

Rapport d'étude

**Analyse de champ proche et de couverture  
radioélectrique**

F. Le Pennec  
Dpt Microondes

- Septembre 2001 -

## Table des matières

A.	Introduction générale .....	3
B.	Modélisation des niveaux de champs pour une antenne macro-cellulaire sur toit-terrasse.....	4
B.1.	Introduction à l'étude de couverture radio.....	4
B.2.	Modélisation d'une antenne sur toit terrasse .....	6
B.3.	Avec plan métallique réflecteur à $\lambda g/4$ .....	8
C.	Etude des champs proches .....	11
C.1.	Etude à partir du modèle filaire de l'antenne.....	11
C.1.1.	Modélisation NEC .....	11
C.1.2.	Paramètres généraux .....	12
C.1.3.	Diagramme de rayonnement.....	12
C.1.4.	Champs proches.....	14
C.2.	Antenne GSM avec modèle 3D .....	16
C.2.1.	Optimisation des paramètres du dipôle élémentaire avec son armature.....	16
C.2.2.	Simulation de l'antenne GSM complète .....	17
D.	Conclusion générale.....	22
E.	Références bibliographiques.....	23
F.	Annexes .....	24
F.1.	Fichier de simulation NEC.....	24

## Table des figures

Figure B.1-1	Environnement étudié .....	4
Figure B.1-2	Diagramme de rayonnement de l'antenne utilisée.....	5
Figure B.2-1	Simulation X-Siradif, antenne isolée sur terrasse .....	7
Figure B.2-2	Champs E sur antenne isolée sur toit terrasse en fonction de la position.....	8
Figure B.3-1	Cartographie de la puissance reçue avec plan métallique à $\lambda/4$ .....	9
Figure B.3-2	Champs E sur antenne avec plan à $\lambda/4$ sur toit terrasse en fonction de la position.....	10
Figure C.1-1	Géométrie de l'antenne analysée .....	11
Figure C.1-2	Définition des angles pour le diagramme de rayonnement .....	13
Figure C.1-3	Diagramme de rayonnement dans le plan E (X,Z).....	14
Figure C.1-4	Valeurs efficaces du champ électrique (V/m) proche dans le plan vertical E (X,Z), $P_e=20W$ .....	15
Figure C.1-5	Valeurs efficaces du champ électrique (V/m) proche dans le plan horizontal H (X,Y), $P_e=20W$ .....	15
Figure C.2-1	Géométrie utilisée pour l'optimisation .....	16
Figure C.2-2	Réponse du dipôle optimisé .....	17
Figure C.2-3	Modélisation de l'antenne GSM sous MWS .....	18
Figure C.2-4	Adaptation de l'antenne complète .....	18
Figure C.2-5	Diagramme de rayonnement 3D et cartésien de l'antenne GSM.....	19
Figure C.2-6	Diagrammes polaires dans chaque plan de l'antenne GSM.....	19
Figure C.2-7	Distribution du champ dans le plan vertical pour l'antenne GSM.....	20
Figure C.2-8	Distribution de champ dans le plan horizontal pour l'antenne GSM.....	21

## A. Introduction générale

Cette étude contient deux parties distinctes. La première, qui est développée dans la partie B du rapport, porte sur l'analyse des niveaux de champ électrique rayonné par une antenne GSM située sur le toit-terrace d'un immeuble. Elle permet d'estimer la distribution des intensités de champ électrique en tenant compte du diagramme de rayonnement de l'antenne et de la configuration particulière des bâtiments présents. 2 scénarios sont envisagés : une situation "canonique" qui vise à conforter des résultats présentés par ailleurs en [biblio E-1] et une situation dérivée dans laquelle un plan réflecteur est judicieusement placé à l'arrière de l'antenne pour maximiser le rayonnement avant, constituant ainsi une sorte de "pire cas". Dans la deuxième partie de l'étude, développée au paragraphe C, nous calculons les champs proches d'antennes GSM composées de réseaux de 4 dipôles rayonnants montés sur une armature adéquate. Nous avons utilisé un modèle filaire de l'antenne dans le but d'établir des comparaisons avec [biblio E-2], et un modèle tridimensionnel rigoureux permettant de valider notre logiciel de simulation électromagnétique Microwave Studio (MWS) pour ce type d'étude. Les résultats et la démarche d'analyse sont présentés de manière exhaustive.

## B. Modélisation des niveaux de champs pour une antenne macro-cellulaire sur toit-terrasse

### B.1. Introduction à l'étude de couverture radio

Dans cette première partie de l'étude, nous nous sommes intéressés à l'estimation des niveaux de champs induits par une antenne située au dessus d'un immeuble et face à un autre immeuble plus petit, conformément aux indications fournies par l'ANFR et résumées dans le schéma ci-dessous :

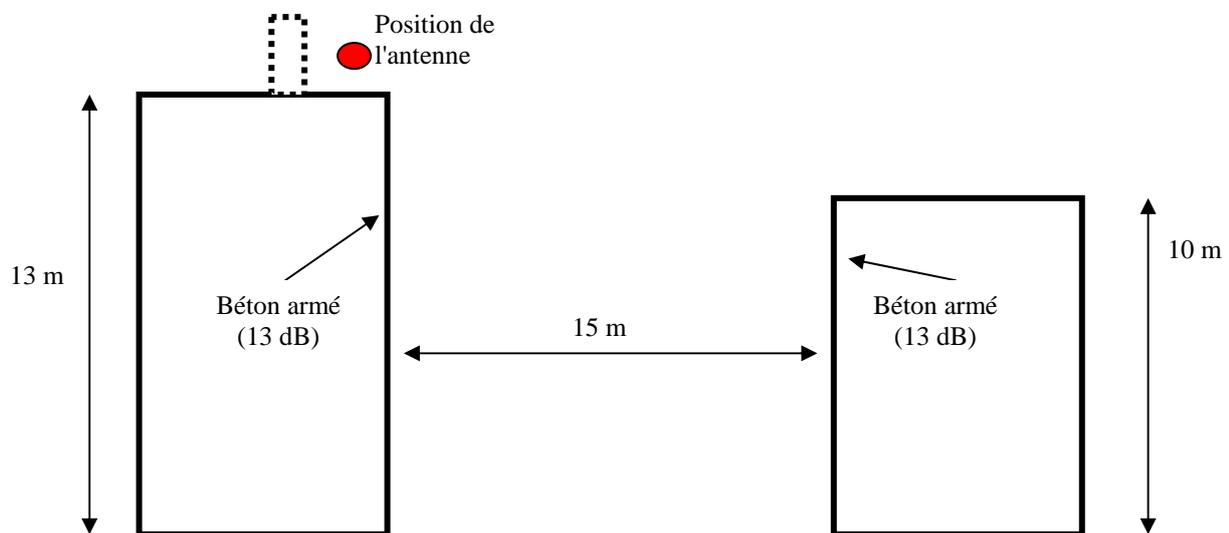


Figure B.1-1 Environnement étudié

Pour mener à bien cette étude, nous avons utilisé le logiciel X-Siradif, version HP9000 1.2, de la société SIRADEL (Rennes). Celui-ci est basé sur un formalisme de rayon et s'appuie sur la théorie uniforme de la diffraction (TUD) pour calculer les zones de couvertures et certaines caractéristiques de propagation utiles à la planification cellulaire. Le logiciel prend ainsi en compte les différents chemins issus d'une source ponctuelle dont l'intensité est spatialement modulée en respectant une spécification de diagramme de rayonnement. Il permet d'exprimer les atténuations liées à différents types de matériaux utilisés dans le modèle numérique de terrain sur lequel s'appuie la modélisation. Il prend également en compte les effets de diffraction provenant des arêtes à considérer dans l'analyse. La figure ci-dessous permet de visualiser le diagramme de rayonnement de l'antenne qui nous avait été transmis par l'ANFR et que nous avons utilisé dans nos simulations :

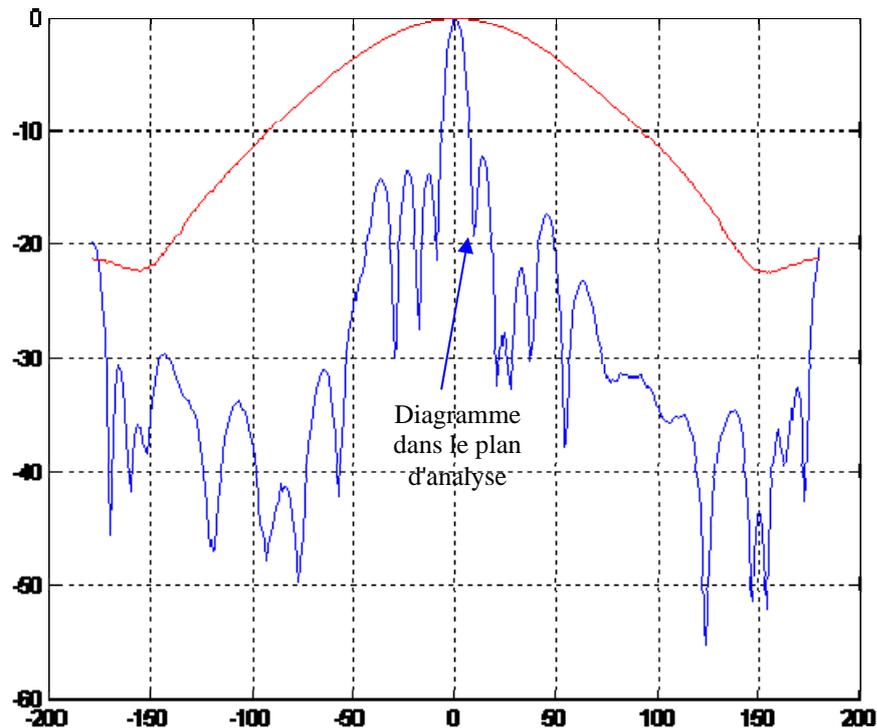


Figure B.1-2 Diagramme de rayonnement de l'antenne utilisée

Deux situations ont été étudiées, la première concerne l'antenne isolée située à 1 mètre du bord et au dessus du premier immeuble. Dans la seconde, nous avons placé un plan métallique parfaitement réflecteur à  $\lambda/4$  de l'antenne pour maximiser l'effet potentiel d'un tel obstacle sur le rayonnement avant. Dans notre schéma précédent [Figure B.1-1], cet obstacle apparaît en pointillé.

Le logiciel calcule en fait la puissance reçue par un récepteur parfaitement adapté et exprime celle-ci en dBm. Il est donc nécessaire de convertir cette puissance en niveau de champ équivalent, à toute fin utile de comparaison. On a la formule de Friis :

$$Pr = Pe Ge \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 Gr \text{ avec}$$

Pr : puissance reçue au point d'observation (W)

Ge : gain linéaire de l'antenne d'émission

$\lambda$  : longueur d'onde (m)

d : distance entre l'émetteur et le récepteur (m)

Gr : gain linéaire du récepteur adapté, ici isotrope soit Gr = 1

Nous avons par ailleurs :

$$Pr = Sr \cdot Ar = \frac{E^2}{120\pi} Ar \text{ où}$$

$S_r$  est la densité de puissance ( $W/m^2$ )

$A_r$  : surface équivalente du récepteur ( $m^2$ )

$E$  : Champ électrique local ( $V/m$ )

et

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r$$

En utilisant le fait que le récepteur en réception est isotrope,  $G_r=1$  et nous déduisons :

$$E_r = \frac{4\pi\sqrt{30}\cdot 10^{\frac{15}{20}}}{C} f_{GHz} 10^{\frac{Pr_{dbm}}{20}} = 7.255 f_{GHz} 10^{\frac{Pr_{dbm}}{20}} \quad \text{Eq. B-1}$$

où

$C$  est la vitesse de la lumière dans le vide ( $3\cdot 10^8$  m/s)

$f_{GHz}$  est la fréquence exprimée en GHz

$$Pr_{dbm} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{Pr}{10^{-3}} \right)$$

Notons au passage que la relation  $E^2 = \frac{30PeGe}{d^2}$  ne peut pas être appliquée ici si on veut prendre en compte la contribution des bâtiments environnants. L'équation "Eq. B-1" permet de calculer le niveau de champ reçu quelle que soit la fréquence. Dans notre cas, cette fréquence étant toujours égale à 900 MHz, la relation se simplifie et nous avons :

$$6.530 \cdot 10^{\frac{Pr_{dbm}}{20}} \quad \text{Eq. B-2.}$$

A partir de l'expression des puissances, nous pouvons donc très simplement déterminer l'expression correspondante en champ à partir d'un logiciel de post traitement. Nous avons utilisé le logiciel de calcul matlab à cet effet, en tirant parti par ailleurs de ses possibilités graphiques.

L'ensemble des résultats est obtenu en utilisant le récepteur "grille" de X-Siradif et en prenant en compte toutes les combinaisons de rayons diffractés (jusqu'au deuxième ordre) et réfléchis (jusqu'au troisième ordre). Le paramétrage de la grille d'analyse a été poussé à son maximum (300 X 300) pour permettre des mesures aussi détaillées que possible dans la zone d'observation.

## **B.2. Modélisation d'une antenne sur toit terrasse**

Nous présentons dans la figure ci-dessous les résultats de la simulation sous X-Siradif :

Antenne : Gain : 15.5 dBi, puissance : 43 dBm (20W), polarisation dans le plan du dessin, tild 5° vers le bas

Bâtiment : mur en béton, épaisseur 75 cm (correspond à une atténuation de 13 dB sous incidence orthogonale à 900 MHz pour X-Siradif)

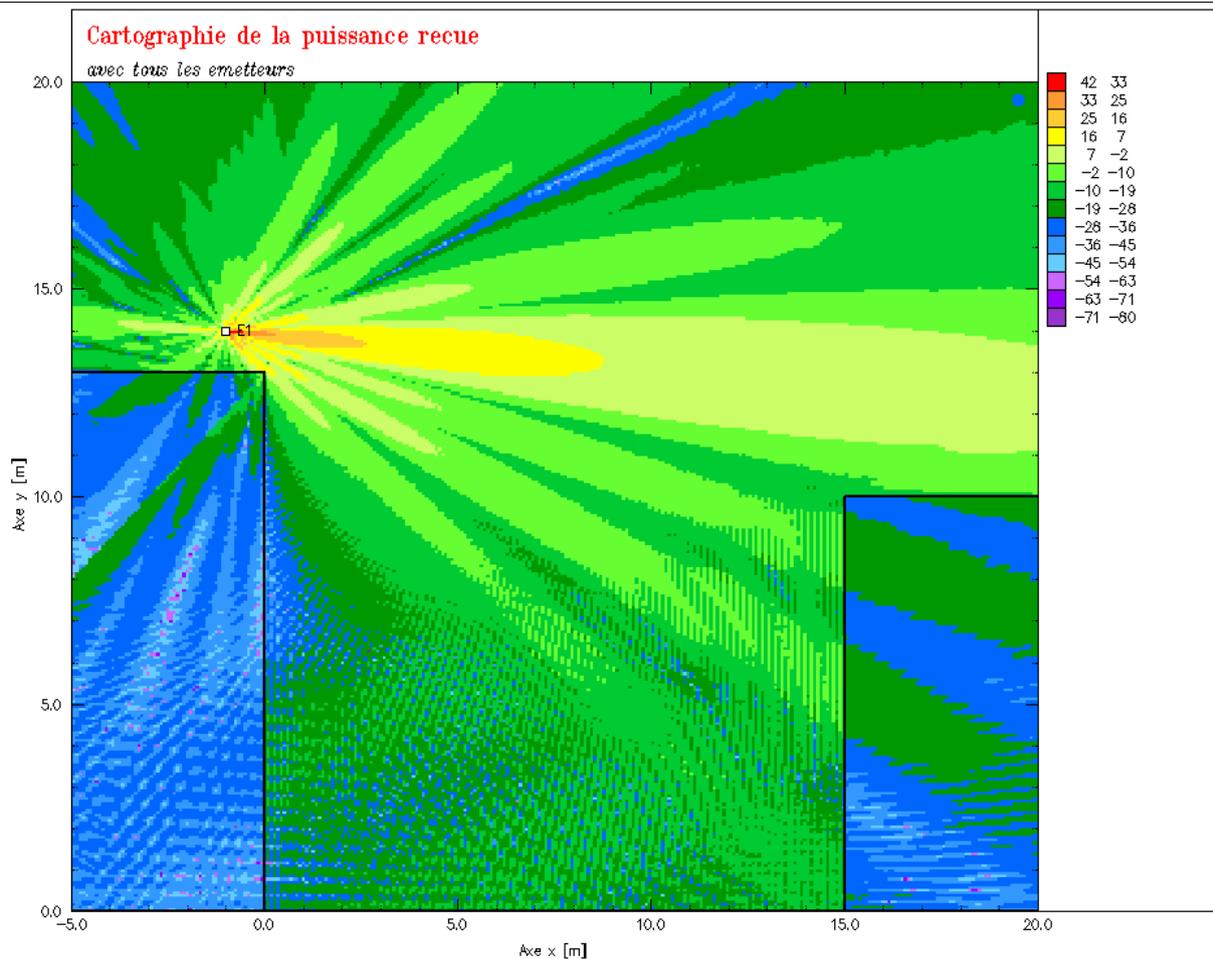


Figure B.2-1 Simulation X-Siradif, antenne isolée sur terrasse

On voit nettement apparaître la propagation à l'intérieur des bâtiments et le rôle particulier des lobes d'antennes vis à vis de la répartition de l'intensité. Au niveau du sol, la distribution de puissance apparaît beaucoup plus homogène en raison des réflexions sur les murs verticaux des bâtiments. Il ressort également à l'intérieur du bâtiment de gauche l'effet du point de diffraction angulaire.

Nous présentons ci-dessous la figure correspondant à cette simulation obtenue après traitement sous matlab

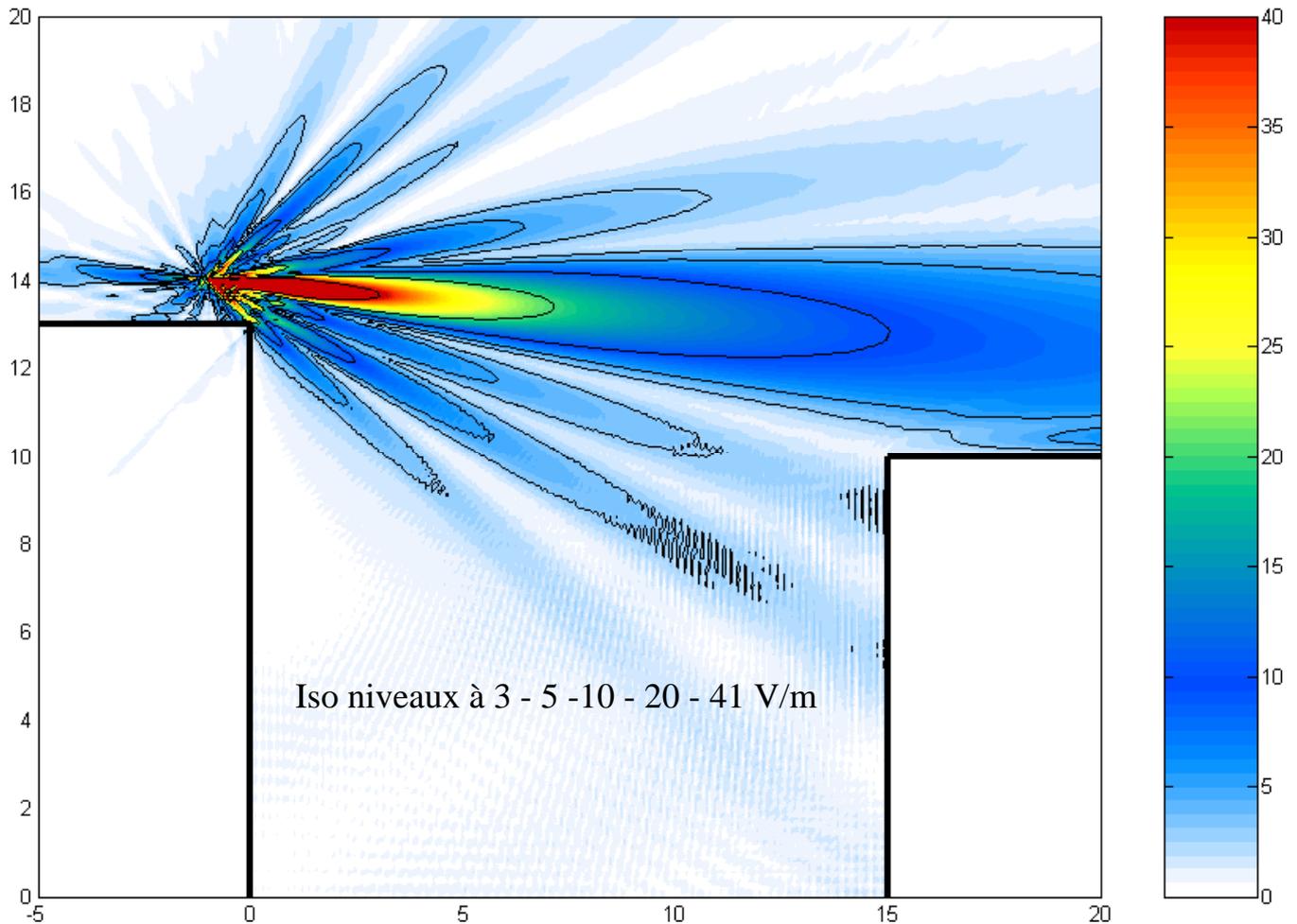


Figure B.2-2 Champs E sur antenne isolée sur toit terrasse en fonction de la position

Cette figure est à comparer avec celle présentée dans le paragraphe "Antenne macro-cellulaire sur toit-terrasse" de l'étude "Modélisation des sites radioélectriques et des niveaux de champs", version 2 du 11/12/2000 de l'ANFR [biblio E-1]. Les résultats sont globalement très voisins et se distinguent essentiellement au niveau de la zone toute proche de l'antenne d'émission. Dans notre cas en effet, il nous est impossible de tenir compte de la forme particulière de l'antenne et donc du champ proche créé autour de celle-ci. Par contre, l'utilisation d'une description plus précise de l'environnement et un traitement adapté montre un comportement plus réaliste de la distribution générale du champ en rapport avec les bâtiments présents.

### **B.3. Avec plan métallique réflecteur à $\lambda/4$**

Après avoir validé notre démarche de modélisation dans la simulation précédente, nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus avec un plan conducteur métallique de hauteur 2m situé à  $\lambda/4$  du point d'émission. A cette distance, le champ émis dans la direction arrière de l'antenne se réfléchit sur le plan métallique et se combine en phase avec le champ avant pour en maximiser l'intensité. Nous

présentons dans un premier temps les résultats en puissance obtenus avec X-Siradif. Dans un deuxième temps, nous donnerons les résultats en champ obtenus par post-traitement avec matlab selon la méthode exposée dans le paragraphe B.2.

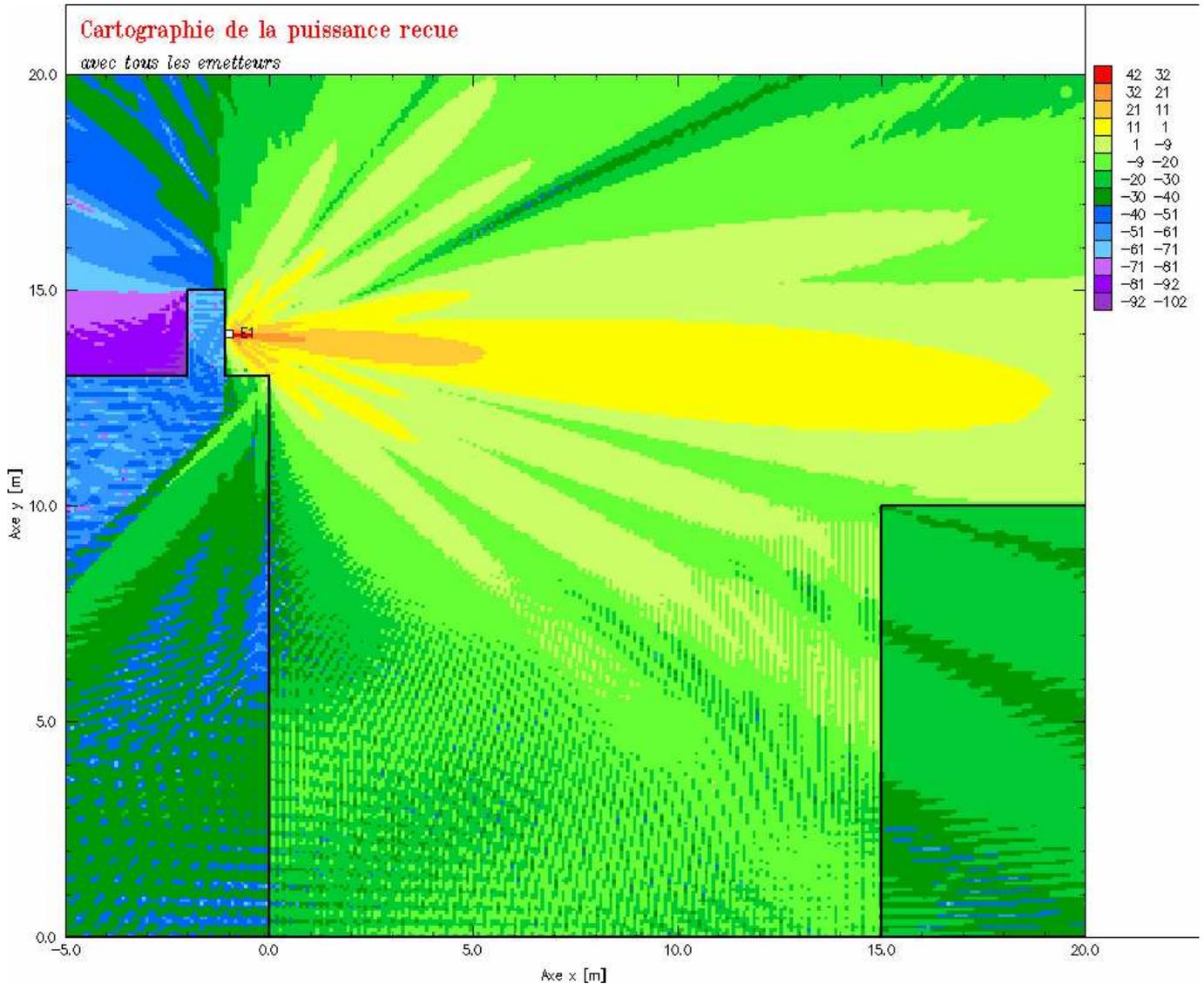


Figure B.3-1 Cartographie de la puissance reçue avec plan métallique à  $\lambda/4$

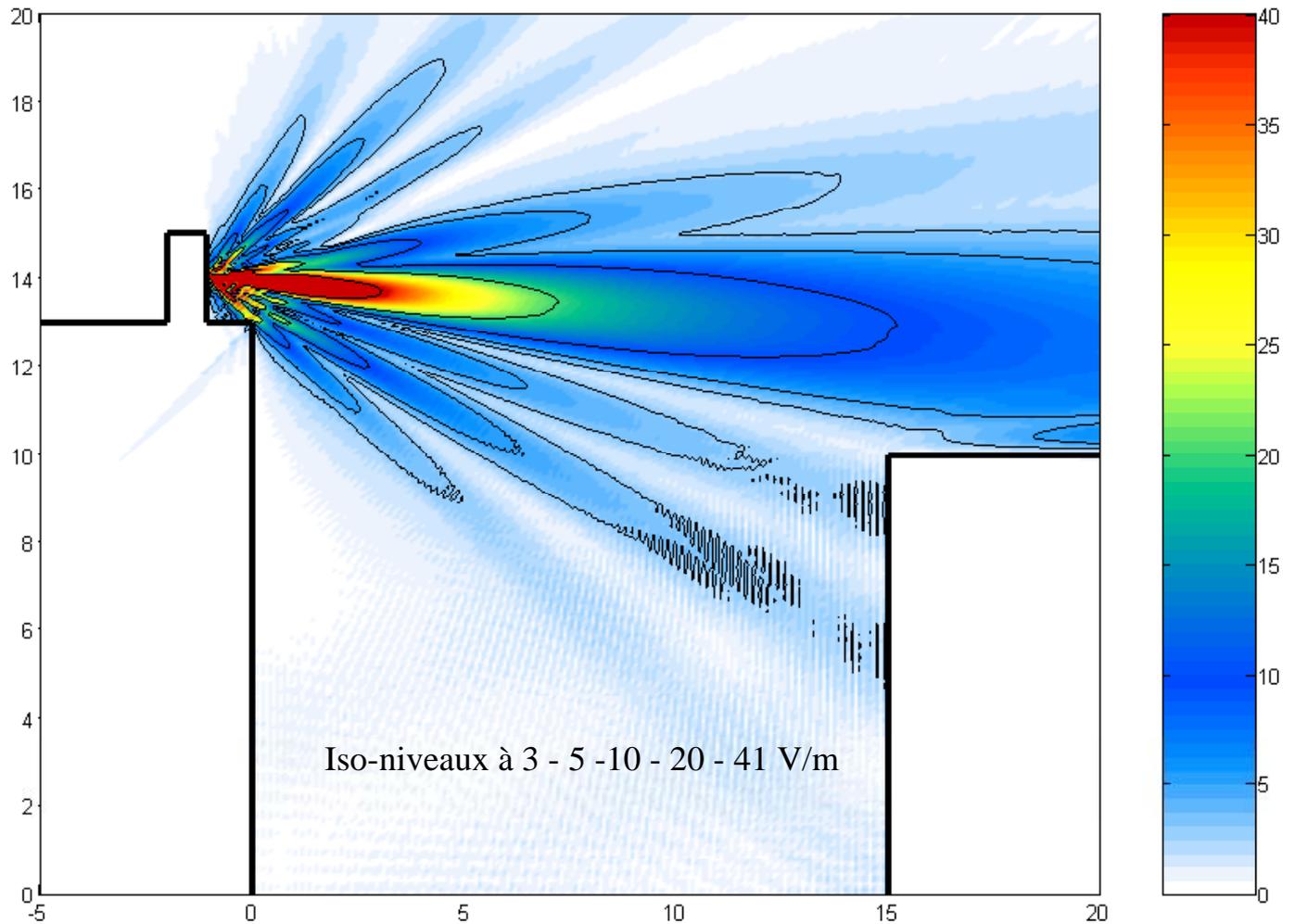


Figure B.3-2 Champs  $E$  sur antenne avec plan à  $\lambda/4$  sur toit terrasse en fonction de la position

Par rapport à l'antenne isolée, la seule modification notable concerne le rayonnement arrière qui est quasiment supprimé par le plan métallique réflecteur. La modification sur le champ avant est imperceptible en raison du peu d'énergie qui était effectivement rayonnée vers l'arrière (niveau de remontée à -20 dB du lobe principal).

## C. Etude des champs proches

### C.1. Etude à partir du modèle filaire de l'antenne

Nous avons utilisé le logiciel NEC développé à l'origine au laboratoire Lawrence Livermore pour le "Naval Ocean System Center" aux Etats-Unis, dont le code est aujourd'hui disponible dans le domaine public en version 2. Différentes sociétés proposent des versions "professionnelles" de ce code et nous avons pour notre part à notre disposition la version necwinpro 1.1.a de Nittany Software. Celle-ci offre l'avantage d'une certaine convivialité dans l'interface graphique. L'intérêt principal d'une telle approche avec NEC est qu'elle permet le traitement d'antennes en champ proche à partir d'une formulation électromagnétique rigoureuse qui tire parti de la spécificité de la propagation le long des fils. Grâce à cela, les ressources de calcul utilisées sont réduites et il est possible d'observer le champ rayonné dans des domaines relativement importants autour de l'antenne utilisée. Un post-traitement adapté permet alors de visualiser la distribution d'intensité dans les différents plans de références. Comme pour les paragraphes précédents, nous avons utilisé le logiciel matlab pour ces post-traitements.

#### C.1.1. Modélisation NEC

Nous présentons-ci dessous la figure correspondant au modèle réalisé sous NEC, à partir du dessin présenté dans [biblio E-2]. Chaque élément de grille unitaire a un côté de largeur  $\lambda/10$ . Pour information, nous avons fait apparaître dans l'annexe 1 le fichier d'entrée utilisé pour cette simulation NEC.

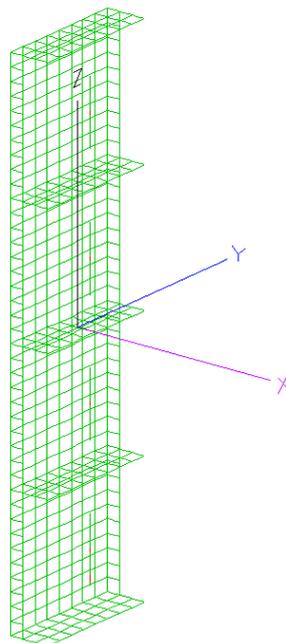


Figure C.1-1 Géométrie de l'antenne analysée

### C.1.2. Paramètres généraux

Temps de calcul : 8950.250 s (2H30)

Mémoire utilisée : 40 Mo

Taille du fichier de sortie : 57 Mo

Impédances d'entrée sur les brins extérieurs (en bas et en haut de la structure) :

$91.59 + j * 48.11 \Omega$  à 900 MHz

Impédances d'entrée sur les brins centraux (de part et d'autre de l'axe central) :

$95.24 + j * 47.46 \Omega$  à 900 MHz

Puissance de sortie :

18.411 W correspondant à une alimentation sur chaque brin de 32.935 V et à une efficacité de 100% (pas de pertes).

Les valeurs d'impédances sont relatives au diamètre du fil utilisé, à la longueur des brins rayonnant et de l'environnement autour de ces brins. Le type d'excitation utilisé nous garantit par ailleurs l'adaptation parfaite de l'antenne. La valeur de puissance rayonnée étant différente de 20W, nous devons normaliser les champs calculés. Soit V la tension d'alimentation des brins, E le champ calculé par NEC et  $E_{20}$  la valeur de champ correspondant à une puissance injectée de 20W. Le système étant linéaire, nous avons :

$$\frac{E_{20}}{E} = \frac{V_{20}}{V} = \frac{\sqrt{V_{20}^2 * (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}}{\sqrt{V^2 * (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}} = \frac{\sqrt{20}}{\sqrt{18.411}} = 1.04226$$

les valeurs  $Y_i$  correspondent aux différentes admittances d'entrée des brins rayonnant. Nec calculant des valeurs maximales de champ, la valeur efficace correspondant à une puissance injectée de 20W est donc finalement :

$$E_{20eff} = 0.737 * E \quad \text{Éq. C-1}$$

### C.1.3. Diagramme de rayonnement

Ci-dessous la définition utilisée pour les angles du diagramme de rayonnement

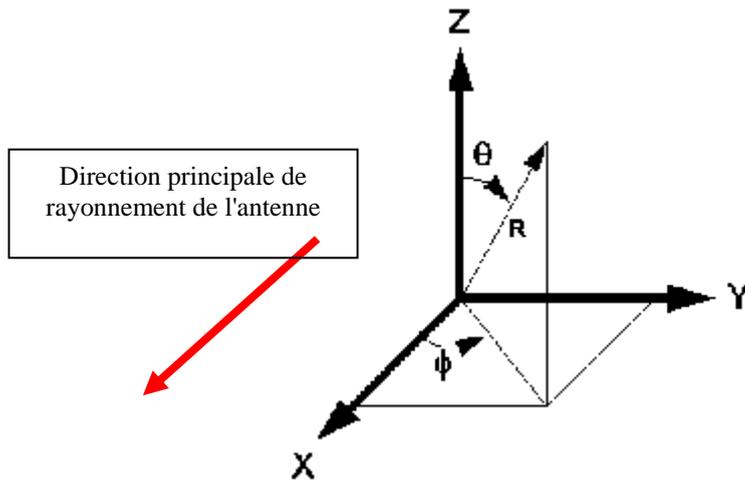


Figure C.1-2 Définition des angles pour le diagramme de rayonnement

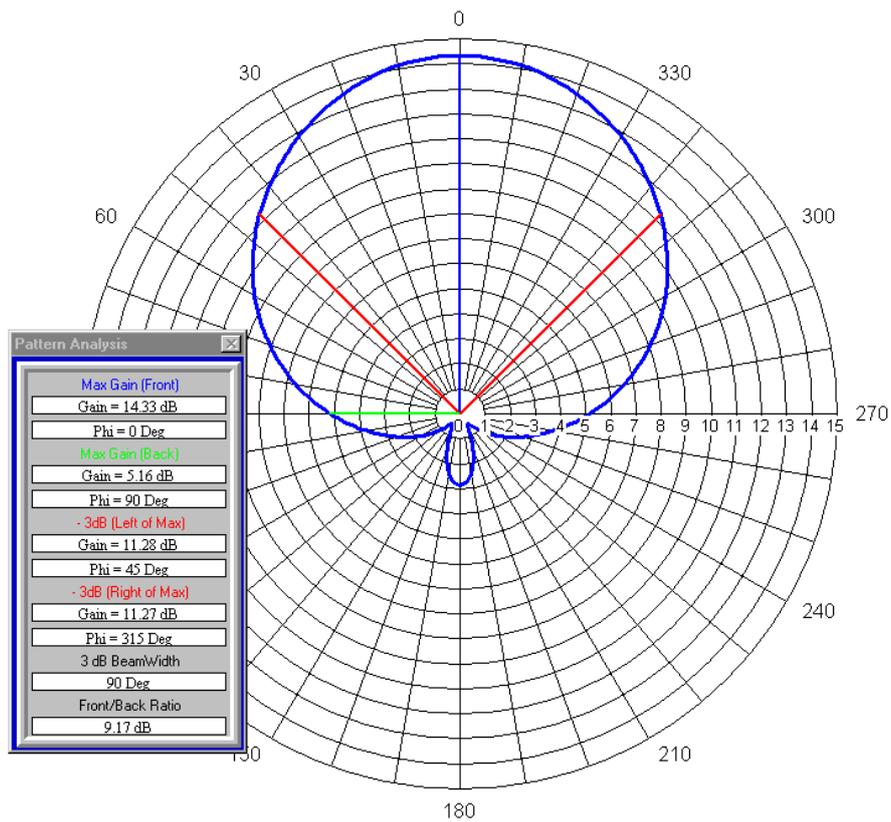


Diagramme de rayonnement dans le plan H (XY)

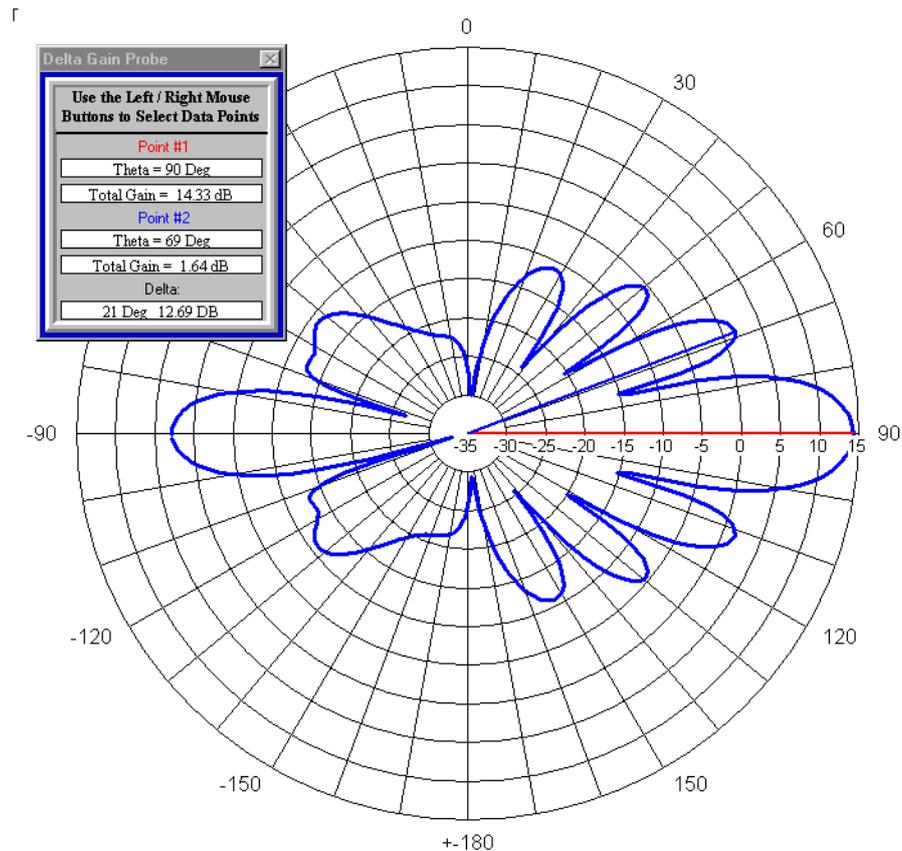


Figure C.1-3 Diagramme de rayonnement dans le plan E (X,Z)

La figure fait apparaître des angles d'ouverture à 3 dB de 90° et 10°, le gain étant par ailleurs de 14.33 dBi, la publication [biblio E-2] mentionnant 15.5 dBi. La faible différence peut s'expliquer par les choix que nous avons faits lorsque le paramétrage utilisé dans la publication nous était inconnu (diamètre des brins élémentaires).

#### C.1.4. Champs proches

Afin de faciliter la comparaison, nous avons développé une table de couleur quasiment conforme à celle utilisée dans [biblio E-2] pour la présentation des résultats. Nous y avons superposé les lignes d'iso niveaux. Nous présentons ci-dessous les résultats pour les deux plans principaux.

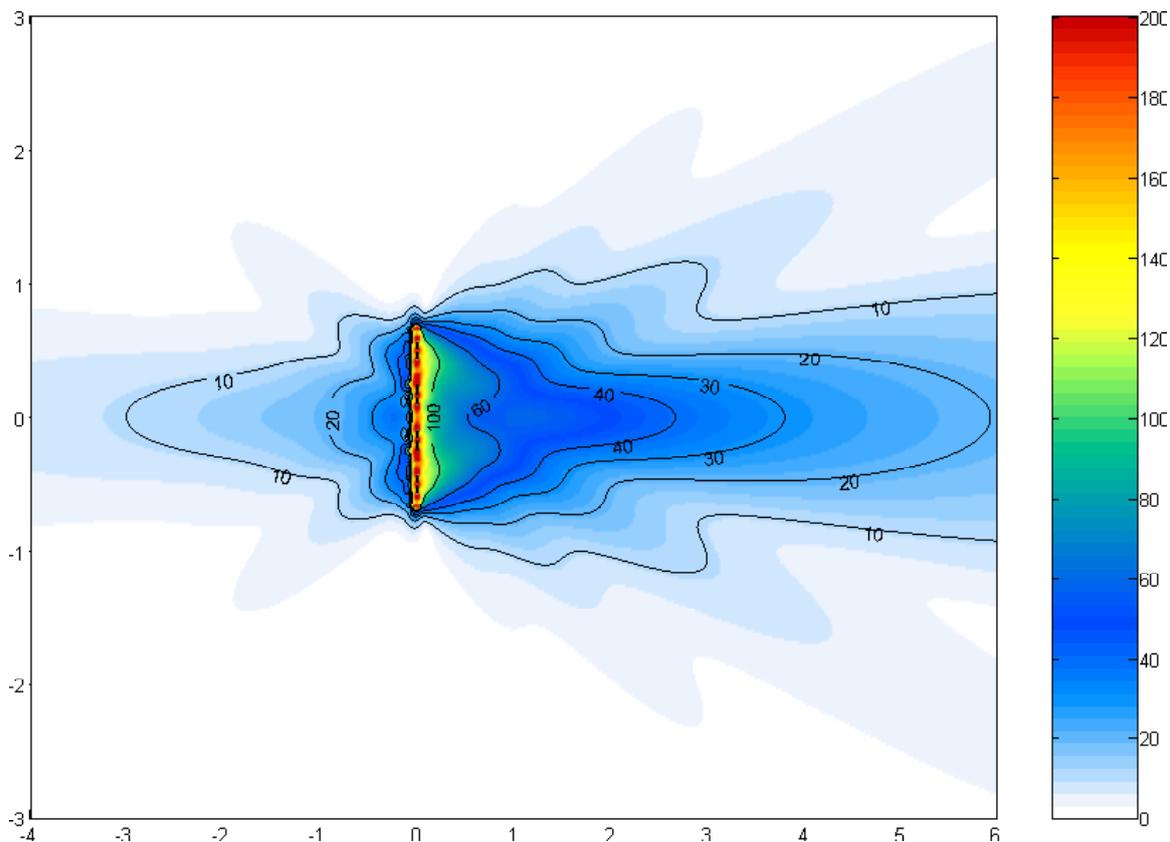


Figure C.1-4 Valeurs efficaces du champ électrique proche (V/m) dans le plan vertical  $E(X,Z)$ ,  $Pe=20W$

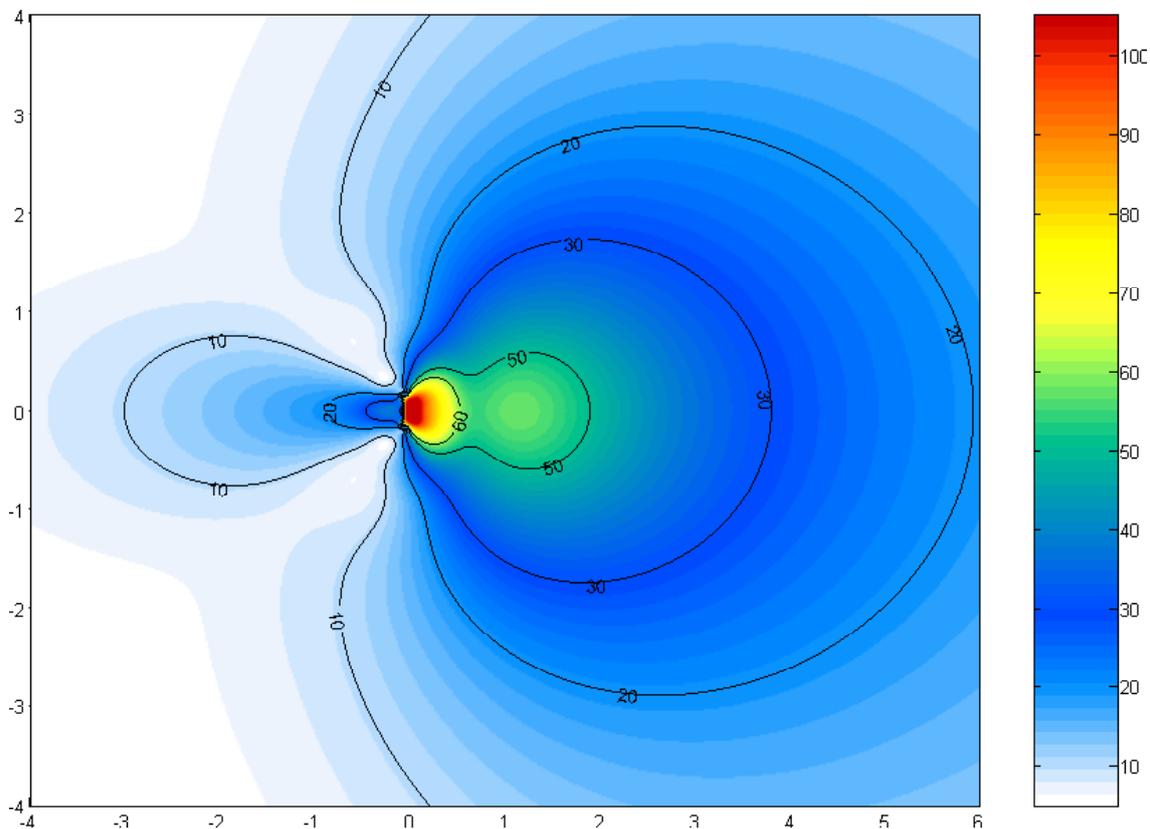


Figure C.1-5 Valeurs efficaces du champ électrique proche (V/m) dans le plan horizontal  $H(X,Y)$ ,  $Pe=20W$

Par rapport à la publication de référence [biblio E-2], l'allure générale des distributions de champ correspond parfaitement pour chacun des plans. Par contre, les valeurs d'intensité sont dans notre cas légèrement plus élevées. Comme élément de vérification, nous avons une estimation du champ à la distance 6m en face de l'antenne avec la formule  $E = \sqrt{30 \cdot PIRE} / d$ , où PIRE est la puissance isotrope rayonnée équivalente à l'émission et d la distance qui sépare l'antenne du point d'observation. Puisque  $P = 20W$  et que le gain est de 14.33 dBi (27.10 en linéaire), le champ E devrait être de 21.25 V/m à 6m. Nous lisons sur les figures précédentes que la courbe iso-niveau correspondant à 20 V/m est effectivement à la limite de cette distance 6m. Cette vérification valide donc nos résultats.

## C.2. Antenne GSM avec modèle 3D

le logiciel MWS que nous avons utilisé pour cette étude permet une approche globale et 3D de l'antenne. En contrepartie, tous les éléments de la structure doivent être précisément dimensionnés pour permettre la simulation. En particulier, nous avons du étudier les dipôles plaqués utilisés afin qu'ils rayonnent au mieux à la fréquence de 900 MHz, ceci avec la meilleure adaptation possible. Nous avons donc effectué une étude préliminaire pour dimensionner ces dipôles, en tenant compte de leur environnement et des temps de calculs induits. Pour cela, nous avons du optimiser la structure élémentaire présentée dans le paragraphe suivant. L'épaisseur de métallisation a été fixée à 0.5mm.

### C.2.1. Optimisation des paramètres du dipôle élémentaire avec son armature

Les paramètres à optimiser sont les largeur et hauteur du dipôle plaqué. La séparation entre les deux brins du dipôle permet d'introduire une source de tension discrète normalisée à  $50\Omega$  qui assure l'alimentation de l'antenne.

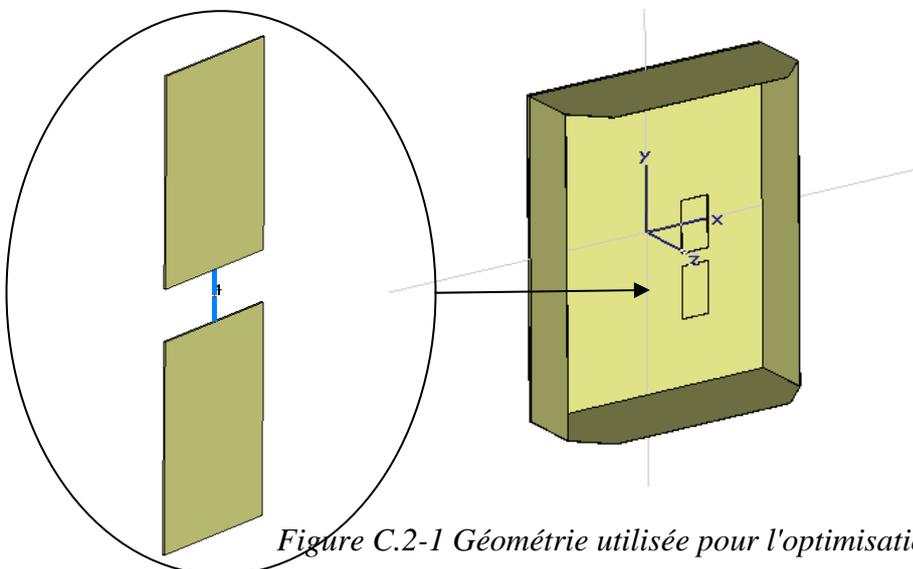
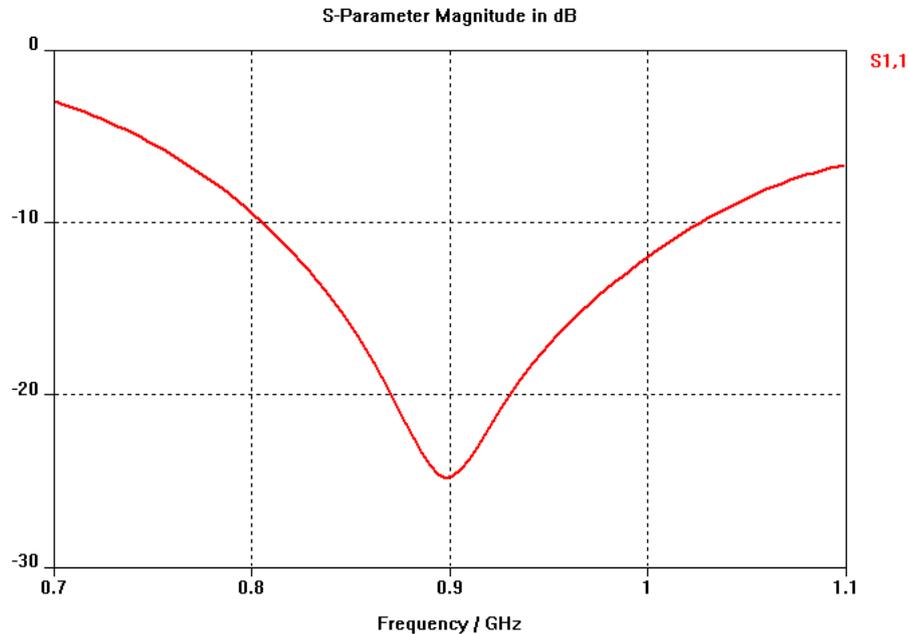


Figure C.2-1 Géométrie utilisée pour l'optimisation

les résultats d'optimisation sont présentés ci-dessous. Le temps de calcul étant d'environ deux heures sur un PC pentium III Xéon 900MHz. Le nombre d'itérations pour l'optimisation est de 31.



*Figure C.2-2 Réponse du dipôle optimisé*

La figure [Figure C.2-2] nous montre une adaptation d'environ -24 dB à 900 MHz. Ceci nous permettra d'obtenir un champ rayonné en directe proportion de la tension d'alimentation de nos sources discrètes, puisque la structure est par ailleurs sans perte et qu'une infime partie de la puissance injectée est réfléchie vers la source.

### **C.2.2. Simulation de l'antenne GSM complète**

En utilisant le dimensionnement déterminé précédemment, nous avons simulé l'antenne complète. Nous en présentons la géométrie dans la figure ci-dessous.

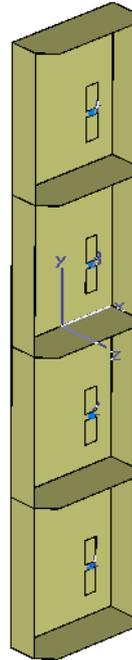


Figure C.2-3 Modélisation de l'antenne GSM sous MWS

Le maillage adopté dans cette simulation est de 15 cellules par longueur d'onde, ce qui est ici suffisant pour obtenir la convergence du simulateur. Le temps de calcul sur pentium III xéon 900 MHz est de 30 minutes environ. La réponse globale en paramètre S est présentée ci-dessous :

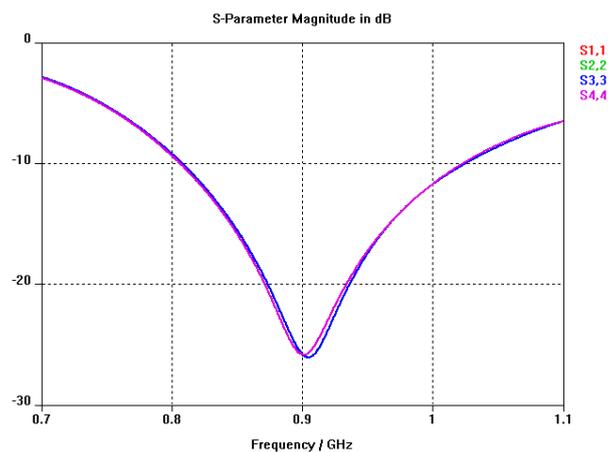


Figure C.2-4 Adaptation de l'antenne complète

Cette courbe d'adaptation valide notre démarche d'optimisation puisque nous obtenons un niveau de -25 dB à la fréquence de 900 MHz.

Diagrammes de rayonnement :

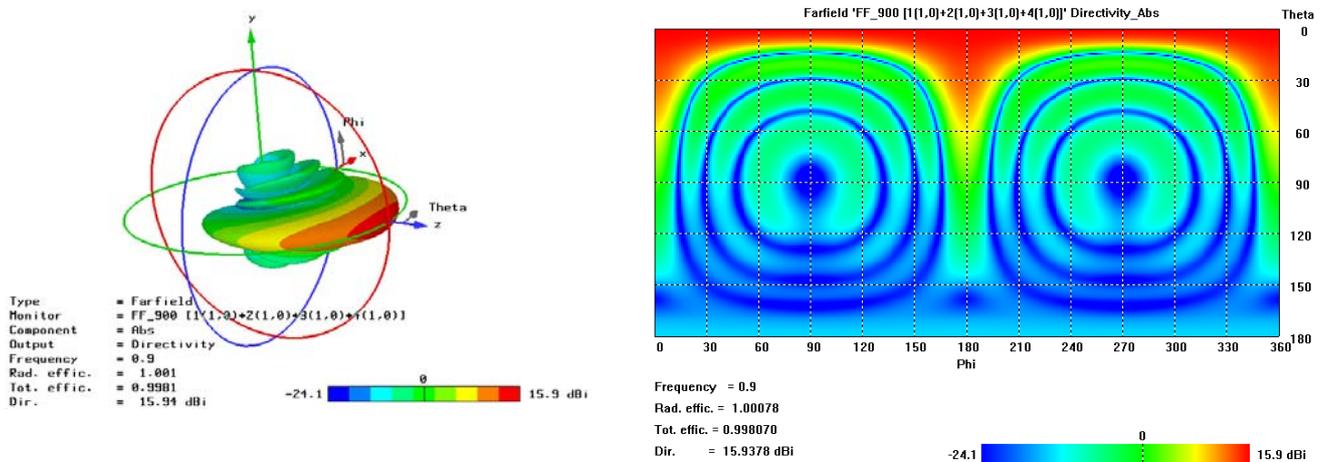


Figure C.2-5 Diagrammes de rayonnement 3D et cartésien de l'antenne GSM

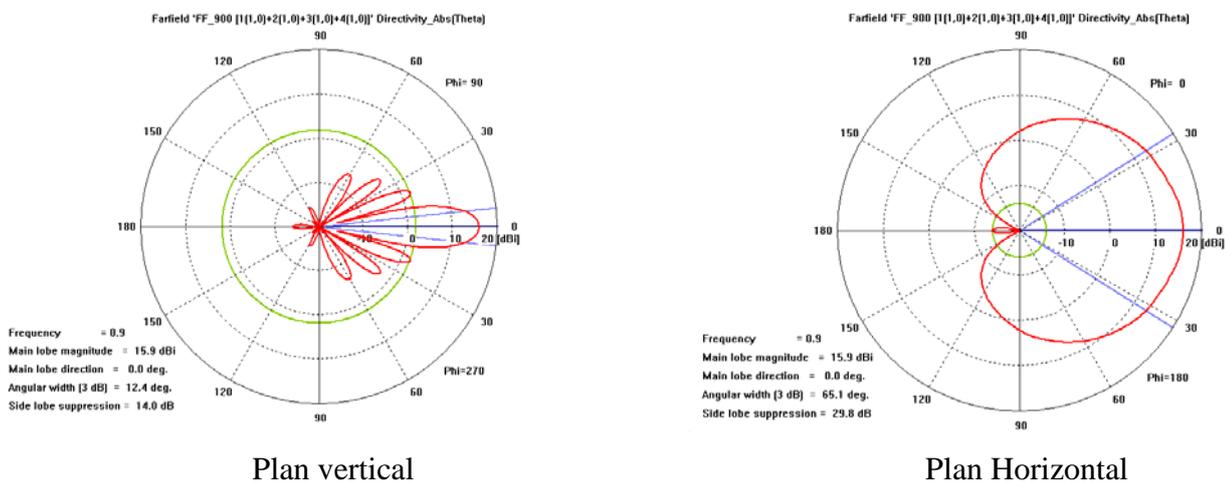


Figure C.2-6 Diagrammes polaires dans chaque plan de l'antenne GSM

Les figures font apparaître une directivité de 15.94 dBi dans la direction principale de rayonnement. Aucune optimisation particulière de la géométrie n'ayant été faite sur l'ouverture (ce n'était pas l'objet de l'étude), celle-ci est de 66° dans le plan horizontal et de 12.4° dans le plan vertical.

### Figures de champs

Le logiciel MWS permet le tracé direct des lignes de contour et des lignes iso-niveaux de champ électrique. La puissance injectée étant de 1W à chaque port par défaut, il faut prendre la précaution de normaliser la puissance injectée à chaque accès à la valeur désirée (dans notre étude 20W, soit 5W par dipôle) avant d'effectuer le tracé. Ceci est également directement possible dans MWS à partir du menu de post-traitement "Combine/Results" dont le paramètre est proportionnel à la tension d'alimentation des dipôles, donc à la racine carrée de la puissance injectée. Malheureusement un bug du logiciel empêche actuellement la saisie de facteur de normalisation scalaire et seuls les facteurs entiers sont utilisables

(nous aurions dû utiliser  $\sqrt{20W/4\text{dipôles}}=2.236$  pour chaque dipôle). Aussi nous avons effectué nos tracés avec une normalisation de la puissance injectée de 100W. Les valeurs de champs présentées dans les figures suivantes sont donc à diviser par 2.236 pour obtenir celles correspondant à une puissance injectée de 20W. Nous avons averti le support de ce petit problème et espérons avoir rapidement une solution permettant de le corriger.

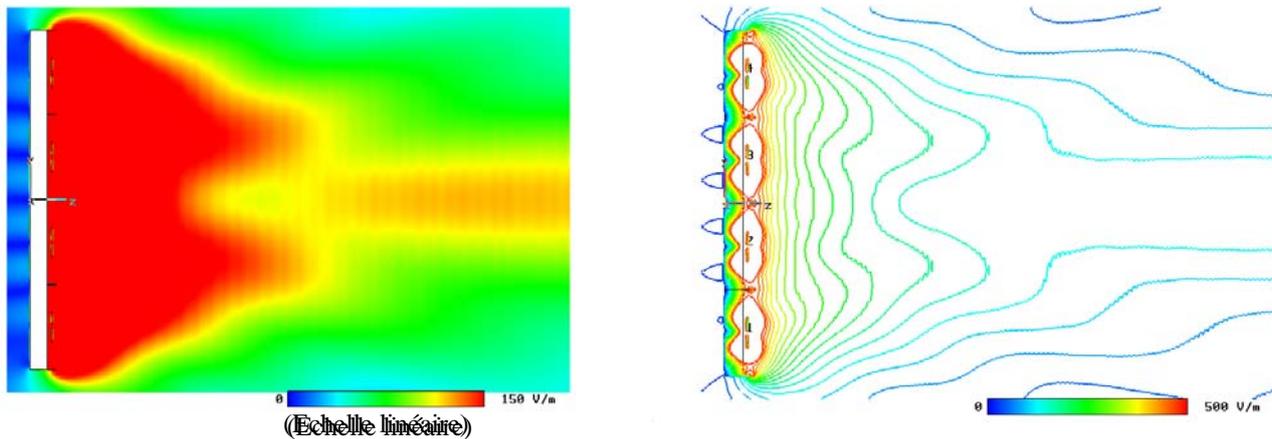


Figure C.2-7 Distribution du champ dans le plan vertical pour l'antenne GSM

Cette figure est à rapprocher de la figure [Figure C.1-4] concernant le modèle filaire. Si l'allure générale dans la distribution du champ se retrouve entre les deux figures et en dehors du petit problème de normalisation signalé plus haut, les intensités ne peuvent pas être directement comparées compte tenu du fait que même si les antennes se ressemblent géométriquement, leurs performances électriques sont tout de même assez différentes. Le volume d'analyse est également beaucoup plus limité dans cette simulation (ici dans un cube de 2.1 m X 1.5 m X 0.5 m). Cela provient de la complexité du moteur d'analyse 3D qui est plus général que celui de NEC, mais qui en contrepartie consomme plus de ressource informatique. On ne peut donc pas étudier la distribution du champ électrique sur des distances comparables à celles que NEC permet d'analyser (nous étions avec NEC à 10 m X 6 m X 8 m). On remarque sur la partie gauche du dessin les figures d'interférences liées à la diffraction sur les bords arrière de l'antenne.

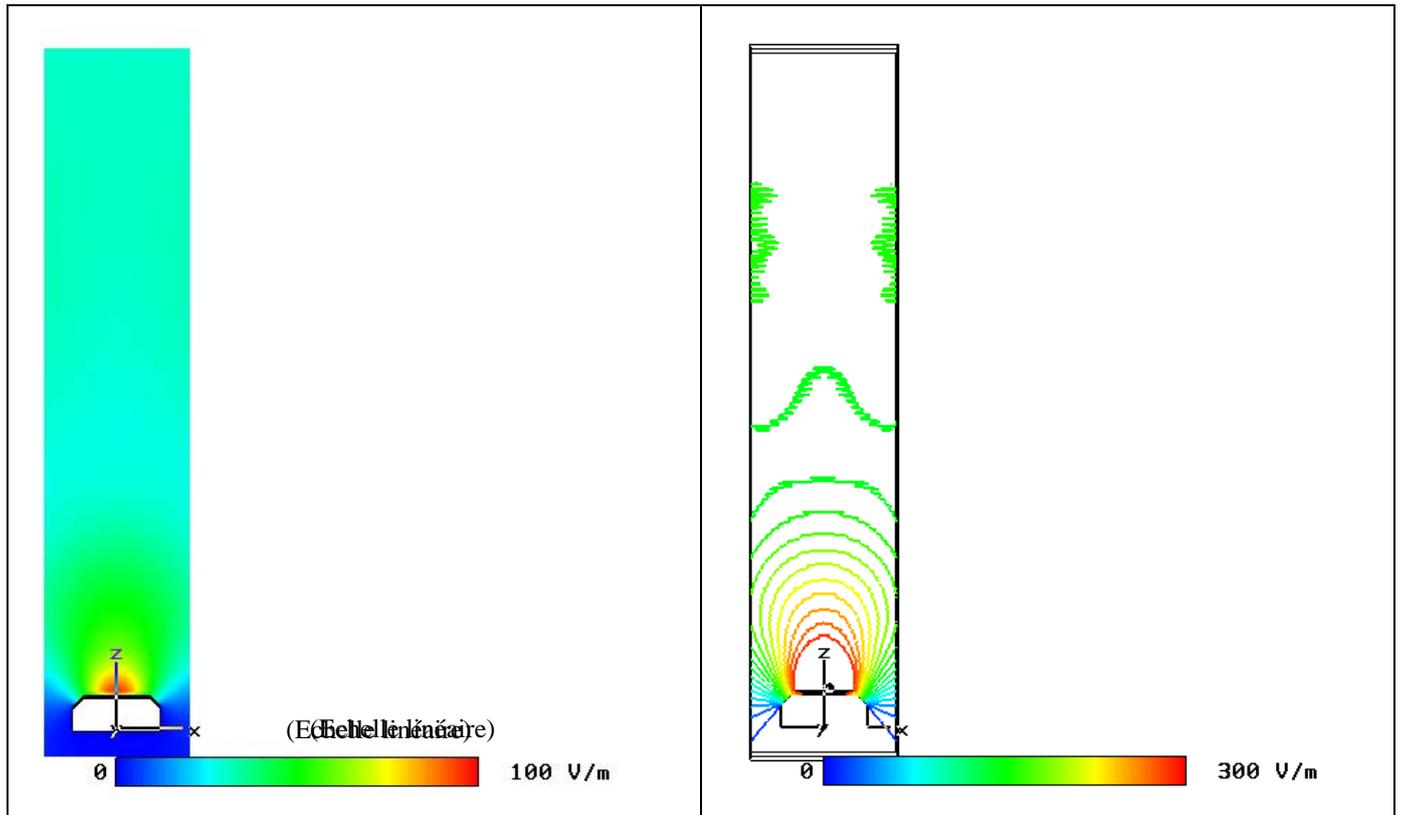


Figure C.2-8 Distribution du champ dans le plan horizontal pour l'antenne GSM

Sur la courbe iso-niveaux, on remarque en particulier l'apparition de la concentration du champ dans la direction principale de rayonnement. Les légères oscillations qui apparaissent sur certaines lignes de niveaux sont dues au procédé d'interpolation du logiciel compte tenu du maillage que nous avons effectivement adopté, elles ne représentent donc aucun phénomène physique particulier. La limitation sur l'espace de calcul apparaît par contre beaucoup plus nettement dans ce plan.

## D. Conclusion générale

L'étude concernant l'impact d'une antenne GSM sur l'environnement a permis de mettre en avant les potentialités de notre logiciel de simulation X-Siradif. Nous retenons en particulier sa capacité à intégrer le diagramme de rayonnement des antennes réelles, mais aussi la géométrie et la nature des matériaux constituant les immeubles environnants (absorption dans le béton, réflexions sur les murs, diffraction par les points anguleux ou les arêtes). Si nos résultats sont très voisins de ceux présentés dans [biblio E-1] pour les cas comparables, ces potentialités particulières contribuent tout de même à améliorer la précision de nos prédictions dans l'environnement des immeubles et au dessus du sol. Par contre, il nous est impossible d'intégrer à notre simulation la contribution d'énergie électromagnétique stockée liée à la géométrie particulière de l'antenne. Nous avons vu toutefois que cela n'affectait globalement quasiment pas les résultats pour nos cas de figure.

La simulation dans laquelle nous avons introduit un plan réflecteur à l'arrière de l'antenne pour maximiser le rayonnement avant n'a pas apporté de modifications significatives par rapport au cas initial. Cela est lié au très faible niveau de rayonnement arrière de l'antenne utilisée.

L'étude du champ proche de l'antenne GSM réalisée avec le logiciel NEC a permis de retrouver exactement l'allure des résultats présentés dans [biblio E-2], mais avec une intensité de champ légèrement supérieure dans nos simulations. Nous avons justifié nos résultats. Malheureusement la méthode particulière utilisée pour cette antenne ne peut pas être utilisée dans le cas général des antennes disponibles sur le marché. Aussi nous avons démontré dans notre deuxième simulation en champ proche que nous disposions d'un logiciel (MWS, Microwave Studio) beaucoup plus général que NEC qui nous permettait non seulement de ne plus nous limiter à une modélisation filaire de l'antenne, mais également d'intégrer des matériaux diélectriques de formes quelconques (par exemple les substrats des antennes planaires). La généralité du code de calcul sous jacent étant plus complexe, le logiciel est aussi plus gourmand en ressources informatiques que NEC et la dimension des zones analysables autour de l'antenne est de ce fait plus limitée. Nous avons dû à l'occasion de cette dernière simulation procéder à une petite étape de synthèse préalable. Nous avons également rencontré un petit "bug" logiciel concernant la normalisation de puissance injectée dans MWS pour lequel nous avons averti le service support du constructeur et qui devrait être rapidement résolu.

## E. Références bibliographiques

- [biblio E-1] Rapport interne ANFR "Modélisation des sites Radioélectriques et des niveaux de champs", décembre 2000
- [biblio E-2] "Zwi ALTMAN, Joe WIART, "Efficient Models for Base Station Antennas for Dosimetric Analysis"

## F. Annexes

### F.1. Fichier de simulation NEC

```
1. CM Antenne GSM 4 dipoles avec plan réflecteur
2. CM Juillet/aout 2001
3. CM ENST Bretagne - dpt Microondes - FLP
4. CE
5. GW 1,19, 0,0,-.5833, 0,0,-.41667, .0005
6. GM 1 3 0 0 0 0 0.33333 1.1
7. GW 5,50, -.0833333,-.1666667,-.6666667, -.0833333,-.1666667,0.6666667, 0.0005
8. GM 1 8 0 0 0 0 0.0416667 0 5.5
9. GW 14,11, -.0833333,-.1666667,-.6666667, -.0833333,.1666667,-.6666667, 0.0005
10. GM 1 40 0 0 0 0 0.0333333 14.14
11. GW 55,11, -.05,-.1666667,-.6666667, -.05,.1666667,-.6666667, 0.0005
12. GM 1 2 0 0 0 0.03333333 0 0 55.55
13. GM 1 4 0 0 0 0 0.3333333 55.57
14. GW 70,3, -.0833333,-.1666667,-.6666667, -.05,-.1666667,-.6666667, 0.0005
15. GM 1 2 0 0 0 0.0333333 0 0 70.70
16. GM 1 8 0 0 0 0.0416667 0 70.72
17. GM 1 4 0 0 0 0 0.3333333 70.96
18. GW 100,3, -.0833333,-.1666667,-.633333, -.05,-.1666667,-.633333, 0.0005
19. GM 1 8 0 0 0 0 0.0333333 100.100
20. GM 1 3 0 0 0 0 0.3333333 100.108
21. GM 1 1 0 0 0 0 .3333333 0 100.132
22. GW 200,3, -.05,-.1666667,-.6666667, -.05,-.1666667,-.6333333, .0005
23. GM 1 39 0 0 0 0 0.0333333 200.200
24. GM 1 1 0 0 0 0 .3333333 0 200.239
25. GS 0 0 1
26. GE 0
27. EX 0 1 10 00 32.93500 0.00000
28. EX 0 2 10 00 32.93500 0.00000
29. EX 0 3 10 00 32.93500 0.00000
30. EX 0 4 10 00 32.93500 0.00000
31. FR 0 1 0 0 900 1
32. RP 0 1 360 1000 90 0 0 1
33. RP 0 360 1 1000 -90 0 1 1
34. NE 0 501 501 1 -4 -4 0 0.02 0.02 0
35. NE 0 501 1 501 -4 0 -4 0.02 0 0.02
36. EN
```