

# La compatibilité électromagnétique

Alain Azoulay  
Jean Berson  
Jacques Desplanque  
Ahmed Zeddham

Alain Azoulay, Supélec 70, est chargé du département "Radiocommunications de terre et compatibilité électromagnétique" au centre Paris B du CNET. Il participe également aux travaux de l'UIT-R et du CISPR sur ces sujets.

Jean Berson est chef du département "Transmission et réseaux spécialisés" à la Direction du réseau et de l'exploitation (DRX). Membre du "Bureau des fréquences", il participe à l'élaboration de la politique à long terme de France Télécom.

Jacques Desplanque, X63, ENST 68, est responsable "Développement technique" à l'état-major de France Télécom Mobiles. Il a débuté en régions avant d'être nommé directeur technique au Service du contrôle technique de France Télécom (SCTT).

Ahmed Zeddham, docteur ès sciences (1988) travaille sur les problèmes de compatibilité électromagnétique depuis 1982. Il est responsable de la commission "Bruits et brouillages" à l'URSI et préside un groupe similaire à l'UIT-T.

# La compatibilité électromagnétique

La maîtrise du rayonnement électromagnétique, des fuites parasites aux effets biologiques, se révèle une condition sine qua non de qualité pour les services de télécommunications.

La compatibilité électromagnétique (CEM) prend depuis quelques années de plus en plus d'importance, compte tenu de la large diffusion et de la sophistication des nouveaux équipements électroniques (qui peuvent s'avérer sensibles aux perturbations électromagnétiques et aux émissions radio) et du développement de nouveaux services radioélectriques dont la radiotéléphonie numérique cellulaire. De plus, la mise en application obligatoire de la directive européenne sur la CEM (89/336/CEE) à partir du 1<sup>er</sup> janvier 1996 induit depuis quelque temps une motivation supplémentaire des industriels autour de ce sujet.

Le but de cet article est de présenter les principales lignes directrices des études de compatibilité électromagnétique permettant d'assurer un fonctionnement correct des équipements en présence de perturbations électromagnétiques.

## La compatibilité électromagnétique

### Définition et domaines couverts

La compatibilité électromagnétique est l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire lui-même des perturbations intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement.

La CEM d'un équipement recouvre donc deux aspects fondamentaux :

- le pouvoir perturbateur (ou émission de parasites). Ces parasites affectent en tout premier lieu la réception radioélectrique. En effet, tout signal parasite est créé par des variations rapides de tension ou courant électrique à travers des conducteurs. Ces signaux ont alors un spectre radioélectrique qui peut venir se superposer au signal reçu par un récepteur de radio et le brouiller. Le brouillage de la réception radioélectrique est strictement réglementé par la loi ;

- l'immunité aux perturbations électromagnétiques ou aux émissions radioélectriques. L'immunité est constituée par l'ensemble des protections apportées aux équipements pour les rendre insensibles ou moins sensibles à l'environnement extérieur et à toutes les sources de perturbations risquant d'affecter le fonctionnement de ces équipements.

La CEM couvre donc tous les thèmes qui participent de près ou de loin à la réalisation des deux principes fondamentaux cités précédemment. Parmi les domaines couverts, on peut citer :

- la caractérisation de l'environnement électromagnétique (sources de perturbations ou d'émissions électromagnétiques),
- l'étude des mécanismes de couplage,
- l'étude de l'immunité des équipements aux perturbations,
- les méthodes et moyens de protection (les dispositifs de filtrage et d'écrêtement des perturbations, le blindage, les règles d'ingénierie),
- l'étude des effets biologiques des ondes électromagnétiques,
- la normalisation.

De façon générale, il y a deux grandes catégories de phénomènes en cause : les phénomènes radioélectriques et les phénomènes impulsionnels ou transitoires.

On a toujours séparé les études radioélectriques des études des phénomènes transitoires car bien que certains mécanismes de couplages soient identiques (au moins en basse fréquence), les effets sur les systèmes et les niveaux de perturbations sont très différents.

### Les phénomènes radioélectriques (ondes entretenues)

Ces phénomènes couvrent le spectre radioélectrique et amènent à réaliser des études de quelques kHz à plusieurs dizaines de GHz.

Ils consistent en :

- l'étude des risques de brouillage entre systèmes radioélectriques,
- la caractérisation des émissions radio-électriques des émetteurs et des effets de leur rayonnement,
- l'étude du pouvoir perturbateur d'équipements non radioélectriques pouvant brouiller la réception,
- les rayonnements compromettants.

### Phénomènes transitoires ou impulsionnels

Ces phénomènes amènent à traiter des signaux pouvant être rapides et parfois énergétiques, principalement dans le domaine temporel.

Ils consistent en :

- l'étude de la foudre et de ses implications,
- les surtensions induites par l'EDF ou la SNCF sur les réseaux de télécommunications,
- l'impulsion électromagnétique nucléaire (IEMN),
- les phénomènes transitoires rapides industriels,
- les décharges d'électricité statique (DES)...

### Mécanismes d'action des perturbations électromagnétiques

Le principe d'action des perturbations électromagnétiques est schématisé par le diagramme de la figure 1. Pour que se produise un phénomène de perturbation électromagnétique, trois éléments doivent être présents :

- une source de perturbations,
- une victime des perturbations,
- un milieu de couplage.

Un des éléments fondamentaux des phénomènes de perturbations réside dans les questions de couplages des ondes électromagnétiques.

On sait qu'un conducteur parcouru par un courant variable dans le temps  $i(t)$  produit un champ électromagnétique variable dans le temps et dans l'espace, qui se propage et s'atténue avec la distance. Ce champ est constitué de deux composantes : le champ électrique  $E$  qui s'exprime en V/m et le champ magnétique  $H$  qui s'exprime en A/m.

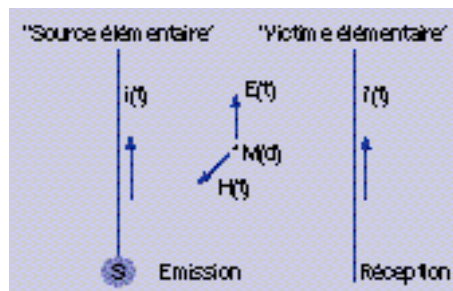


Figure 2 - Couplage électromagnétique élémentaire.

Réciproquement, un conducteur baignant dans un champ électromagnétique va être le siège du développement d'un courant  $i'(t)$  lié au champ ambiant et aux caractéristiques du conducteur et de ses circuits d'extrémités (figure 2).

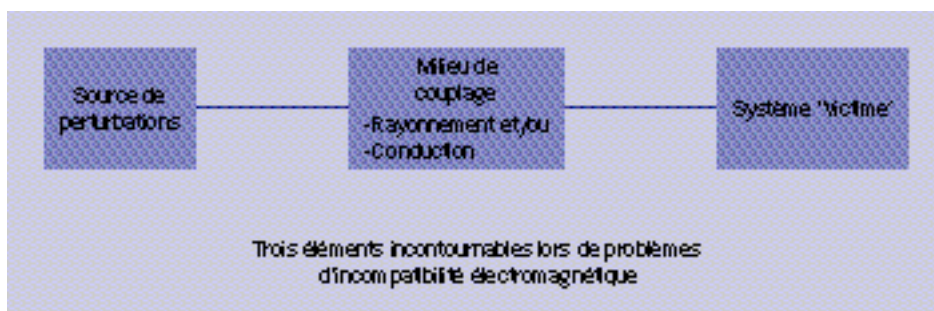


Figure 1 - Schéma type d'une incompatibilité électromagnétique.

Ceci peut expliquer les couplages entre câbles, l'induction de courant par des champs électromagnétiques, les mécanismes du rayonnement des antennes filaires à l'émission et à la réception etc.. donc une grande partie des mécanismes de création, de propagation et de réception des perturbations ou des signaux parasites.

Le couplage d'une onde électromagnétique à un câble dépend de la longueur d'onde (donc de la fréquence) des phénomènes électromagnétiques et des longueurs relatives des câbles par rapport à la longueur d'onde en cause. Dans l'air, la longueur d'onde  $\lambda$  est liée à la fréquence par une formule simple :

$$\lambda = 300/F \quad (\lambda \text{ en mètres, } F \text{ en MHz})$$

Aux fréquences inférieures à 10 MHz ( $\lambda \gg 30 \text{ m}$ ), les couplages se produisent généralement par les câbles assez longs de longueur non négligeable devant la longueur d'onde (lignes téléphoniques, câbles de raccordement, câbles secteur ou d'alimentation, etc.).

Le champ électromagnétique induit des courants de mode commun sur les câbles (qui jouent le rôle d'antenne de réception) et des tensions de mode commun RF se développent à l'entrée des équipements électroniques raccordés.

Aux fréquences comprises entre 10 MHz et 80 MHz, il y a souvent un effet conjugué de courant perturbateur conduit par les lignes et du champ direct sur les équipements (couplage au câblage interne des appareils).

Au-delà de 80 MHz environ, les signaux RF sont atténués le long des lignes et c'est seulement l'effet du champ sur le câblage interne de l'équipement ou sur le dernier mètre de câblage externe qui peut provoquer les perturbations.

Aux fréquences supérieures à 1 GHz, c'est généralement l'effet direct de l'onde EM sur les composants électroniques actifs qui perturbe le fonctionnement du système entier.

A l'exception des récepteurs radioélectriques pouvant être brouillés dans leur canal de réception (brouillage co-canal ou dans un canal adjacent), les effets des perturbations électromagnétiques sur les équipements électroniques sont dus aux non-linéarités des composants actifs (effets de redressement ou de détection des signaux souvent imprévisibles) ou à des claquages liés à des effets thermiques ou à des ruptures d'isolation : ce sont les principaux effets induits sur les "victimes" de signaux "forts" comme la foudre, les décharges électrostatiques (DES), l'impulsion électromagnétique d'origine nucléaire, les champs radiofréquences intenses (produits par des radars ou par des émetteurs puissants), ou lorsque la "victime" est à faible distance de l'antenne d'émission RF.

La CEM étant, en général, une affaire de compromis, sauf si la sécurité des personnes est en jeu, le problème fondamental sera une optimisation des trois éléments (sources, couplage, sensibilité) à un coût acceptable sans dégradation notable de la qualité de fonctionnement.

Ceci doit se traduire par une diminution raisonnable des sources de perturbations lorsqu'on peut les maîtriser. Traiter le mal à la source est un des principes fondamentaux de la CEM.

L'amélioration de l'immunité intrinsèque des équipements victimes potentielles des perturbations est le deuxième objectif de la CEM.

Le troisième objectif est de diminuer les couplages autant que possible entre la source et la victime.

Pour ce faire, lors de l'installation des équipements, il importe d'établir des règles de câblage, de mise à la terre et d'interconnexion entre équipements. En effet, ces règles d'ingénierie doivent permettre de limiter le couplage des perturbations entre équipements ou vis-à-vis de l'extérieur.

Il faut savoir qu'un même équipement peut être à la fois source et victime de perturbations.

## Implications de la CEM pour France Télécom

La CEM contribue à la disponibilité des équipements et permet d'assurer une meilleure qualité de service lorsque les équipements sont conformes aux spécifications internes de CEM.

La qualité de service est un objectif permanent des services d'exploitation. Si les effets positifs d'une bonne compatibilité électromagnétique ne semblent pas évidents à court terme, il se feront sentir lorsque la CEM sera intégrée globalement dans les centres, dans le réseau et chez les clients. On doit donc se préoccuper :

- de la protection des équipements contre les agressions électromagnétiques telles que citées précédemment comme la foudre qui est la première cause de nuisances, les surtensions diverses (industrielles ou liées aux réseaux de transport d'énergie), les décharges électrostatiques et les émissions radioélectriques,
- des perturbations produites entre équipements implantés sur un même site qu'ils soient radioélectriques ou non,
- des émissions parasites créées par les équipements de télécommunications et pouvant brouiller la réception radioélectrique (services mobiles, radionavigation aérienne, radiodiffusion et télévision).

Et par conséquent, il faut faire en sorte que les équipements ne soient pas sensibles aux perturbations électromagnétiques et ne soient pas eux-mêmes sources de perturbations.

## Les études de CEM

Les études de CEM visent à donner à l'opérateur les moyens de s'affranchir des effets néfastes de l'environnement électromagnétique sur la disponibilité des équipements et sur la qualité de service, à assurer une bonne cohabitation entre équipements de toutes natures et à faire en sorte aussi que les équipements du réseau ne polluent pas le spectre radio-électrique.

C'est ce que nous appellerons la "CEM classique". Elle constitue la partie la plus importante des travaux menés en CEM ces dernières années.

Ces études comprennent entre autres, les activités suivantes :

- la caractérisation de l'environnement électromagnétique,
- la modélisation des couplages avec les infrastructures et les équipements du réseau,
- l'établissement de spécifications et la validation des matériels pour les différents services d'exploitation.

Mais le développement récent de nouveaux et nombreux services dont les services radioélectriques, a induit de nouvelles études fort importantes dans le contexte d'une diffusion très large de terminaux radiomobiles et de la multiplication des stations de base pour assurer une couverture radioélectrique totale.

Ces études sont relatives :

- à l'optimisation de l'utilisation des fréquences et à la vérification qu'il n'y a pas de risque de brouillage avec d'autres systèmes. Elles constituent l'ingénierie des fréquences ;
- à l'assurance que les champs électromagnétiques produits par des émetteurs radioélectriques n'induisent pas de dysfonctionnements de certains appareils électroniques médicaux (stimulateurs cardiaques, pompes à insuline, équipements électroniques hospitaliers par exemple), ou de défauts sur des systèmes électroniques d'aide à la sécurité (ABS dans un véhicule automobile, électronique de contrôle

d'un avion). C'est un volet particulier de la "CEM classique" important pour la sécurité des personnes ;  
 ■ aux effets biologiques éventuels des émissions radioélectriques.

Le tableau ci-dessous représente les interactions possibles entre sources et victimes potentielles des perturbations électromagnétiques ou des émissions radioélectriques.

Source \ Victime	Terminal radio	Station de base, antenne	Station de base, châssis, câbles	Equipement électronique général	Foudre, DES, surtensions, transitoires...
terminal radio	ingénierie des fréquences	ingénierie des fréquences	CEM classique	CEM classique	CEM classique
station de base antenne	ingénierie des fréquences	ingénierie des fréquences	CEM classique	CEM classique	CEM classique
station de base châssis	CEM classique	CEM classique	CEM classique	CEM classique	CEM classique
équipement électronique général	CEM classique	CEM classique	CEM classique	CEM classique	CEM classique
équipement électronique médical (hôpitaux)	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes
équipement électronique de véhicule (avion, automobile)	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes
équipement électronique médical implanté (stimulateur cardiaque, aides...)	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes	CEM sécurité des personnes
équipement de télécommunication non radio	CEM classique	CEM classique	CEM classique	CEM classique	CEM classique
être humain	effets biologiques	effets biologiques			sécurité, risques d'électrocution

Tableau 1 - Interaction entre "source" et "victime" des perturbations électromagnétiques.

## Compatibilité électromagnétique "classique"

La CEM classique, le plus vaste des aspects de la CEM, traite de toutes les questions générales de protection des équipements électroniques en général et plus particulièrement des équipements installés dans le réseau de télécommunications.

### Protection des installations contre la foudre

La foudre, de par son caractère imprévisible, est la manifestation naturelle la plus impressionnante et pour laquelle une protection complète est impossible à garantir.

La foudre (ou éclair nuage-sol) peut se définir comme une décharge électrique d'origine atmosphérique entre le nuage et la terre. Le traceur de foudre prend souvent son origine dans le nuage et forme un canal ionisé qui se propage par bonds successifs à une vitesse de quelques 100 km/s vers la terre pour y frapper un point quelconque : on parle alors de foudre descendante. Il arrive aussi que des structures élevées puissent constituer l'origine du canal ionisé par lequel la décharge se propage vers le nuage : il s'agit alors de foudre ascendante. Par ailleurs, selon la polarité des charges situées à la base du nuage, on parlera de coup de foudre positif ou négatif. Le rapport de polarité est fonction du territoire considéré (en France, 10 % des coups de foudre sont positifs). Les coups de foudre positifs se caractérisent généralement par des effets beaucoup plus sévères.

La foudre est toujours composée de un ou plusieurs chocs de courant correspondant soit à des impulsions de courant élevées (plusieurs dizaines de kA) mais de brève durée (quelques 100 µs) soit aussi de longue durée (quelques dixièmes de seconde) mais de faible intensité (quelques centaines d'Ampères).

La valeur crête maximale du courant de foudre est le plus souvent la valeur de crête de la première impulsion. La valeur de crête du courant de foudre est utile pour traiter des problèmes de surtensions et des problèmes d'efforts mécaniques engendrés par les chocs de foudre. Le courant de foudre détermine la chute de tension  $RI$  due à la résistance ohmique  $R$  d'un conducteur ou d'une prise de terre. Il permet également de déterminer le champ magnétique  $H$  à une distance  $r$  d'un conducteur rectiligne parcouru par le courant  $I$ .

De plus, un éclair peut avoir un ou plusieurs points d'impact.

Les dégâts que la foudre peut occasionner à une installation sont essentiellement dus à l'écoulement du courant de foudre à la terre et aux champs électriques et magnétiques produits, ce qui entraîne à des degrés variables, des effets thermiques, électrodynamiques et électrochimiques.

Les différents paramètres de la foudre évoqués précédemment ne conduisent pas aux mêmes effets ni aux mêmes modes de défaillance sur les différents matériels.

## Protection des réseaux France Télécom contre la foudre

Les télécommunications sont aujourd'hui en constante évolution avec notamment l'apparition de nouvelles technologies et la mise en place d'architectures de réseaux de plus en plus complexes.

Ces réseaux associent de façon hybride les supports de transmission que sont le cuivre, la fibre optique et les ondes hertziennes. Bien que l'introduction de la fibre optique dans le réseau France Télécom se poursuive de façon intensive, la cohabitation entre l'optique et le cuivre se traduit encore par de nombreuses applications qui concernent en particulier la fourniture de services numériques à hauts débits sur des supports cuivre mais

également l'alimentation des répéteurs pour les réseaux optiques.

Dans ce contexte, il convient de maîtriser les problèmes de compatibilité électromagnétique pour lesquels il faut prendre en considération les aspects nouveaux qui apparaissent en terme de pouvoir perturbateur et d'immunité des systèmes.

Avec l'apparition de ces matériels sophistiqués et fonctionnant avec des signaux numériques bas niveau, France Télécom fait de l'optimisation de la protection contre les agressions électromagnétiques l'une de ses préoccupations majeures.

Dans ce domaine, l'objectif de l'opérateur est d'abaisser à un niveau suffisamment bas la probabilité de dégâts matériels et de dommages corporels tout en offrant une qualité de service satisfaisante.

Afin d'améliorer l'immunité du réseau de télécommunication contre ces phénomènes perturbateurs, il est indispensable de caractériser l'environnement électromagnétique et de bien comprendre les phénomènes de couplage au niveau des infrastructures.

C'est plus particulièrement dans ce dernier contexte que sont menés des travaux ayant pour objet le développement et l'optimisation de codes de calcul des couplages dans des installations de télécommunications complexes.

Ils constituent une étape essentielle dans la conception des éléments et méthodes de protection. Ces recherches impliquent l'utilisation de méthodes numériques donnant une image précise des phénomènes mis en jeu.

Les premiers travaux se sont tout d'abord concentrés sur l'étude du couplage d'une onde électromagnétique avec des structures aériennes ou enterrées de forme relativement simple. Puis l'aspect multifilaire des câbles de télécommunications a ensuite été abordé en modélisant, d'une part, l'effet des torsades et en introduisant, d'autre part, la notion de conducteur équivalent qui présente l'avantage de réduire considérablement la taille du problème à étudier.

Cependant, la complexité du réseau de France Télécom a fait apparaître la nécessité de disposer d'outils de simulation qui prennent en compte cet aspect dans l'évaluation des signaux parasites induits par différentes sources électromagnétiques.

Ainsi de façon plus concrète, s'est posé le problème du calcul des courants et tensions induits par la foudre au niveau des équipements de l'utilisateur. La prise en compte d'un point d'impact situé en amont dans le réseau, voire même sur le bâtiment abritant les équipements de communications est tout à fait essentielle.

La résolution de ce type de problème est aujourd'hui facilitée par l'apparition de la topologie électromagnétique qui, associée à la théorie des lignes de transmission, permet de disposer d'un formalisme assez simple d'emploi [1][2][3].

A titre d'exemple, les courbes de la figure 3 montrent un exemple de résultats obtenus expérimentalement et par le calcul sur un réseau de forme complexe soumis à une impulsion de foudre conduite.

[1] "Couplage d'une onde électromagnétique rayonnée par une décharge orageuse à un câble de télécommunications".

A. Zeddou, thèse de l'université des sciences et techniques de Lille Flandre Artois, juillet 1988.

[2] "Analyse des perturbations en régime impulsionnel sur les lignes multiconducteurs".

K. Kerroum, A. Benali, J. Fontaine, M. Vautier, A. Zeddou, 6e Colloque sur la CEM, Lyon, pp. 85-91, 1992.

[3] "Prise en compte de la complexité des installations du réseau de France Télécom dans le cadre de l'étude théorique et expérimentale des phénomènes de couplage électromagnétique".

O. Daguiillon, thèse de doctorat, université de Clermont-Ferrand, juillet 1995.

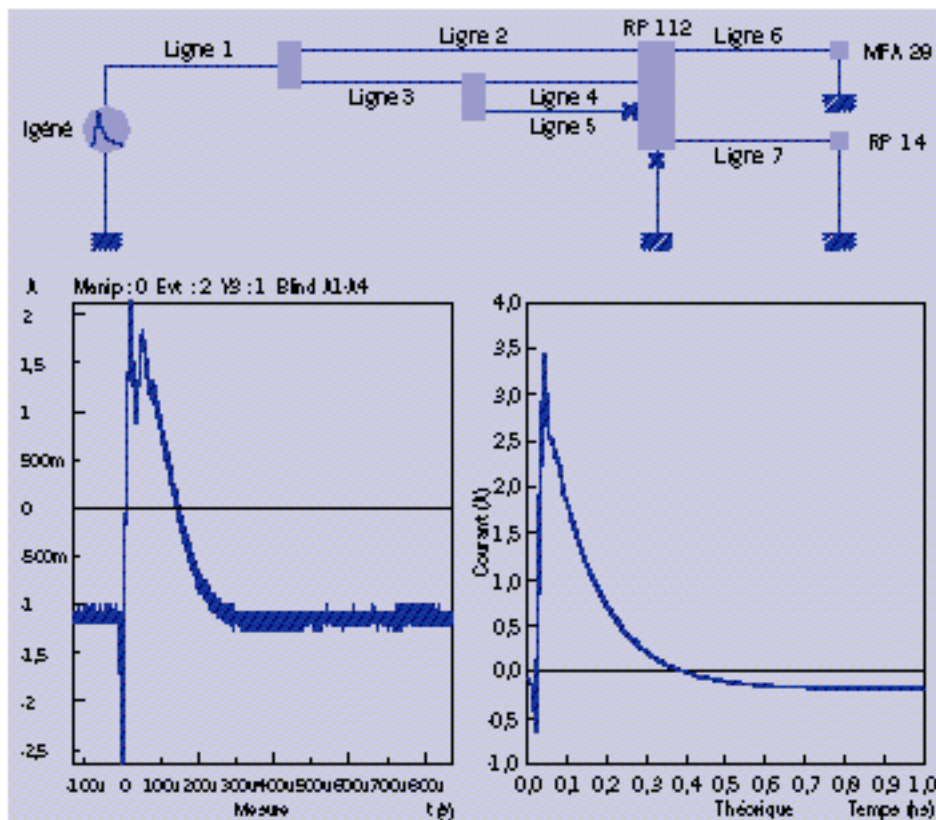


Figure 3 - Courant induit au niveau de ligne L5.

### Protection des bâtiments de France Télécom contre la foudre

Les centres de télécommunications constituent des sites sensibles dans la mesure où ils comportent des équipements électroniques très sophistiqués. Pour de telles installations, une agression due à la foudre peut endommager des équipements et même porter atteinte à la sécurité des personnes.

De plus, il ne faut pas que l'installation de pylônes et d'antennes sur les terrasses des bâtiments de France Télécom fragilise la protection des bâtiments et des équipements des centres vis-à-vis de la foudre et d'autres agressions électromagnétiques.

Les antennes sont bien évidemment un vecteur de pénétration de la foudre si les précautions adéquates ne sont pas prises.

La protection des structures contre la foudre doit, pour être optimale, comprendre une protection contre les coups directs, une protection contre les surtensions transitoires dues aux effets indirects et une équipotentialité des réseaux de terre et de masses.

Cependant, pour des considérations d'ordre économique, le besoin d'une protection contre les effets directs de la foudre n'est pas toujours systématique, et il doit être de ce fait déterminé dans chaque cas par une évaluation du risque de dommages.

L'étude des effets directs et indirects de la foudre sur un bâtiment de télécommunications peut être abordée de manière théorique à l'aide du formalisme des antennes qui conduit à la résolution, par la méthode des moments, des équations intégrales qui régissent la distribution des courants induits sur la

structure métallique du bâtiment constituée par le système de protection extérieure et le réseau de masse maillé. Le modèle numérique ainsi développé a été validé à l'aide de résultats expérimentaux obtenus lors des campagnes de déclenchement artificiel de la foudre menées à Saint-Privat d'Allier [3][4][5].

Par ailleurs, cet outil informatique permet de prendre en compte la présence du réseau de masse maillé du bâtiment et contribuer ainsi à l'optimisation des règles d'ingénierie.

Ce travail d'ingénierie très important est à intégrer dans le schéma directeur de la protection des équipements dans les centres de France Télécom.

### La protection des installations contre les décharges d'électricité statique (DES)

La protection des installations contre les décharges d'électricité statique (DES) est un des autres aspects de la CEM "classique" à prendre en compte tant lors de la conception des équipements que dans le cadre de leur maintenance. La démarche globale visant à assurer la protection électrostatique des équipements de télécommunications se différencie de moins en moins de celle qui s'adresse aux équipements électroniques professionnels.

[4] "Numerical modeling of lightning protection systems".

O. Daguillon, A. Zeddani, A. Karwowski, Euroem Bordeaux, pp. 1746-1753, juin 1994.

[5] "Déclenchement artificiel de la foudre : application à la validation des méthodes de protection des installations de France Télécom".

A. Zeddani, l'écho des Recherches, n° 150, 4<sup>e</sup> trimestre 1992.

Pour aboutir au résultat escompté, les moyens à mettre en œuvre sont d'une grande variété. Ils passent aussi bien par le blindage d'un châssis que par les précautions particulières qu'il convient de prendre lors de la manipulation des cartes électroniques. Ils font souvent l'objet d'une description dans des procédures spécifiques. Néanmoins, malgré leur diversité, ils sont ici regroupés sous trois aspects principaux qui concernent :

- l'élimination des charges électrostatiques,
- l'immunité des équipements aux décharges d'électricité statique,
- l'application de procédures spécifiques.

La protection électrostatique actuellement mise en œuvre dans les centres repose essentiellement sur l'immunité renforcée donnée aux équipements et sur les qualités électriques des planchers qui sont installés dans ces centres. L'évaluation de la conductivité des sols fait, jusqu'à présent, référence à la recommandation T/TR 02-08 de la CEPT datant de 1986. Depuis, l'ETSI, qui a pris le relais en matière de normalisation, a édité en mars 1994 un rapport technique à l'usage des personnels des opérateurs publics de télécommunications et de leurs fournisseurs. Il apparaît toutefois que sa majeure partie est adaptée à la protection des équipements électroniques professionnels. En effet, au-delà des préconisations relatives à la résistance qu'il convient de donner aux sols, on y traite d'autres aspects de la protection électrostatique. On relève notamment la définition d'environnements électrostatiques, répartis en quatre catégories, et des recommandations pour la connexion à la terre des bracelets antistatiques ou d'autres équipements. On y trouve enfin des recommandations diverses concernant les divers aspects de la protection électrostatique et allant des précautions relatives à l'emballage des composants sensibles jusqu'à la formation du personnel ou à la pratique d'audits.

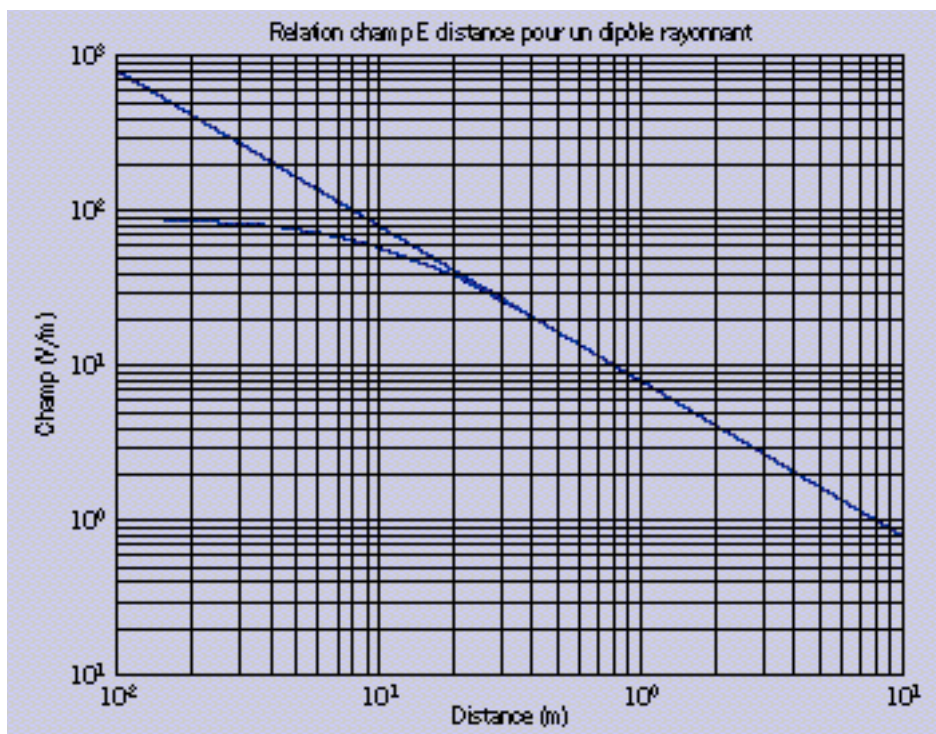


Figure 4 - Relation champ E en fonction de la distance pour un dipôle rayonnant une puissance de 2 W.

## Protection des équipements contre les émissions radioélectriques

Bien qu'étant particulièrement utiles dans les télécommunications, certains émetteurs radioélectriques peuvent représenter une "menace" électromagnétique.

En effet, un émetteur radio produit un champ assez élevé à faible distance de l'antenne d'émission. Il peut arriver que ce champ provoque des dysfonctionnements sur des matériels électroniques situés à proximité de l'antenne d'émission et insuffisamment protégés.

Il y a quelques années, des problèmes de perturbations électromagnétiques sont apparus à proximité d'émetteurs de radiodiffusion ou de télévision. A la fin des années 80, l'expérience des postes téléphoniques S 63 à courant réduit en a donné un des tous premiers exemples, mais avec l'introduction de terminaux électroniques, les problèmes se sont multipliés et diversifiés, se traduisant par

l'écoute de la radiodiffusion ou de cibistes dans les postes téléphoniques.

La situation s'est considérablement améliorée dès que la norme française de compatibilité électromagnétique des postes téléphoniques et télématiques a été rendue obligatoire pour l'agrément des terminaux [6].

Cependant, le développement de nouveaux services radioélectriques, en particulier ceux utilisant des terminaux mobiles de moyenne puissance (supérieure à 0,5 W crête) et fonctionnant en numérique, a mis en évidence de nouveaux problèmes de CEM.

En effet, dans le domaine radioélectrique, un champ électromagnétique de 1 à 3 V/m était considéré comme assez élevé jusqu'à l'apparition et à la banalisation des terminaux GSM 8 et 2 Watts. Les normes d'immunité se limitaient à des valeurs de ces ordres de grandeur, en général.

[6] "Matériels téléphoniques et télématiques : compatibilité électromagnétique". Norme NF-C 98020, août 1986, UTE.

La figure 4 représente les variations du champ crête produit par un terminal GSM de 2 W crête à faible distance du terminal entre 2 cm et 1 m, et montre que des champs très supérieurs à 3 V/m sont obtenus à faible distance des terminaux GSM tant dans l'hypothèse d'onde plane (droite) qu'avec un calcul plus précis de rayonnement d'un dipôle (courbe).

Ceci pose de nouveaux problèmes car la normalisation européenne et internationale a été établie sur des normes d'immunité comprises entre 1 et 10 V/m.

De plus, le principe de multiplexage temporel (AMRT) utilisé dans le système GSM, implique l'existence d'impulsions de signaux RF dans la bande 900 MHz (émission par les terminaux entre 890 et 915 MHz) avec une fréquence de répétition de 217 Hz et une durée d'impulsion de 577 µs, pendant la phase de conversation.

Ces impulsions RF peuvent induire des défauts sur des appareils électroniques dont les concepteurs n'ont pas pris en compte ce type de rayonnement.

En effet, de par les non-linéarités des composants électroniques, les appareils électroniques peuvent démoduler les impulsions de signaux radiofréquence, les traiter comme des signaux utiles et engendrer parfois des défauts de fonctionnement de dispositifs électroniques.

Deux paramètres interviennent donc dans le mécanisme de perturbation du dispositif électronique :

- l'amplitude de la fréquence du champ électromagnétique ou des courants RF couplés au dispositif électronique,
- la forme et la fréquence de modulation ou de répétition des signaux RF appliqués (impulsions dans le cas des radars et des systèmes fonctionnant en multiplexage temporel, modulation d'amplitude pour les émetteurs de radiodiffusion ou de télévision).

Dans ces conditions, le rayonnement de terminaux radioélectriques pose un problème aux porteurs d'appareils électroniques d'assistance médicale (aide auditive, pompes à insuline, stimulateurs cardiaques). Dans des cas extrêmes et

surtout lorsqu'aucune considération de CEM n'a été prise à la conception de ces appareils, des dysfonctionnements peuvent être mis en évidence si l'antenne d'émission se trouve à moins de 20 cm de l'appareil médical.

Les fabricants de matériel médical et de terminaux radioélectriques ont déjà conseillé aux porteurs d'aides électroniques médicales de prendre un certain nombre de précautions quant à l'usage des terminaux de radiotéléphonie cellulaire. Ces précautions sont d'ores et déjà inscrites dans les notices d'utilisation des terminaux radio. D'autre part, les médecins traitant les patients munis d'aides électroniques ont été sensibilisés au problème.

Dans les avions, il est interdit d'utiliser son radiotéléphone cellulaire mais aussi tout équipement électronique (ordinateur, jeu vidéo, caméscope, baladeur, etc.) dans les phases critiques des vols (décollage et atterrissage) car des interférences peuvent se produire.

A bord des voitures équipées d'air-bag ou de systèmes électroniques divers, les questions d'immunité radioélectrique des équipements se sont posées dès l'introduction de l'électronique. Les constructeurs automobiles y sont très sensibles : ils ont d'ores et déjà intégré des normes adéquates pour l'électronique de bord.

Figure 5 - Pouvoir perturbateur en rayonnement à 1 m d'un micro-ordinateur à base de processeur Pentium 90 incomplètement blindé entre 20 et 200 MHz.

## Pouvoir perturbateur des équipements électroniques

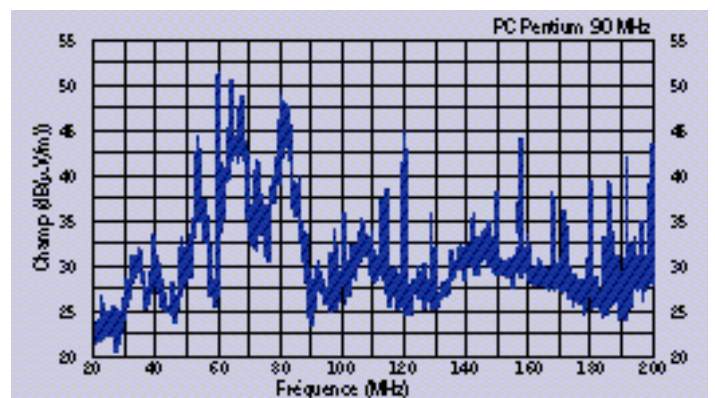
Les équipements électroniques modernes sont aussi des sources de parasites pouvant brouiller la réception des services radio-électriques tout comme des équipements électroniques sensibles.

Les principales sources de bruit électromagnétique dans un équipement électronique donné sont :

- les alimentations à découpage,
- les alimentations à très haute tension des écrans de visualisation pour la partie la plus basse du spectre des fréquences,
- les relais, les moteurs à collecteurs, tout élément produisant des étincelles,
- tout sous-ensemble utilisant des oscillateurs (horloges et bus de circuits logiques, oscillateurs locaux pour équipements de transmission vidéo ou radioélectrique),
- etc.

Ces émissions parasites caractérisent le pouvoir perturbateur d'un appareil.

La figure 5 montre le spectre parasite rayonné à 1 mètre de distance par un micro-ordinateur PC Pentium 90 imparfaitement traité en compatibilité électromagnétique. On peut en identifier des sources à bande étroite (raies parasites) et des sources à large spectre (bruit occupant une certaine largeur en fréquence).



Note : La relation permettant le passage du champ exprimé en dB(µV/m) au champ exprimé en V/m est la suivante :  

$$E = 10^{(E_0 - 120)/20}$$
avec E en V/m et E<sub>0</sub> en dB(µV/m).

La limitation des rayonnements parasites produits par tous les équipements électroniques commercialisés contribue à la protection du spectre radioélectrique en permettant d'éviter des brouillages de services radioélectriques. Elle relève de l'écologie du spectre radioélectrique qui est une ressource de plus en plus rare et chère.

## Tendances de la recherche en CEM pour les années 1995-2000

Après avoir particulièrement progressé dans les années 85-95, la recherche de base en CEM pour les télécommunications est maintenant concentrée sur certains secteurs où les normalisations sont insuffisantes alors que certains problèmes subsistent.

Les principales orientations visent entre autres :

- la protection du réseau et des équipements de France Télécom vis-à-vis des perturbations de type transitoires,
- les études de rayonnement parasite et d'immunité radioélectrique aux fréquences supérieures à 1 GHz,
- les effets des émissions des terminaux radioélectriques sur l'électronique médicale et sur les équipements électroniques embarqués (avions, voitures, trains),
- les brouillages entre équipements situés à faible distance (de quelques cm à quelques mètres) car l'on voit de plus en plus se côtoyer de la radio et de l'électronique parfois incompatibles (PC équipé d'un modem radio, par exemple),
- les méthodes économiques de protection des équipements,
- la métrologie du champ électromagnétique RF qui est un domaine insuffisamment exploré et nécessaire à la validation des méthodes de mesures normalisées.

De plus, les nouvelles technologies et les nouvelles structures de réseaux ATM, HDSL, ADSL verront se banaliser des transmissions à haut débit jusque chez

l'utilisateur avec des équipements qui seront installés dans les rues, sur le trottoir, dans des immeubles ou en milieu industriel. La CEM doit être prise en compte très tôt dans le processus de définition et de normalisation afin d'optimiser et de définir les règles adéquates de câblage. Enfin, la modélisation électromagnétique permettra de prévoir le traitement éventuel des bâtiments dans la perspective d'améliorer globalement, au moindre coût, l'isolation des équipements des centres de télécommunications vis-à-vis de perturbateurs potentiels.

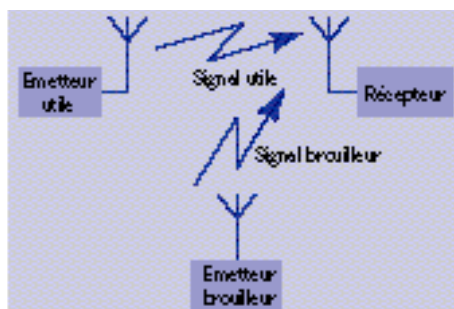
## Ingénierie des fréquences

### Position du problème

Le développement très rapide de nouveaux services radioélectriques depuis quelques années, et en particulier des services mobiles, a induit de nouvelles études dans le domaine radioélectrique.

Ces nouvelles études ont pour principe général d'assurer la compatibilité entre systèmes radioélectriques anciens et nouveaux ou entre nouveaux services.

Ceci correspond à la recherche des conditions optimales de fonctionnement de services radioélectriques en présence d'émissions d'autres services radio, le but étant d'éviter tout brouillage intersystèmes radioélectriques (figure 6).



## Définition des études

Pour éviter les brouillages, il faut évaluer les principaux paramètres radioélectriques (comme les rayonnements non essentiels des émetteurs, le blocage des récepteurs, l'intermodulation), les critères de partage d'une même bande de fréquences, les brouillages entre systèmes radioélectriques fonctionnant sur des bandes de fréquences adjacentes, et réaliser des études de compatibilité interservices entre les différents services existants ou à venir (exemple : GSM/Pointel, Pointel/TV, GSM/UIC, DECT/DCS 1800, Service fixe/services mobiles futurs, mobiles par satellite/faisceaux hertziens, etc.).

Les calculs prévisionnels de compatibilité et d'ingénierie des fréquences sont basés sur des scénarios vraisemblables de cohabitation interservices. Ils utilisent les paramètres connus apparaissant dans les spécifications des équipements ou des systèmes radioélectriques, des lois de propagation généralement reconnues ou acceptées et des critères de brouillages définis.

Des campagnes de mesures servent à vérifier l'adéquation des calculs tant en laboratoire que sur des sites réels lorsque des installations sont réalisées.

## Normalisation dans le domaine radioélectrique

Les instances de normalisation européenne et internationale sont très actives, en particulier la Commission 1 de l'UIT-R dédiée à la gestion du spectre radioélectrique et la Commission 2 de l'UIT-R dédiée à la compatibilité interservices, mais surtout le Groupe spectrum engineering (SE) de la CEPT et des Comités techniques RES (radio), SES (satellites), TM (faisceaux hertziens) de l'ETSI.

Figure 6 - Schéma type d'une situation de brouillage entre services radioélectriques.

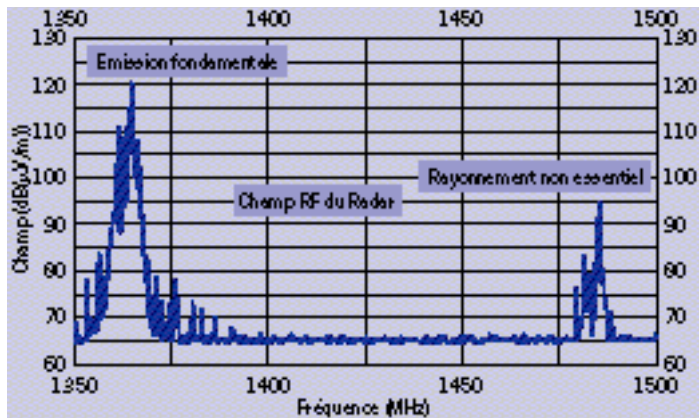


Figure 7 - Rayonnement d'un radar de 2 MW à 10 km de son site d'émission, en visibilité.

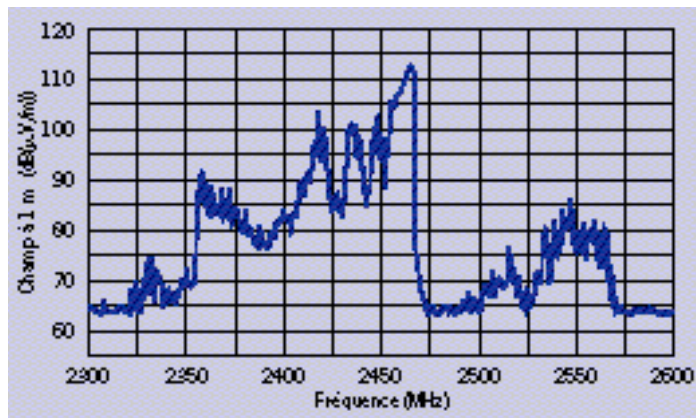


Figure 8 - Enveloppe maximum du rayonnement de fuite d'un four à micro-ondes à une distance de 1 m de la porte. Le four est chargé par un récipient contenant 1 litre d'eau.

Leurs travaux visent à établir des limites et des méthodes de mesure des paramètres critiques comme les rayonnements non essentiels et les rayonnements hors bande des émetteurs, des paramètres de blocage des récepteurs, à donner des critères relatifs aux conditions de partage des fréquences pour des systèmes différents, etc.

Pour illustrer la notion de rayonnement non essentiel, la figure 7 représente le spectre de rayonnement d'un radar de contrôle de navigation aérienne de technologie ancienne et le niveau relatif de rayonnement non essentiel produit par le magnétron de l'émetteur. De tels niveaux parasites sont de plus en plus intolérables car ils peuvent empêcher la cohabitation avec des faisceaux hertziens ou des services radioélectriques nouveaux.

## Les effets biologiques des ondes électromagnétiques\*

### Généralités

La question des effets biologiques des ondes électromagnétiques n'est pas nouvelle. En France, EDF est depuis fort longtemps confrontée aux effets des champs induits à la fréquence de 50 Hz par la présence des lignes et des ouvrages à haute-tension. De temps à autres, des controverses sur les risques liés à l'usage des fours à micro-ondes sont publiées.

Le développement des tables à induction rayonnant localement des champs magnétiques intenses autour de 100 kHz soulève aussi des interrogations.

Enfin, les rayonnements radioélectriques de toutes natures mais surtout ceux liés à l'utilisation du radiotéléphone cellulaire sont également mis en cause car les interactions des rayonnements électromagnétiques, plus particulièrement radioélectriques, avec les structures biologiques sont mal connues.

Les effets possibles pourraient être de deux ordres : des effets thermiques et des effets non thermiques.

La première catégorie correspond aux interactions liées à l'apport d'énergie et implique des expositions à des champs ou à des densités de puissances extrêmement élevés. L'effet de cuisson du four à micro-ondes nécessite un transfert localisé d'environ 1 kW dans un volume relativement faible et sur des sections en sortie de magnétron, correspondant à des densités d'exposition de l'ordre de ou supérieures à 20 W/cm<sup>2</sup>. Bien évidemment, ceci ne concerne que l'intérieur du four à micro-ondes. Compte tenu des protections efficaces mises en place par les constructeurs, les fuites d'un four à micro-ondes sont faibles et ne doivent pas induire de nuisance électromagnétique. La figure 8 montre un relevé de fuites d'un four à micro-ondes dans sa bande de fréquence autorisée (2 400 à 2 500 MHz). A 1 m de distance, le champ rayonné dans la bande autorisée 2 400-2 500 MHz n'est pas dangereux par rapport aux effets thermiques.

Mais on peut constater que le rayonnement du four peut se faire aussi en dehors de sa bande autorisée d'où risque de brouillage avec des services radioélectriques (voir paragraphe précédent).

\*Voir aussi l'article invité de Bernard Veyret page 79.

D'autre part, on utilise en médecine les effets thermiques des micro-ondes pour provoquer localement une élévation de la température. C'est l'hyperthermie. Elle permet d'accélérer les traitements de certaines maladies ou de détruire des cellules cancéreuses.

Les mécanismes qui régissent ces effets thermiques sont relativement bien connus.

Il en va tout autrement des émetteurs radioélectriques, et en particulier des terminaux radiotéléphoniques, dont la vocation est de rayonner à l'air libre. Il n'est heureusement pas possible d'atteindre des densités de puissances locales telles que celles calculées à l'intérieur d'un four micro-ondes ou telles que celles utilisées en hyperthermie.

Pour les terminaux GSM, la puissance moyenne est d'environ le huitième de la puissance de crête maximum annoncée soit 250 mW pour un terminal de 2 W crête et 1 W pour un terminal de 8 W crête.

Les risques de déclenchement d'effets thermiques sont en principe négligeables, même lorsque l'antenne est tout contre la tête de l'utilisateur. Un calcul sommaire montre que la densité d'exposition à 3 cm de l'antenne d'émission ne dépasse pas 3 mW/cm<sup>2</sup> pour un terminal de 2 W crête émettant à pleine puissance.

De façon générale, la densité surfacique d'exposition diminue avec le carré de la distance pour devenir très vite totalement négligeable par rapport aux effets thermiques. De plus, la vascularisation des tissus biologiques permet l'évacuation de la chaleur.

Pour les émetteurs de radiotéléphonie, le principal enjeu, au plan européen, est de déterminer des limites de puissance d'émission n'induisant pas de danger pour l'être humain et compatibles avec le développement des systèmes radioélectriques. Cette question, importante, est au cœur de la normalisation européenne (Cenelec). Néanmoins, son intérêt est appelé à décroître grâce à la baisse vraisemblable de la puissance d'émission des mobiles par la densification du réseau.

La deuxième orientation des effets biologiques concerne les interactions qui ne sont pas du type thermique.

Partout, en Europe (Action COST 244) et dans le monde, des chercheurs se penchent sur les interactions possibles des ondes électromagnétiques avec les mécanismes régissant la vie. C'est ainsi que des études sont menées sur le système nerveux central et certains organes vitaux du cerveau.

Pour l'instant, il ne semble pas y avoir de résultats prouvant, avec certitude, l'existence d'effets nocifs. Cependant, il apparaît que compte tenu des enjeux, le sujet mérite d'être approfondi. Une grande partie de la communauté scientifique travaillant en bioélectromagnétisme est intéressée par cette question. Les industriels tout comme les opérateurs de radiotéléphonie doivent poursuivre des recherches dans ce domaine avec l'appui des réglementeurs.

## Etudes futures

Pour affiner les connaissances dans ce domaine, deux types d'études sont envisagées, l'une concerne la modélisation du champ électromagnétique dans les structures biologiques (dans la tête, par exemple), l'autre est orientée sur des études biomédicales associant ingénieurs, biologistes et médecins. Cette deuxième voie est extrêmement complexe et nécessite des moyens très importants.

Outre leur aspect pluridisciplinaire, une des difficultés de ces études réside dans le fait qu'il est très difficile de démontrer de façon très générale, que l'utilisation d'un appareil n'a pas d'effet nocif pour la santé des personnes.

La figure 9 représente la répartition du champ électromagnétique induit par un dipôle rayonnant 1 W à la fréquence de 900 MHz. Ces résultats ont été obtenus au CNET à l'aide d'une modélisation basée sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) [7].

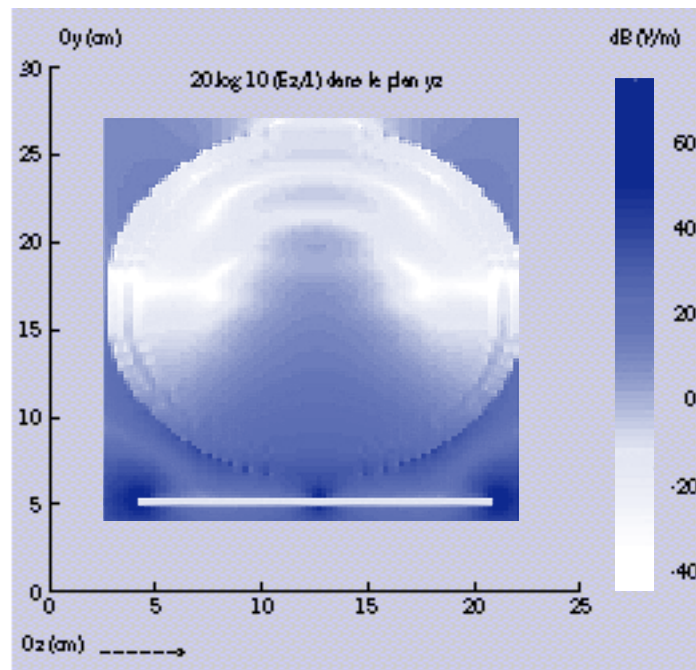


Figure 9 - Répartition du champ produit par un dipôle accordé rayonnant 1 W à 900 MHz dans une tête modélisée par une succession de sphères.

[7] "Calculation of electromagnetic field induced by an electric dipole near a layered sphere". J. Wiart. Colloque de la Bioélectromagnetics Society (BEMS). Juin 1995.

---

## Conclusion

En conclusion, on peut constater que la CEM est globalement un sujet en forte expansion dans le monde en 1995 du fait du développement sans précédent des applications radioélectriques et de l'intégration énorme de l'électronique dans la vie quotidienne soumise à des perturbations électromagnétiques nombreuses.

La mise en application obligatoire au 1<sup>er</sup> janvier 1996, à travers la Communauté européenne, de la directive européenne sur la CEM (89/336/CEE) [8] est un facteur positif tendant à sensibiliser le plus grand nombre d'acteurs économiques à ces aspects encore confidentiels, il y a quelques années.

Sujets parfois controversés, de nombreuses interrogations subsistent et demandent plus d'efforts de recherche européenne et internationale (effets biologiques), de normalisation (CEM et ingénierie des fréquences).

La prise de conscience des différents volets de la CEM et de ses enjeux est indispensable à tous les niveaux, afin d'aboutir, dans les meilleures conditions technico-économiques, à la satisfaction des clients à travers une bonne qualité de service et un minimum de nuisances (en terme d'effets électromagnétiques gênants).

Du chercheur à l'exploitant, la CEM doit être considérée comme un facteur visant à l'assurance d'une bonne qualité de service et non comme une contrainte supplémentaire alourdissant les procédures d'intégration dans les réseaux de télécommunications. Il est d'ailleurs frappant de constater que les matériels conformes aux spécifications CEM ne font jamais parler d'eux en termes de perturbations lorsqu'ils sont mis dans le réseau de télécommunications.

---

[8] Directive européenne sur la compatibilité électromagnétique (89/336/CEE) parue sous le titre Directive du Conseil du 3 mai 1989 concernant le rapprochement des législations des états membres relatives à la compatibilité électromagnétique. Journal officiel des Communautés européennes du 23 mai 1989 (modifié par la directive 92/31) et ses transcriptions en droit français : décret 92-587 du 26 juin 1992 et décret 95-283 du 13 mars 1995.