

MAITRISE DE L'ENVIRONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE DES POSTES DE DISTRIBUTION

Louis QUINCHON Loïc POPIEL
EDF - Direction des Etudes et Recherches
Laboratoires de Génie Electrique
Les Renardières
F - 77 818 MORET SUR LOING Cedex

Résumé

Au voisinage des postes de distribution d'électricité (HTB/HTA et HTA/BT), les niveaux de champ magnétique rencontrés, quoique faibles, sont susceptibles de perturber les écrans d'ordinateur. La connaissance de l'environnement magnétique de ces installations, les outils de modélisation et le développement de solutions « clef en main » permettent, au cas par cas, de définir la meilleure solution technique aux problèmes de voisinage des postes et d'en optimiser le coût.

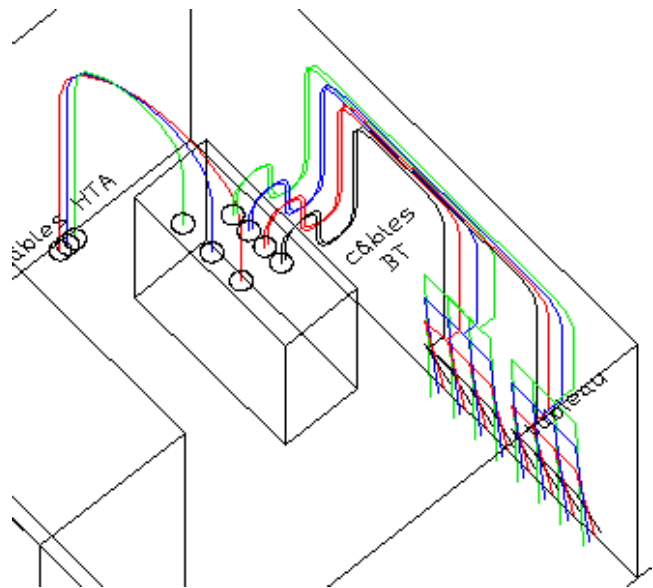
1. INTRODUCTION

Le champ magnétique à fréquence industrielle (50 Hz) est émis par tout appareil ou installation produisant, transportant ou consommant de l'électricité. Au voisinage des installations de distribution d'électricité, les niveaux de champ magnétique rencontrés, quoique faibles, sont susceptibles de perturber les écrans d'ordinateur. L'ordinateur lui-même n'est pas affecté, mais la perturbation se traduit par des oscillations de l'image, qui peuvent dégrader considérablement le confort d'utilisation pour l'opérateur.

Les normes génériques européennes de compatibilité électromagnétique définissent des niveaux d'émission et d'immunité des appareils, ce qui doit permettre une bonne cohabitation des appareils entre eux et avec leur environnement. Concernant le champ magnétique 50 Hz, les normes génériques ne fixent pas de niveau maximal d'émission. En revanche, un niveau normatif d'immunité est donné pour les écrans à 1 A/m; cette valeur est normative pour l'environnement industriel mais n'est qu'informatrice pour l'environnement résidentiel, commercial et industrie légère. Le niveau réel de susceptibilité des écrans d'ordinateurs varie entre 0,3 A/m et quelques A/m. D'un point de vue normatif, le poste comme l'écran sont conformes à leur norme respective mais leur cohabitation conduit très souvent à des perturbations d'images.

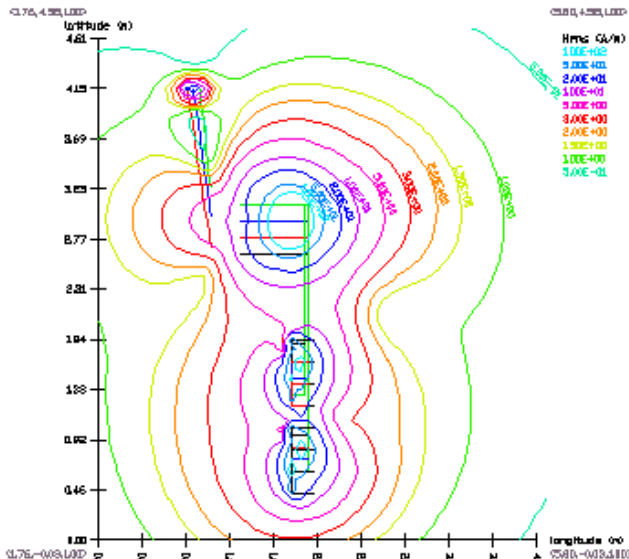
2. ENVIRONNEMENT DES POSTES

Des mesures et des calculs sur des postes HTA/BT ou HTB/HTA, permettent d'évaluer la contribution des différents éléments du poste à l'émission de champ magnétique, ainsi que le niveau global que l'on peut s'attendre à trouver dans l'environnement d'un poste. Les résultats obtenus permettent d'évaluer si, dans un cas de perturbation, c'est bien le poste qui est la source de champ magnétique (ce n'est le cas que dans un rayon de quelques mètres autour du poste), et sur quels éléments du poste on va pouvoir agir pour réduire le niveau de champ magnétique au niveau de l'écran. Le transformateur est dans la plupart des cas une source de champ relativement négligeable par rapport aux câbles et aux jeux de barres.



Modélisation 3D des câbles et du tableau d'un poste HTA/BT

Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel ANAPOST, logiciel 3D de calcul du champ magnétique émis par les postes et les lignes. Il permet de décrire l'ensemble des conducteurs du poste, et ainsi de prédire le niveau de champ à un endroit donné. Lors de l'étude de modifications des éléments du poste ou de réaménagement des câbles, il permet par un calcul rapide d'évaluer l'influence d'un changement de géométrie sur les niveaux de champ magnétique rayonné.



Cartographie du champ magnétique à 1m au dessus du sol

Comme l'illustre la cartographie précédente, le champ magnétique 50Hz décroît rapidement avec la distance. Le champ émis par les postes HTA/BT du réseau EDF est généralement inférieur à 1A/m au delà de quelques mètres de distance au poste, pour une charge moyenne du poste.

3. REDUCTION DES PERTURBATIONS

La solution de l'éloignement, lorsqu'elle est possible, est la plus efficace et la moins coûteuse. Si elle ne peut pas être mise en œuvre pour des raisons de place ou si elle est insuffisante, d'autres dispositions peuvent être prises.

3.1 Réarrangement de la source

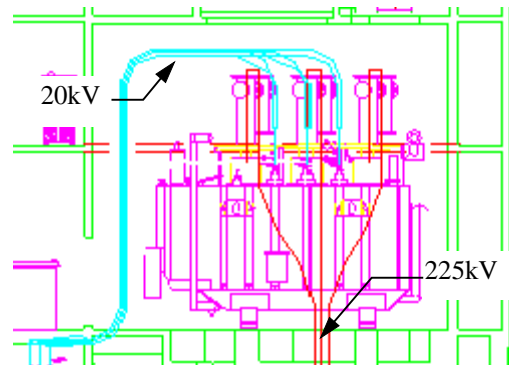
Si des modifications doivent être effectuées dans un poste, c'est sur les liaisons du secondaire du transformateur que l'on doit généralement agir en priorité : le déplacement ou le réaménagement des câbles est souvent relativement aisé, et donne des résultats tout à fait satisfaisants.

A titre d'exemple, le logiciel ANAPOST a été utilisé pour optimiser l'environnement électromagnétique 50Hz d'un poste HTB/HTA en construction. L'utilisation de cet outil a permis :

- d'évaluer le champ magnétique à 50 Hz au voisinage du poste,
- de mettre en évidence les sources de champ magnétique les plus contraignantes (tronçons de conducteurs essentiellement),
- de comparer différentes configurations géométriques des conducteurs, pour retenir la moins contraignante.

Dans un premier temps, le poste a été modélisé selon les règles habituelles de conception, qui ne prenaient pas en compte particulièrement la réduction du champ magnétique

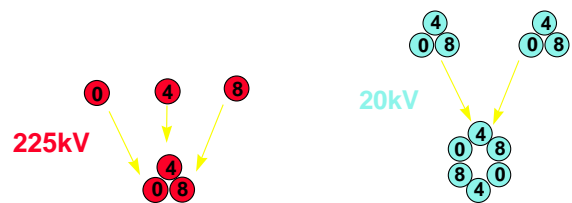
dans son voisinage. Les calculs effectués sur cette configuration ont montré que le champ magnétique à 50 Hz au voisinage du poste atteignait quelques A/m. De plus, nous avons pu mettre en évidence que la remontée des câbles 225kV vers la cellule transformateur, ainsi que le tronçon de câbles 20kV entre le transformateur et le disjoncteur, étaient les sources prépondérantes.



Vue de côté du transformateur HTB/HTA

Afin de réduire au maximum le champ magnétique à proximité du poste, nous avons testé, avec le logiciel ANAPOST, d'autres dispositions pour ces deux tronçons de câbles, en les comparant à la configuration initiale. Les principales modifications apportées sont :

- le regroupement en trèfle des câbles 225 kV remontant vers le transformateur,
- le regroupement en symétrie hexagonale de phase des câbles 20 kV à la sortie du transformateur,
- un cheminement différent des câbles 20 kV entre le transformateur et le disjoncteur.



Réarrangement des profils de câbles

La configuration retenue a permis de mettre en évidence une disposition des câbles 225 kV et 20 kV permettant de réduire le champ magnétique 50Hz, au voisinage du poste, d'un facteur compris entre 2 et 3.

3.2 Blindage : le principe

Lorsque le poste n'autorise pas de réarrangement de ses équipements, il existe une autre solution qui consiste à protéger les écrans d'ordinateurs par des écrans électromagnétiques ou blindages. Parmi ces solutions on distinguera :

- Le cas des blindages disposés autour des sources de perturbation. Pour être efficace le blindage doit entourer

la source le plus possible, ce qui peut conduire à des structures de grandes dimensions avec un coût de réalisation important.

- Le cas des blindages entourant l'élément sensible des écrans d'ordinateur, le canon à électron. Dans ce cas le blindage est de petite dimension, mais cette solution peut être pénalisante d'un point de vue esthétique ou lorsque le nombre d'ordinateurs à protéger est important (salle informatique).

Dans les deux solutions précédentes, le principe de réduction du champ magnétique est le même : il s'agit de réduire le couplage entre la source de perturbation et la cible (écran d'ordinateur). Pour quantifier l'impact d'un blindage sur le couplage, on définit un l'efficacité S par :

$$S = \frac{\text{Induction_sans_blindage}}{\text{Induction_avec_blindage}}$$

L'efficacité varie en fonction des matériaux utilisés. On distinguera ainsi :

- les blindages atténuateurs constitués de matériaux conducteurs et non perméables;
- les blindages déflecteurs constitués de matériaux perméables et conducteurs.

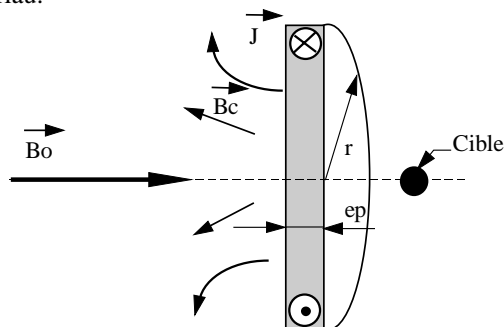
Les blindages atténuateurs

Ils sont constitués pour la plupart d'aluminium et plus rarement de cuivre, ce dernier étant plus cher pour une efficacité proche. Le principe de ces blindages est basé sur la loi de Lenz et la loi d'Ohm. Le champ magnétique basse fréquence induit dans le blindage conducteur des courants de Foucault, qui s'opposent au champ source B_o en créant un contre champ B_c .

La répartition des courants induits est différente suivant l'orientation du champ source. Pour un champ magnétique dirigé suivant la normale d'une plaque d'aluminium de rayon r et d'épaisseur ep , l'efficacité du blindage est proportionnelle à la densité de courant J induite [2].

$$|J| = \frac{2\pi f \sigma B_o r}{2}$$

avec f la fréquence de B_o (50Hz) et σ la conductivité du matériau.

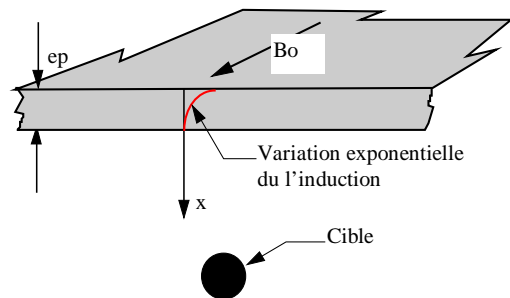


Induction normale à un blindage atténuateur

La densité de courant est plus importante en périphérie de la plaque, aussi le contre champ B_c qui s'oppose au champ source B_o n'est pas uniforme.

Propriété n°1 : En champ normal, l'efficacité S d'une plaque conductrice est proportionnelle à son épaisseur, son rayon et sa conductivité. Par contre S décroît avec le carré de la distance séparant la cible de la plaque.

Si le champ magnétique est tangent à une plaque conductrice, l'efficacité du blindage dépend de l'épaisseur de peau δ mais aussi des dimensions de la plaque (contournement de la plaque).



Induction tangentielle à un blindage atténuateur

Avec l'hypothèse d'une plaque semi-infinie (plaque finie suivant ep), le module du champ magnétique suivant l'épaisseur de la plaque peut s'écrire :

$$B = B_o \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \text{ avec } \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

avec μ la perméabilité du matériau et B_o l'induction sans blindage. A partir de cette équation, on peut tirer la deuxième propriété des blindages atténuateurs.

Propriété n°2 : En champ tangent, un blindage atténuateur est d'autant plus efficace que l'épaisseur de peau δ est faible devant l'épaisseur ep . Pour l'aluminium l'épaisseur de peau est environ de 1 mm.

Les blindages déflecteurs

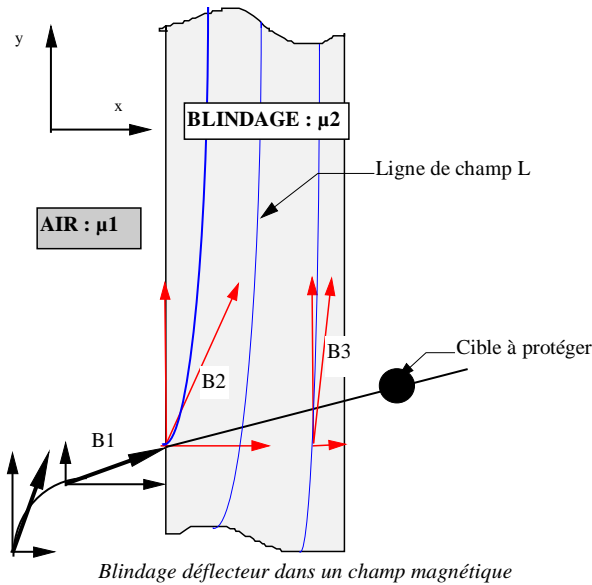
Les blindages déflecteurs sont constitués de matériaux à haute perméabilité. Leur principe consiste à canaliser le champ magnétique basse fréquence dans la direction de « facile aimantation », i.e. dans la direction de forte perméabilité.

Les matériaux couramment utilisés aujourd'hui pour les blindages déflecteurs sont le Fer Nickel (FeNi) et le Fer Silicium (FeSi). Le FeNi possède une perméabilité relative isotrope importante ($\mu \approx 100000$) tant qu'il n'est pas saturé. Son pouvoir de canalisation est plus important que le FeSi à faible champ, mais il reste cher et difficile à travailler : ses propriétés magnétiques se dégradent pour toute action mécanique.

Le FeSi sature moins vite que le FeNi mais il a une perméabilité relative plus faible ($\mu \approx 20000$). Par ailleurs, ses propriétés magnétiques sont anisotropes, autrement dit il n'agira pas de la même façon sur les trois composantes

du champ perturbateur. Il est cependant moins onéreux que le FeNi car largement utilisé en électrotechnique (moteurs et transformateurs).

Pour synthétiser les paramètres qui régissent le principe des blindages défecteurs, prenons le cas d'une plaque semi-infinie, baignant dans un champ magnétique d'incidence quelconque.



On suppose qu'aucun courant ne circule dans le blindage (conductivité nulle). Avec ces hypothèses, le blindage peut être étudié en statique et les conditions de passage des champs aux interfaces peuvent s'écrire :

- Continuité de la composante normale de l'induction
 $B1_x = B2_x$

- Discontinuité de la composante tangentielle
 $B1_y = \frac{\mu_1}{\mu_2} * B2_y$ avec $\mu_1 \ll \mu_2$

A partir de ces lois de passage, nous pouvons établir les deux premières propriétés des blindages défecteurs :

- *Propriété n°1* : En amont l'induction normale (B_x) sera renforcée et la composante tangentielle sera atténuée.
- *Propriété n°2* : Au franchissement de l'interface air/blindage, l'induction est réorientée parallèlement à la surface du blindage. Au franchissement de l'interface blindage/air, l'induction est réorientée perpendiculairement à la surface du blindage.

Remarque : un champ normal ($B=B_x, B_y=B_z=0$) est un cas particulier puisque celui-ci traversera sans aucune difficulté le blindage (hypothèse conductivité nulle).

Pour un champ source non homogène, les lignes de champ à l'intérieur du blindage ne sont pas des droites parallèles. On montre alors [3] que le champ est plus grand côté concave que côté convexe d'une ligne d'induction L. Cette propriété se traduit par une réorientation du champ parallèlement aux surfaces du blindage.

- *Propriété n°3* : Suivant l'épaisseur du blindage, la composante normale (B_x) sera fortement atténuée, tandis que la composante tangentielle (B_y) restera sensiblement constante.

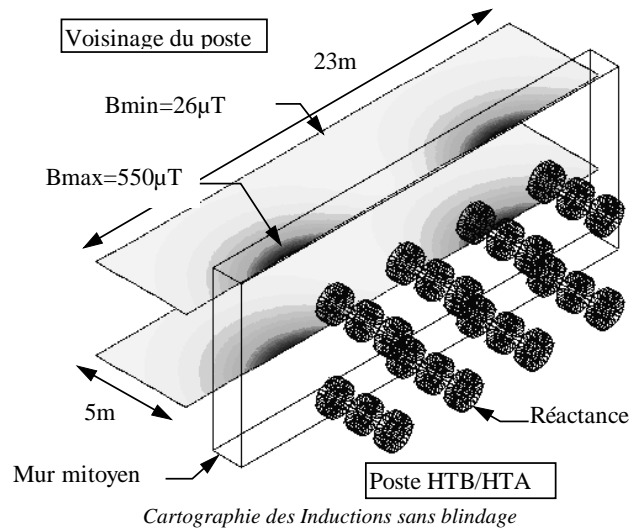
En conclusion, une plaque de blindage du type défecteur oriente le champ magnétique incident parallèlement à la plaque. La composante normale de l'induction en aval du blindage (côté cible) est atténuée, tandis que la composante tangentielle reste sensiblement constante, mais est canalisée suivant le profil de la plaque.

Remarque : Les matériaux ferromagnétiques utilisés pour les blindages ont une conductivité non nulle et une forte perméabilité. De ce fait, ils cumulent les propriétés des blindages défecteurs et atténuateurs, avec cependant un comportement prédominant des défecteurs.

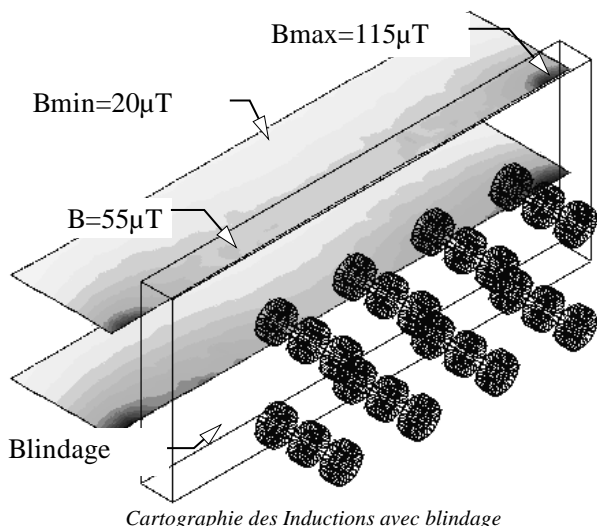
3.3 Exemple d'application d'un blindage à la source

Pour illustrer l'impact d'un blindage sur le champ magnétique 50Hz, nous avons modélisé un poste HTB/HTA avec Flux3D, logiciel de calcul des champs électromagnétiques par éléments finis [4].

Le poste est constitué de 8 départs 20kV avec une réactance de limitation des courants de court-circuit par phase. Ces réactances sont bobinées dans l'air et émettent un champ magnétique important dans leur environnement. La figure suivante présente une cartographie des champs générés par les réactances sans blindage.



Un blindage défecteur a été posé sur le mur mitoyen. Celui-ci est constitué de quatre couches croisées de FerSilicium anisotrope, de 0.35mm chacune, afin d'obtenir un blindage isotrope. Pour modéliser les courants de Foucault dans le blindage, nous avons utilisé la formulation coque développée par [4].



Le blindage en Fer Silicium a permis de réduire dans le meilleur des cas d'un facteur 10 l'induction. On a cependant renforcé le champ sur les bords ($B=115\mu\text{T}$) et à 5m du blindage le niveau est resté pratiquement identique. Cet exemple montre les limites des blindages :

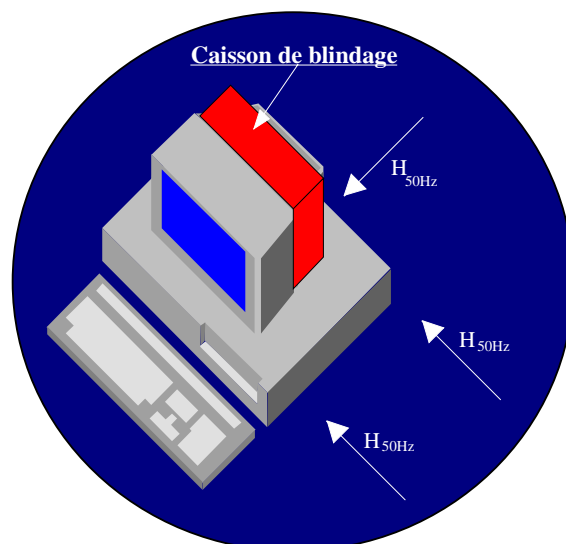
- pour diminuer l'induction à 5m (due principalement au contournement), il conviendrait d'augmenter la longueur des plaques, avec cependant une limite sur les aspects thermique et coût,
- pour diminuer l'induction près du blindage, où le champ en amont est perpendiculaire aux plaques, il conviendrait d'associer au FeSi un *blindage atténuateur* (propriété $n^{\circ}1$).

3.4 Blindage sur la cible

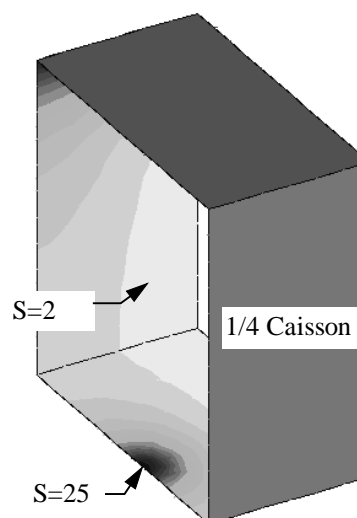
Lorsque le nombre d'ordinateurs n'est pas trop important et lorsque l'esthétique n'est pas un point de blocage dans le cahier des charges de la protection, on peut placer un blindage autour de l'écran.

La technique la plus efficace consiste à recouvrir les 5 faces de l'écran avec un blindage déflecteur, mais cette solution a un coût élevé en raison des qualités du matériau (le plus souvent du FerNickel) et des difficultés de conception (recuit des blindages après pliage des tôles). De plus, les caissons de blindages commercialisés à ce jour sont encombrants, onéreux et surdimensionnés par rapport aux champs magnétiques couramment mesurés dans les postes HTA/BT.

Nous avons alors développé un caisson de blindage mieux adapté à l'environnement électromagnétique des postes HTA/BT, plus esthétique pour l'utilisateur et moins onéreux, de par la quantité de matériau utilisé et de par la simplicité de conception. Les caissons sont en FerNickel et s'ajustent sur la partie arrière de l'écran d'ordinateur : l'orientation de l'écran reste alors libre pour l'utilisateur.



Les modélisations 3D ont permis de choisir le matériau et d'optimiser la géométrie du caisson, notamment l'épaisseur. La cartographie suivante montre que l'efficacité du *minicaisson* n'est pas homogène. Toutefois son domaine d'application est suffisant pour les situations classiquement rencontrées à proximité des postes, i.e. $B < 3\mu\text{T}$.



Cartographie 3D de l'efficacité d'un mini caisson

4. CONCLUSION

Il existe donc une gamme variée de solutions de réduction des perturbations d'écrans d'ordinateurs engendrées par le champ magnétique 50Hz : jouer sur la configuration de la source, jouer sur le couplage ou bien enfin blinder le récepteur. Il convient de bien cibler le maillon faible de la chaîne de couplage électromagnétique, qui sera tantôt une source trop importante, tantôt un écran d'ordinateur à l'immunité insuffisante.

5. REFERENCES

- [1] L. Quinchon, N. Recrosio, F. Morillon, Ph. Adam, H. Lisik, "Calcul du champ électromagnétique émis par un poste THT", CIGRE 1994, 23/13-13
- [2] E. Boridy, " Electromagnétisme. Théorie et Applications ", Presses de l'Université du Québec, 1992.
- [3] PUSTERLE Ch. "Analyse Vectorielle des champs - méthode pour la physique ", Masson, 1991
- [4] J.L. Coulomb, "Finite Element 3 dimensional Magnetic Fields Computation", IEEE Transaction On Magnetics Vol 17, No.6, November 1981
- [5] C. Guerin, G. Tanneau, G. Meunier, "A shell element for computing 3D eddy currents application to transformers", IEEE Transaction On Magnetics Vol 29, No.2, March 1993