

## 1. Quelques généralités sur les réseaux électriques

Les réseaux électriques sont constitués d'un maillage de lignes aériennes et de câbles souterrains reliant producteurs et consommateurs d'électricité. Les nœuds du réseau sont les postes de transformation qui contiennent les équipements de connexion et de protection des lignes et de pilotage des flux d'énergie. Les postes contiennent également les transformateurs qui permettent les échanges d'énergie entre réseaux de différentes tensions.

On distingue le réseau de distribution et le réseau de transport d'électricité ; le second est dédié au transport de grandes quantités d'électricité sur de longues distances. D'une manière générale, plus il y a d'électricité à transporter sur une grande distance, plus la tension du réseau sera élevée. En France les lignes les plus longues font typiquement 200 km et la tension la plus élevée est 400 000 volts (400 kV), ce qui est aussi le standard de nos voisins européens. Dans les pays très étendus, on trouve des niveaux de tension supérieurs (735 000 volts par exemple au Canada).

Le réseau de distribution électrique en France est constitué de deux paliers techniques : 230 volts (dit « basse tension ») et 20 000 volts (dit « moyenne tension »). Le principal opérateur est ENEDIS mais il existe aussi des régies locales de distribution électrique comme celle de Strasbourg.

Le réseau à haute et très haute tension français est essentiellement constitué de 3 niveaux de tension : 63/90<sup>1</sup>, 225 et 400 kV. L'ensemble est géré par une seule compagnie publique, en situation de monopole : RTE, Réseau de Transport d'Electricité. Avec environ 100 000 km de lignes, RTE est en Europe le plus gros gestionnaire de réseau électrique. Ceci est lié d'une part à la taille du territoire français et d'autre part au fait que RTE gère aussi le réseau 63-90 kV français (qui représente à peu près la moitié des 100 000 km), alors que la situation usuelle en Europe est que ces niveaux de tension sont opérés par des compagnies régionales de distribution d'électricité.

## 2. De quoi dépendent les champs générés par les lignes à haute tension ?

### 2.1 Influence de la géométrie de l'ouvrage

Pour le champ magnétique, la source de champ la plus simple est le conducteur rectiligne parcouru par un courant. Le champ magnétique est proportionnel à l'intensité du courant et inversement proportionnel à la distance au conducteur électrique :

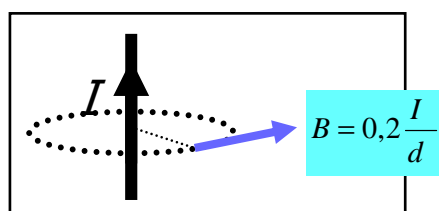
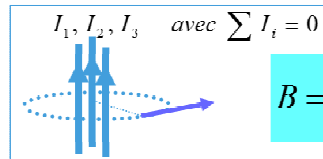


Figure 1 : champ magnétique généré par un courant circulant dans un conducteur rectiligne infini.  
Dans le formule, B est en  $\mu T$ , I en ampères et d en mètres

Pour un réseau électrique, le calcul est plus complexe car l'énergie électrique est acheminée via un système de trois conducteurs (les électriciens parlent de système triphasé) dans lequel circulent trois courants. Les propriétés de ces trois courants sont telles que leurs trois champs magnétiques ne vont pas s'additionner mais au contraire vont avoir tendance à se compenser mutuellement. Cette compensation

<sup>1</sup> Les réseaux à 63 et 90 kV sont physiquement identiques

dépend toutefois de la manière dont les trois conducteurs sont disposés dans l'espace : plus ces conducteurs sont proches, meilleure est la compensation et donc plus faible sera le champ magnétique total. Au final – et c'est là une différence importante par rapport au cas du conducteur unique - le champ magnétique généré par les réseaux électriques va décroître très vite, comme le carré de la distance ( $1/d^2$ ). La valeur du champ magnétique généré par un système triphasé est donnée par la formule (simplifiée) suivante :



$I_1, I_2, I_3 \text{ avec } \sum I_i = 0$

$$B = 0,2 \cdot \frac{I}{d} \cdot \frac{e}{d} = 0,2 \cdot \frac{e \cdot I}{d^2}$$

Figure 2 : champ magnétique généré par un système de courants triphasé circulant dans 3 conducteurs parallèles.  
Dans le formule, B est en  $\mu T$ , I en ampères et d et e en mètres

Dans cette formule, le paramètre « e » caractérise l'écartement entre les différents conducteurs d'un système électrique triphasé : plus l'ouvrage sera de grandes dimensions, plus ces conducteurs seront espacés et plus fort sera le champ. Ainsi, du fait de ses dimensions supérieures, une ligne 400 kV générera, à courant égal, plus de champ qu'une ligne de moindre tension. En ordre de grandeur, l'écartement « e » est de 5 à 7 m en 400 kV, 3 à 5 m en 225 kV et 2 à 3 m en 63/90 kV.

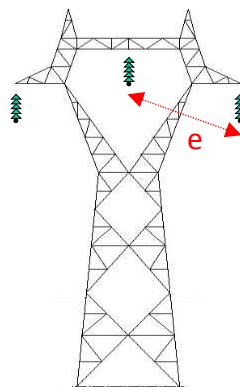


Figure 3 : écartement entre les conducteurs d'une ligne aérienne

Dans la réalité, cette formule n'est qu'approchée et la constante « 0,2 » de la formule peut en fait prendre différentes valeurs selon la géométrie de la ligne, et notamment suivant le fait que les conducteurs sont disposés en triangle ou alignés, et suivant que cet alignement soit horizontal (pylône Trianon) ou vertical (pylône Tonneau). Il existe une complexité supplémentaire avec les lignes dites à double circuit, c'est-à-dire qui portent deux lignes électriques sur les mêmes pylônes : le champ magnétique total résulte donc de la combinaison des 6 champs générés par les 6 conducteurs et de la manière dont ceux-ci sont positionnés les uns par rapport aux autres.

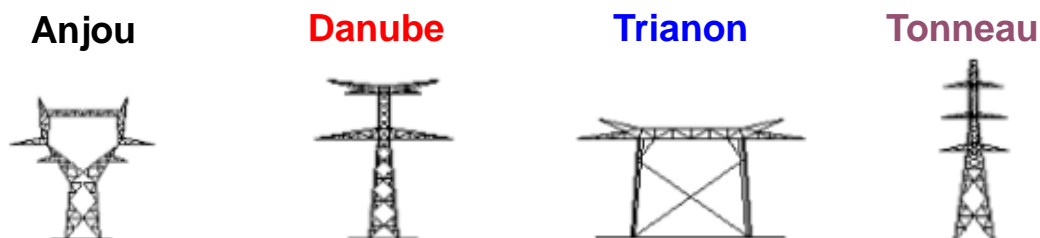


Figure 4 : différents types de pylônes du réseau 400 kV français  
Tous ces pylônes sont à double circuit (ils portent deux lignes électriques)

Enfin il faut tenir compte que du fait que les conducteurs d'une ligne aérienne ne sont pas horizontaux et qu'ils sont bien plus bas en milieu de portée qu'au niveau des pylônes. Le champ sera donc maximal en creux de portée, là où les conducteurs seront les plus proches du sol et réciproquement il sera minimal au pied des pylônes, là où les conducteurs sont les plus éloignés du sol :

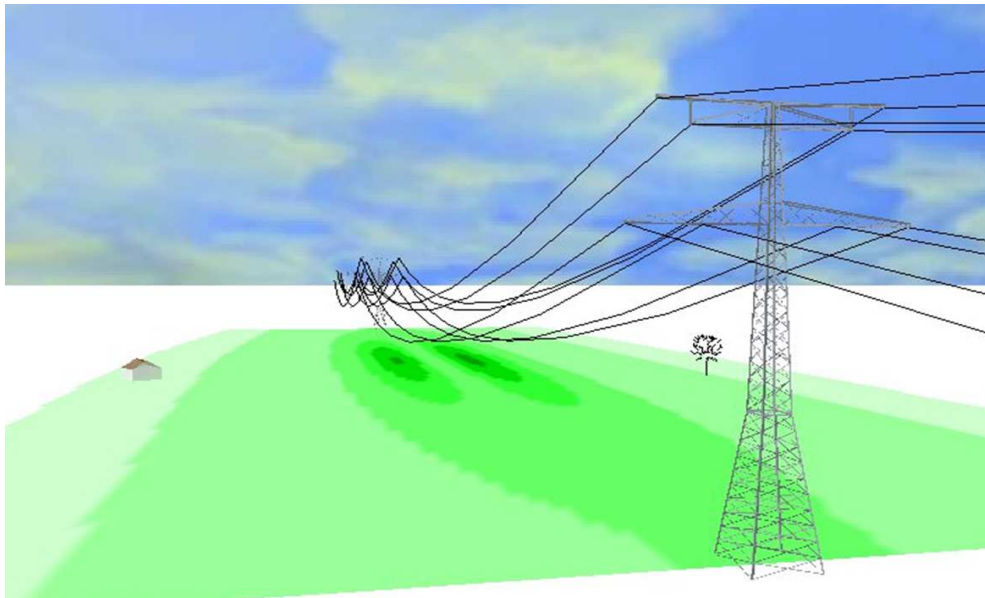


Figure 5 : calcul du champ magnétique généré par une ligne à haute tension  
La zone de champ maximal (couleur foncée) est située en creux de portée

Pour une ligne souterraine, c'est plus simple car les câbles sont toujours à la même profondeur dans le sol. Le champ sera donc le même tout au long de l'ouvrage, tant que sa géométrie ne change pas <sup>2</sup>.

## 2.2 Influence des cycles temporels

Le champ magnétique d'une ligne (aérienne ou souterraine) va varier en permanence au cours du temps, suivant les variations cycliques de consommation électrique. On a ainsi des cycles journaliers (jour/nuit), hebdomadaires (jours ouvrés/weekend) et saisonniers (été/hiver). On atteint couramment un facteur 2 à 3 entre les minima et maxima journaliers, ainsi que d'une saison à l'autre.

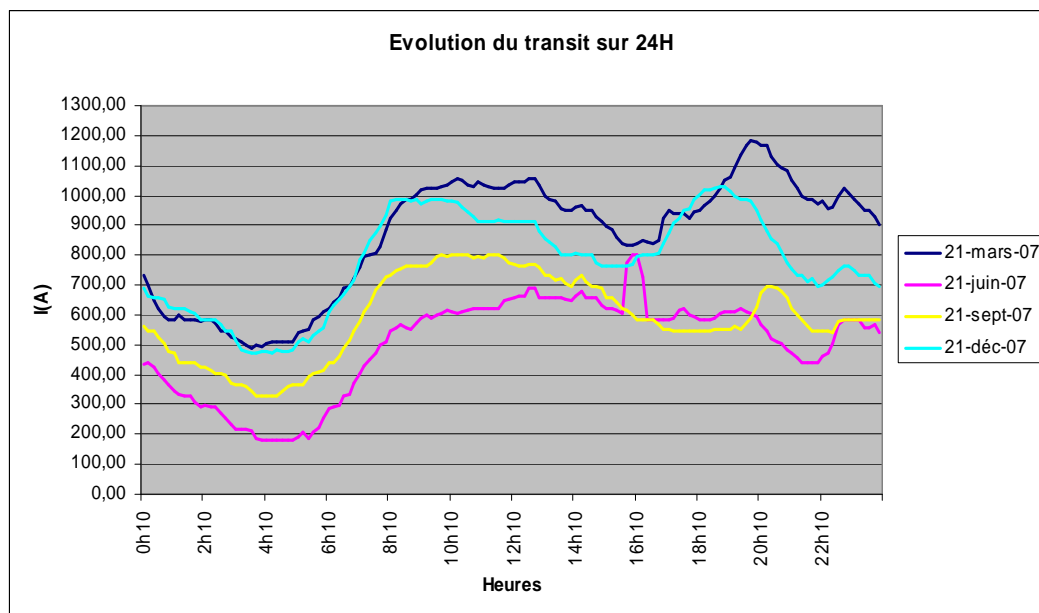


Figure 6 : variations cycliques journalières et saisonnières sur une ligne 400 kV d'île de France

A titre d'illustration, la Figure 6 présente les courants enregistrés pendant 4 journées de l'année 2007 dans un ouvrage à 400 kV de la région parisienne. On voit qu'entre le minima nocturne d'une journée d'été (courbe rose à 4h00 du matin : 200 A) et le pic de début de soirée d'une journée d'hiver (courbe noire à

<sup>2</sup> On a des changements de géométrie de pose au niveau des boîtes de jonction entre tronçons de câbles et quand le passage dans certaines zones du sous-sol impose des techniques particulières.

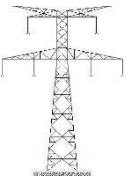
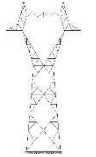
20h00 : 1200 A) on a à peu près un facteur 6. Ces variations sont représentatives du fonctionnement normal d'un réseau électrique, mais il peut y avoir des variations plus importantes à l'occasion d'évènements climatiques exceptionnels.

### 3. Valeurs de champ pour les lignes aériennes

Au final, du fait de ces variations dans le temps et de la dépendance aux paramètres géométriques, il est compliqué de répondre à la question « c'est quoi le champ magnétique (et/ou électrique) d'une ligne à haute tension ? »

On comprend bien que donner une seule valeur, ou même une série de valeurs est forcément un exercice réducteur. En toute rigueur, il faudrait soit donner une fourchette de valeurs, soit donner en même temps les hypothèses précises sur la géométrie et le courant. Voici à titre d'exemple les valeurs de champs calculées pour trois géométries typiques de pylônes, en creux de portée et pour des courants moyens représentatifs de ces ouvrages (ces valeurs peuvent donc être différentes de celles données dans d'autres supports d'information comme par exemple la vidéo du MOOC) :

Tableau 1 : valeurs de champs pour trois géométries de lignes aériennes et pour les courants moyens représentatifs de ces ouvrages

Type	Géométrie	Champ électrique (V/m)			Champ magnétique (μT)		
		100 m	30 m	Aplomb	Aplomb	30 m	100 m
400 kV 2 circuits 3 X 570 <sup>2</sup>		30	1900	4200	12	4,4	0,2
225 kV 1 circuit 1 x 570 <sup>2</sup>		10	250	1650	5	0,6	0,06
63/90 kV 1 circuit 1 x 570 <sup>2</sup>		5	100	750	5	0,4	0,04

Note : toutes les valeurs de champ données ci-dessus sont calculées à **1 m au-dessus du sol**. Cette hauteur est celle spécifiée par les normes de mesures<sup>3</sup>, et le fait d'utiliser la même hauteur standardisée permet le cas échéant de comparer calculs et mesures.

On rappelle que le champ électrique dépend de la tension qui ne varie pas au cours du temps. Par contre, la variation du champ électrique en fonction de la géométrie de l'ouvrage et de la position dans la portée (autrement dit à la hauteur des conducteurs par rapport au sol) est aussi forte que pour le champ magnétique.

<sup>3</sup> Par exemple la norme française UTE C99-132, elle-même basée sur la norme internationale CEI 62110.

## 4. Valeurs de champ pour les liaisons souterraines

Le premier élément qui distingue liaisons aériennes et souterraines est le fait que les secondes n'émettent aucun champ électrique. En effet, chacun des 3 câbles d'une liaison souterraine est entouré d'un écran métallique qui est lui-même mis à la terre. Tout le champ électrique est donc concentré dans l'isolant entre l'âme du câble et cet écran, et le champ est nul à l'extérieur.

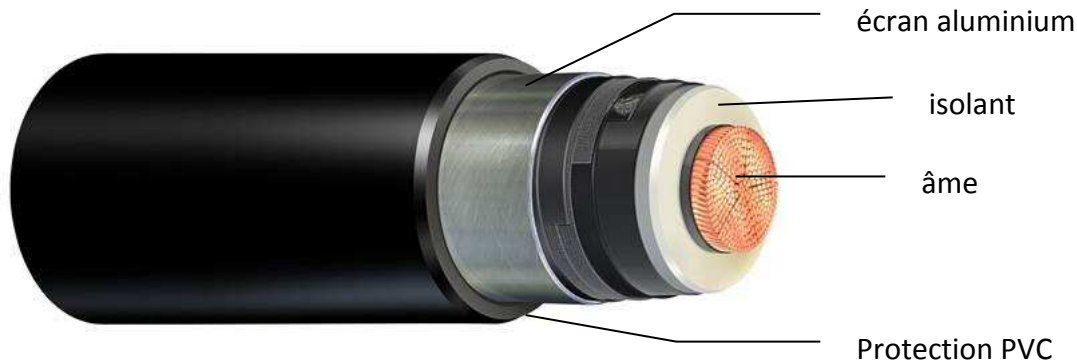


Figure 7 : vue en coupe d'un câble souterrain à haute tension

Pour le champ magnétique, tout ce qui a été dit précédemment sur l'influence du courant et de la géométrie reste vrai et la formule de calcul simplifiée donnée précédemment est applicable. L'influence de la géométrie de l'ouvrage est particulièrement facile à mettre en évidence avec une liaison souterraine car il n'existe en fait que 2 géométries : en nappe ou en trèfle (= en triangle). En pratique, toutes choses égales par ailleurs (même courant, même écartement entre câbles et même profondeur de pose) la pose en nappe génère un champ magnétique 1,4 fois plus élevé que la pose en trèfle. Qualitativement, on perçoit bien que la géométrie de la pose en trèfle est plus « compacte » que celle de la pose en nappe. La pose en trèfle présente des avantages en termes de largeur de tranchée, et c'est celle qui est la plus courante en France.

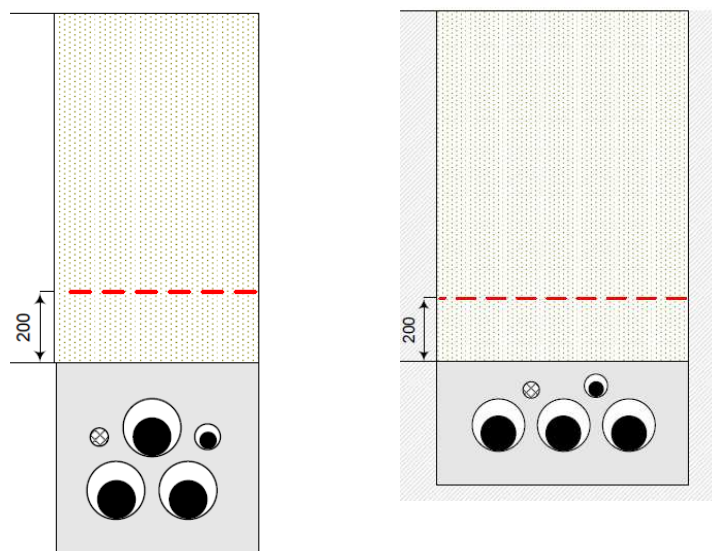
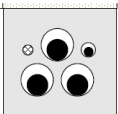

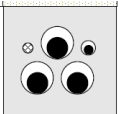


Figure 8 : vue en coupe d'une pose en trèfle et en nappe  
(le trait pointillé représente un grillage avertisseur posé 200 mm au dessus du mortier dans lequel est enfoui l'ouvrage)

Des exemples de calcul de champ magnétique 50 Hz au voisinage des lignes souterraines à haute tension sont donnés dans le tableau suivant (valeurs calculées pour le courant moyen dans l'ouvrage) :

Tableau 2 : valeurs de champ magnétique au voisinage des liaisons souterraines

Tension	Géométrie	Type	Champ magnétique (μT)			
			Aplomb	5 m	10 m	15 m
225 kV		Trèfle non jointif Section câble : 1600 <sup>2</sup> Cu	4,6	0,8	0,2	0,1
225 kV		Nappe Section câble : 1600 <sup>2</sup> Cu	7,3	1,2	0,3	0,2
63 kV		Trèfle non jointif Section câble : 1200 <sup>2</sup> Alu	2,8	0,5	0,1	0,1

**Note** : toutes les valeurs de champ données ci-dessus sont calculées à 1 m au-dessus du sol. Cette hauteur est celle spécifiée par les normes de mesures <sup>4</sup>, et le fait d'utiliser la même hauteur standardisée permet le cas échéant de comparer calculs et mesures.

## 5. Comparaison aérien-souterrain

On a vu que la même formule peut s'appliquer aux réseaux aériens et souterrains.

$$B [\mu T] = 0,2 \frac{e \cdot I}{d^2}$$

Néanmoins, les valeurs des paramètres géométriques diffèrent beaucoup entre lignes aériennes et souterraines : pour l'aérien le paramètre « *e* » prend des valeurs de quelques mètres, tandis que pour le souterrain, il est de l'ordre de 15 à 25 cm (et environ le double au niveau des chambres de jonction). Réciproquement, la distance aux conducteurs (le paramètre « *d* » de la formule) est de l'ordre de 10 m minimum en aérien, tandis que pour une liaison souterraine, il est de l'ordre de 2 m. Ceci compense cela et au final, c'est ce qui fait dire qu'en ordre de grandeur les champs magnétiques sont comparables à l'aplomb d'une ligne aérienne et au surplomb d'une ligne souterraine.

Dès qu'on s'éloigne de l'axe de l'ouvrage, en comparant les tableaux 1 et 2 on voit que les champs décroissent beaucoup plus vite au voisinage des lignes souterraines, et ceci alors même qu'on vient de voir que la même formule de calcul s'applique dans les deux cas. En fait tout est affaire d'échelle : comme une liaison souterraine est un ouvrage très compact, quand on passe de l'axe à 5 m, puis 10 m on s'éloigne réellement de l'ouvrage.

Réciproquement une liaison aérienne est un ouvrage de grandes dimensions (environ 10 m de large pour une ligne 225 kV à simple circuit comme illustré à la Figure 9 et jusqu'à 25 m de large pour une ligne double 400 kV), il s'ensuit que quand on passe de l'axe de la ligne à 5 ou 10 m, on est toujours sous les conducteurs et la distance aux conducteurs n'a donc pas réellement changé ; ce n'est qu'au-delà de 20 à 30 m que la décroissance du champ va intervenir.

<sup>4</sup> Par exemple la norme française UTE C99-132, elle-même basée sur la norme internationale CEI 62110.

Ainsi la notion de distance à la source de champ doit être mise en regard des dimensions de la source de champ : être à 5 m de l'axe d'une ligne aérienne, ce n'est donc pas la même chose qu'être à 5 m de l'axe d'une liaison souterraine.

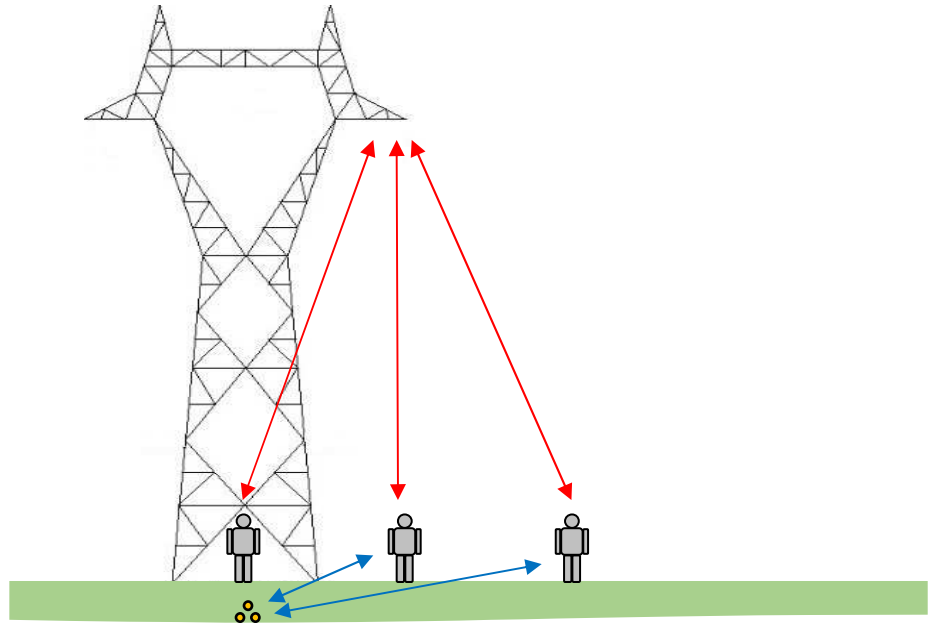


Figure 9 : comparatif des dimensions des ouvrages aériens et souterrains :  
il faut s'éloigner de plusieurs dizaines de mètres d'une ligne aérienne pour que la distance aux conducteurs augmente significativement, tandis que pour une liaison souterraine, quelques mètres suffisent

## 6. Sources localisées

On a vu dans ce qui précède deux familles de sources de champs : d'une part les conducteurs isolés, générant un champ qui décroît en  $1/d$  et d'autre part les réseaux triphasés dont le champ décroît en  $1/d^2$ . Ces deux types de sources ont la caractéristique commune d'être de grande longueur.

La troisième famille est celle des sources de champ qui au contraire occupent un espace/un volume délimité. C'est par exemple le cas de tous les appareils électriques domestiques, mais on peut aussi intégrer dans cette famille des sources de plus grande taille comme par exemple un poste électrique de distribution, qui se présente typiquement sous la forme d'une petite construction de quelques  $m^2$ .

Pour toute cette famille, le champ magnétique va décroître suivant une loi en  $1/d^3$ , donc encore plus vite que pour les autres familles : par exemple entre 10 et 20 cm d'un sèche-cheveux, le champ va décroître d'un facteur  $2^3 = 8$ . Entre 10 et 40 cm, ce sera donc un facteur 64 ! ... On comprend que dans ces conditions, le champ va devenir très vite négligeable. Comme on l'a vu dans la vidéo 3, c'est la raison pour laquelle de nombreuses sources de champ présentes en environnement résidentiel ne génèrent quasiment pas d'exposition.

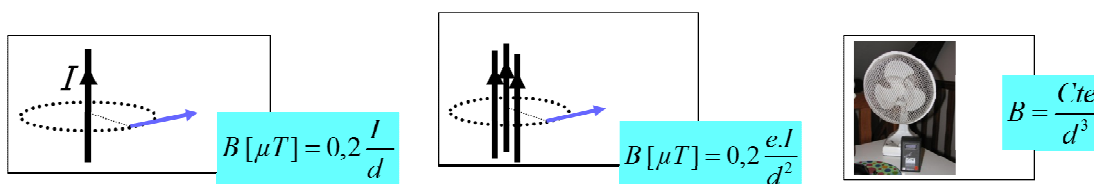


Figure 10 : les 3 familles de sources de champ magnétique

C'est aussi la raison pour laquelle on considère que les postes électriques, même quand ils sont de grandes dimensions (plusieurs hectares pour les postes 400 kV), ne sont pas des sources de champs importantes.

Dans la plupart des cas, les champs d'un poste seront négligeables devant ceux des lignes aériennes et souterraines qui y sont connectées.