

Chapitre 1

Introduction A La Haute Tension

1. Qu'est-ce que la haute tension ?

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. Alors, l'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés.

Les systèmes à haute tension sont souvent le siège de phénomènes non linéaires et complexes, où se produisant à partir d'un seuil. Exemple : l'arc électrique, effet couronne, claquage des matériaux isolants (solides, liquide), etc...

2. Histoire du secteur haute tension

C'est à la fin du 19ème siècle seulement, que l'éclosion d'un multiple d'application de l'électricité donnera naissance aux techniques de la haute tension.

✓ 1950-1959

Déjà en 1950 RITZ a offert des transformateurs de tension et de courant jusqu'à 220 kV pour l'application extérieure par catalogue. En 1951 la première livraison pour la tension en série a été effectuée.

Transformateurs combinés ayant un système de bobinage transformant le courant, construction à tête type support avec socle coulé et occlusion (soufflet métallique). En cas de besoin éclisse de commutation pour différents courants assignés primaires

✓ 1953

Livraison de neuf transformateurs de courant de 380 kV avec dispositif de division capacitif pour le premiers réseau à très haute tension mondial (380 kV) à la königliche Wasserfall Gesellschaft au nord de Suède.

✓ 1957

Livraison de 3 transformateurs combinés de 380 kV (avec diviseur capacitif) à RWE (Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk)

Transformateurs de courant traversés de 60 kV et 110 kV pour passage de l'intérieur à l'extérieur.

✓ **1960-1969**

Objectifs pour la poursuite du développement des transformateurs jusqu'à 220 V

✓ **1970-1975**

Dans les années 70 s'effectue une modification fondamentale dans la construction de tous les modèles de transformateurs de haute tension de 60 kV jusqu'à 800 kV.

✓ **1976-1985**

Au début des années 80 la technique d'occlusion a été modifiée, une boîte de superficie ondulée remplaçant le soufflet. À part de la rentabilité on bénéficie d'une robustesse élevée. La différence de volume d'une boîte est de 5 litre ce qui correspond à une détente de 63 litres d'huile pendant un échauffement à 100°C.

Les caractéristiques constructifs des derniers modèles permettent la construction de transformateurs de courant et de tension jusqu'à 800 kV.

✓ **1986-2000**

Les transformateurs de mesure de haute tension jusqu'à 800 kV de RITZ ont conquis une position leader au monde quant à la sécurité, liberté d'entretien et la longévité.

Des transformateurs de tension à isolation gazeuse se brident à des installations de distribution encapsulées ne provoquant pratiquement pas d'encombrement supplémentaire. Les trajets d'isolation se trouve, comme chez les GIS, à l'intérieur du coffret mis à la terre.

Les transformateurs isolés à gaz pour l'extérieure s'applique au cas où l'application de transformateurs à l'huile doit être évitée, p.ex. dans des zones de protection d'eau potable, les conditions légales correspondants étant en vigueur.

3. Découvertes de la haute tension

Les premières observations connues des phénomènes électriques datent de l'antiquité grecque, Selon l'histoire des Sciences, le premier scientifique à s'être intéressé aux phénomènes électriques fut le grand philosophe Thalès de Milet, le plus ancien et le plus connu des sept Sages de la Grèce.

Surtout célèbre pour ses travaux en géométrie et pour la prévision d'une éclipse de Soleil en 585 avant J.-C., c'est vers 600 avant notre ère qu'il décrit l'attraction de corps légers par un morceau d'ambre jaune avec une peau de chat. Il attribue à ces objets une "âme" et un "souffle" pour expliquer ces phénomènes. (ελεκτρον en grec, a donné le mot électricité).

Pour que l'électricité statique devienne une science, il faut attendre la fin du 16ème Siècle et les scientifiques fabriquent les premières machines électrostatiques:

- **William Gilbert** (1540-1603), médecin de la reine d'Angleterre, Il fabrique le premier électroscope permettant de détecter l'électricité statique et classe les corps en électriques et non électriques selon qu'ils se chargent ou pas.
- **Otto Von Guericke** (1602-1686), Le physicien allemand, bourgmestre de la ville de Magdeburg, invente la première machine électrostatique (figure 1), formée d'une boule de soufre montée sur un axe de rotation. Le but est d'essayer d'augmenter la force d'attraction électrostatique. Mais le résultat, c'est qu'à partir d'une certaine charge, des étincelles éclatent: surprise !

Otto von Guericke est aussi connu pour la célèbre expérience des hémisphères de Magdeburg, montrant l'effet de la pression atmosphérique.

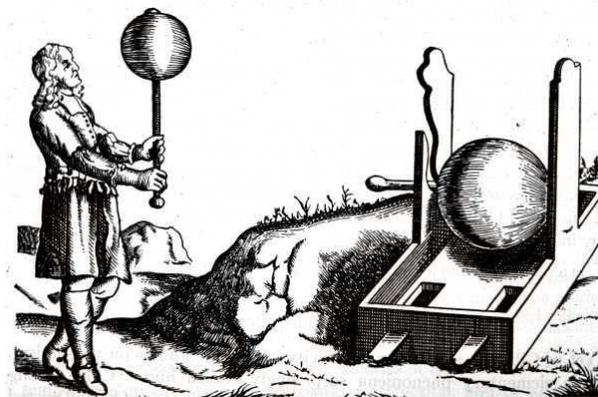


Figure 1: La machine d'Otto Von Guericke



Otto von Guericke

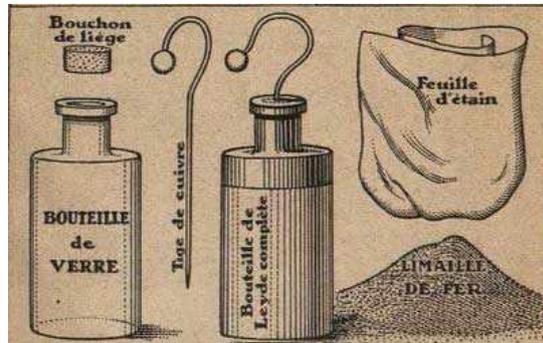
- **Christian Huygens** (1629-1695), perfectionne la machine de Von Guericke en remplaçant la boule de soufre par une sphère d'ambre.



- **Charles-François du Fay** (1698-1739), met en évidence deux formes d'électricité : l'électricité vitreuse obtenue en frottant des corps transparents et l'électricité résineuse obtenue avec les corps opaques comme l'ambre.



- **En 1746**, Invention de la bouteille de Leyde (Pays-Bas) par le physicien **Ewald Georg Von Kleist** qui permet de stocker les charges électriques.
- Il s'agit d'un condensateur constitué par une bouteille remplie d'eau dans laquelle plonge une tige métallique traversant le bouchon.



Ewald Georg von Kleist

Figure 2 : La bouteille de Leyde

- **1776** : **Jesse Ramsden** (1735-1800) construit une machine électrostatique qui devient très vite populaire. Elle est constituée d'un disque de verre entrainé par une manivelle et sur lequel viennent frotter 4 coussins de cuir remplis de crin. Les charges positives créées sur le disque provoquent par influence l'électrisation de deux tubes métalliques creux.

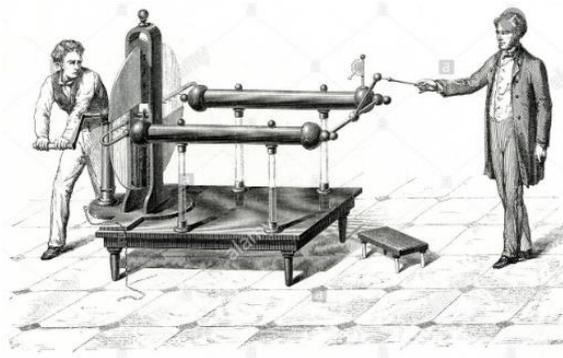


Figure 3 : La machine de Jesse Ramsden

- **Charles Coulomb**, en 1785 fabrique sa balance de torsion (Figure 4) et énonce la première loi de l'électricité : loi de Coulomb, qui quantifie la charge électrique, et permet de calculer les forces électriques entre ces charges.



Figure 4: Balance de torsion réalisée par Coulomb

- **Alessandro Volta** (1745-1827), reprend les observations de Galvani, et invente la pile électrique. Ce générateur permet alors d'obtenir des courants électriques



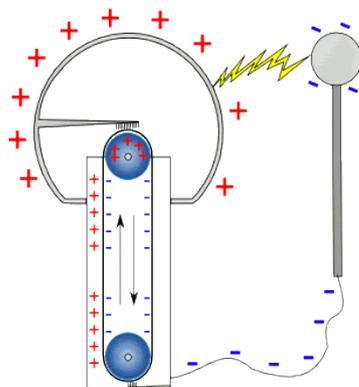
- **La machine de Wimshurst** (1880) est une amélioration de la machine de Ramsden. Elle utilise deux disques de verre tournant en sens inverse, portant des secteurs métalliques sur lesquels viennent frotter des balais.



Figure 5: La machine de Wimshurst

- **Robert J. Van de Graaf** (1901-1967), invente de puissantes machines électrostatiques pour accélérer les particules (Figure 6). La machine est constituée d'une courroie isolante entraînée par une manivelle. La bande est électrisée par frottement ou par un générateur auxiliaire.

Un peigne placé au-dessus de la courroie récupère les charges qui passent dans la sphère par influence, les charges opposées étant évacuées par le peigne (par effet de pointe).



Robert van de Graaff



Figure 6 : Générateur électrostatique de Van de Graaf

Ces deux machines électrostatiques sont utilisées dans les collèges et les lycées pour les expériences d'électrification. Elles permettent d'obtenir des tensions de 100 à 200kV et des étincelles qui peuvent atteindre 10 cm

4. Utilité de la haute tension

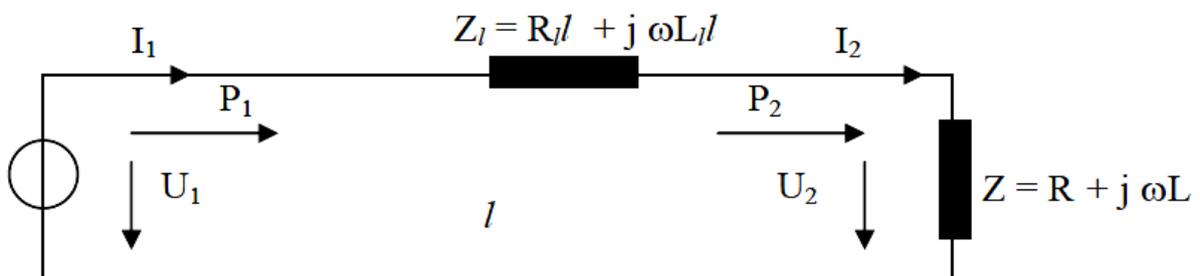
Question : Pourquoi utilise-t-on la haute tension pour le transport de l'énergie électrique ?

Le développement des réseaux électriques a constitué la première utilisation, à grande échelle, des hautes tensions. Les centrales de production d'énergie électrique sont fréquemment situées à de grandes distances de lieux de consommation.

Dans ces conditions, on recourt au transport de l'énergie électrique à moyenne de 20 à 100 km et grandes distances de 100 à 1000 km.

En effet, l'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne (RI^2) et de pouvoir transiter de grandes puissances.

Soit une ligne monophasée (fig.1) où l'on néglige en première approximation les capacités et les conductances transversales.



La puissance délivrée en un point de consommation (2) située à une distance l vaut:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Avec $I_1 = I_2 = I$ et φ : est l'angle de déphasage (tension, courant)

Rl et Ll sont respectivement la résistance linéique et l'inductance linéique de la ligne

On constate d'après la relation de la puissance que deux variables entre en jeu afin d'augmenter la puissance électrique transporté soit:

❖ L'élévation du courant :

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

⇒ Augmentation de la section

⇒ Augmentation du poids

❖ L'élévation de la tension :

⇒ Augmentation du champ électrique

⇒ Augmentation des distances d'isolement

⇒ Apparition de phénomènes potentiellement perturbants

Le rendement de la ligne de transport est un autre paramètre entre en jeu et qui nous a permet de choisir la bonne technique pour augmenter la puissance transportée.

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_e} \quad \text{où } P_e = R_l l I^2 \quad (\text{puissance perdue par effet de joule})$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R_l l}{\cos^2 \varphi} \frac{P_2}{U_2^2}}$$

Exemple : dans le cas d'une ligne triphasée et pour $R_l = 0.1 \text{ m}\Omega/\text{m}$, $l = 100 \text{ km}$, $\cos \phi = 0.8$, $P_2 = 300 \text{ MVA}$

En fonction des niveaux de tension composée on trouve :

U (kV)	132	220	380	750
η	0.79	0.91	0.97	0.99

Il est clair qu'avec l'augmentation de la tension le rendement s'améliore. C'est pour quoi en pratique on utilise la haute tension pour le transport de l'énergie électrique.

5. Réseaux électriques HT

- Les réseaux de transport sont triphasés, sans conducteur de neutre.

Le domaine de ce qu'on appelle Très Haute Tension va de 60 à 800 kV (entre phases). Il existe des projets jusqu'à 1200 kV. Les laboratoires d'essai à THT peuvent étudier et tester des ouvrages et matériels jusqu'à 12300 kV.

- Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz.
- Les courants transportés vont de 400 à 3000 A.
- Le tableau ci-dessous montre l'évolution de la tension composée des réseaux au cours du temps.

Date approximative d'apparition	Tension nominale du réseau (kV)
	3
	6
	10
	20
	30
1890	45
	66
1910	110
	132
	150
1930	220
	300
1950	380
	525
1970	750

5.1. Capacité de transport d'une ligne triphasée HT

Ce tableau donne les puissances couramment transitées en fonction de la tension composée nominale.

Tension du réseau (kV)	Capacité de transport d'une ligne triphasée (MVA)
0,4	0,01
10	1
20	3
66	25
110	50
220	250
380	600
750	200

5.2. Domaine de la haute tension

5.2.1. Haute tension A (H.T.A)

- ❖ Installations dans lesquelles la tension excède 1000 V sans dépasser 50 000V en courant alternatif (C.A.).
- ❖ Installations dans lesquelles la tension excède 1500 V sans dépasser 75 000V en courant continu (C.C.).

5.2.2. Haute tension B (H.T.B)

- ❖ Installations dans lesquelles la tension excède 50 000 V en courant alternatif (C.A.).
- ❖ Installations dans lesquelles la tension excède 75 000 V en courant continu (C.C.).

Bien qu'ils ne soient pas normalisés, on utilise également couramment les termes :

- **extra-haute tension**, pour désigner les tensions alternatives qui sont supérieures à 300 kV et inférieures ou égales à 800 kV.
- **ultra-haute tension**, pour désigner les tensions alternatives qui sont supérieures à 800 kV. Il existe actuellement des projets 1 100 kV en Chine et 1 200 kV en Inde. Dans

les années 1990, il y a eu un projet 1 100 kV très avancé au Japon avec essais de prototypes, mais à ce jour il n'a été exploité qu'en 550 kV.

5.3. Problèmes liés à la haute tension

Plusieurs problèmes sont survenus lors de l'application de la haute tension :

5.3.1. Claquage

Apparition d'une décharge électrique dans un milieu isolant. Donc c'est une décharge disruptive (figure 7).



Figure.7 : Claquage d'un isolant

Le claquage est la dernière phase résultant d'une chaîne de phénomènes compliqués qui peuvent durer des microsecondes (cas du claquage du gaz) ou des années (par exemple l'action des décharges partielles sur un isolant solide). On l'appelle aussi « rupture du diélectrique », « décharge électrique » ou « disruption ». L'appellation « arc électrique » n'est valable que pour des claquages de courant fort.

Après un claquage, l'état isolant peut se rétablir comme c'est le cas des isolants liquides et gazeux ou non comme c'est le cas des solides.

5.3.2. Isolation

Ensemble d'éléments constitués de matériaux isolants et servant à isoler les uns des autres les parties conductrices d'un dispositif.

5.3.3. Contournement des isolateurs

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre.

- ✚ Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) ;
- ✚ Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur (figure 8).

Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre).

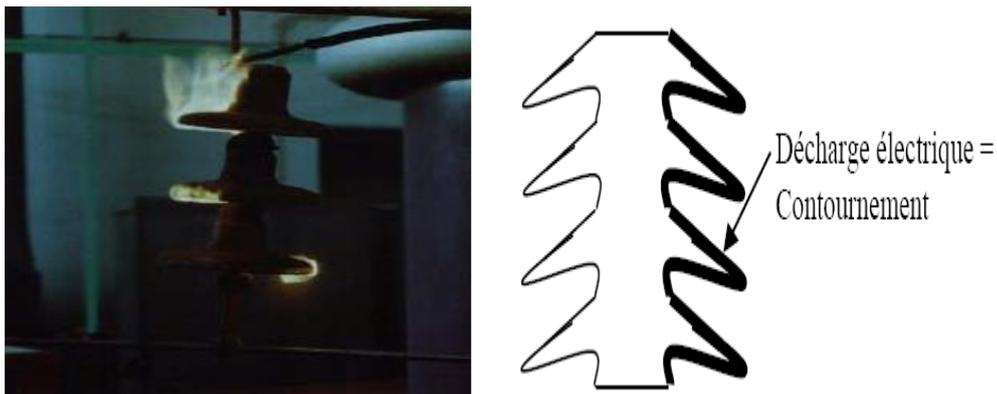


Figure.8: Phénomène de contournements d'in isolateur

5.3.4. Effet couronne

On appelle "décharge partielle" ou "effet de couronne" l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Cette conductivité est due aux phénomènes d'ionisation. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, $\approx 30 \text{ kV/cm}$), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse. (Figure.9).

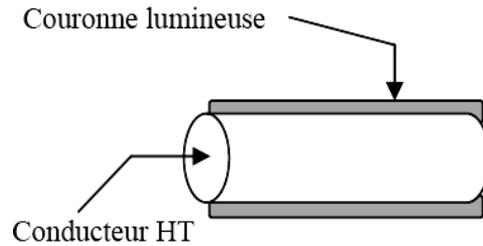
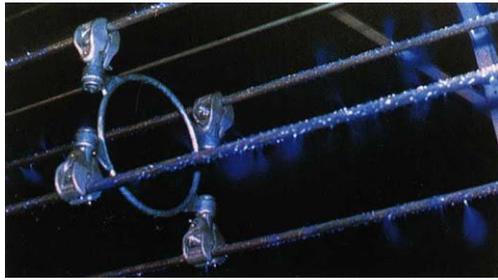


Figure.9: Effet couronne dans un conducteur

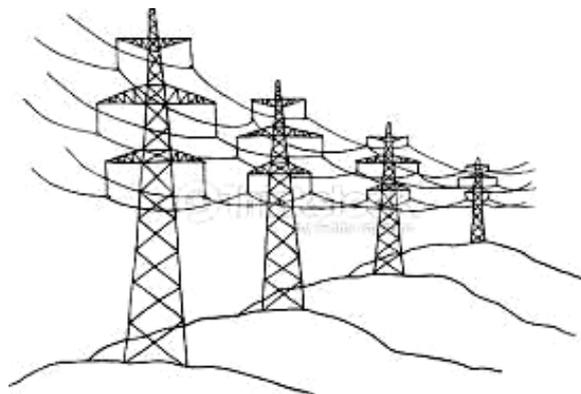
Sur les régions à faible rayon de courbure (pointe) le champ devient très intense.

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 H.T on doit éviter les pointes à la surface des conducteurs. Par contre, quand on désire un champ élevé on utilise un conducteur pointu.

5.4. Danger de la Haute Tension

Les installations Haute Tension à courant fort, comme les réseaux électriques aériens par exemple, génèrent des courants qui sont mortels. En plus, les lignes à haute tension génèrent des champs électriques et magnétiques à très basse fréquence, qui créent des courants électriques dans l'organisme.

Tels qu'on les rencontre dans la vie quotidienne, ces champs électriques ne développent qu'un courant électrique très faible.



A très forte intensité (limitée à certains environnements industriels très spécifiques), ces courants électriques peuvent provoquer des impressions de scintillements lumineux ou des contractions musculaires incontrôlables.

Selon l’OMS, l’exposition à long terme aux champs magnétiques à très basse fréquence n’entraîne pas d’augmentation du risque de cancer chez l’homme, excepté un très léger risque de leucémie chez l’enfant.

Par ailleurs, même si le risque de causalité était confirmé, le risque de développer cette pathologie serait vraiment très faible: de l’ordre d’un cas de leucémie infantile supplémentaire par an dans une population de 35 millions de personnes.

D’autres effets sur la santé sont-ils possibles ? Depuis quelques années, des publications scientifiques font état d’une augmentation possible de maladies neuro-dégénératives (comme la maladie d’Alzheimer) chez les personnes habitant à proximité des lignes à haute tension ou exposées dans le cadre de leur profession.

On parle aussi de dépressions, de troubles cardiovasculaires, d’autres cancers infantiles, de modifications immunologiques, etc.

L’OMS a conclu, en 2007, que de tels effets, s’ils existent, seraient vraiment très réduits. Dans un souci d’extrême prudence, le Conseil Supérieur de la Santé (2008), en Belgique, a néanmoins conseillé de limiter l’exposition de longue durée aux champs magnétiques des enfants de moins de quinze ans.

Cependant, certaines installations HT notamment les laboratoires à courant faible n’offrent pas de danger pour les personnes ($I < 10 \text{ mA}$). On peut recevoir une décharge électrique sans en mourir, comme le cas des décharges électrostatiques.

6. Pouvoir de pointe

On peut facilement démontrer à l’aide du théorème de Gauss qu’une surface plane portant une densité de charge ρ_s , produit un champ électrique $E = \rho_s / \epsilon_0$ (fig.10).

Densité surfacique de charge : $\rho_s = \frac{q}{S}$

Pour une surface pointue : $S \approx 0 \Rightarrow \rho_s = \frac{q}{S} \gg \gg E \gg$

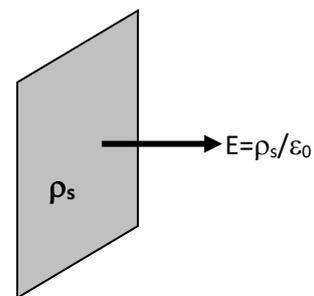


Figure 10 : Champ électrique produit par un Plan chargé

Exemples (fig.11) :

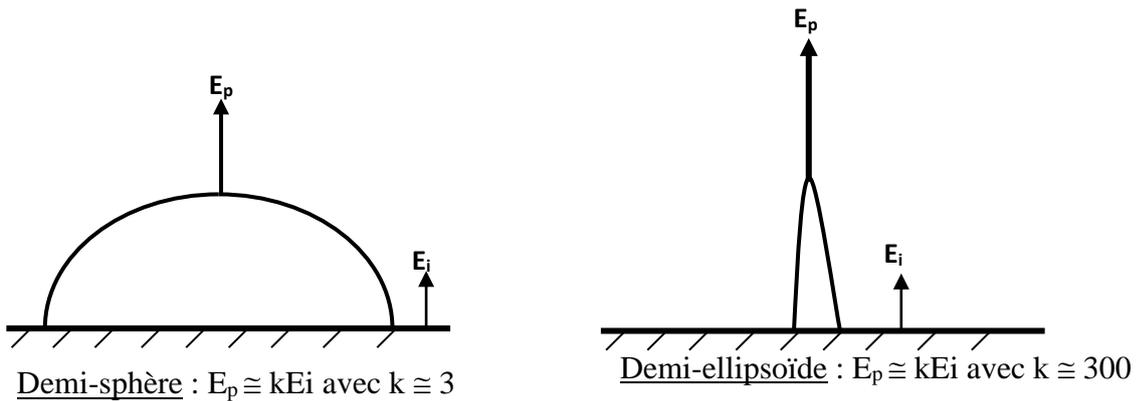


Figure 11 : Effet de la pointe sur le champ électrique

Conclusion : 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 des formes arrondies et sont munis d'anneaux pour une répartition du champ uniforme.

6.1. Quelques applications du pouvoir de pointe

- a) Parafoudre : Le champ élevé de la pointe attire la foudre pour écouler le courant vers la terre (figure.12).
- b) Charger des particules : des flèches placées sur les ailes de l'avion neutralisent la charge se trouvant sur la surface de l'avion acquise par frottement avec l'air (figure. 13).

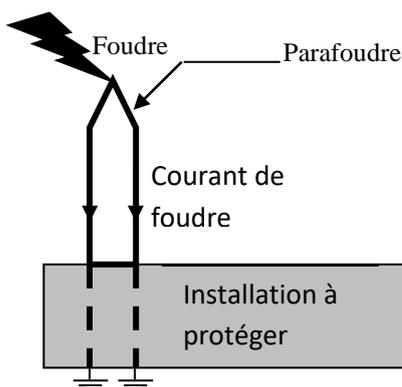


Figure 12: Parafoudre

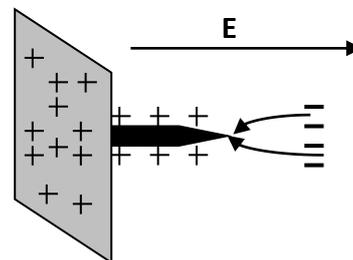


Figure 13 : Neutralisation des particules

7. CAGE DE FARADAY

A l'intérieur d'un conducteur en équilibre ($I=0$), le champ électrique est nul.

On peut déduire à partir du théorème de Gauss : $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{q_{\text{int}}}{\epsilon} = 0 \Rightarrow q_{\text{int}} = 0$,

que dans un conducteur en équilibre les charges se répartissent à l'extérieur.

Si des charges sont injectées à l'intérieur d'un conducteur, elles se « repoussent » sur la surface externe (fig.14).

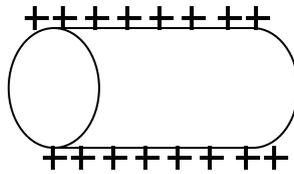


Figure 14 : Conducteur à l'équilibre

Application : Cage de Faraday

Si jamais un accident (défaut d'isolation) survient à l'intérieur, la personne ainsi que le matériel se trouvant à l'intérieur seront protégés, car les charges partent à l'extérieur (Fig.15).

Exemples :

Laboratoire HT ; tenue de travail sous tension ; carcasse métallique des habitations (contre la foudre), voitures, avion...(voir figure 16).

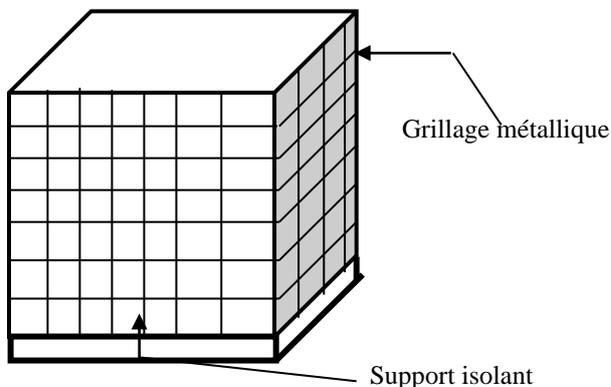


Figure 15 : Cage de Faraday



Figure 16 : Les personnes à l'intérieur ne ressentent rien, mais il est interdit de poser la main sur la surface de

8. CHAMP ELECTRIQUE

Dans un poste HT de 220 kV, le champ électrique à une distance de 6 m du conducteur central d'une ligne en nappe atteint 2 kV/m, ce qui pour le champ électrique est une valeur élevée. Par contre, le champ magnétique n'est que de 0,007 kA/m, ce qui pour le champ magnétique est une valeur faible. En haute tension, le champ électrique est prépondérant par rapport au champ magnétique.

Tableau 1: Champs magnétique et électrique sous un jeu de barre triphasé 220 kV, en nappe.

Distance entre phases de 4m - diamètre du conducteur 25 mm.

Champs	Distance verticale par rapport au conducteur central (en m)							
	0,5	1	2	3	4	5	6	7
H (kA/m)	0,096	0,049	0,025	0,017	0,012	0,009	0,007	0,005
E (kV/m)	62,7	29,9	12,6	6,7	4,5	2,8	2,0	1,8

9. RESEAUX HVDC

HVDC: High Voltage Direct Current

L'utilisation de la Haute Tension continue dans les réseaux peut être possible dans les cas suivants :

- Lignes longues (> 1000 km) des réseaux UHT, où l'on gagne sur les distances d'isolement entre les valeurs crête et efficace ;
- Longs câbles souterrains (dans les mers ou dans les villes), pour s'affranchir du problème de transit de l'énergie réactive.

Il est cependant obligatoire de prévoir des convertisseurs statiques pour transformer l'énergie alternative en continu et vice-versa, vu que la majorité des appareillages utilisent la tension alternative.