

MODELISATION DE L'IMPACT ACOUSTIQUE
DES POSTES DE TRANSFORMATION

Jean-Gabriel MIGNERON Ing. Ph.D.

Chercheur au Centre de recherches en aménagement
et en développement et responsable du laboratoire
d'acoustique de l'Ecole d'architecture
Université Laval, Québec, G1K 7P4

SOMMAIRE

Les recherches présentées ici se poursuivent depuis 1980, initialement subventionnées par l'Hydro-Québec, elles sont actuellement soutenues par le ministère Fédéral de l'Energie, des Mines et des Ressources. Le projet original comprenait deux volets principaux: soit le développement d'un modèle mathématique pour simuler la propagation du bruit autour des postes de transformation et la mise au point en laboratoire des différents dispositifs et matériaux absorbants susceptibles de réduire efficacement le bruit des transformateurs. Le présent article est consacré à la première partie de la recherche, alors que les matériaux absorbants seront décrits dans une prochaine publication. Le modèle mathématique a d'abord été développé en APL, suite à de nombreuses mesures sur des transformateurs et des postes existants, il tient compte des réflexions, des diffractions et de l'effet de sol sur la propagation; de plus, des relevés sont actuellement poursuivis pour établir les effets de la topographie et des conditions climatiques sur la propagation à grande distance. Enfin, la version FORTRAN du programme est en cours de développement, avec alternativement la possibilité d'une définition très simplifiée des postes, en fonction de la tension nominale et de la puissance totale installée.

ABSTRACT

The research described in this article has been underway since 1980. It was initially subsidized by Hydro-Quebec and is now being supported by Energy, Mines and Resources Canada. The original project comprised two parts: elaboration of a mathematical model for simulating noise propagation around transformer stations, and testing in a reverberant room of various devices and materials which could be used to effectively reduce transformer noise. The present article covers the first part of the project; the research on absorbent materials will be presented in a later publication. The mathematical model was first elaborated in APL on the basis of a large number of noise measurements of existing transformers and transformer stations. It takes into account noise reflection, noise diffraction and ground effects on propagation. In addition, further readings are presently being taken in

order to determine the effects of topography and climatic conditions on long-distance noise propagation. At the present time, the FORTRAN version of the program is being worked out, with the alternative possibility of a much more simplified version of the stations in terms of nominal voltage and total electric power.

INTRODUCTION

Les recherches présentées ici se poursuivent depuis 1980, initialement subventionnées par l'Hydro-Québec via la firme d'ingénieurs conseils L.G.L. de Montréal, elles sont actuellement soutenues par le ministère fédéral de l'Energie, des Mines et des Ressources. Le projet original confié au Centre de recherches en aménagement et au Laboratoire d'acoustique de l'Ecole d'architecture comprenait deux volets principaux:

- le développement d'un modèle mathématique pour simuler la propagation du bruit autour des postes de transformation;
- une recherche en laboratoire sur différents matériaux absorbants et dispositifs pouvant réduire de façon efficace le bruit des transformateurs (1).

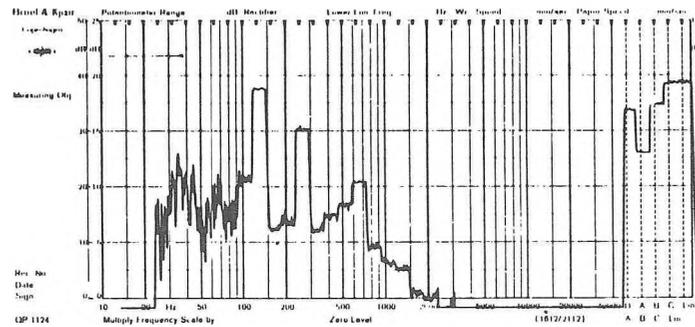
Le professeur T. Nakajima de l'Ecole d'architecture a dirigé le traitement informatique initial du modèle expérimental alors que MM. R. Paquet et A. Esteve travaillent maintenant respectivement sur le développement du modèle en FORTRAN et sur les mesures acoustiques relatives à la propagation.

1. REFERENCES POUR LA MODELISATION DE L'IMPACT ACOUSTIQUE DES TRANSFORMATEURS

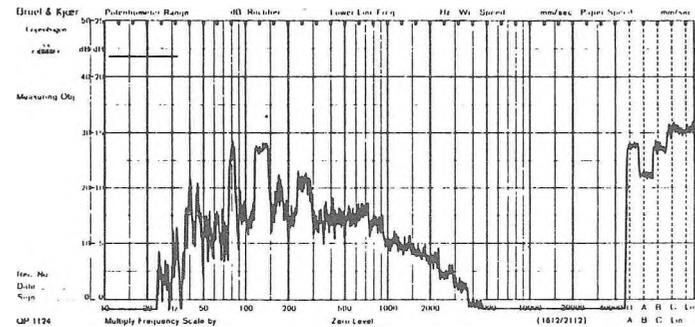
Avant de développer notre propre modèle nous avons pris connaissance de trois modèles existants relatifs au bruit des transformateurs: E.D.F., 1980 (2), TSUCHIYA, OOGI, NODA et HORI, 1974 (3) et surtout GIAO TRINH, 1975 (4). Ce dernier modèle, développé à l'Institut de recherche en électricité du Québec, a déjà été utilisé par l'Hydro-Québec, malheureusement il ne comporte pas de calcul de diffraction; nous avons néanmoins utilisé sa procédure de reconnaissance des surfaces réfléchissantes au voisinage des transformateurs. Le second modèle mentionné a été publié par la compagnie Hitachi, il considère les réflexions sur les bâtiments, la "directivité des transformateurs" et les "caractéristiques de phase des sources sonores". Les équations présentées sont incomplètes, de telle manière qu'il est impossible d'en faire une analyse très détaillée. Quant au document E.D.F., il s'agit d'une plaquette de synthèse qui présente à la fois la politique française de contrôle du bruit des transformateurs et les éléments mathématiques nécessaires au calcul sommaire de l'impact acoustique et des dispositifs de protection. Nous nous sommes en partie inspirés de cette démarche pour la préparation de notre propre modèle. Concernant la relation entre la puissance électrique nominale ou la masse du noyau magnétique et le niveau de bruit produit, ainsi que l'effet de la tension de fonctionnement sur ce même niveau de bruit (suivant l'induction), nous nous sommes référés à REIPLINGER, 1977 (5) pour la théorie et à GALLAY et DENIS, 1978 (6) pour les équations pratiques.

nombreux cas une très légère élévation dans le bas de la cuve (là où repose l'armature des enroulements); néanmoins, en partie pour tenir compte du rayonnement du couvercle, nous avons suivi la recommandation de REIPLINGER, 1972 (9) pour le calcul des effets d'écran, soit un point source équivalent au 2/3 de la hauteur.

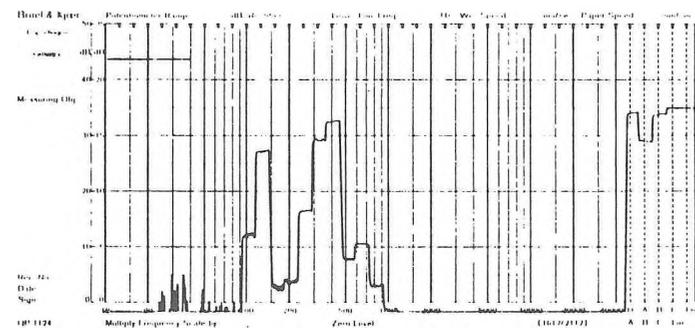
Au point de vue de la fréquence recommandable pour les calculs de diffraction, nous avons procédé à des analyses de composition spectrale sur les 4 faces de différents transformateurs. L'application de la correction physiologique (A), ainsi que l'atténuation relative des différentes bandes de fréquence par la diffraction d'un écran type, nous ont finalement amenés à ne retenir que la bande de fréquence la plus basse (soit 120 Hz); même si, comme le montre la Figure no 2, pour certains transformateurs le niveau de pression des premières harmoniques (240 ou 360 Hz) peut dépasser celui de la fréquence de base, ou bien dans d'autres cas le bruit de la ventilation couvre un large spectre, jusque vers 1 500 Hz.



a) spectre d'un transformateur 20 MVA, sans ventilation (bande principale à 120 Hz)



b) même spectre que le précédent, ventilateurs en fonctionnement



c) spectre d'un transformateur 66 MVA, sans ventilation (bande principale 360 Hz, exceptionnel)

FIGURE NO 2 : Exemples de quelques analyses de composition spectrale au 1/3 d'octave relevées à 1 mètre de la cuve d'un transformateur.

Enfin, nous avons procédé à de nombreuses cartographies des niveaux de bruit autour de postes existants d'importances variées (de 2 à 30 transformateurs ou inductances shunt), ainsi qu'à des mesures de bruit communautaire pour les résidences les plus proches, ceci afin de pouvoir vérifier l'efficacité du modèle par rapport à des situations réelles. A ce propos, la Figure no 3 montre deux exemples de postes d'importance différente, cartographiés lorsque les ventilateurs étaient en fonctionnement.

3. GRANDES LIGNES DU MODELE EXPERIMENTAL DEVELOPPE

Nous voulions obtenir un modèle susceptible de fournir le niveau de bruit résultant pour un point de coordonnées X, Y, Z (fenêtre d'une habitation par

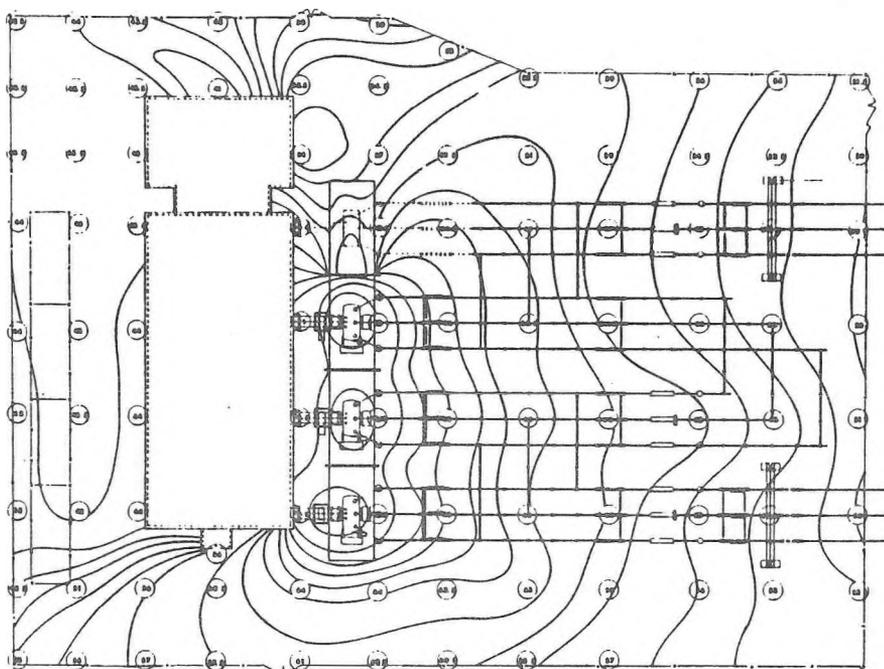
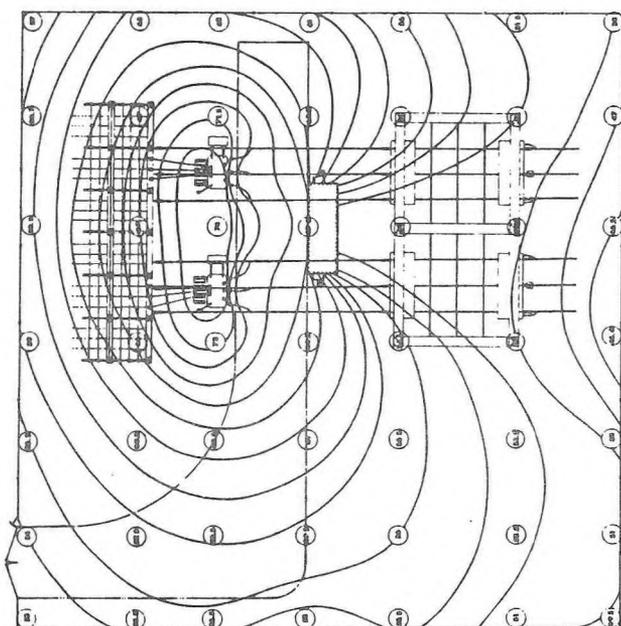


FIGURE NO 3 : Exemple de cartographie des niveaux de bruit de fond, tels que mesurés pour un poste à 3 transformateurs 230/25 KV (avec murs coupe-feu) et pour un poste à 2 transformateurs 120/25 KV (1980).



exemple), mais également une grille de valeurs en X, Y, interpolable sous forme d'une carte de bruit, ou bien encore des lignes de valeurs (entre deux bornes de propriété par exemple). L'ordonnancement logique du modèle expérimental finalement mis au point est la suivante:

- description des sources;
- calcul de la puissance acoustique;
- description des murs et bâtiments présents sur le poste;
- choix des points de calcul (isolés ou matrice pour cartographie);
- description complémentaire des lieux (limites, clôtures, édifices, etc.);
- calcul de la propagation hémisphérique;
- calcul de l'effet de sol (gradient de température, etc.);

- calcul des éventuelles réflexions;
- calcul des éventuelles diffractions;
- itération et sommation des niveaux de bruit résultants;
- sortie, imprimée ou graphique suivant la demande.

4. ASPECTS ORIGINAUX DU MODELE EXPERIMENTAL

Tout d'abord, comme le montre la Figure no 4, le calcul de la puissance acoustique d'un transformateur a été limité à 5 cas dans le modèle expérimental (du transformateur sans radiateur au transformateur avec deux batteries de radiateurs accolées et ventilateurs); il sera élargi par la suite, notamment au cas des batteries d'aéroréfrigérants indépendantes.

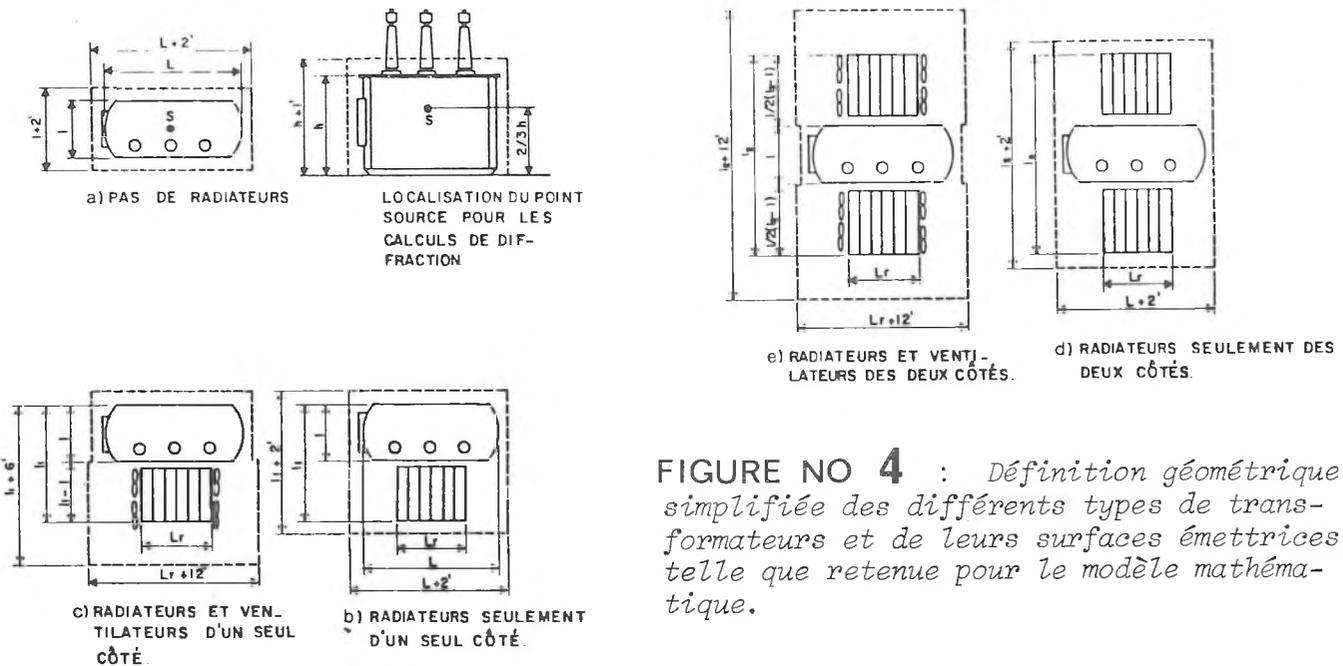


FIGURE NO 4 : Définition géométrique simplifiée des différents types de transformateurs et de leurs surfaces émettrices, telle que retenue pour le modèle mathématique.

La Figure no 5 regroupe ensuite la plupart des aspects originaux du modèle, sans pour autant rentrer dans le détail de tous les algorithmes. La propagation hémisphérique, complétée par l'effet de sol, est initialement calculée suivant l'équation:

$$N(A) = P_{W(A)} - 20 \log d + 5 \log (3Z + 2h)/d - 8$$

dans laquelle d est la distance réelle entre le point d'écoute (X, Y, Z) et le point source placé tel que mentionné au 2/3 de la hauteur de la cuve h. De cette formule, purement expérimentale, il découle qu'au-dessus de la droite d'équation $Z = d/3 - 2/3h$ il n'existe aucun effet de sol. Cette partie du modèle s'inspire des principes énoncés par WHITE et McNALLY, 1974 (10) et des équations proposées en 1976 par le Greater London Council pour l'impact des autoroutes. La propagation est donc considérée comme hémisphérique autour du transformateur jusqu'à un cercle de rayon égal à 2h.

Ensuite, les réflexions sont définies en trois dimensions avec un certain nombre de conditions visant à la simplification des calculs; la propagation du son réfléchi fournissant un niveau résultant conforme à l'équation:

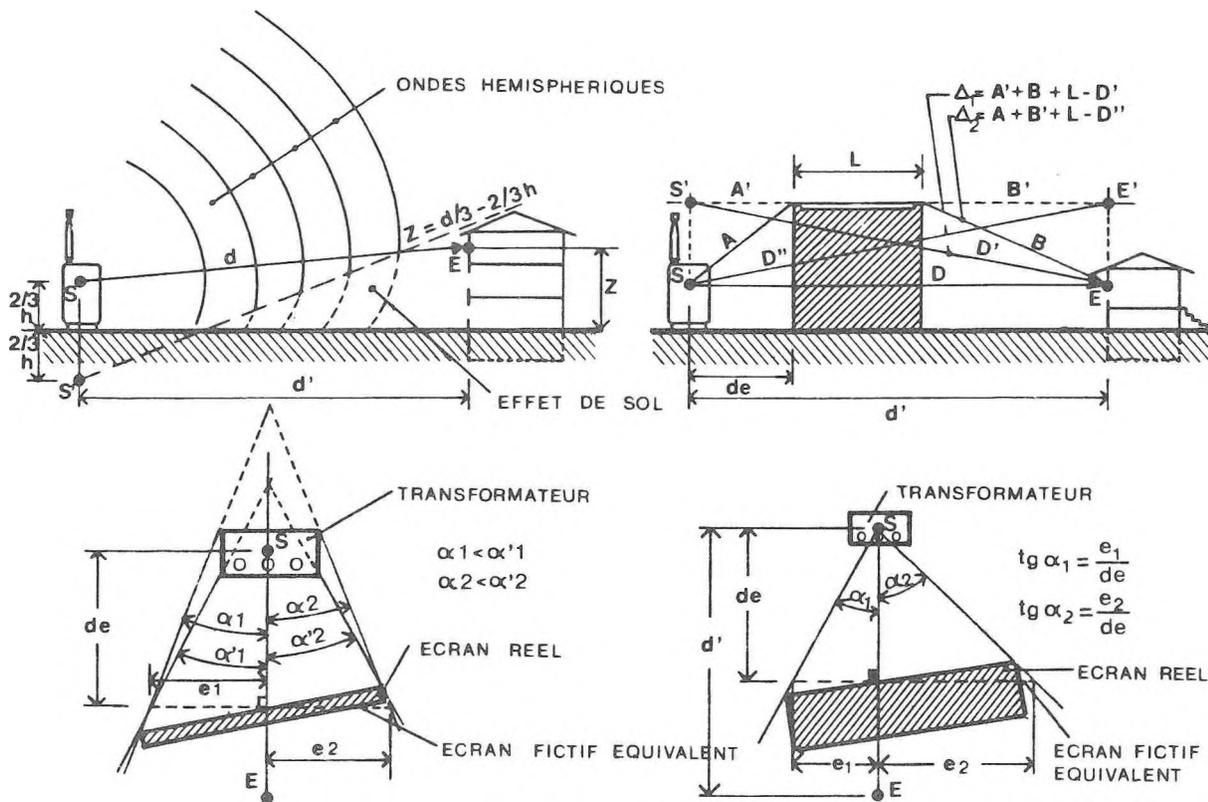


FIGURE NO 5 : Principaux aspects de la propagation du bruit des transformateurs abordés dans le modèle expérimental.

$$N_R = P_{W(A)} - 20 \log (r_1 + r_2) + 20 \log (1 - \alpha) - 8$$

relation dans laquelle r_1 et r_2 sont les deux portions du cheminement réfléchi et α le coefficient d'absorption de la surface réfléchissante. Pour le calcul de l'atténuation théorique par la diffraction la Figure no 5 fait également référence au cas d'un bâtiment écran (double diffraction); cette propagation est comparée à deux diffractions simples résolues à l'aide de la théorie de MAEKAWA telle que formulée par KURZE (11) avec quelques modifications après essai, suivant l'équation:

$$A_{TB} = 10 \log 40 \Delta_1/\lambda + 10 \log 40 \Delta_2/\lambda + 20 \log (A + B + L)/D$$

Les notations sont celles de la figure, Δ_1 et Δ_2 sont les différences de parcours acoustiques et λ la longueur d'onde est prise égale à 2,83 m.

Pour les pertes d'atténuation aux deux extrémités d'un écran, les deux droites de propagation limites définissent autour du point source les angles α_1 et α_2 ainsi que les segments e_1 et e_2 sur la perpendiculaire élevée sur le cheminement direct, à la distance de du point source ($\text{tg } \alpha_1 = e_1/de$). Les longueurs d' et de sont toujours respectivement la projection de la distance du point source au point d'écoute et la distance du point source à l'écran. Nous avons mis au point la formule simple suivante, qui donne finalement l'atténuation réelle d'un écran à partir de son atténuation théorique A_T :

$$A_R = A_T/2 \log (10 \text{tg} \alpha_1) \quad \text{ou} \quad A_T/2 \log (10 \text{tg} \alpha_2)$$

avec comme condition $0,1 \leq \text{tg}\alpha \leq 10$ (en fait il s'agit simplement de retenir le calcul correspondant au plus petit des angles α_1 ou α_2). Le modèle tient également compte du cas où les dimensions de la source sont très grandes par rapport à la longueur de l'écran en définissant plutôt 4 angles α_1, α_1' et α_2, α_2' et en choisissant le plus petit d'entre eux pour le calcul de l'atténuation réelle A_R . Le modèle tient compte ensuite de la continuité des écrans, jusqu'à 3 éléments différents (murs ou bâtiments), mais possédant au moins un point commun entre eux.

Finalement, il procède à toutes les sommations des niveaux sonores résultants et à toutes les itérations nécessaires, par ailleurs fort nombreuses.

5. RESULTATS ET PERSPECTIVES DE DEVELOPPEMENT

La Figure no 6 présente deux exemples de résultats, tels que fournis par l'ordinateur, pour un poste de 120 KV à 2 transformateurs et pour un poste de 230 KV à 3 transformateurs, avec murs coupe-feu et bâtiment de contrôle basse-tension; en fait il s'agit des deux mêmes postes que ceux qui sont cartographiés sur la Figure no 3.

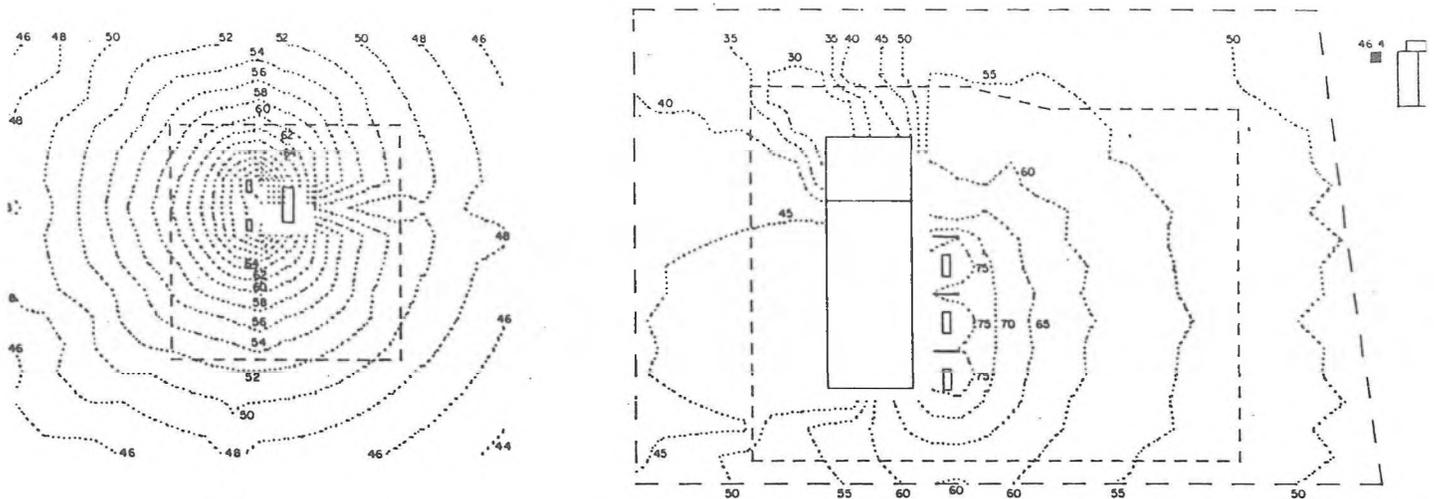


FIGURE NO 6 : Exemples de résultats cartographiques obtenus par simulation, par classe de 2 ou de 5 dB(A) (ces deux exemples correspondent aux postes de la figure No 21).

Au point de vue du développement du modèle, nous poursuivons actuellement nos travaux et nos mesures, de façon à intégrer dans les algorithmes les problèmes de propagation à grande distance (de 2 à 3 km), suivant les conditions climatiques et la topographie du site. Pour ce faire, nous avons entrepris un programme de relevés portant sur douze mois consécutifs, en périodes diurne et nocturne. Ces problèmes ont d'ailleurs été abordés d'un point de vue théorique par YING et McGAUCHEY, 1981 (12). D'autre part, nous avons intégré une entrée de données simplifiées (tension nominale, puissance totale installée, nombre et qualité des transformateurs), de façon à permettre la résolution rapide de certains problèmes de planification environnementale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) J.-G. MIGNERON: "Etude du contrôle acoustique dans les postes de transformation", 263 p., Hydro-Québec, Direction des Projets Electrotechniques et Lalonde, Girouard, Letendre et Ass., 1980.
- (2) ELECTRICITE DE FRANCE: "L'acoustique du poste et l'habitat environnant", Centre d'Equipement du Réseau de Transport, 18 p., E.D.F., Paris, 1980.
- (3) T. TSUCHIYA, Y. OOGI, K. NODA et Y. HORI: "Noise prevention for substation transformers", in Hitachi Review, Vol. 23, No 2, pp. 56-63, 1974.
- (4) N. GIAO TRINH: "Une méthode de calcul du niveau de bruit audible généré par les transformateurs de puissance dans un poste", 6 p. plus annexes, Rapport IREQ-1304, Institut de Recherche de l'Hydro-Québec, Varennes, 1975.
- (5) E. REIPLINGER et H. STELTER: "Gerauschprobleme", in Elektrotechnische Zeitschrift, ETZ-A, Vol. 93, No 3, pp. 224-228, 1977 (version anglaise par Transformatoren Union "Noise problems", 1978).
- (6) M. GALLAY et P. DENIS: "Le bruit des transformateurs de grande et moyenne puissance et de leur réfrigération", 15 p., in Bruit des Matériels Electriques, journées d'études organisées par la Société des Electroniciens, des Electriciens et des Radio-électriciens, et par le Groupement des Acousticiens de Langue Française, novembre 1977.
- (7) NORMES NEMA:
 - "General Pub." No TR1, pp. 1-10, Part 0, fév. 1972, août 1975.
 - "Audible sound level tests" Pub. No TR1, pp. 4-5, 1971.
 - "Table 1 - Outdoor substations basic parameters", Appendix A, Pub. No SG6, p. 2, déc. 1977.
- (8) NORMES CEI: "Mesure des niveaux de bruit des transformateurs et des bobines d'inductance", Pub. 551, 35 p., Commission Electrotechnique Internationale, Genève, 1976.
- (9) E. REIPLINGER: "Massnahmen zur Geräuschminderung in Umspannanlagen" in Technische Mitteilungen AEG-Telefunken, Vol. 62, No 2, 5 p., 1972 (version anglaise par Trafo-Union "Measures for reducing the noise in transformer stations").
- (10) J.M. WHITE et R.G. McNALLY: "Transformer noise control", in the Inst. of Eng., Australia Electrical Engineering Transactions, Vol. EE10, No 1, pp. 32-38, 1974.
- (11) U.J. KURZE: "Noise reduction by barriers", in Journal of Acous. Soc. of America, Vol. 55, No 3, pp. 504-518, 1974.
- (12) S.P. YING et J.W. McGAUCHEY: "Transformer noise propagation and measurement", 5 p., présenté au 101st Meeting of the Acoust. Soc. of America, Ottawa, 1981.