature des matériaux formant l'enceinte à vide, etc.

Dans le vide, l'émission par effet de champ joue un rôle important. Une évaluation numérique montre que le champ à la surface des électrodes devrait être au moins 100 fois supérieur au champ homogène, ce qui n'est pas complètement élucidé.

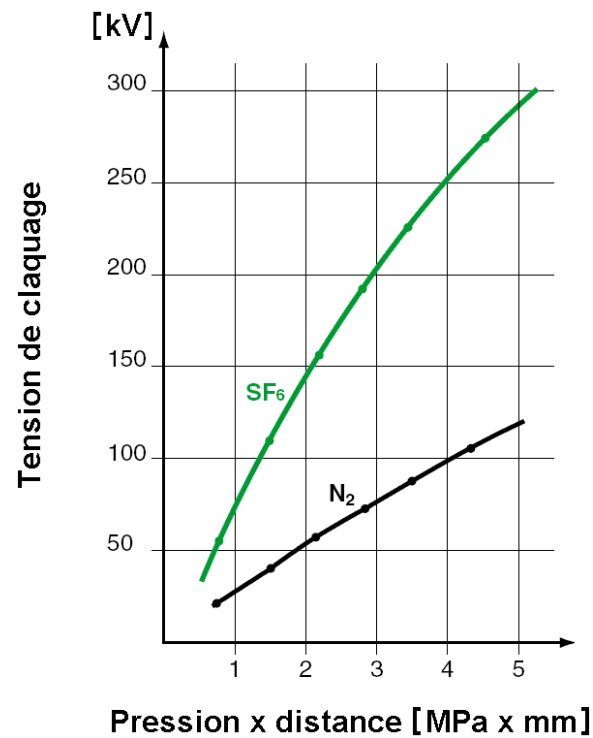
Les tests de rigidité diélectrique d'un intervalle «vide» ne sont généralement pas reproductibles. Chaque claquage modifie la composition du gaz et l'état de surface des électrodes. D'où l'importance du conditionnement, avant la mise en service.



Tension de claquage mesurée entre deux électrodes en forme d'anneaux en W-Cu placées dans le vide (pression résiduelle 10^{-4} Pa et tension appliquée AC 50Hz)

6. Rigidité diélectrique du SF₆:

Une tension de claquage nettement plus élevée que l'air permet de réduire d'autant les distances entre les éléments entre lesquels existe une différence de potentiel (distance d'isolement).



Effet de Couronne

1. Définitions

L'**effet de couronne** consiste en l'apparition d'aigrettes et d'effluves autour d'un conducteur porté à un potentiel élevé.

On appelle **effluve**, la décharge électrique faiblement lumineuse et ne produisant pas de bruit particulier. Les effluves correspondent à la fin de la zone de Townsend 2, proche du claquage.

On appelle **aigrette** la décharge électrique intermittente en forme de houppe mobile. Elle est généralement accompagnée d'un sifflement ou d'un crépitement. Les aigrettes constituent un état instable de la décharge, sous forme d'aller et retour entre la zone de Townsend 2 et la zone de claquage.

L'effet de couronne peut être indésirable (par exemple autour des lignes à haute tension), ou au contraire mis à profit dans certaines applications : générateurs électrostatiques, traitement de surface, xérophographie, production d'ozone, etc.

2. Effet de couronne sur ligne coaxiale

Lorsqu'on applique une tension croissante à une ligne coaxiale de rayons R_1 et R_2 , la décharge disruptive survient à partir d'un seuil de tension, U_c .

Deux cas sont à distinguer :

$R_1 < R_2/e$: apparition d'une zone ionisée, de rayon croissant, autour du conducteur central ; puis amorçage d'une étincelle.

$R_1 > R_2/e$: amorçage d'une étincelle sans effet de couronne.

Correction de Peek

$$U_c = E_{d0} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \times R_1}} \right) R_1 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

E_{d0} : champ disruptif standard, $E_{d0} = 30 \text{ kV/cm}$ en DC ou $21,2 \text{ kV/cm}$ efficace AC

K : facteur de corrections climatiques

m : facteur de corrections liées à l'état de surface du conducteur

Le facteur entre parenthèses tient compte de la difficulté des électrons à produire l'ionisation de l'air autour d'un conducteur de très petit diamètre.

Lignes monophasées

Pour une ligne monophasée, avec une distance D entre les conducteurs de rayon R , la valeur efficace de la tension d'apparition de l'effet de couronne est donnée par :

$$U_c = 2 E_{d0} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \times R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

Lignes triphasées

Pour une ligne triphasée symétrique dans laquelle les trois conducteurs sont disposés en triangle équilatéral, l'effet de couronne apparaît dès que les tensions simples atteignent la valeur :

$$U_c = E_{d0} \frac{K m}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \times R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

3. Effet de couronne dans les réseaux

Les lignes électriques sont dimensionnées pour éviter l'effet de couronne. Celui-ci se produit toutefois dans différents cas:

- par temps pluvieux ou par brouillard. Les gouttes ou gouttelettes d'eau favorisent l'apparition d'aigrettes autour des conducteurs ;

Ce sont bien les gouttes qui produisent cet effet; l'humidité a normalement l'effet inverse, sauf quand elle produit de la condensation sur les conducteurs.

- lorsque les conducteurs ou les isolateurs de la ligne commencent à être pollués, comme cela finit forcément par arriver après un certain nombre d'années ;

- lorsqu'un conducteur ou un isolateur est devenu défectueux, à la suite d'une rupture mécanique localisée. Dans ce cas, les perturbations engendrées par l'effet de couronne peuvent servir à localiser le défaut.

4. Pertes dues à l'effet de couronne

Pour $U_s \geq 1,8 U_c$, les pertes de puissance active par phase, dues à l'effet de couronne, sont données par la formule de **Peek** :

$$P = 2,41 \cdot 10^{-9} \frac{f + 25}{K} \sqrt{\frac{R}{D}} (U_s - U_c)^2$$

P : perte de puissance active par unité de longueur [W/m = kW/km]

f : fréquence du réseau [Hz]

U_s : tensions simples

L'expérience montre cependant que les pertes varient fortement selon l'état de surface des conducteurs, qui lui-même dépend de facteurs climatiques, ainsi que du vieillissement des conducteurs.

Pour $U_s < 1,8 U_c$, les pertes de puissance active par phase, dues à l'effet de couronne, sont données par la formule de **Peterson** :

$$P = \frac{2,25 \cdot 10^{-16} E_{d0} f U_s^2}{[\ln(D/R)]^2} \times F$$

Le facteur F dépend du rapport U_s / U_c :

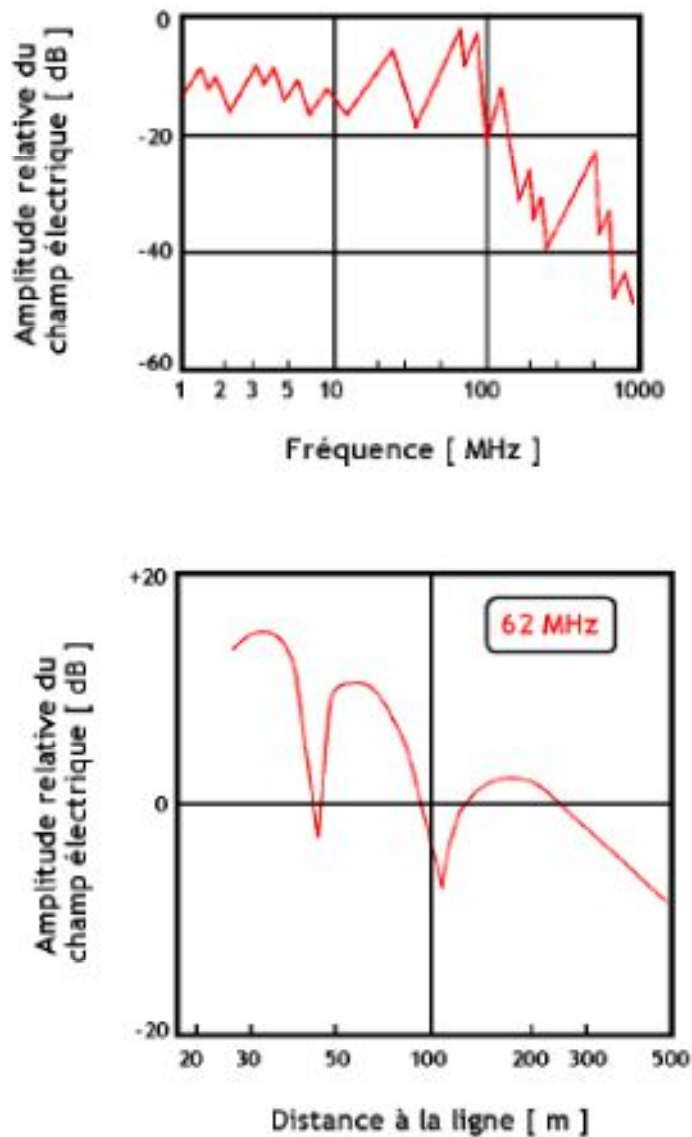
U_s / U_c	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F	0,05	0,08	0,3	1	3,5

Les pertes dues à l'effet de couronne deviennent négligeables, par rapport aux pertes par effet Joule, pour les lignes de grandes longueurs.

5. Autres effets causés par l'effet de couronne

5.1. Perturbations électromagnétiques

L'effet de couronne engendre un rayonnement électromagnétique.

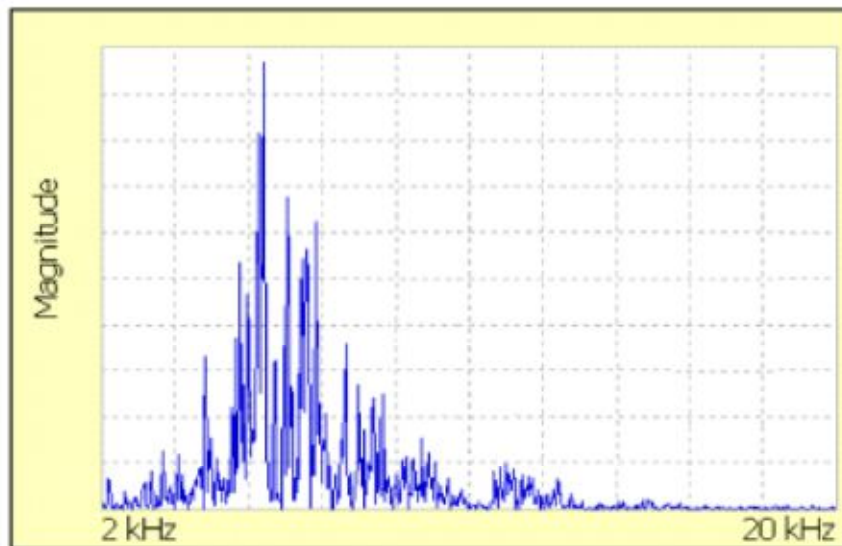


Exemples de variation du champ électrique perturbateur

Une différence de 20 dB est régulièrement observée entre les niveaux des champs électriques perturbateurs mesurés par temps sec et par temps pluvieux.

5.2. Perturbations acoustiques

Les fréquences sonores émises par l'effet de couronne dans le réseau électrique sont principalement comprises entre 2 et 15 kHz.



Exemple de spectre sonore
enregistré sur une installation moyenne tension

5.3. Production d'ozone

La production d'ozone autour des lignes à haute tension est généralement modérée.

Des mesures réalisées sous des lignes haute tension ont montré des concentrations d'ozone de l'ordre de 0,004 ppm d'ozone par temps sec et jusqu'à 0,009 ppm par temps pluvieux.

Les seuils de toxicité de l'ozone, pour des effets réversibles (sensibilité bronchitique) correspondent à 0,1 ppm pendant 7 heures ou 0,35 ppm pendant 1 heure. Dose létale : 50 ppm pendant 30 minutes.

La limite admise dans l'atmosphère est de l'ordre de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit un peu moins de 1 ppm.

6. Utilisation de l'effet de couronne

Production d'ozone

- pour purifier : élimination des bactéries dans l'eau et dans l'air, oxydation des métaux lourds dans les rejets industriels.
- pour blanchir : aliments, papier, textiles...

Production d'ions

- pour (dé)charger : élimination des charges statiques, xérographie.
- pour séparer : analyse chimique, élimination de poussière...
- pour la santé : ioniseurs d'airs.

Générateur corona

Surtections

1. Définitions et origines

On désigne par **surtection** toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc...).

L'étude des surtections peut être abordée de manière différente selon leur spectre de fréquence. Un phénomène électrique ou électromagnétique n'est jamais instantané : il doit se **propager**. Sa **vitesse de propagation** peut être très grande, mais pas infinie.

En pratique, le phénomène pourra être considéré comme instantané si sa **longueur d'onde** est beaucoup plus grande que les dimensions du système considéré.

Exemple :

pour une ligne de 100 km, un phénomène à 50 Hz

$$\lambda = c \times \frac{1}{f} = 3.10^8 \times \frac{1}{50} = 6000 \text{ km}$$

peut être considéré comme instantané ; par contre pour un phénomène à 10 kHz ($\lambda = 30 \text{ km}$), il faudrait tenir compte de sa propagation.

Origines des surtections:

Les surtections peuvent avoir trois origines :

- atmosphériques
- manœuvres sur le réseau (phénomènes transitoires)
- surtections à la fréquence de service dues au déclenchement de charges ou aux lignes à vide.

Pour éviter que les surtections n'aient des suites catastrophiques sur les appareils, on construit ceux-ci de façon à ce qu'ils résistent à des surtections à la fréquence nominale pendant 1 min et à des chocs normalisés. Pour éviter que la tension n'atteigne ces valeurs, on installera à l'entrée des postes de couplage des parafoudres qui s'amorcent à une tension définie et écoulent ces surtections à la terre, puis interrompent le courant qui les traverse.

2. Propagation des ondes dans les lignes à constantes réparties

La théorie fait partie du cours de physique; aussi nous bornerons-nous aux cas particuliers qui nous intéressent.

Les équations différentielles de la tension et du courant sont (d'après la règle de Kirchhoff et des nœuds) :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$

où

R = résistance ohmique (Ω/m)

L = inductance (H/m)

C = capacité (F/m)

G = conductance transversale (S/m)

d'où l'on déduit l'équation commune à u et i

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RG u + (RC + LG) \frac{\partial u}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

L'étude de la solution générale est assez complexe ; dans le cas où l'on a affaire à des ondes de haute fréquence, on peut admettre que les paramètres R et G ont peu d'influence, face à L et C . En posant

$$R = G = 0$$

ce qui revient à admettre que la ligne est sans pertes, c'est-à-dire que l'amortissement du phénomène est nul (il n'est d'ailleurs pas considérable dans les lignes usuelles), l'équation précédente devient :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

dont la solution générale est de la forme : $u = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$

avec v la vitesse de propagation du phénomène

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

où

c = vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ m/s)

μ_r = perméabilité (1 dans le vide, dans l'air)

ϵ_r = constante diélectrique de l'isolant

f_1 et f_2 sont des fonctions arbitraires dépendant des conditions initiales.

$f_1(x - vt)$ est une onde progressive

$f_2(x + vt)$ une onde rétrograde.

Nous définissons l'impédance d'onde:

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

des valeurs typiques pour cette impédance

câble d'énergie : 10 - 60 Ω

câble télécommunication: 100 - 150 Ω

ligne aérienne: 300 - 600 Ω

La résolution du système d'équations donne pour le courant :

$$i = \frac{u}{Z_w} = \frac{f_1(x - vt)}{Z_w} - \frac{f_2(x + vt)}{Z_w}$$

3. Réflexion et réfraction

Lorsqu'une onde se propage dans un réseau, à chaque discontinuité, c'est-à-dire chaque fois que les paramètres changent de valeur, donc aussi l'impédance d'onde Z_w qui devient:

$$Z_{w2} = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$$

une réflexion et une réfraction partielles vont se produire.

Pour simplifier, considérons une onde rectangulaire se propageant à la vitesse v , le long d'une ligne d'impédance Z_{w1}

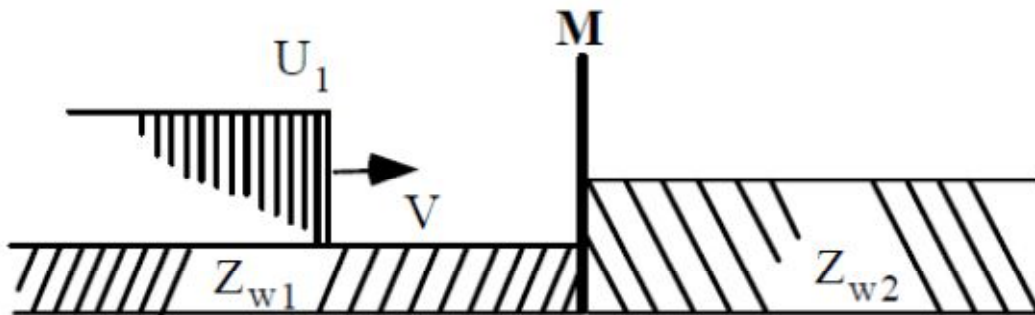


$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

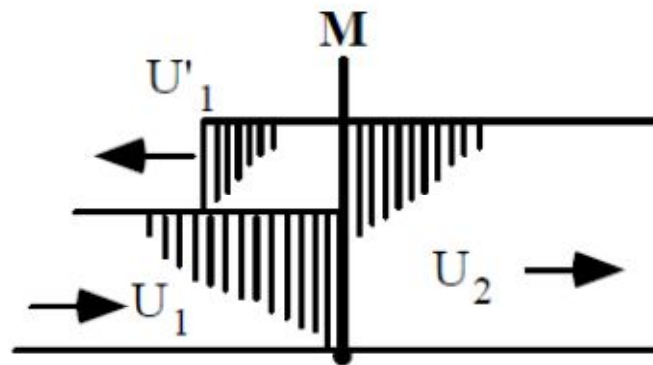
Il y circulera également un courant:

$$i_1 = \frac{u_1}{Z_{w1}}$$

A l'extrémité de la ligne, se trouve (point M) un élément (ligne, câble, transfo, par ex.) dont l'impédance d'onde est Z_{w2}



u_1 est l'onde incidente, respectivement i_1 , appelons u_2 l'onde réfractée (transmise) et u'_1 l'onde réfléchie. Un instant plus tard on aura:



à tout instant :

$$u_1 + u'_1 = u_2$$

D'autre part,

$$i_1 + i'_1 = i_2$$

u_1, i_1, u_2, i_2 sont des ondes progressives

u'_1, i'_1 sont des ondes rétrogrades

donc :

$$u_1 = Z_{w1} i_1$$

$$i_1 = \frac{u_1}{Z_{w1}}$$

$$u_2 = Z_{w2} i_2$$

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_{w2}}$$

$$u'_1 = -Z_{w1} i'_1$$

$$i'_1 = -\frac{u'_1}{Z_{w1}}$$

En introduisant la valeur des courants et en combinant entre les équations des tensions et des courants, on établit que :

$$u'_1 = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}} u_1$$

$$u_2 = \frac{2Z_{w2}}{Z_{w2} + Z_{w1}} u_1$$

On définit alors

le facteur de réflexion:

$$r_u = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}}$$

et le facteur de transmission:

$$t_2 = \frac{2Z_{w2}}{Z_{w2} + Z_{w1}}$$

L'onde réfléchie sera **positive** si $Z_{w2} > Z_{w1}$; dans ce cas, il y aura augmentation de la surtension au point de transition ; par exemple, passage d'une ligne aérienne à un transfo, ou d'un câble à une ligne aérienne. Dans une telle situation, **c'est donc à l'endroit de la transition que l'on peut craindre une rupture de diélectriques.**

Cas particuliers :

a) ligne à vide : $Z_{w2} = \infty$

$$r = +1 \text{ et } t = 2$$

la tension est doublée à l'extrémité de la ligne; le courant est nul car :

$$i_2 = \frac{u_2}{Z_{w2}} = 0$$

$$i'_1 = -i_1$$

l'onde réfléchie est de même phase et de même amplitude.

b) ligne à terre ou en court-circuit : $Z_{w2} = 0$

$$r = -1 \text{ et } t = 0$$

la tension est nulle, mais le courant est doublé :

$$i'_1 = i_1, \quad i_2 = 2i_1$$

l'onde réfléchie est déphasée de 180° et de même amplitude.

c) ligne adaptée: $Z_{w2} = Z_{w1}$

$$r = 0 \text{ et } t = 1$$

il n'y a pas de réflexion.

4. Surtensions atmosphériques

La foudre est une décharge électrique entre un nuage et le sol ou entre deux nuages. A la différence d'un condensateur, où les charges sont à la surface des électrodes conductrices, dans un nuage orageux, les charges sont portées par les gouttelettes d'eau ou les cristaux de glace ; leurs déplacements sont relativement lents, de telle sorte qu'une décharge ne met en jeu qu'une partie des charges contenues dans le nuage.

Ainsi, un coup de foudre est généralement constitué d'une **série de décharges**, utilisant le même trajet d'éclair, et séparées les unes des autres d'un temps variant entre quelques dizaines de microsecondes jusqu'à quelques dixièmes de secondes.

Les décharges entre nuage et sol sont **négatives** dans 90 % des cas ; elles frappent ainsi les points de l'électrode opposée aux points où le champ électrique est le plus fort : c'est-à-dire les pointes (arbres, clochers, pylônes, fils de lignes électriques, etc...).

On peut chiffrer approximativement les grandeurs d'un coup de foudre :

10^8 à 10^{10} V pour le potentiel d'un nuage ;

5 à 10 kV/m pour le champ électrique au voisinage du sol pendant les orages ;

20 à 60 kA pour l'intensité d'une décharge

200 kA pour des valeurs extrêmes

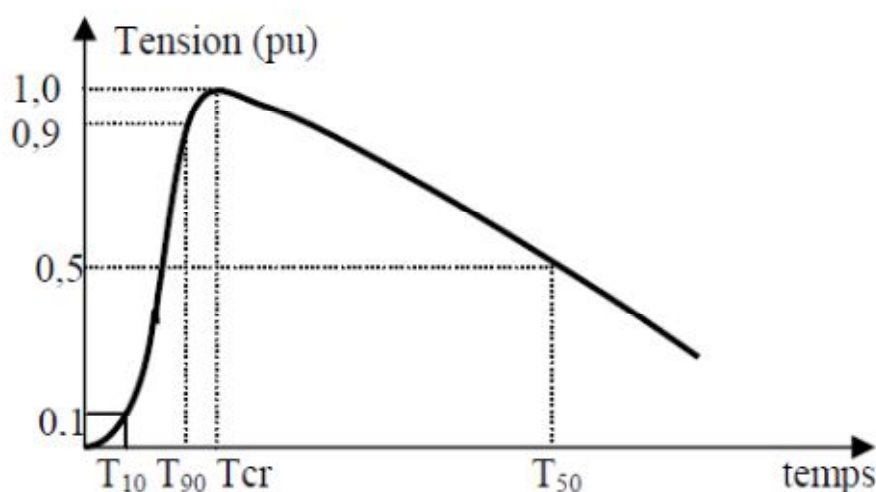
10 à 300 C pour les charges des nuages.

L'onde de choc présente un front de 1 à 5 μ s et une durée de demi-amplitude de 20 à 50 μ s (durée jusqu'à ce que la tension ait atteint la moitié de sa valeur maximum).

Les décharges négatives, partant du nuage suivant un canal nommé streamer, descendent vers le sol par échelons, avec une allure bifurquée. La vitesse de l'éclair est de 20 à 110 m/ μ s, correspondant à une vitesse en ligne droite entre 15 et 65 m/ μ s.

Onde conventionnelle :

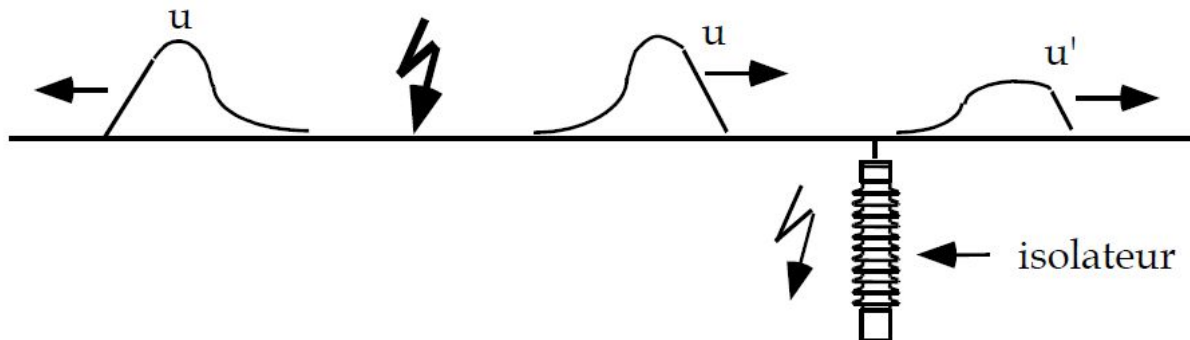
l'onde de choc conventionnelle est une onde normalisée que tous les constructeurs d'appareillage électrique HT utilisent pour effectuer les tests de contrôle.



coup de foudre négatif	coup de foudre positif
$T_{front}(90\%) = 1 \text{ à } 10 \mu s$	$T_{front}(90\%) = 10 \text{ à } 100 \mu s$
$T_{queue}(50\%) = 40 \text{ à } 200 \mu s$	$T_{queue}(50\%) = 500 \text{ à } 1000 \mu s$

Coup de foudre direct :

La décharge atteint directement un ou plusieurs conducteurs de ligne. Les charges s'écoulent dans la ligne, dans les deux sens, en y développant un potentiel dépendant de l'impédance d'onde.



L'onde ayant touché la ligne se déplace le long de celle-ci. Au passage d'un isolateur, elle peut provoquer un amorçage si sa valeur dépasse la tension disruptive de l'isolateur, tension de contournement au choc. Une partie des charges s'écoule à la terre par le support (pylône par ex.). L'onde est alors réduite à une valeur u' .

Toutefois, aussi bien les valeurs u que u' sont très élevées et dépassent la tension provoquant un effet couronne ; cet effet consomme de l'énergie et réduit la tension u' .

Le coup de foudre direct est très dangereux pour le matériel. Aussi s'en protège-t-on par l'emploi des **fil de garde**, placés au sommet des pylônes et reliés à des prises de terre aussi soignées et rapprochées que possible.

Coup de foudre indirect

Lorsque la foudre frappe directement un pylône ou un fil de garde, les charges s'écoulent à la terre. Le potentiel atteint par le pylône est défini par l'impédance de celui-ci, mais surtout par sa **résistance de mise à terre**, qui dépend de la surface des électrodes et des caractéristiques du terrain environnant. Lorsque cette résistance est importante, le potentiel atteint par le pylône peut dépasser la tension de contournement des chaînes d'isolateur. Une décharge se produit à **l'envers**, vers la ligne, et une onde mobile est injectée dans celle-ci, d'amplitude au moins égale à la tension de contournement.

Ce coup de foudre étant limité en tension, il est moins redoutable que le précédent.

5. Dispositifs de protection

Ils peuvent être classés en deux catégories :

- les parafoudres (ou déchargeurs),
- les éclateurs à tige ou de coordination.

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les **parafoudres** :

La **tension d'amorçage** est la tension minimum pour laquelle le parafoudre fonctionne. A 50 Hz, elle aura pour valeur au moins 2 fois la valeur efficace la plus élevée du réseau. Au choc, elle dépend très fortement de la forme d'onde ; elle est généralement définie pour une onde 1,2/50 ou 4/10 et 8/20 pour des ondes de courant.

La **tension résiduelle** est la tension maximum aux bornes du parafoudre pendant le passage du courant de décharge. Tension et courant sont liés par :

$$U_r = I_{décharge} \cdot R_{tot \text{ parafoudre}}$$

La **tension d'extinction** ou tension de désamorçage est la valeur la plus élevée de la tension de service pour laquelle le parafoudre interrompt son courant de suite. C'est généralement la valeur qui désigne le parafoudre.

Le **pouvoir de décharge** est l'intensité maximum du courant que le parafoudre peut écouler, plusieurs fois de suite, sans être endommagé.

Le **courant de suite** est le courant fourni par le réseau et qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension.

Un parafoudre doit remplir les conditions suivantes :

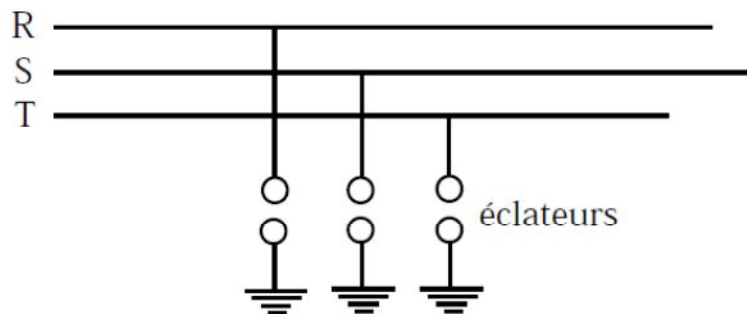
- a) à l'apparition d'une surtension, mettre le conducteur à la terre dans un temps très court ($< 0,1 \mu s$),
- b) se désamorcer rapidement après l'écoulement à la terre de la décharge,
- c) avoir une tension d'amorçage et une tension résiduelle aussi stables que possible pendant des années; elles doivent en outre être indépendantes de la polarité et de la forme de l'onde, des conditions climatiques.

Les modèles des parafoudres les plus courants sont les parafoudres à éclateurs avec résistance et les parafoudres à oxydes métalliques, technique plus récente.

Les parafoudres seront toujours placés le plus près possible des installations à protéger, ou aux jonctions lignes aériennes-câbles.

Les éclateurs

Le moyen le plus simple de protéger un réseau est de placer des éclateurs selon le schéma ci-après :



Bon marché et facilement réalisable, l'éclateur présente un grave inconvénient : l'arc amorcé par la surtension crée un milieu ionisé qui fait que le courant de suite est pratiquement égal au courant de court-circuit. Il s'ensuivra une **interruption de service** provoquée par les protections contre les surintensités, ce qu'il faut naturellement chercher à éviter. D'autre part, son fonctionnement dépend des conditions atmosphériques.

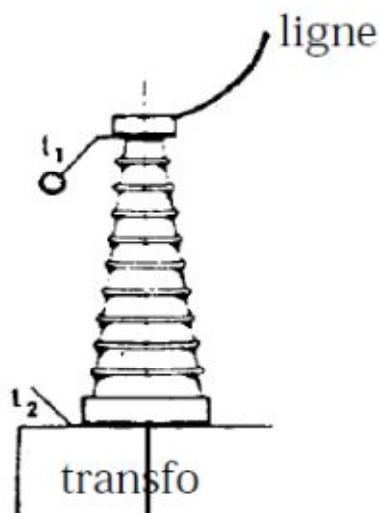
Eclateurs à tiges ou de coordination

Ils sont constitués de deux tiges de quelques mm de diamètre, placées suivant le même arc, et reliées l'une (t_1) à l'appareil à protéger, l'autre (t_2) à la terre. L'extrémité sous tension (t_1) est munie d'une sphère pour limiter l'effet couronne. La distance entre les tiges fixe la valeur de la tension d'amorçage. Pour cela, l'une des tiges est coulissante.

Son niveau de protection au choc est approximativement donné par :

$$U = 10 (d + 1) \text{ [kV}_{\text{crête}}\text{]}$$

d = distance des tiges en cm.



Ces éclateurs n'ont pratiquement aucun pouvoir de coupure. Ils sont destinés en **dernier ressort** à écrêter les surtensions dans le cas où les autres systèmes n'auraient pas fonctionné.

On préférera donc l'usage de parafoudres pour assurer une bonne *coordination de l'isolement*, avec plus de sécurité.

6. Rigidité diélectrique au choc (gaz)

Lorsqu'un choc de tension est appliqué sur un intervalle d'air, on observe que:

- Au-dessous d'une certaine valeur de crête de tension, il n'y a pas de claquage.
- Au dessus de ce seuil, la probabilité d'amorçage passe de 0% à 100% quand la tension s'accroît.

On caractérise l'intervalle d'air par sa **tension $U_{d,50}$** : valeur de crête de la tension pour laquelle la probabilité d'amorçage est de 50%.

Cette valeur est déterminée par interpolation, dans un diagramme gauss-arithmétique.

