

# CHAPITRE I

## NOTIONS FONDAMENTALES

On doit d'abord souligner la nuance très importante entre la propagation et le rayonnement d'ondes électromagnétiques. Le mot propagation est généralement réservé au cas où l'onde est guidée par une structure matérielle (câble, guide d'onde, fibre optique, et même couche troposphérique). Par contre, le mot rayonnement désigne le cas d'une émission et d'une propagation libre dans un espace, théoriquement illimité. Cependant, la différence entre la propagation et le rayonnement, n'est pas si nette du moment que des situations hybrides existent.

Le dispositif générant une onde rayonnée est appelé antenne. Compte tenu de son rôle dans une liaison radioélectrique (fig. 1), on peut donner un certain nombre de définitions d'une antenne. D'un point de vue technique, "une antenne est un transducteur servant à transformer une énergie électromagnétique guidée en énergie électromagnétique rayonnée et réciproquement"

Lorsqu'elle est excitée par un signal électrique (tension/courant), fourni par un générateur (émetteur), l'antenne rayonne ce signal en espace libre sous forme d'onde électromagnétique. On parle alors d'une antenne en émission (fig. 1). D'autre part, lorsqu'elle capte des ondes électromagnétiques, elle fournit à la charge (récepteur) une puissance sous forme d'un signal électrique. On dit alors que c'est une antenne en réception.

Cet aspect dual, permet en vertu du principe de réciprocité (cf. paragraphe 5.3 du chapitre III) de classer les antennes parmi les dispositifs réciproques. En effet, une antenne peut être utilisée à la fois en émission et en réception. C'est la raison pour laquelle il est plus correct de dire antenne en émission (réception) plutôt qu'antenne d'émission (réception). Ainsi, les propriétés que l'on définira pour une antenne le sont pour les deux modes de fonctionnement.

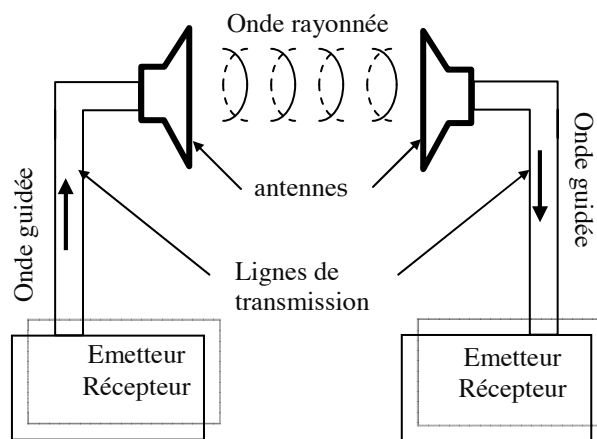


Fig. 1 Principe d'une liaison radioélectrique

### 1. Différents types d'antennes

Il n'est pas question, dans ce paragraphe, de présenter toutes les d'antennes, mais d'en exposer brièvement les plus couramment utilisées.

Les antennes peuvent être généralement classées selon divers critères

- Domaine d'utilisation (liaison terrestre, liaison spatiale, faisceaux hertziens, radar ...)
- Largeur de bande (HF, VHF, UHF ...)
- Forme (filaire, ouverture, à réflecteur, microruban ...).
- Type d'excitation (courant ou champ)
- Ordre chronologique d'apparition.

### 1.1. Antennes filaires

Ce sont des structures basées sur des conducteurs linéiques, de section généralement circulaire ou carrée. Cette section est considérée faible par rapport à la longueur du conducteur ce qui permet de supposer une distribution linéique des sources de courant lors de l'analyse de ces antennes. Une telle hypothèse permet de calculer aisément le rayonnement produit par de telles sources.

Les antennes filaires sont généralement les plus familières car elles sont utilisées dans beaucoup d'applications: automobiles, immeubles, bateaux, avions, engins spatiales ... Elles sont constituées de conducteurs ou de groupements de conducteurs et peuvent épouser plusieurs formes (fig. 2): rectilignes (monopoles, dipôles...), cadres (rectangulaire ou circulaire), hélice...

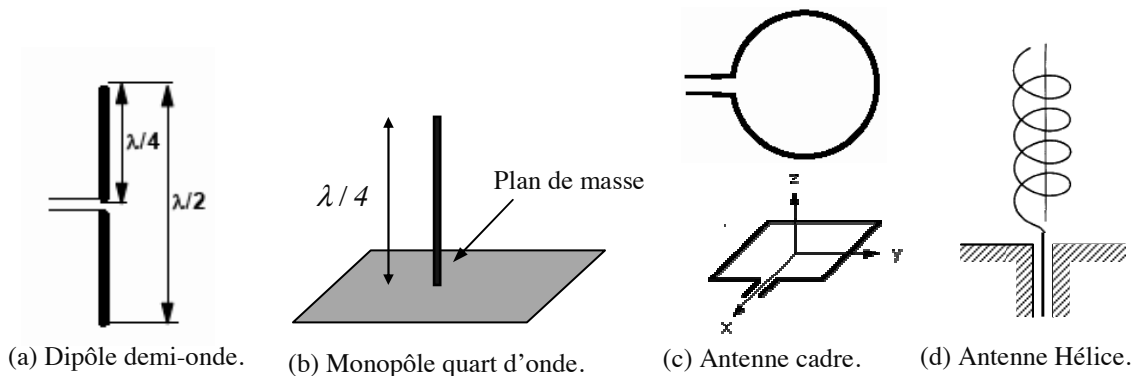


Fig. 2 Représentation de quelques antennes filaires.

Parmi les antennes rectilignes les plus couramment utilisées, on peut citer le dipôle demi-onde et l'antenne fouet quart-d'onde (monopôle).

#### a) Dipôle demi-onde

C'est l'antenne filaire rectiligne historiquement la plus ancienne mais toujours très utilisée. Elle est constituée de deux brins métalliques alignés sur le même axe et alimentée en son centre (fig. 2a). Les deux autres extrémités libres des deux brins sont laissées ouvertes, ce qui permet d'imposer une valeur nulle du courant en ces points. On aboutit ainsi à une répartition de type onde stationnaire avec un maximum de courant à l'entrée du dipôle.

#### b) Antenne monopôle.

L'utilisation du principe des images (cf. paragraphe 2.1 du chapitre III) permet de réduire l'encombrement d'un dipôle en associant à l'antenne un plan de masse de grandes dimensions (fig. 2b). C'est le cas, par exemple, d'antennes utilisées sur le toit d'un véhicule. L'image virtuelle génère l'équivalent d'un dipôle à partir d'un seul brin. On parle alors de monopôle dont le mode fondamental correspond à une longueur de  $\lambda/4$ .

### c) Boucle résonante

La boucle magnétique est constituée d'un fil conducteur ayant une forme qui permet le retour du fil sur lui-même (fig. 2c). Elle peut être carrée, rectangulaire, circulaire ou en forme de losange. Selon les dimensions de la boucle, le rayonnement peut être longitudinal ou transversal. Ce dispositif est très utilisé pour la réception de la radiodiffusion sous la forme d'un cadre sur lequel sont enroulées plusieurs spires. Les systèmes RFID (identification radiofréquence) utilisent également ce dispositif comme antenne. Sensibles au champ magnétique, les boucles magnétiques, sont utilisées également pour la détection d'objets métalliques.

### d) Antenne hélice

L'antenne hélice (fig. 2d) peut être assimilée à une association d'une série de doublets électriques et de boucles magnétiques. Son diagramme de rayonnement dépend du diamètre du cylindre sur lequel elle est généralement enroulée. Il peut être longitudinal (mode axial) ou transversal (mode normal). En ajustant judicieusement ce diamètre, on arrive à obtenir une polarisation circulaire.

## 1.2. Antennes à ouvertures

Très souvent utilisées dans le domaine des hyperfréquences, ces antennes sont constituées d'ouvertures pratiquées sur des structures métalliques (fig. 3). Au niveau de ces ouvertures, les sources d'excitation ne sont, évidemment, plus des courants mais des champs. Plusieurs types d'antennes peuvent être analysés en utilisant le formalisme établi (cf. chapitre VII) pour calculer le champ rayonné par une ouverture plane de forme quelconque. Dans ce paragraphe, on se contentera de présenter le guide d'onde ouvert à l'une de ses extrémités et l'antenne cornet.

### a) Le guide ouvert

Si l'on souhaite faire rayonner en espace libre une onde électromagnétique, guidée par un guide d'onde rectangulaire par exemple, une idée simple consiste à proposer de laisser l'extrémité du guide ouverte, permettant ainsi à l'énergie électromagnétique de se propager librement dans l'espace (fig. 3a). Mais ce type d'antenne possède un faible rendement et une faible directivité car une partie de l'onde guidée subit une réflexion importante au niveau de la discontinuité guide-espace libre (cf. chapitre VIII). Ainsi, ce type de dispositif ne peut être utilisé comme antenne.

### b) Antenne cornet

Pour remédier au problème du guide ouvert, il faut créer une zone de transition entre ce guide et l'espace libre. Pour ce faire, il est nécessaire d'augmenter progressivement les dimensions du guide pour se rapprocher des conditions de propagation en espace libre: on réalise ainsi une antenne cornet (fig. 3b). La direction du rayonnement maximale est selon l'axe du cornet. L'antenne cornet est un dispositif qui illustre très bien la transformation de l'onde guidée vers l'onde rayonnée. La surface de l'ouverture rayonnante étant plus élevée, on obtient de meilleures performances en termes de directivité. De même, en élargissant progressivement le rayon d'un guide d'onde cylindrique, on aboutit à un cornet conique (fig. 3c). Les cornets sont très utilisés dans de nombreux systèmes tels que le radar, les antennes stellites...

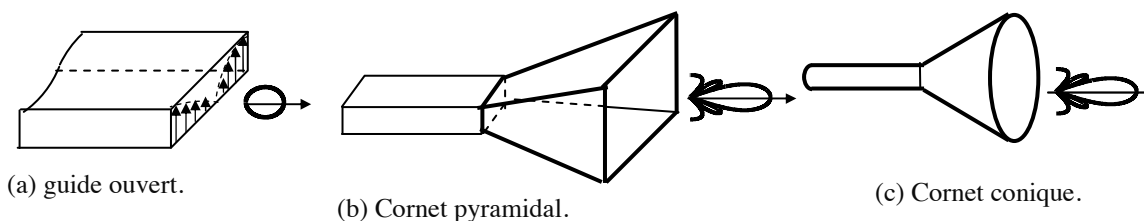


Fig. 3 Antennes à ouvertures.

### 1.3 Antennes à réflecteurs

Le besoin de réaliser des liaisons radioélectriques sur de grandes distances et à des fréquences très hautes a conduit à la conception d'antennes unidirectionnelles en plaçant un réflecteur au voisinage de la source rayonnante. Parmi ces antennes, on peut citer, par exemple, l'antenne à réflecteur parabolique et l'antenne dièdre (fig. 4).

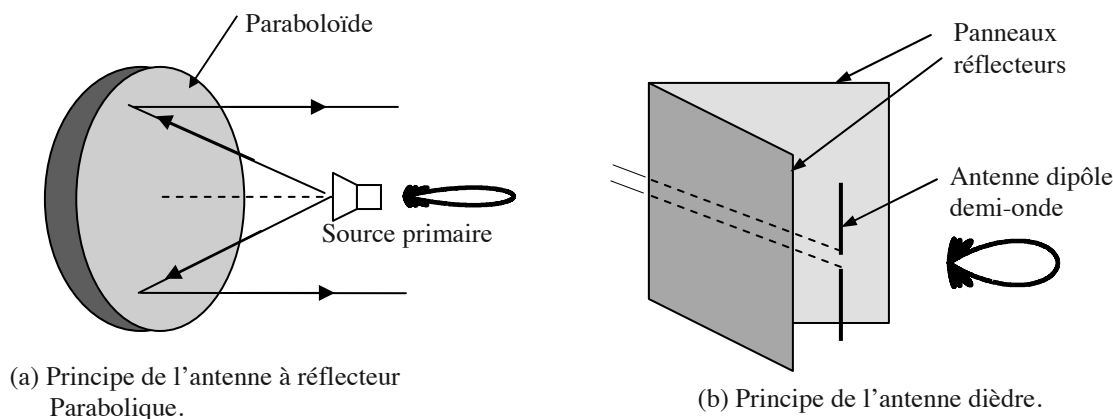


Fig. 4 Antennes à réflecteurs.

#### a) Antenne à réflecteur parabolique

L'antenne à réflecteur parabolique (fig. 4a), utilisée particulièrement en SHF (télécommunications spatiales, radar, ...), est constituée d'un paraboloïde métallique au foyer duquel, on place la source d'excitation (cornet, dipôle demi-onde...). La source primaire rayonne l'onde vers le paraboloïde. Selon la propriété bien connue de la parabole, tous les rayons sont réfléchis parallèlement à l'axe de la parabole (cf. chapitre VIII). Cette antenne présente l'avantage d'offrir un gain élevé et donc d'effectuer des liaisons à très grandes distances.

#### b) Antenne dièdre

L'antenne dièdre est constituée d'un dipôle demi-onde placé devant un réflecteur formé de deux écrans identiques formant un dièdre (fig. 4b). Suivant les dimensions de ce réflecteur, le gain peut atteindre des valeurs élevées (de l'ordre de 10 dB) ce qui est très intéressant pour les fréquences les plus élevées particulièrement en gamme UHF (300 à 3000 MHz). Caractérisée par sa large bande passante, cette antenne offre un rapport avant arrière très avantageux. Elle est utilisée pour des liaisons point à point. Le réflecteur peut être réalisé à l'aide d'une tôle pleine, d'un grillage ou d'un ensemble de tiges parallèles espacées d'un intervalle ne dépassant pas  $0,5\lambda$ .

### 1.4 Antennes plaques microruban

Les antennes plaquées microruban (APM) ont une structure physique (fig. 5) dérivée des lignes de transmission microruban. On utilise diverses terminologies pour désigner ce type d'antennes: antenne plaquée, antenne imprimée, antenne patch et microstrip antenna en anglais.

L'antenne consiste en une très fine pellicule de métal (patch en anglais), un substrat diélectrique et un plan de masse conducteur (fig. 5a). La forme du patch peut, en principe, épouser une forme quelconque. Toutefois, les géométries usuellement utilisées sont rectangulaires, circulaires, triangulaires, annulaires...

L'antenne est alimentée, le plus souvent, soit par une ligne microruban, soit par un câble coaxial. Ces antennes peuvent également être imprimées sur des surfaces non planes (cylindre, sphère...) et sont ainsi appelées antennes conformées (fig. 5b).

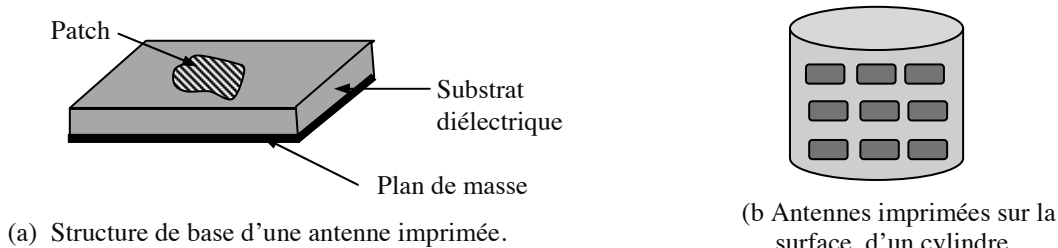


Fig. 5 Antennes imprimées.

### 1.5 Réseaux d'antennes

Certaines applications nécessitent des caractéristiques radioélectriques (directivité par exemple) impossibles à obtenir à l'aide d'un seul élément d'antenne. Une association adéquate d'éléments rayonnants (pas nécessairement identiques) permet d'augmenter la directivité dans des directions désirées et de la diminuer dans d'autres. On obtient ainsi une antenne réseau (fig. 6).

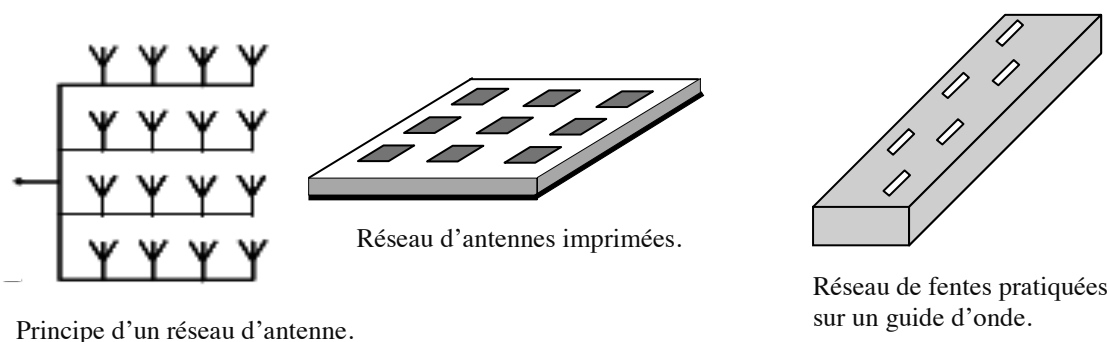


Fig. 6 Illustrations de quelques réseaux d'antennes .

De telles configurations permettent d'obtenir des valeurs élevées de la directivité et même de contrôler électroniquement la direction du rayonnement maximum (balayage électronique).

### 1.6 Antennes diélectriques

Les lentilles diélectriques possèdent les mêmes propriétés que le réflecteur d'une antenne à réflecteur parabolique. A partir d'une forme géométrique et d'un matériau bien choisis, ces lentilles permettent de transformer différents faisceaux d'énergie en ondes planes (fig. 7). Au-delà de la gamme SHF et plus, elles sont appelées à jouer un rôle plus efficace que les antennes à réflecteur.

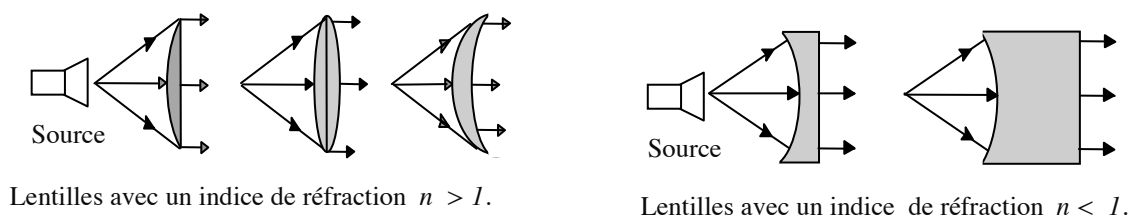


Fig. 7 Lentilles diélectriques [1].

La propagation des ondes dans les guides diélectriques diffère de celle dans les guides métalliques classiques. Toutes les antennes diélectriques ont un diagramme de rayonnement axial et une directivité proportionnelle à la longueur  $l$  du barreau. On trouve ainsi les caractéristiques de rayonnement d'un réseau uniforme à rayonnement longitudinal (end fire array en anglais). En bande X, on trouve une antenne diélectrique, "dite antenne cigare", constituée d'un barreau conique diélectrique excité par un guide d'onde rectangulaire ouvert (fig. 8).

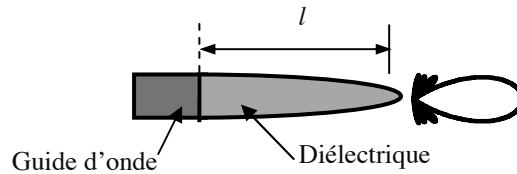


Fig. 8 Antennes diélectriques type cigare.

### 1.7 Antennes fractales

Une fractale est un objet mathématique servant à décrire des objets de la nature dont les formes découpées laissent apparaître à des échelles d'observation, de plus en plus fines, des motifs similaires. C'est donc une forme irrégulière et répétitive, modélisable mathématiquement à l'aide de suites récurrentes. Le concept des formes fractales est mis à profit pour la conception d'antennes dont on peut citer les avantages suivants:

- l'amélioration de l'adaptation d'impédance pour les antennes électriquement réduites;
- la miniaturisation de la taille des antennes résonantes (cadres et rectilignes);
- le fonctionnement multi-bandes, actuellement en vogue, dans le domaine des communications avec les mobiles utilisant divers standards.

La figure 9 illustre quelques configurations d'antennes fractales.

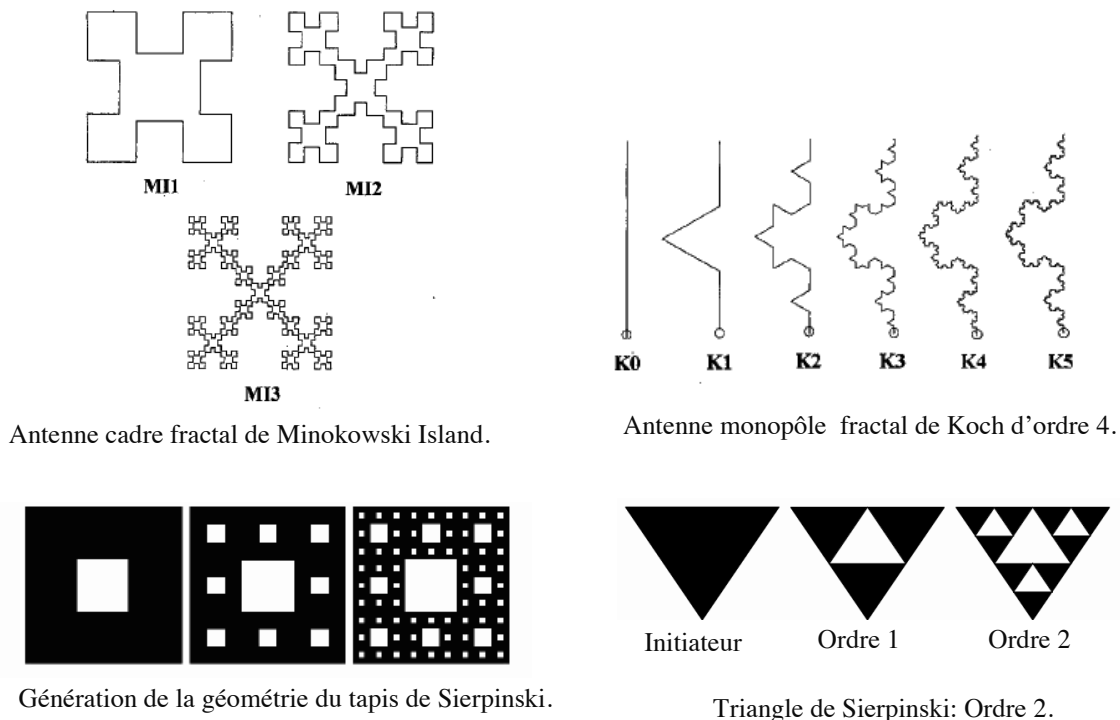


Fig. 9 Illustration de quelques formes d'antennes fractales [2].

## 2 Mécanisme du rayonnement

Dans ce paragraphe, on essayera de donner une explication du phénomène du rayonnement. Comment le signal électrique variable (dans le temps) d'une source est transformé d'abord en onde guidée dans la ligne de transmission et ensuite en onde rayonnée par l'antenne ?

### 2.1 Relation fondamentale du rayonnement

Considérons un conducteur, de longueur  $l$  et de section droite  $S$ , contenant une densité volumique  $q_V$  de charges électriques (fig. 10).

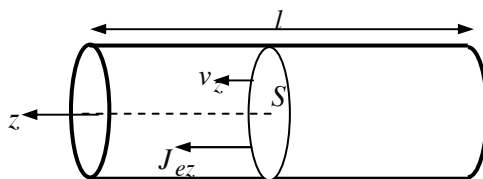


Fig. 10 Conducteur cylindrique.

La densité de courant électrique  $\vec{J}_e$ , orthogonale à la section droite  $S$  s'écrit

$$\vec{J}_e = J_{ez} \hat{z} = q_V v_z \hat{z} \quad (\text{A/m}^2) \quad (1)$$

Pour un conducteur parfait, les charges et les courants sont superficiels et la relation (1) devient

$$\vec{J}_e = J_{ez} \hat{z} = q_S v_z \hat{z} \quad (\text{A/m}) \quad (2)$$

$q_S$  ( $\text{Cbs} / \text{m}^2$ ) est la charge électrique répartie sur la surface du conducteur.

De plus, si le diamètre du conducteur est négligeable devant sa longueur (conducteur filiforme), la densité de charges électriques est purement linéique  $q_l$  ( $\text{Cbs} / \text{m}$ ) et la densité de courant est réduite à un courant  $I$  et s'exprime comme suit

$$\vec{J}_e = I \hat{z} = q_l v_z \hat{z} \quad (3)$$

En dérivant les deux membres de la relation (3) et en multipliant par  $l$  le résultat, on obtient

$$l \frac{dI}{dt} \hat{z} = q \frac{dv_z}{dt} \hat{z} = q \gamma_z \hat{z} \quad (\text{A}) \quad (4)$$

$q$  est la charge électrique totale sur la longueur du conducteur et  $\gamma_z$  son accélération.

L'équation (4) est la relation fondamentale du rayonnement électromagnétique que l'on peut interpréter comme suit : *pour obtenir un rayonnement électromagnétique, on doit disposer soit d'un courant électrique variable (dans le temps), soit de charges électriques accélérées.* On peut ainsi tirer trois conclusions

- Des charges fixes ne produisent pas de rayonnement électromagnétique.
- Dans le cas de charges se déplaçant à une vitesse constante, on distingue deux cas possibles :
  - si le conducteur est droit (rectiligne) et infiniment long, il n'y a pas de rayonnement ;
  - à la moindre discontinuité (fig. 11), la vitesse des charges change et on obtient un rayonnement électromagnétique.

Par discontinuité, on désigne toute courbure, troncature, terminaison chargée...

c) Si les charges oscillent (cas d'une structure en résonance), le rayonnement prend naissance même si le fil est droit.

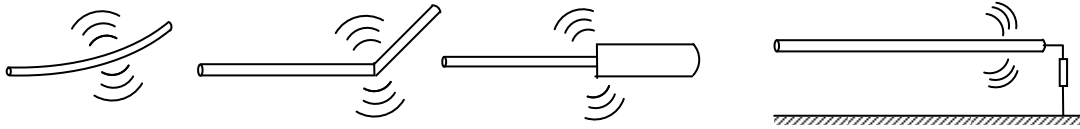


Fig. 11. Discontinuités générant un rayonnement électromagnétique.

## 2.2 Cas de deux conducteurs parallèles

Appliquons un signal électrique variable à l'entrée d'une ligne de transmission chargée par une antenne (fig. 12a). Un champ électrique est alors établi entre les deux conducteurs de la ligne, générant ainsi un déplacement de charges électriques et donc la circulation d'un courant électrique variable. En vertu du théorème d'Ampère, ce courant donne à son tour un champ magnétique variable dont les lignes de force encerclent les deux conducteurs. Une onde électromagnétique est ainsi établie et se propage de manière guidée le long de la ligne.

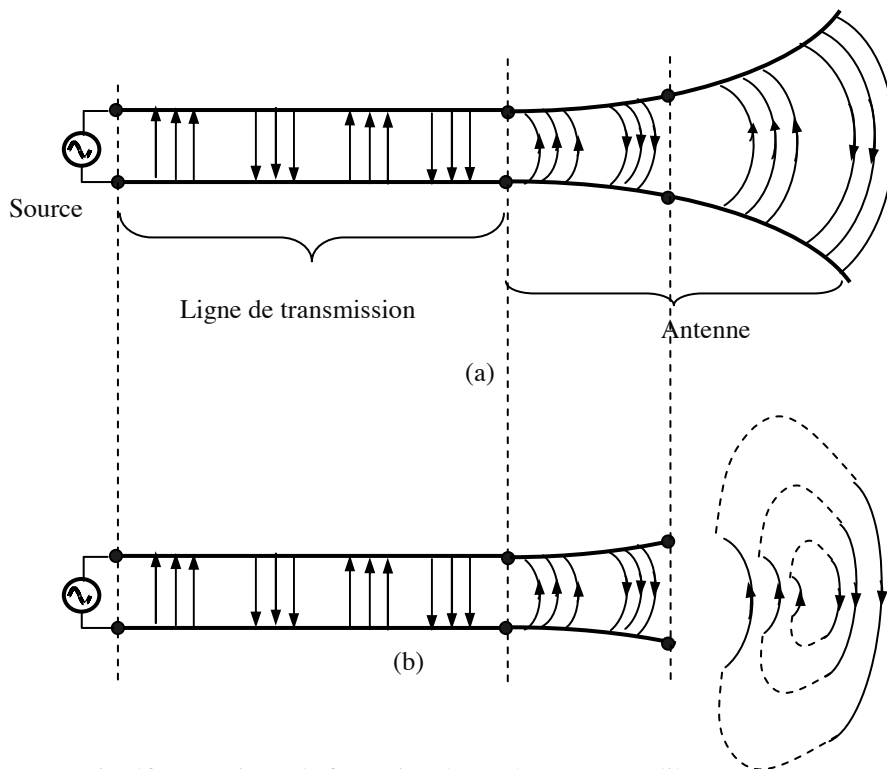


Fig. 12 Mécanisme de formation des ondes en espace libre.

(a) Source-ligne de transmission-antenne

(b) Détachement des lignes de champ électrique.

Les courants dans les deux conducteurs étant de même amplitude mais en opposition de phase, il s'en suit que le champ rayonné par cette ligne est nul. Fort heureusement, car une ligne de transmission ne doit que véhiculer l'onde guidée jusqu'à l'entrée de l'antenne. Tout rayonnement de sa part est considéré comme une perte et donc sujet à la diminution du rendement. Au niveau de