

bun 20200325

SALMER.

5037C  
1988  
281

U.S.T.L. FLANDRES ARTOIS  
VILLENEUVE D'ASCQ

**DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES EN ELECTRONIQUE**

Mention: "Electromagnétisme et dispositifs microondes"

**ESSAI DE MODELISATION BIDIMENSIONNELLE DES PROFILS THERMIQUES  
BASE SUR LES MESURES RADIOMETRIQUES :  
APPLICATION AUX STRUCTURES MULTICOUCHES DE TYPE PNEUMATIQUE**



DUBOIS luc

JUILLET 1988

# SOMMAIRE

Introduction	2
<b>1. Mesures expérimentales des températures de surfaces et radiométriques</b>	<b>3</b>
1.1 Description du banc de mesure utilisé	3
1.1.1 Positionnement de l'antenne	4
1.1.1.1 Problème du à l'échauffement de l'antenne	5
1.1.1.2 Problème lié au diagramme de rayonnement	5
1.2 Relevés de température obtenus	5
1.3 Hypothèses utilisées pour la reconstruction numérique des profils thermiques	5
<b>2. Mise au point d'un logiciel de reconstruction de profils thermiques basé sur un modèle unidimensionnel</b>	<b>7</b>
2.1 Expression de la puissance captée par l'antenne dans le cas général	8
2.1.1 Calcul des coefficients de réflexion et de transmission apparents	9
2.1.2 Puissance totale captée provenant des différents milieux	9
2.2 Cas particulier de la structure étudiée	9
2.3 Traitement informatique des calculs	10
2.3.1 Méthode de simulation utilisée	10
2.3.1.1 Enumération des diverses étapes	11
2.3.1.2 Profils thermiques proposés	11
<b>3. Utilisation d'un modèle bidimensionnel et résultats obtenus</b>	<b>12</b>
3.1 Mise au point d'un logiciel basé sur un modèle bidimensionnel	12
3.1.1 Détermination de l'expression approchant le diagramme de rayonnement de l'antenne	12
3.1.2 Calcul de la puissance totale captée par l'antenne	13
3.1.2.1 Puissance captée par l'antenne dans le cas général	13
3.1.2.2 Cas particulier de la structure étudiée	14
3.1.3 Traitement informatique des calculs	14
3.1.3.1 Méthode de simulation utilisée	14
3.1.3.2 cas du pneu lisse	15
3.1.3.3 Cas du pneu sculpté	15
3.2 Résultats obtenus	15
3.2.1 Prise en compte de phénomènes supplémentaires	16
3.2.1.1 Atténuation liée à la présence d'une lame d'air	16
3.2.1.2 évolution des caractéristiques diélectriques en fonction de la température	18
3.2.2 Comparaison entre le modèle unidimensionnel et bidimensionnel	18
Conclusion	19
Bibliographie	20

## INTRODUCTION

Il est souvent très difficile de déterminer la température au sein d'un milieu sans introduire des sondes thermométriques qui alors entraînent une perturbation, voire une destruction locale de la structure étudiée.

La radiométrie microonde permet de déterminer la puissance thermique émise par un milieu émissif. En particulier lorsque celui-ci est le siège d'un gradient thermique, il est alors nécessaire d'avoir recours à une reconstruction de profil thermique à partir de la connaissance de la température de surface, de la ou les températures radiométriques, et des caractéristiques diélectriques du milieu sous investigation.

Pour certaines applications industrielles ( textile, industrie du caoutchouc, matériaux composites etc... ), il est nécessaire de pouvoir déterminer la température radiométrique à distance: c'est le problème que nous avons traité dans ce mémoire.

L'objectif fixé consiste à déterminer la répartition de température qui s'établit dans un pneumatique en roulement [7] à partir des mesures radiométriques réalisées en infrarouge, en bande x et en utilisant un logiciel de reconstruction de profils thermiques basé sur la théorie des transferts radiatifs.

Ce mémoire comprend trois parties:

1. Description du banc de mesure utilisé, optimisation de la distance antenne - milieu émissif, et hypothèses utilisées pour la création d'un logiciel de reconstruction de profils thermiques
2. Mise au point d'un programme basé sur un modèle unidimensionnel qui ne prend en compte que la zone du milieu émissif située dans le prolongement de l'axe de l'antenne.
3. Conception d'un programme basé sur un modèle bidimensionnel et résultats obtenus.

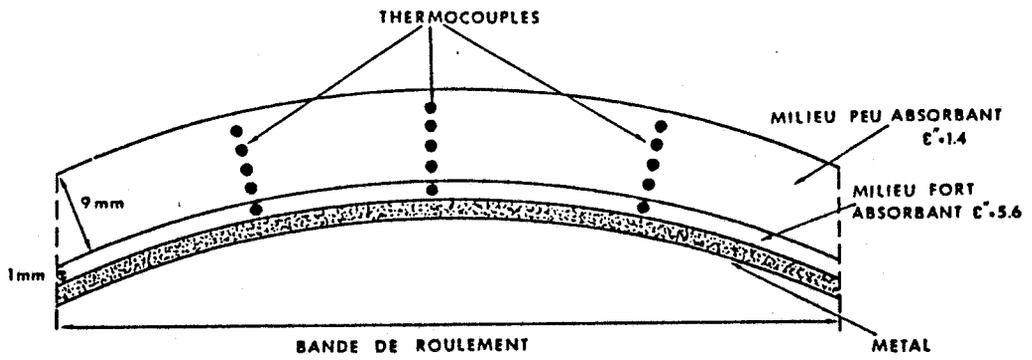


figure 1

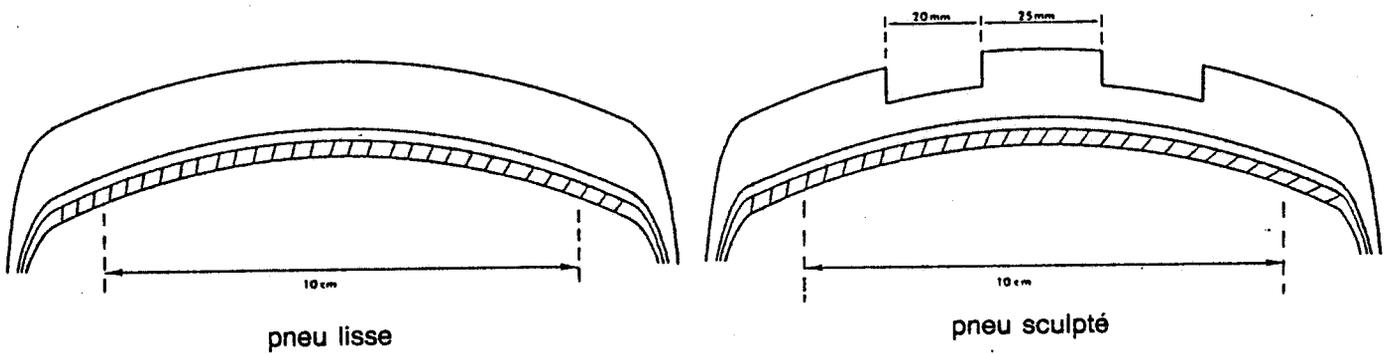


figure 2

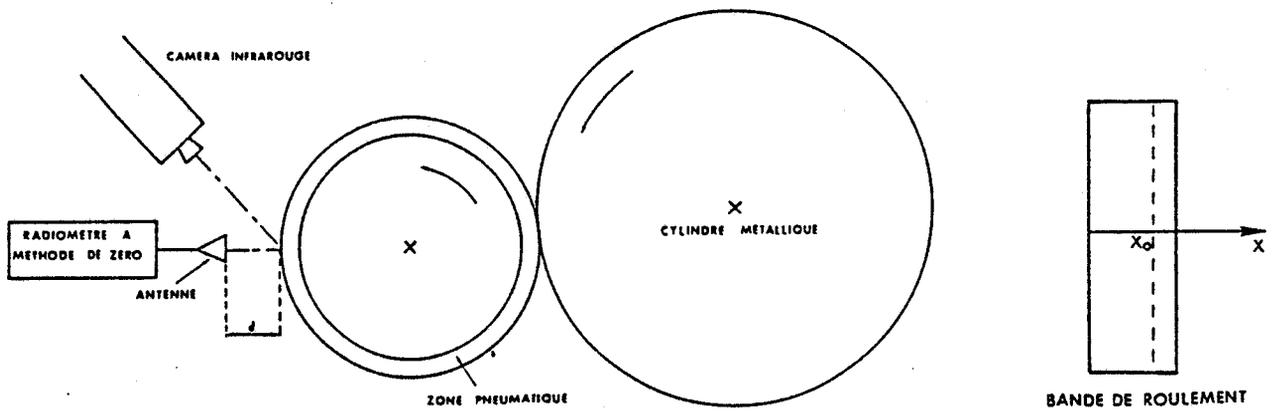


figure 3

## Chapitre 1

### Mesures expérimentales des températures de surfaces et radiométriques

Les structures étudiées sont des milieux pneumatiques multicouches faiblement dissipatifs ( $\epsilon'' < 10$ ) reposants sur un miroir non parfait et dans lesquels règne un gradient thermique (pneumatique en roulement). Les gradients thermiques s'établissant dans ces structures ont été déterminés en implantant des thermocouples en différents points ( *figure 1* ).

Il présentent généralement une allure parabolique qui en première approche peut être considérée linéaire pour de faibles épaisseurs de milieu.

Pour notre étude, les structures considérées sont illustrées *figure 2*.

#### 1.1 Description du banc de mesure utilisé

La représentation schématique du banc de mesure utilisé est donnée *figure 3*.

Le pneumatique est mis en roulement avec une vitesse "V" par friction sur un cylindre métallique en rotation. On mesure la température moyenne de surface par caméra infrarouge en un point d'abscisse "xo". Etant donnée la symétrie du pneumatique tous les points passant en xo présentent la même température.

Cette caméra infrarouge peut être déplacée latéralement afin d'obtenir le profil de température de surface pour toute la bande de roulement. On mesure également au même point "xo" la température radiométrique à l'aide d'une antenne plaquée log - périodique [2],[5] ( *figure 4* ) associée à un radiomètre à méthode de zéro [6],[5] opérant en bande x.



*figure 4*

L'antenne est située à une distance "d" du pneumatique en rotation et peut se déplacer latéralement.

### 1.1.1 Positionnement de l'antenne

L'antenne utilisée pour la mesure radiométrique présente une bande passante de 1Ghz centrée autour de 9Ghz [2],[5].

Une étude du coefficient de réflexion S11 a été effectuée pour diverses distances antenne - milieu émissif ( figure 5 ).

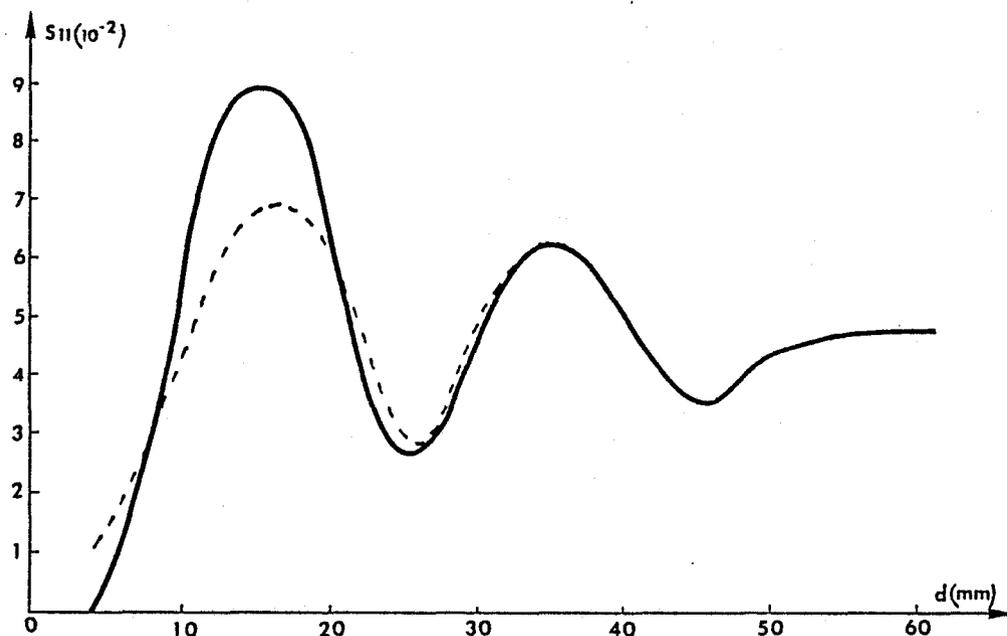


figure 5

On constate une même évolution du S11 pour différentes gommes, avec des variations importantes pour une distance "d" comprise entre 5 et 20mm. L'utilisation d'un radiomètre à méthode de zéro [6],[5] s'impose donc pour s'affranchir de la variation du S11; car le pneumatique en rotation, selon sa vitesse se rapproche plus ou moins de l'antenne (phénomène de gonflement lié à l'échauffement du pneu).

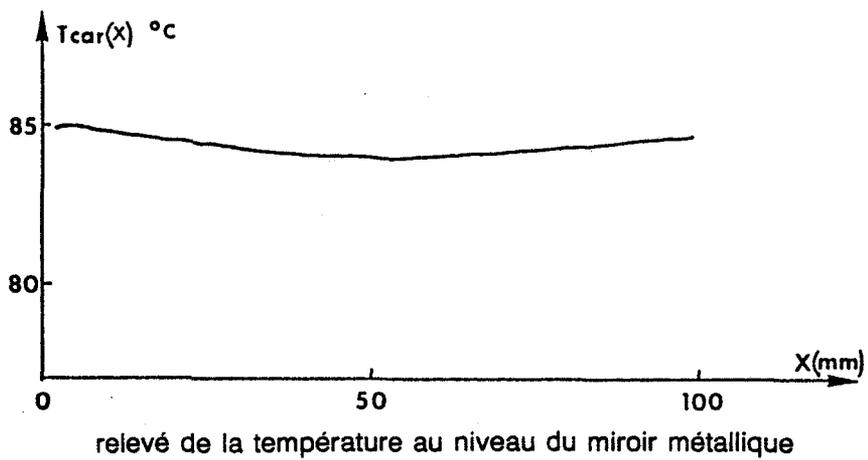
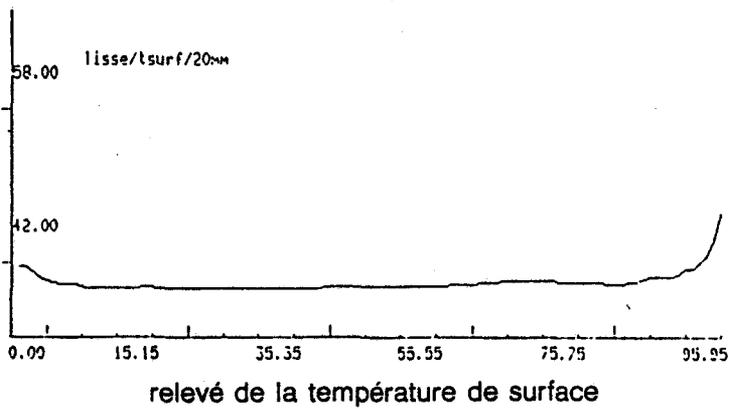
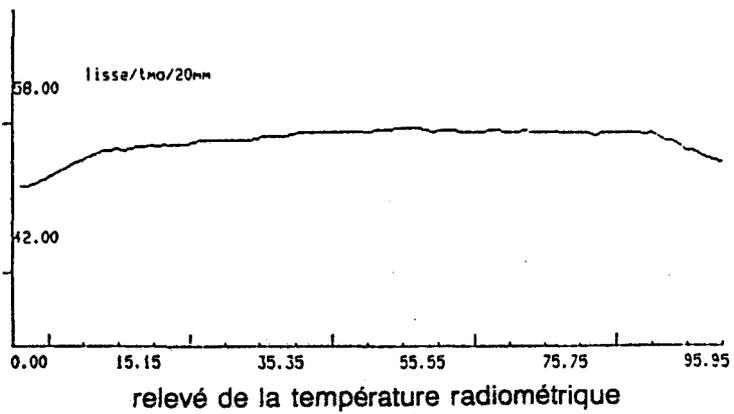
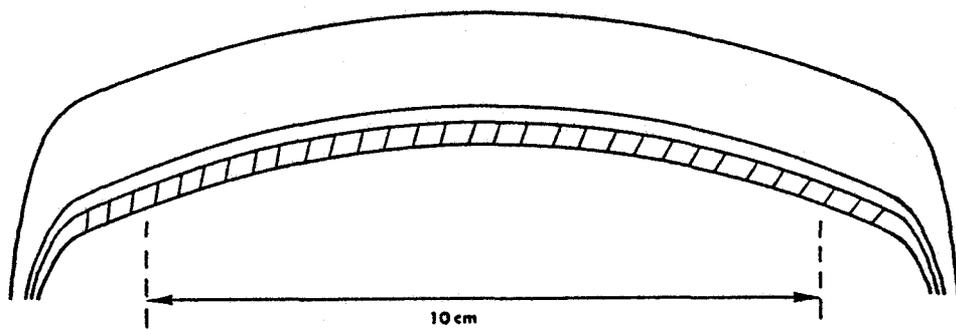


figure 6

### 1.1.1.1 Problème du à l'échauffement de l'antenne

Lorsque l'antenne se trouve relativement près du milieu émissif (entre 0.5 et 1cm), étant donné que les températures de surface sont de l'ordre de 40 à 60 degrés; les connectiques et l'extrémité du câble subissent un échauffement assez important qui risque de perturber la mesure radiométrique dans le temps.

Il est donc nécessaire de se placer à une distance suffisamment grande ( de l'ordre de 20mm ) pour minimiser ce phénomène.

### 1.1.1.2 Problème lié au diagramme de rayonnement

Des études antérieures [2] ont permis de déterminer expérimentalement le diagramme de rayonnement de l'antenne. Celle - ci présente un lobe de rayonnement qui s'élargit en fonction de la distance; plus l'antenne sera proche du milieu sous investigation et plus le volume couplé à celle - ci sera étroit.

La prise en compte de tous ces phénomènes, nous a donc amené à choisir une distance de 20mm entre l'antenne et le milieu émissif.

## 1.2 Relevés de température obtenus

Nous donnons *figures 6 et 7* les relevés des températures de surface et radiométriques, ainsi que l'évolution de la température au niveau du miroir métallique, fournis par l'industriel. Ces mesures sont effectuées lorsque l'équilibre thermodynamique est atteint.

Dans le cas du pneu lisse, nous constatons que la température au niveau du miroir métallique est pratiquement constante quel que soit l'endroit où s'effectue la mesure.

Par contre, pour la structure sculptée, la température au niveau du miroir suit les variations du profil géométrique de surface.

## 1.3 Hypothèses utilisées pour la reconstruction numérique des profils thermiques

La reconstruction du profil thermique à l'intérieur des structures étudiées sera calculée à partir de la connaissance de la température de surface, de la température radiométrique et des caractéristiques du milieu sous investigation [4],[8],[9],[10].

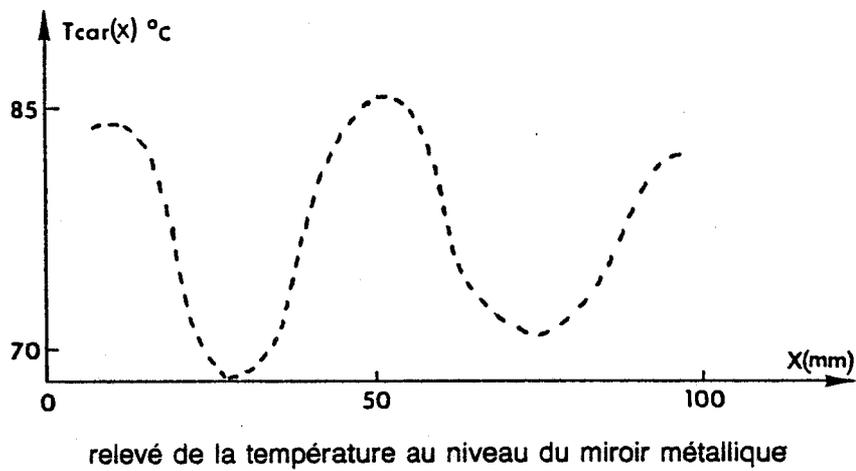
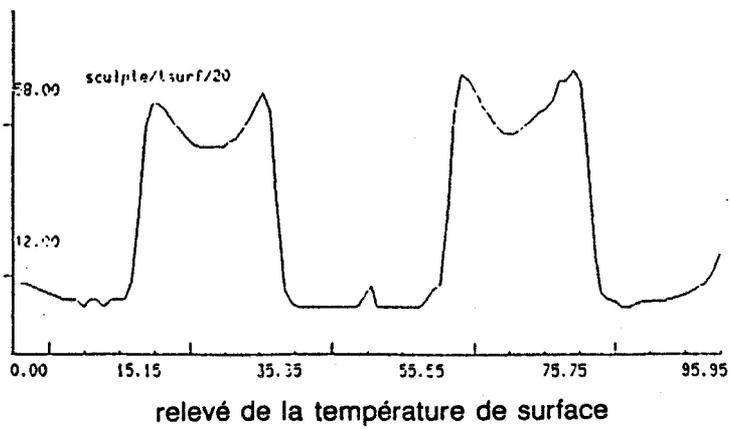
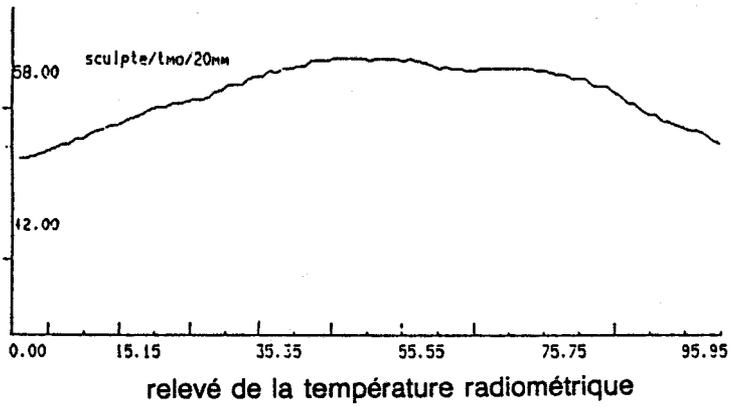
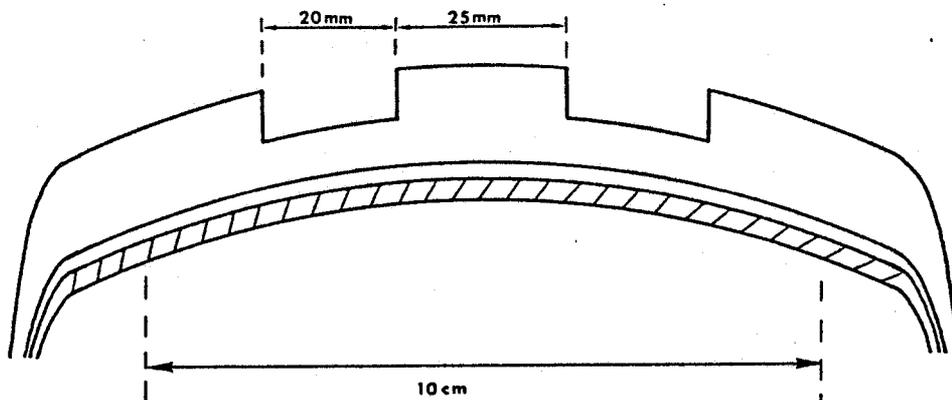


figure 7

## HYPOTHÈSES:

- Nous avons considéré uniquement le mode de propagation TEM.
- Les ondes émises se propagent perpendiculairement aux interfaces entre les différents milieux.
- Nous assimilons les structures étudiées à des structures planes ( *figure 8* ).
- Les calculs sont effectués en considérant que le système est à l'équilibre thermodynamique.

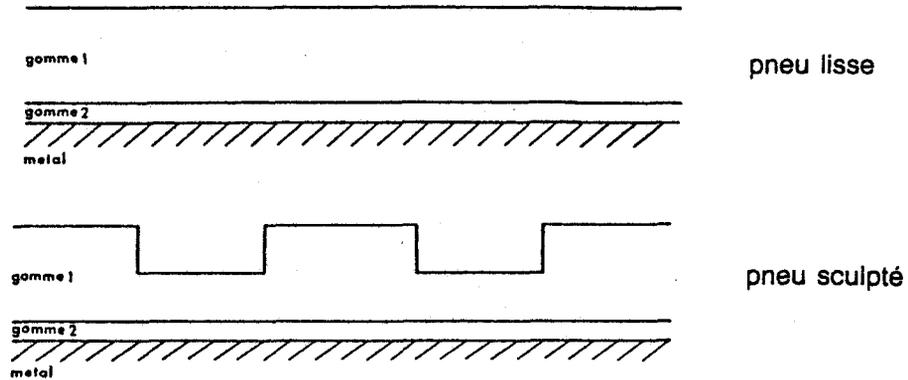


figure 8

En réalité nous n'avons pas un miroir parfait, mais un treillis métallique. Nous avons donc été amenés à déterminer la valeur du coefficient de réflexion en puissance au niveau de ce treillis. Cette détermination a été effectuée par une mesure en transmission qui nous a donnée un coefficient de réflexion en puissance  $\rho = 0.4$ .

D'autre part des mesures de l'atténuation du champ électrique à l'intérieur de milieux ayant des caractéristiques diélectriques équivalentes ont données un coefficient d'atténuation:  
 $\alpha = 1.4 \alpha_{TEM}$ .

A l'aide de ces différents résultats de mesures et des hypothèses envisagées, nous avons mis au point un programme de calcul de profil thermique qui s'établit dans de telles structures lorsqu'elles ont atteint leur équilibre thermique.

## Chapitre 2

### Mise au point d'un logiciel de reconstruction de profils thermiques basé sur un modèle unidimensionnel

La reconstruction du profil thermique est basée sur le calcul de la puissance électromagnétique d'origine thermique émise par un milieu dissipatif.

Dans le domaine des microondes, on peut montrer que pour des températures  $T > 10$  degrés kelvin, une antenne réceptrice pointée vers un corps noir porté à une température uniforme  $T$  et supposée à l'équilibre thermodynamique avec le milieu extérieur, recueille une puissance  $P$  qui s'exprime par la loi de Nyquist:

$$P = kT\Delta f$$

avec  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  (Constante de Boltzmann)

$\Delta f$  = bande passante

Dans le cas qui nous intéresse, nous sommes en présence de gradients thermiques. Nous allons donc appliquer la loi des transferts radiatifs.

Le milieu émissif est considéré comme formé d'un grand nombre de tranches élémentaires d'épaisseur  $dz$ , dont chacune émet une puissance:  $dP = 2\alpha_i k T_i \Delta f dz$  dans une bande de fréquence  $\Delta f$ .

$\alpha_i$  = coefficient d'absorption de la lame élémentaire (fonction des constantes diélectriques)

$k$  = constante de Boltzmann

$T_i$  = température en degrés Kelvin de la tranche élémentaire d'indice  $i$

La puissance totale captée par l'antenne correspond alors à la somme des contributions en puissance de chaque tranche élémentaire, compte tenu du coefficient de transmission  $T_{pj}$  entre la tranche élémentaire émissive considérée d'indice  $j$  et l'antenne réceptrice.

Nous allons donc calculer ce coefficient de transmission et écrire que:

$$P_{reçue} = \sum_j T_{pj} P_j$$

Etant donné que les calculs sont effectués en considérant que l'on est en mode TEM, le coefficient  $T_{pj}$  s'exprime par:

$$T_{pj} = \left| T_j \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_j^*} \right|$$

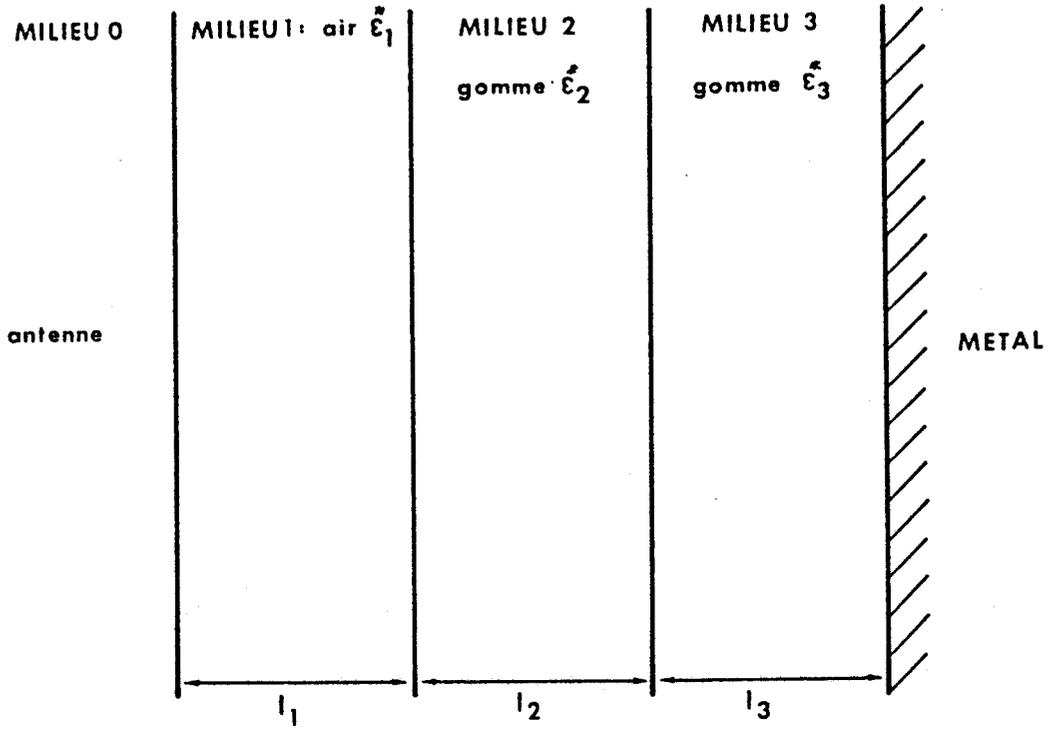


figure 9

avec  $T_j$  = coefficient de transmission en champ électrique.

$n_0^*$  = indice de réfraction complexe du milieu 0

$n_j^*$  = indice de réfraction complexe du milieu j

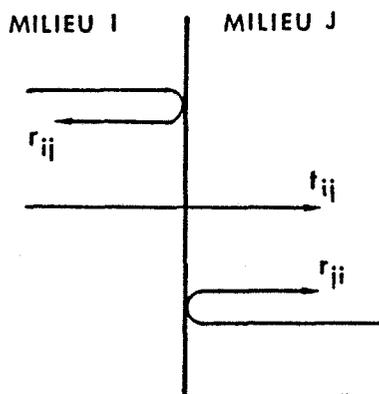
Les structures étudiées sont constituées de plusieurs couches de caractéristiques diélectriques différentes, ce qui va donc induire un phénomène de réflexions multiples. Nous allons donc calculer la puissance totale captée par l'antenne et provenant de chaque couche en tenant compte de toutes ces réflexions.

Des calculs similaires ont déjà été effectués [1],[8], mais ceux-ci n'étaient valables que dans le cas de milieux fortement dissipatifs où il n'était pas nécessaire de prendre en compte toutes les réflexions. Une reprise des calculs a donc été effectuée en considérant un cas plus général.

Le modèle utilisé pour notre structure est donné figure 9.

## 2.1 Expression de la puissance captée par l'antenne dans le cas général

On calcule d'abord les coefficients de réflexion et de transmission en champ électrique aux interfaces:



$$r_{ij} = \frac{n_i^* - n_j^*}{n_i^* + n_j^*} = -r_{ji}$$

$$t_{ij} = (1 + r_{ji}) = (1 - r_{ij})$$

avec :  $n_i^* = \sqrt{\epsilon_i^*}$  : indice de réfraction complexe du milieu i.

$\epsilon_i^* = \epsilon_i' - j\epsilon_i''$  : permittivité complexe du milieu i.

nous avons également la constante de propagation du milieu i donnée par l'expression :

$$\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i.$$

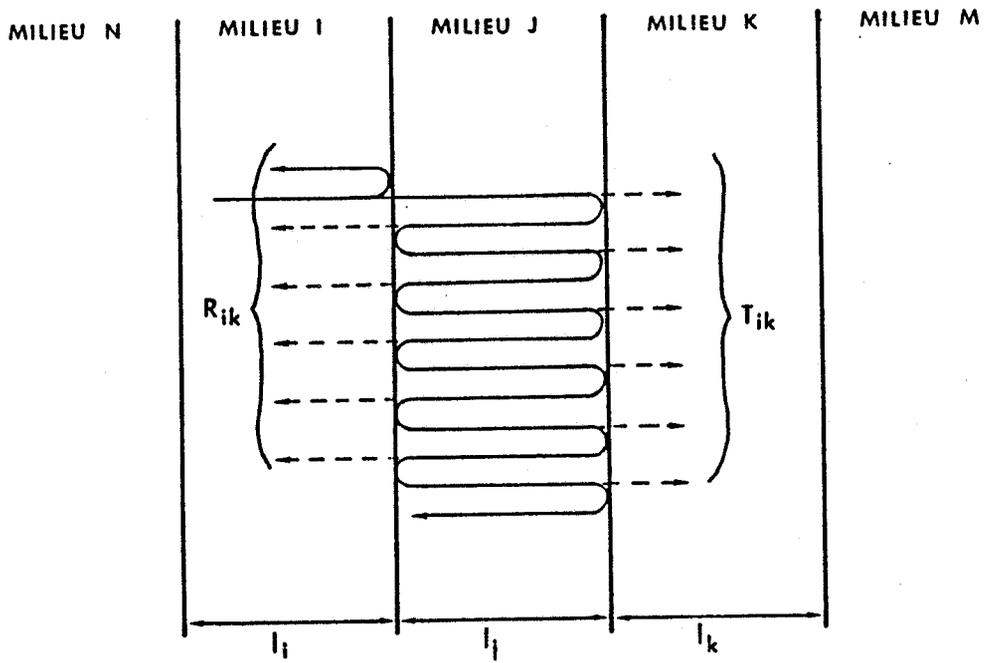


figure 10

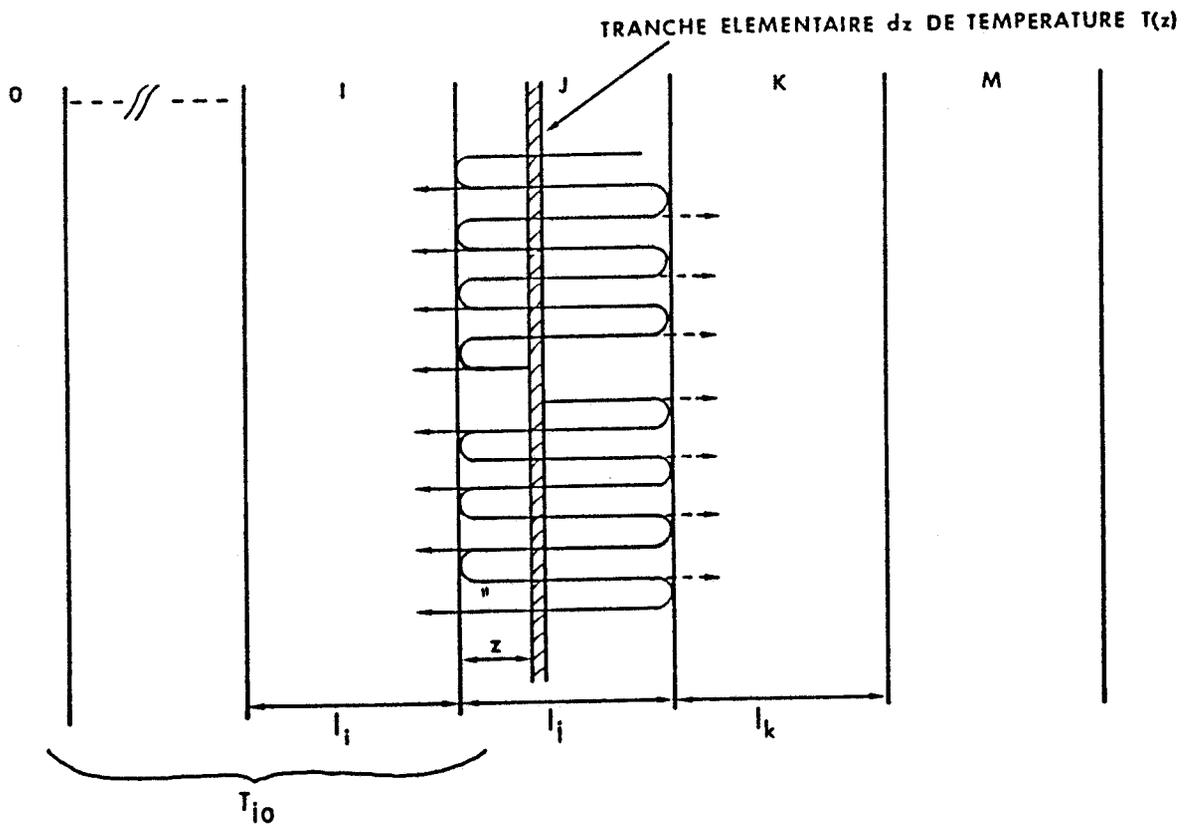


figure 11

### 2.1.1 Calcul des coefficients de réflexion et de transmission apparents

On considère une onde incidente se propageant perpendiculairement aux interfaces du milieu I vers le milieu J ( *figure 10* ). Le coefficient de réflexion vu du milieu I se traduit par l'expression suivante:

$$T_{ik} = r_{ij} + \left[ \frac{t_{ij} t_{ji} R_{jm} e^{-2\gamma_j l_j}}{1 - R_{jm} r_{ji} e^{-2\gamma_j l_j}} \right]$$

et le coefficient de transmission vu du milieu k s'écrit:

$$T_{ik} = \left[ \frac{t_{ij} t_{jk} e^{-\gamma_j l_j}}{1 - r_{jk} R_{jm} e^{-2\gamma_j l_j}} \right]$$

### 2.1.2 Puissance totale captée provenant des différents milieux

La puissance totale captée provenant d'un milieu j ( *figure 11* ) s'exprime par la relation suivante:

$$P_j = 2 \alpha_j k \Delta f \left| T_{j0} \right|^2 \int_0^{l_j} \left| \frac{e^{-\gamma_j z} + R_{jm} e^{-\gamma_j (2l_j - z)}}{1 - r_{ji} R_{jm} e^{-2\gamma_j l_j}} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_j^*} \right| T(z) dz$$

## 2.2 Cas particulier de la structure étudiée

La structure étant constituée de 3 milieux ( *figure 9* ) nous obtenons donc les expressions suivantes des puissances:

$$P_1 = 2 \alpha_1 k \Delta f \left| t_{10} \right|^2 \int_0^{l_1} \left| \frac{e^{-\gamma_1 z} + R_{13} e^{-\gamma_1 (2l_1 - z)}}{1 - r_{10} R_{13} e^{-2\gamma_1 l_1}} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_1^*} \right| T(z) dz$$

$$P_2 = 2 \alpha_2 k \Delta f \left| T_{20} \right|^2 \int_0^{l_2} \left| \frac{e^{-\gamma_2 z} + R_{24} e^{-\gamma_2 (2l_2 - z)}}{1 - r_{21} R_{24} e^{-2\gamma_2 l_2}} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_2^*} \right| T(z) dz$$

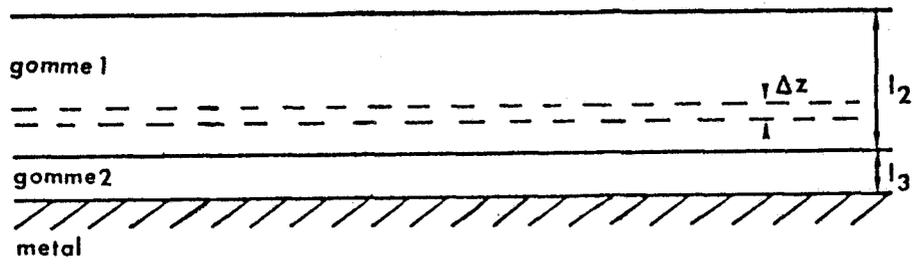


figure 12

$$P_3 = 2 \alpha_3 k \Delta f \left| \frac{e^{-\gamma_2 l_2} T_{20} t_{32}}{1 - r_{21} R_{24} e^{-2\gamma_2 l_2}} \right|^2 \int_0^{l_3} \left| \frac{e^{-\gamma_3 z} + r_{34} e^{-\gamma_3 (2l_3 - z)}}{1 - r_{32} r_{34} e^{-2\gamma_3 l_3}} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_3^*} \right| T(z) dz$$

Avec les coefficients:

$$T_{20} = \frac{t_{21} t_{10} e^{-2\gamma_1 l_1}}{1 - r_{10} R_{13} e^{-2\gamma_1 l_1}}$$

$$R_{13} = r_{12} + \left[ \frac{t_{12} t_{21} R_{24} e^{-2\gamma_2 l_2}}{1 - r_{21} R_{24} e^{-2\gamma_2 l_2}} \right]$$

$$R_{24} = r_{23} + \left[ \frac{t_{23} t_{32} r_{34} e^{-2\gamma_3 l_3}}{1 - r_{32} r_{34} e^{-2\gamma_3 l_3}} \right]$$

## 2.3 Traitement informatique des calculs

Chaque milieu est décomposé en tranches élémentaires [1],[4],[8],[9] de largeur  $\Delta z = 10^{-4}$  mètres ( figure 12 ) et on effectue la somme des puissances captées par l'antenne provenant de chaque tranche.

Pour le traitement informatique du problème, il est nécessaire de discrétiser les expressions des puissances. Pour un milieu d'indice j, la puissance captée s'écrit alors:

$$P_j = 2 \alpha_j k \Delta f \left| T_{j0} \right|^2 \sum_{i=1}^{2^{i=n}} \left| \frac{e^{-\gamma_j i \Delta z} + R_{jm} e^{-\gamma_j (2l_j - i \Delta z)}}{1 - r_{ji} R_{jm} e^{-2\gamma_j l_j}} \right|^2 T_i \left| \frac{n_0^*}{n_j^*} \right| \Delta z$$

avec  $n = \frac{l_j}{\Delta z}$  ;  $l_j$  : épaisseur de la tranche d'indice j.

$\Delta z$  : pas de discrétisation.

### 2.3.1 Méthode de simulation utilisée

Connaissant les caractéristiques diélectriques des différents milieux constituant la structure étudiée, ainsi que la distance à laquelle est placée l'antenne. Un premier calcul est effectué en considérant l'ensemble de la structure portée à une température homogène T1 puis T2 pour réaliser un étalonnage numérique [4],[9],[10].

On obtient alors les puissances totales captées par l'antenne:

$$P_{TOTAL} (T1) = \sum_{j=1}^{j=N} P_j (T1) \quad P_{TOTAL} (T2) = \sum_{j=1}^{j=N} P_j (T2)$$

N = nombre de milieux (ici N=3)

Etant donné que l'évolution de P( T ) est linéaire, on en déduit la pente et le décalage qui permettent alors d'associer à une puissance thermique captée provenant de la structure, une température équivalente dite "Température radiométrique".

Ainsi, à partir des mesures de la température radiométrique et de la température de surface, il est possible, compte tenu de la connaissance de l'allure du profil thermique, d'en déduire l'évolution de la température dans la structure [4],[9],[10].

### 2.3.1.1 Enumération des diverses étapes

- Procédure d'étalonnage théorique
- Connaissant le type de profil, on propose une première évolution de la température à partir de laquelle, on calcule la puissance correspondante captée par l'antenne.
- A partir de la procédure d'étalonnage préalable, on détermine la température radiométrique équivalente qui lui est associée.
- On compare cette température radiométrique calculée à celle qui est effectivement lue sur le radiomètre et l'on modifie en conséquence le profil de température calculé.
- Les ajustements du profil sont effectués jusqu'à ce que l'on ait :

$$\left| Trad_{calculée} - Trad_{mesurée} \right| \leq 0.05^{\circ} C.$$

### 2.3.1.2 Profils thermiques proposés

A partir des mesures effectuées sur plusieurs structures pneumatiques, on a relevé que les profils thermiques présentent une allure parabolique (parabole dont le maximum est situé à 7mm derrière le miroir métallique) qui en première approximation peut être considérée linéaire sur de faibles épaisseurs.

Le logiciel offre donc le choix entre un profil linéaire ou parabolique.

## Chapitre 3

### Utilisation d'un modèle bidimensionnel et résultats obtenus

Le modèle unidimensionnel convient très bien lorsque l'on considère des structures pour lesquelles, les températures de surface et radiométriques sont relativement constantes au niveau de la zone examinée par l'antenne.

Par contre lorsque l'on a des variations non négligeables de ces températures ou lorsque le profil géométrique de la structure n'est pas constant, il est nécessaire de considérer un modèle bidimensionnel. Il faut alors prendre en compte le diagramme de rayonnement de l'antenne.

#### 3.1 Mise au point d'un logiciel basé sur un modèle bidimensionnel

##### 3.1.1 Détermination de l'expression approchant le diagramme de rayonnement de l'antenne

L'antenne utilisée est une antenne plaquée du type log - périodique adaptée aux mesures radiométriques dans la bande 8.5Ghz - 9.5Ghz.

Des études antérieures [3] en champ proche ont permis de montrer que le champ rayonné dans un milieu dissipatif peut s'exprimer de façon approchée par la relation suivante:

$$\left| E(x,z) \right| = E_0(z) e^{-C(z) x^2}$$

avec  $E_0(z)$  = champ sur l'axe de l'antenne à une distance  $z$ .

Le champ rayonné présente une allure gaussienne dans un axe transverse à l'antenne.

Le paramètre  $C(z)$  traduit l'évolution de la largeur à mi - hauteur de la gaussienne en fonction de la profondeur  $z$ . On a ici :

$$C(z) = \frac{2 \cdot 76}{L(z)^2}$$

$L(z)$  est caractéristique du milieu, c'est lui que l'on s'efforce de déterminer expérimentalement. Ainsi, à partir des relevés expérimentaux du champ rayonné, nous avons tracé l'évolution de la fonction  $L(z)$  pour une fréquence d'utilisation  $f=9\text{Ghz}$ . Cette évolution correspond à une droite d'équation :  $L(z) = (0.6)a + (1.2)z$  avec  $a = 19 \text{ mm}$  (ouverture de l'antenne pour  $z=0$ ).

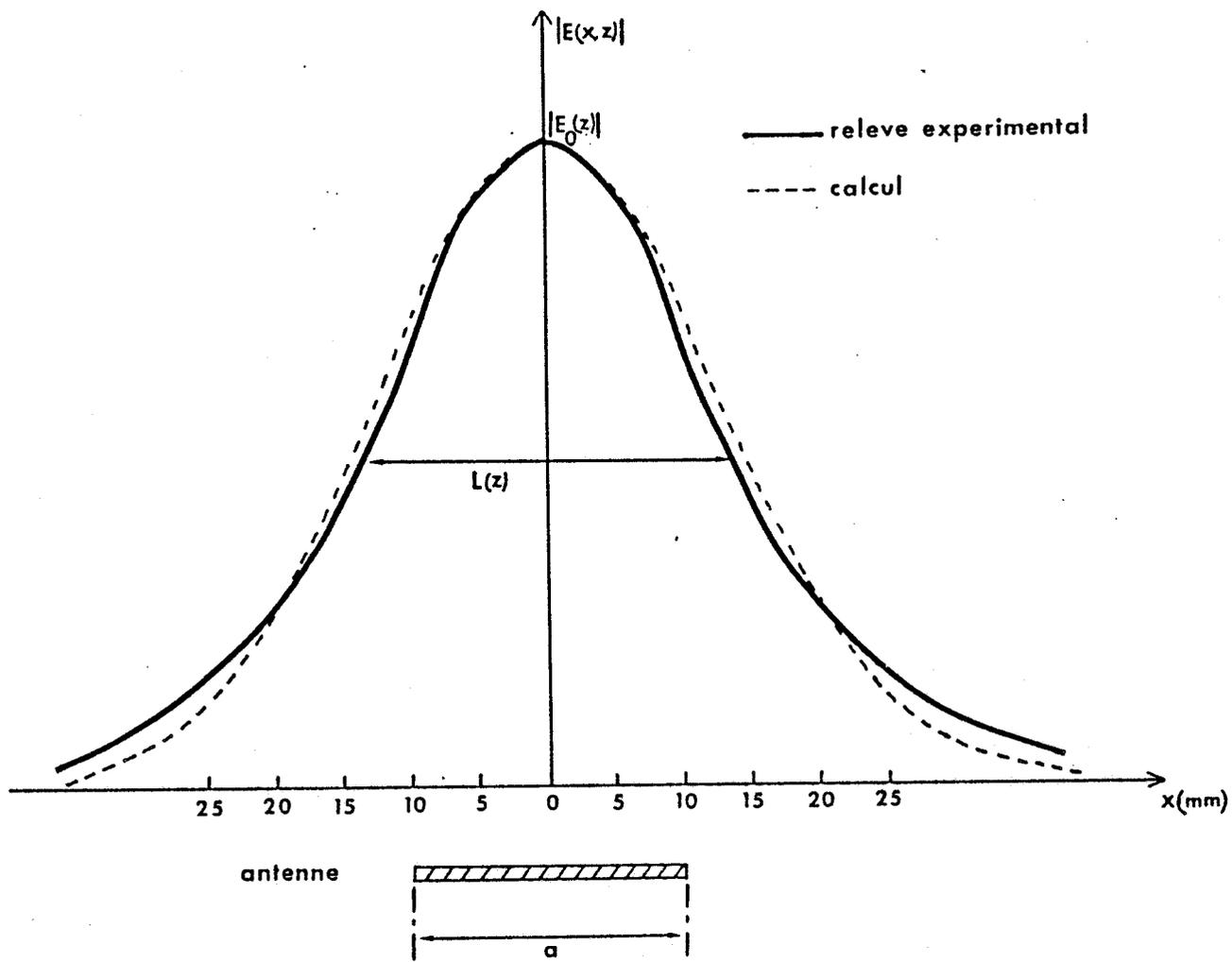


figure 13

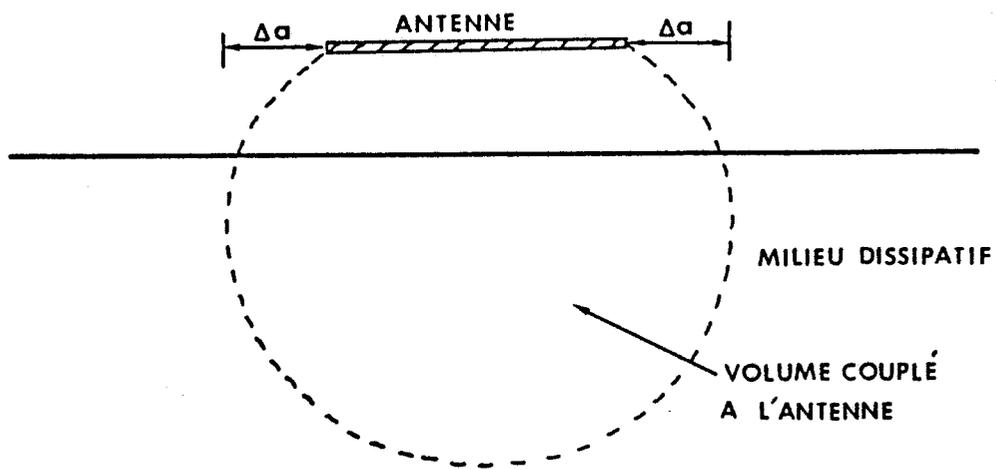


figure 14

Nous donnons à titre de comparaison le diagramme de rayonnement de l'antenne déterminé expérimentalement pour  $z = 15\text{mm}$  et celui calculé à partir de l'expression précédente ( *figure 13* ).

On constate que celle-ci donne une assez bonne approche pour les conditions d'utilisation adoptées.

### 3.1.2 Calcul de la puissance totale captée par l'antenne

Les expressions des coefficients de réflexion et de transmission utilisés dans le cas du modèle unidimensionnel sont toujours valables. Par contre, les expressions des puissances captées par l'antenne et provenant des différents milieux doivent tenir compte maintenant du diagramme de rayonnement de l'antenne.

Nous avons donc une intégration sur la largeur de l'antenne des puissances émises par les différents milieux, pondérées par ce diagramme de rayonnement.

En fait l'antenne présente un lobe de rayonnement dans lequel une partie de la puissance émise par les milieux latéraux proches, intervient dans le bilan de la puissance totale captée. Le volume couplé à l'antenne présente l'allure donnée *figure 14* :

Etant donné que les structures étudiées présentent une épaisseur de l'ordre du centimètre, que l'antenne est placée à 2 cm de la structure et compte tenu de l'évolution de la largeur à mi-hauteur du lobe de rayonnement en fonction de la distance; la valeur du paramètre  $\Delta a$  a été fixé à 1 cm.

Ainsi, l'intégration de la puissance captée s'effectue non pas sur la largeur "a" de l'antenne mais sur une largeur "a + 2 $\Delta a$ ". Nous avons vérifiés par calcul que pour une valeur  $\Delta a > 1$  cm le pourcentage de puissance captée en plus était négligeable.

#### 3.1.2.1 Puissance captée par l'antenne dans le cas général

La puissance captée par l'antenne et provenant d'un milieu j s'écrit alors:

$$P_j = 2 \alpha_j k \Delta f \left| T_{j0} \right|^2 \int_{(-\Delta a - \frac{a}{2})}^{(\Delta a + \frac{a}{2})} \int_0^{z_j} \left| \frac{e^{-\gamma_j z} + R_{jm} e^{-\gamma_j (2l_j - z)}}{1 - r_{ji} R_{jm} e^{-2\gamma_j l_j}} \right|^2 \left| e^{-C(z) x^2} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_j^*} \right| T(x, z) dz dx$$

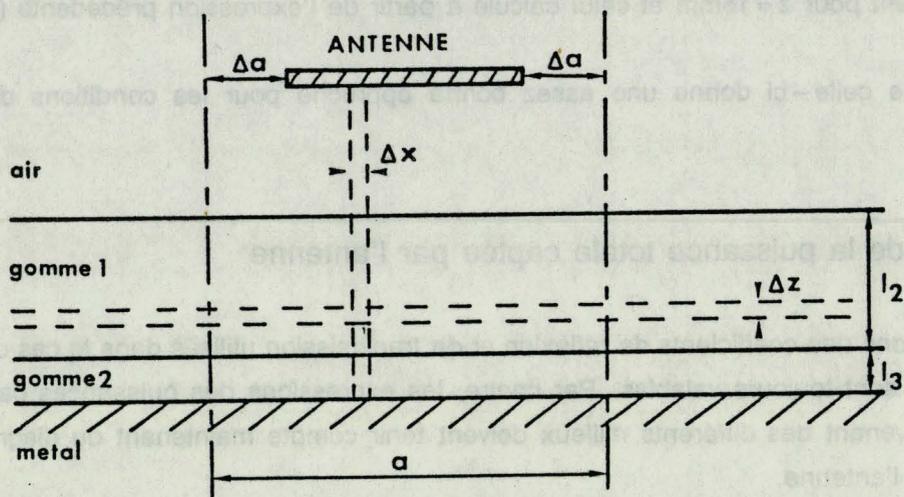


figure 15

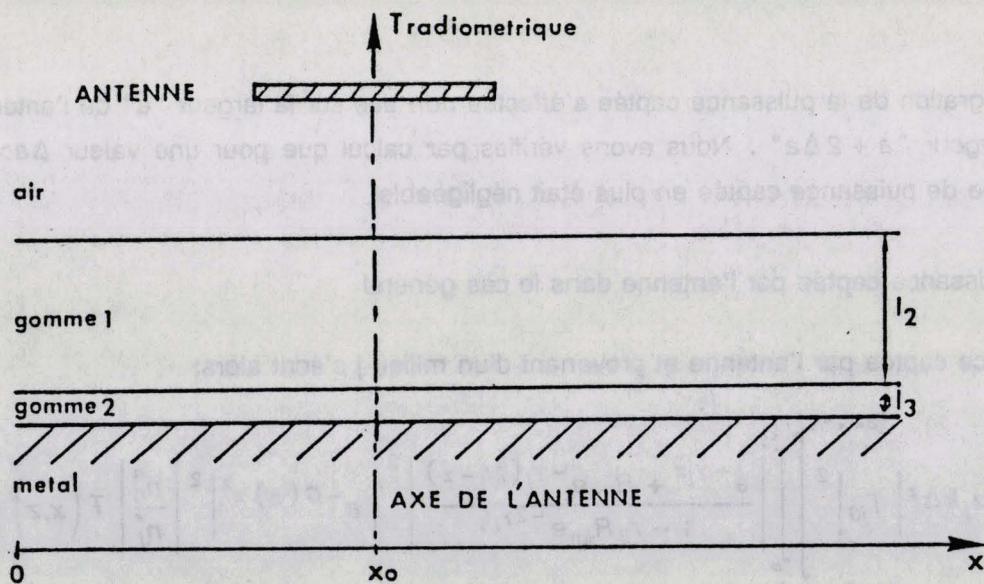


figure 16

### 3.1.2.2 Cas particulier de la structure étudiée

Pour notre structure nous obtenons les expressions suivantes des puissances:

$$P_1 = 2 \alpha_1 k \Delta f \left| t_{10} \right|^2 \int_{(-\Delta a - \frac{\alpha_1}{2})}^{(\Delta a + \frac{\alpha_1}{2})} \int_0^{l_1} \left| \frac{e^{-\gamma_1 z} + R_{13} e^{-\gamma_1 (2l_1 - z)}}{1 - r_{10} R_{13} e^{-2\gamma_1 l_1}} \right|^2 \left| e^{-C(z) x^2} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_1^*} \right| T(x, z) dz dx$$

$$P_2 = 2 \alpha_2 k \Delta f \left| T_{20} \right|^2 \int_{(-\Delta a - \frac{\alpha_2}{2})}^{(\Delta a + \frac{\alpha_2}{2})} \int_0^{l_2} \left| \frac{e^{-\gamma_2 z} + R_{24} e^{-\gamma_2 (2l_2 - z)}}{1 - r_{21} R_{24} e^{-2\gamma_2 l_2}} \right|^2 \left| e^{-C(l_1 + z) x^2} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_2^*} \right| T(x, z) dz dx$$

$$P_3 = 2 \alpha_3 k \Delta f \left| \frac{e^{-\gamma_2 l_2} T_{20} t_{32}}{1 - r_{21} R_{24} e^{-2\gamma_2 l_2}} \right|^2 \int_{(-\Delta a - \frac{\alpha_3}{2})}^{(\Delta a + \frac{\alpha_3}{2})} \int_0^{l_3} \left| \frac{e^{-\gamma_3 z} + r_{34} e^{-\gamma_3 (2l_3 - z)}}{1 - r_{32} r_{34} e^{-2\gamma_3 l_3}} \right|^2 \left| e^{-C(l_1 + l_2 + z) x^2} \right|^2 \left| \frac{n_0^*}{n_3^*} \right| T(x, z) dz dx$$

### 3.1.3 Traitement informatique des calculs

Comme dans le cas du modèle unidimensionnel, chaque milieu est décomposé en tranches élémentaires de largeur  $\Delta z = 10^{-4}$  mètres. Mais cette fois, on décompose latéralement le volume couplé à l'antenne en tranches  $\Delta x$  de 1mm ( *figure 15* ).

On calcule la somme des puissances captées par l'antenne provenant des différents milieux sur une tranche  $\Delta x$ . On somme ensuite les puissances captées provenant de chaque tranche  $\Delta x$  sur la largeur  $L = (a + 2\Delta a)$ , en tenant compte du diagramme de rayonnement. On obtient ainsi la puissance totale captée.

#### 3.1.3.1 Méthode de simulation utilisée

Elle est basée sur le même principe que dans le cas du modèle unidimensionnel. A chaque tranche  $\Delta x$  est associée une température de surface  $T_s(x)$  et la température radiométrique considérée correspond à celle qui est associée à la position de l'axe de l'antenne en  $x_0$  ( *figure 16* ). Les mesures par thermocouples ont permis de mettre en évidence une évolution très différente de la température au niveau du miroir métallique suivant que l'on considère une structure lisse ou sculptée. Nous avons donc distingué ces 2 cas:

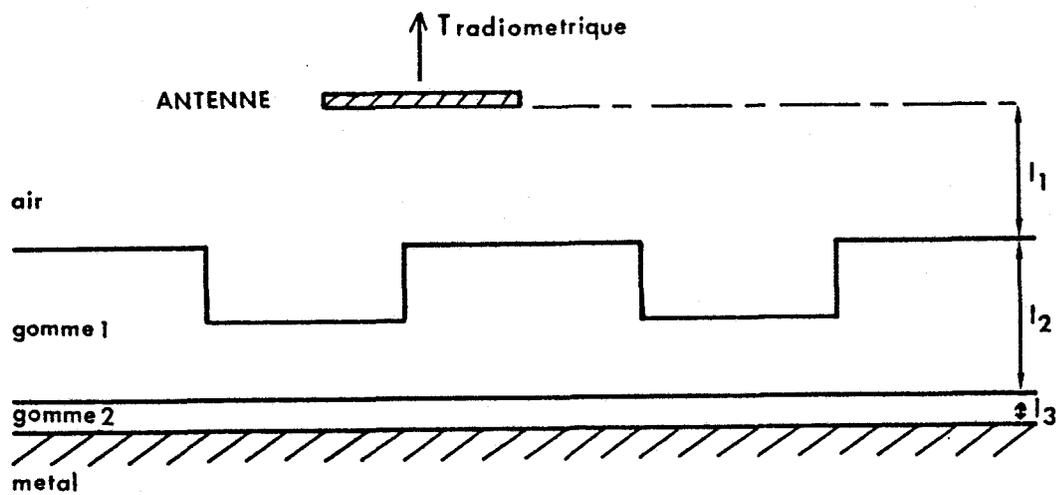


figure 17

PROFIL GEOMETRIQUE DE SURFACE DU PNEU

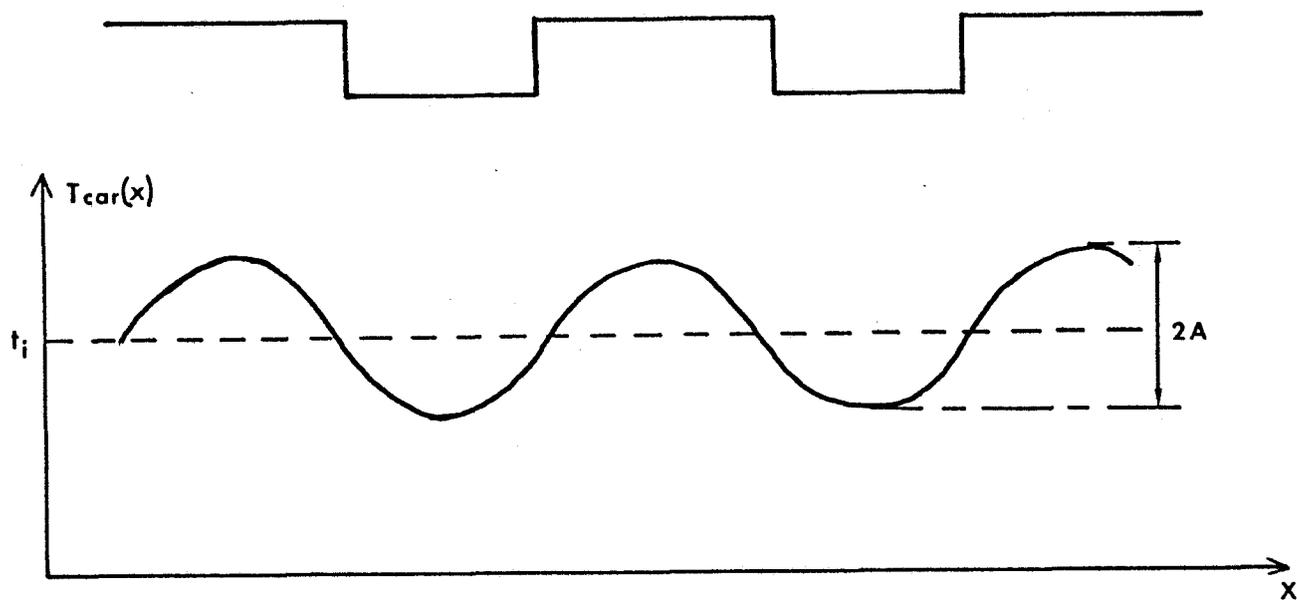


figure 18

### 3.1.3.2 cas du pneu lisse

D'après les relevés expérimentaux, la température au niveau du miroir métallique peut être considérée constante sur toute la largeur d'intégration ( $a + 2\Delta a$ ). Ainsi chaque tranche  $\Delta x$  présente la même température au niveau du miroir ( $T_{car}(x) = \text{constante}$ ).

Connaissant la température de surface et le profil d'évolution de la température à l'intérieur de la structure; pour une valeur  $T_{car}(x)$  donnée, une répartition est calculée pour chaque tranche  $\Delta x$  intervenant dans le lobe de rayonnement de l'antenne.

La somme des puissances captées provenant de ces diverses tranches est effectuée et à celle-ci est associée une température radiométrique grâce à un étalonnage théorique préalable, dont le principe est analogue à celui du modèle unidimensionnel.

Celle-ci est comparée à la température radiométrique déterminée expérimentalement et les ajustements des profils sont réalisés jusqu'à ce que l'on ait :  $\left| Trad_{calculée} - Trad_{mesurée} \right| \leq 0.05^\circ C$

A la fin des calculs, le résultat retenu et stocké pour le tracé du profil, correspond à la répartition de température dans la tranche  $\Delta x$  située dans le prolongement de l'axe de l'antenne ( *figure 16* ).

### 3.1.3.3 Cas du pneu sculpté

La méthode utilisée est la même que précédemment, en tenant compte que les longueurs  $l_0$  et  $l_1$  varient suivant la tranche  $\Delta x$  considérée ( *figure 17* ).

En ce qui concerne la température au niveau du miroir métallique; celle-ci n'est plus supposée constante, mais on considère qu'elle présente une évolution sinusoidale ( *figure 18* ) du type :  $T_{car}(x) = T_i + A \sin(x)$  avec  $T_i = \text{constante}$  que l'on va ajuster lors des calculs de profils et  $A = 3.5$ .

## 3.2 Résultats obtenus

Dans le cas du pneu lisse, en utilisant un modèle bidimensionnel nous avons calculé le profil thermique qui s'établit à l'intérieur de la gomme de caoutchouc constituant la bande de roulement ( *figure 19* ).

Nous constatons que le profil calculé, linéaire ou parabolique, passe assez loin des points expérimentaux. Nous avons donc essayé de prendre en compte d'autres phénomènes en vue d'améliorer le modèle.

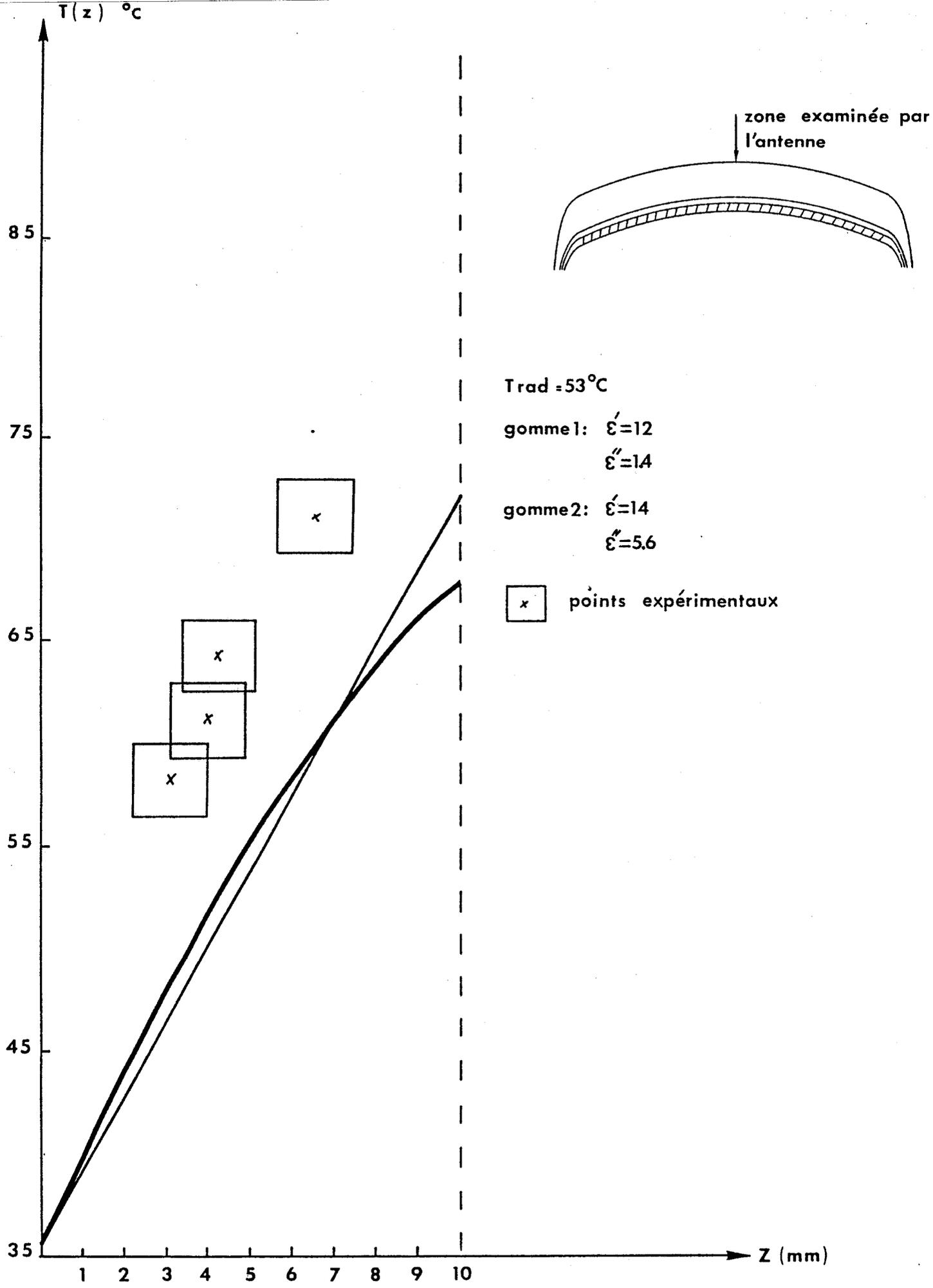


figure 19

### 3.2.1 Prise en compte de phénomènes supplémentaires

#### 3.2.1.1 Atténuation liée à la présence d'une lame d'air

Bien que l'air présente de très faibles pertes, celles-ci viennent néanmoins atténuer les signaux d'origine thermique émis par la structure. De plus l'air (étant un milieu faiblement dissipatif) émet également un rayonnement d'origine thermique.

Les pertes subies à travers cette lame d'air sont fonction de l'humidité et des particules en suspension qui peuvent être relativement nombreuses en milieu industriel.

- Expression du gradient de température dans la tranche d'air:

La surface du pneu étant portée à une température supérieure de plusieurs dizaines de degrés au dessus de la température ambiante, il s'établit un profil thermique dont l'évolution est déterminée en résolvant l'équation de transfert de chaleur:

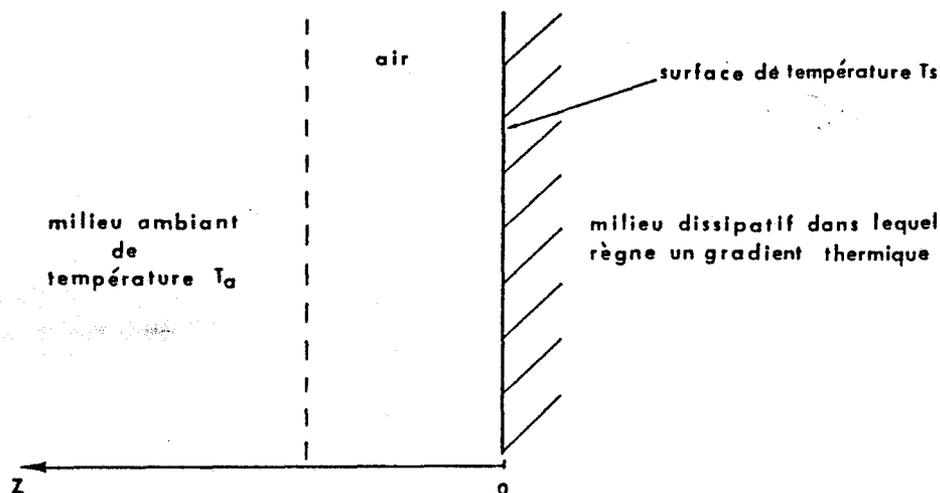
$$\frac{\delta T(z)}{\delta z} = \frac{H}{Kl} [T(z) - T_a]$$

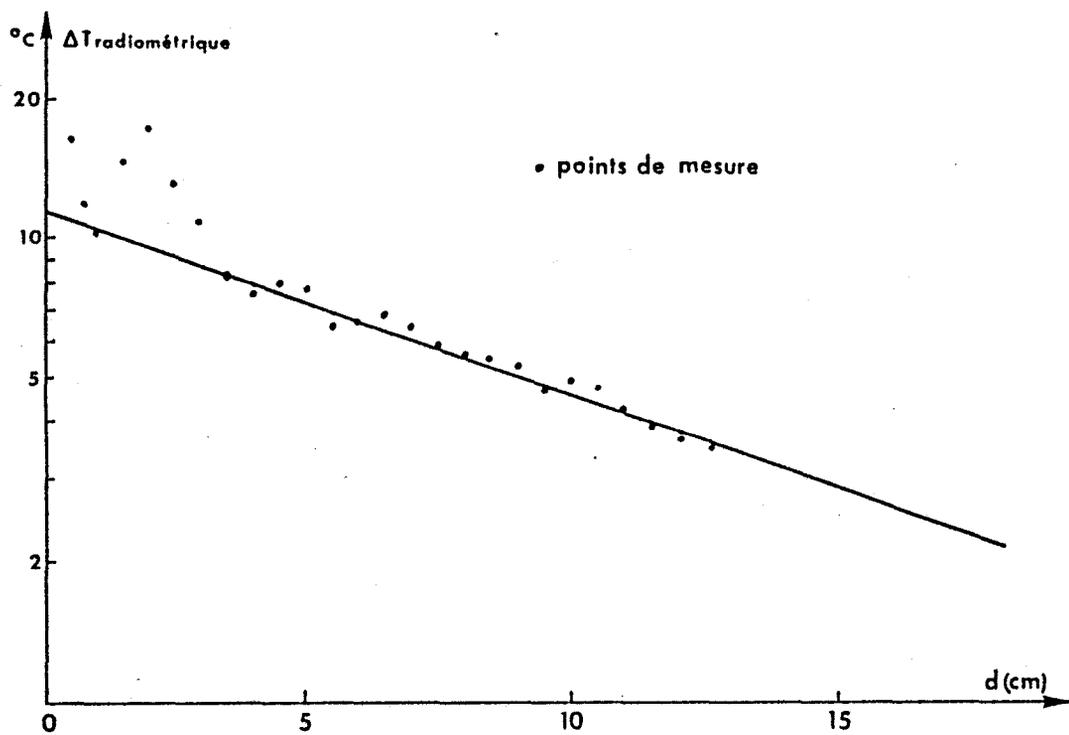
avec  $Q = -Kl \frac{\delta T(z)}{\delta z}$  : chaleur reçue en un point d'abscisse  $z$  provenant des couches sous-jacentes.

$Q = H [T_a - T(z)]$  : chaleur perdue par convection.

La résolution de cette équation nous donne:

$$T(z) = (T_s - T_a) e^{-\frac{H}{Kl}z} + T_a$$





$\Delta T_{\text{radiométrique}}$ , correspond à l'écart de température radiométrique entre la mesure faite face à la cuve et celle faite en milieu ambiant.

figure 21

H : coefficient de transfert de chaleur combiné. Ce coefficient dépend de la vitesse de roulement du pneu.

Kt : conductivité thermique de l'air ( $Kt = 0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ )

- Détermination expérimentale de l'atténuation dans l'air:

L'antenne est placée face à une cuve contenant de l'eau portée à 61 °C ( figure 20 ).

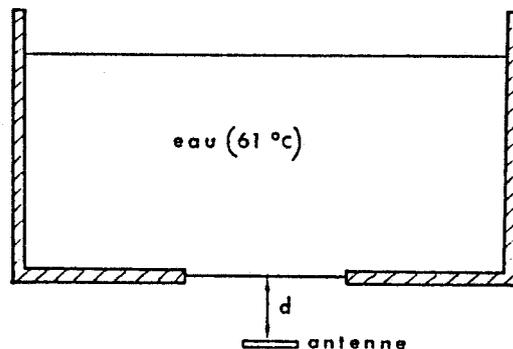


figure 20

Cette cuve est suffisamment grande, pour que l'on puisse considérer que l'antenne se trouve face à un milieu semi - infini, lorsque la distance "d" varie de 0 à une dizaine de centimètres.

On relève alors la température radiométrique ( à l'aide d'un radiomètre non basé sur une méthode de zéro) en fonction de la distance "d"; ce qui donne alors une évolution de la puissance captée en fonction de l'épaisseur de la tranche d'air ( figure 21 ).

Dans les 5 premiers centimètres, on retrouve une évolution très irrégulière comme dans le cas des mesures du coefficient S11.

On constate bien que lorsque  $d > 5 \text{ cm}$ , les problèmes dus à l'adaptation ont disparu et l'on observe une diminution régulière du signal capté due aux pertes subies dans la tranche d'air.

Ces pertes peuvent être prises en compte dans les calculs de profils en, introduisant une valeur de  $\epsilon''_{air}$  déterminée à partir de ces relevés expérimentaux, qui nous ont donné :  $\epsilon''_{air} = 10^{-3} \text{ N/m}$ .

Evidemment, ce n'est qu'une mesure assez grossière qui est sujette à de nombreuses erreurs.

Les calculs tenant compte de ces pertes donnent une augmentation de la température au niveau du miroir de l'ordre de 2 °C. L'air intervient donc peu dans des conditions normales.

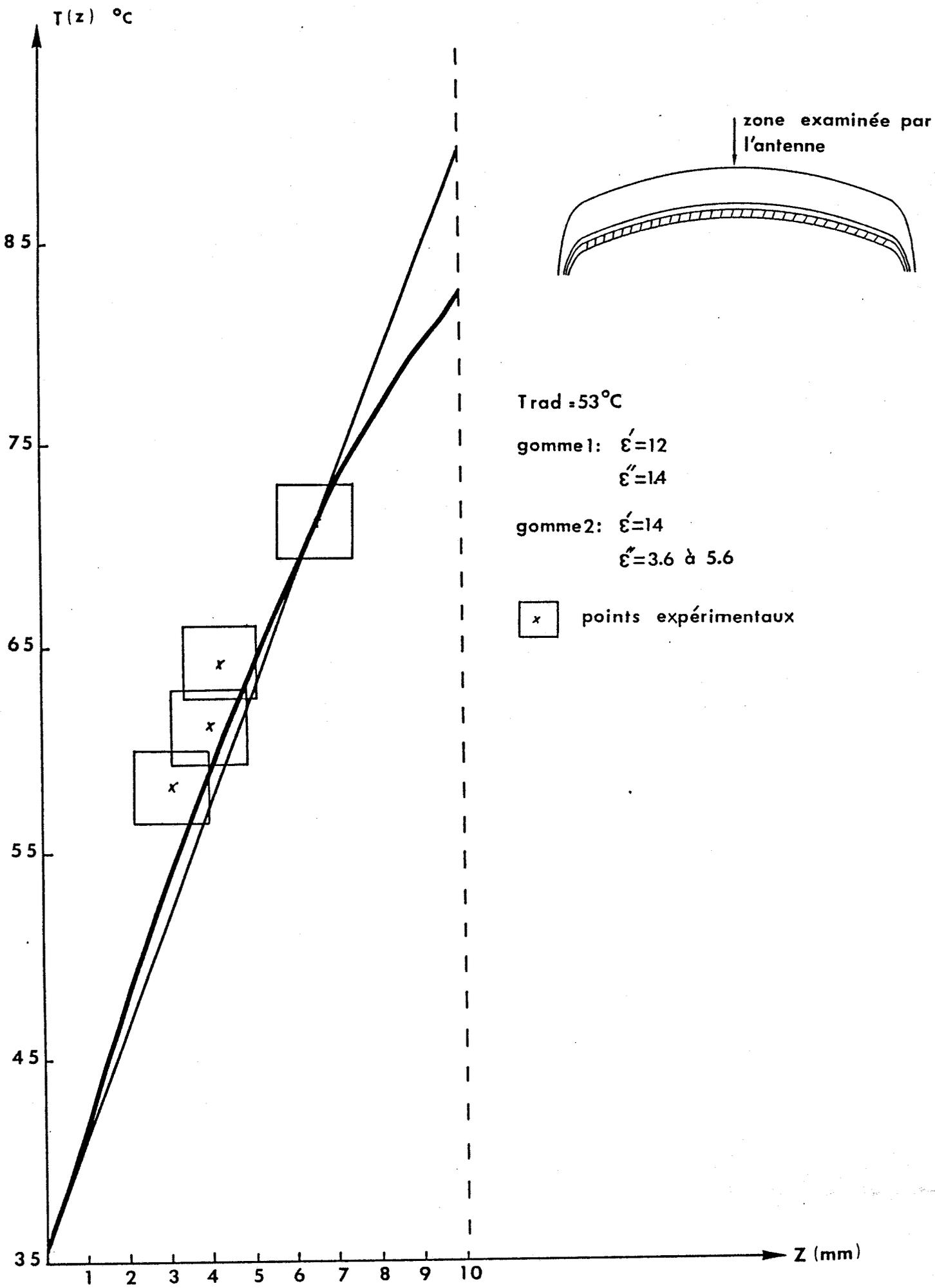


figure 22

### 3.2.1.2 évolution des caractéristiques diélectriques en fonction de la température

Des mesures de permittivité sur différentes gommés, pour une température variant de 20°C à 100°C montrent que les évolutions de  $\epsilon'$  et  $\epsilon''$  peuvent être très différentes suivant le type de gomme utilisée.

Nous avons donc tenu compte de cette évolution des caractéristiques diélectriques en fonction de la température. Nous obtenons alors les résultats suivant:

#### - Cas du pneu lisse ( figure 22 ):

Nous constatons que les profils calculés passent par les points expérimentaux. Ceci montre donc qu'il est nécessaire d'avoir une très bonne connaissance des valeurs et évolutions des permittivités diélectriques des différentes gommés utilisées.

#### - Cas du pneu sculpté:

Etant donné que la température à l'intérieur de la structure varie suivant l'axe transverse, les permittivités vont également varier.

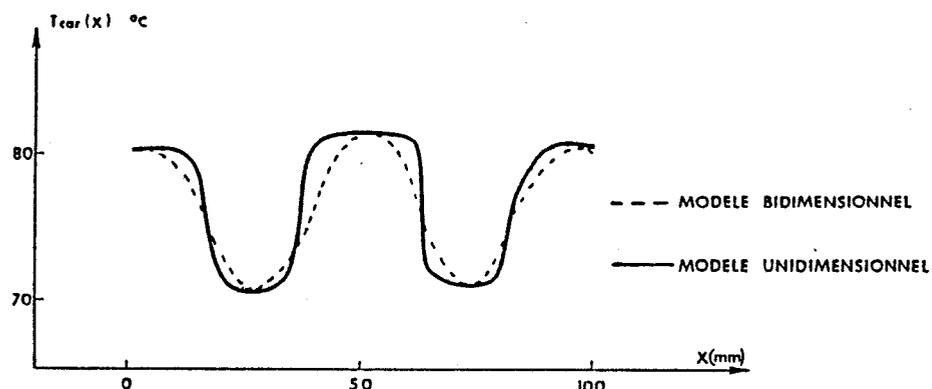
Par exemple, pour la gomme 2 située près du miroir métallique  $\epsilon''$  passe de 4 au niveau d'un creux à 3.6 au niveau d'une bosse. Il faut donc tenir compte de cette variation des permittivités des différents milieux situés dans le lobe de rayonnement de l'antenne.

A titre d'exemple, nous donnons ( figure 23 ) les profils calculés au niveau d'un creux lorsque l'on considère  $\epsilon'' = 3.6$  et  $\epsilon'' = 4$ . Nous constatons que les points expérimentaux se situent bien entre les profils calculés pour ces 2 valeurs extrêmes.

### 3.2.2 Comparaison entre le modèle unidimensionnel et bidimensionnel

Lorsque l'antenne est située face à une zone du pneumatique où les épaisseurs des différents milieux sont constantes, nous observons des évolutions des profils thermiques relativement proches.

Par contre, nous constatons l'intérêt du modèle bidimensionnel lorsque l'antenne est placée entre un creux et une bosse.



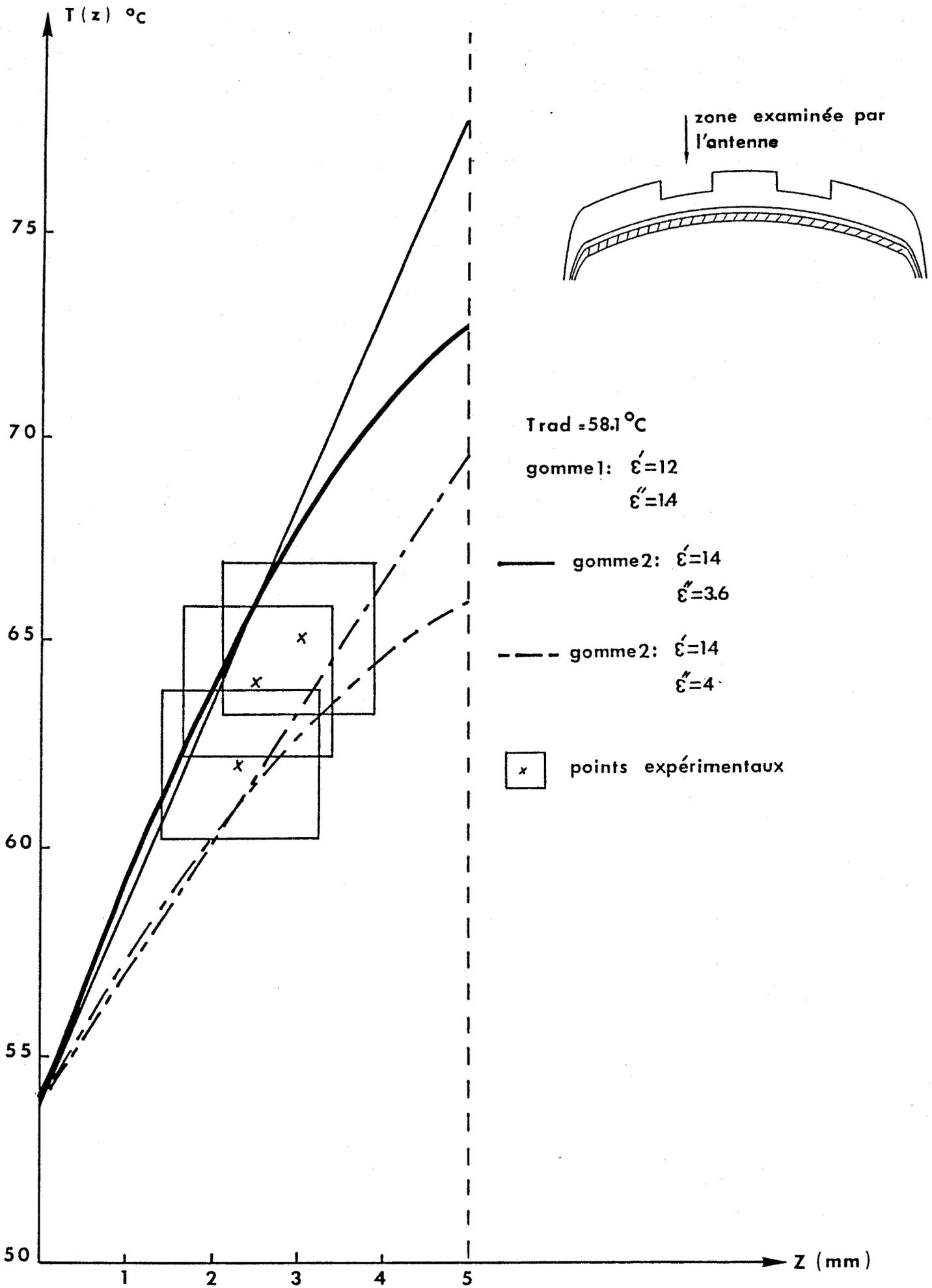


figure 23

## Conclusion

Dans un premier temps, nous avons mis en évidence certains problèmes pratiques, lors de mesures radiométriques effectuées à distance sur un pneumatique en roulement.

Ces problèmes ont été résolus en analysant un certain nombre de mesures expérimentales. Ce qui nous a permis d'optimiser la distance antenne - milieu pneumatique et de déterminer divers paramètres nécessaires aux calculs de reconstruction de profils thermiques.

Par un calcul approché du diagramme de rayonnement de l'antenne et par des mesures du coefficient d'atténuation en champ dans les milieux étudiés; nous avons montré qu'à partir d'un modèle simple ne prenant en compte que des calculs effectués en mode TEM, il est possible de déterminer les profils thermiques s'établissant dans un pneumatique en roulement.

Ces calculs nécessitent la connaissance de la température de surface et radiométrique, mais également une très bonne connaissance des constantes diélectriques des milieux en fonction de la température. En fait, pour réaliser une bonne approche des profils, il est nécessaire de connaître les permittivités diélectriques en chaque point de la structure étudiée.

Cette méthode de reconstruction de profils thermiques a été implantée en site industriel et donne entière satisfaction aux utilisateurs.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Fabre J.J

Méthodes de calcul de signaux thermiques et possibilité de nouvelles utilisations de la thermographie microonde.

Thèse de troisième cycle, Lille, 1982.

[2] Bera J

Réalisation et caractérisation d'antennes plaquées de type patch à éléments multiples: Applications à la radiométrie microonde.

D.E.A JUILLET 1987

[3] Robillard M

Contribution à l'étude des sondes et à la reconnaissance d'objets thermiques par thermographie microonde (T.M.O)

Thèse de troisième cycle, Lille, 1981

[4] Plancot M

Contribution à l'étude théorique, expérimentale et clinique de l'hyperthermie microonde contrôlée par radiométrie microonde.

Thèse troisième cycle, Lille, 1983

[5] Vanloot D, Bera J, Ledee R, Chive M

Système radiométrique à méthode de zéro automatique pour la mesure de température sans contact.

J.N.M 1987 (NICE)

[6] Vanloot D

Contribution à l'étude et à la réalisation d'un dispositif de traitement du signal optimum pour des systèmes radiométriques: Application au radiomètre à méthode de zéro automatique.

Thèse de Docteur Ingénieur, Lille, Mai 1987

[7] Fabre J.J, Dubois L, Chive M

Reconstruction de profils thermiques dans un pneumatique en roulement à partir des mesures de températures de surface et radiométriques.

Rapport de fin de contrat Michelin, Février 1988

Rapport confidentiel.

[8] Fabre J.J, Leroy Y

Thermal noise emission of a lossy material for a TEM propagation.

Electronics Letters, 28th May 1981, Vol 17, pp 376 - 377

[9] Plancot M, Prevost B, Fabre J.J, Chive M, Moschetto Y, Giaux G

Thermal dosimetry based on radiometry in multilayered media.

I.E.E.E 8th annual conf. E.M.B.S DALLAS - FORT WORTH 1986, pp 1429 - 1431

[10] Plancot M, Prevost B, Chive M, Fabre J.J, Ledee R, Giaux G

A new method for thermal dosimetry in microwave hyperthermia using microwave radiometry for temperature control.

INT . J. Hyperthermia, 1987, Vol 3, No 1, pp 9 - 19

[11] Chive M, Ledee R, Fabre J.J, Player E

Mesure de température des pneumatiques par radiométrie microonde.

J 101/74208 (Rapport interne C.H.S Michelin)

Rapport confidentiel.

