Les hyperfréquences et la mesure de l'humidité

Autor(en): **Gardiol, Freddy / Zürcher, Jean-François**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **108 (1982)**

Heft 4

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74640

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Les hyperfréquences et la mesure de l'humidité

par Freddy Gardiol et Jean-François Zurcher, Lausanne

1. Introduction et préliminaires

L'humidité contenue à l'intérieur de matériaux est une grandeur difficile à mesurer. Une méthode à laquelle on doit souvent avoir recours quand on veut des mesures précises consiste à extraire un échantillon du matériau, à le peser, puis à le sécher et à le peser à nouveau, la différence de poids donnant la quantité de matière volatile (eau) évacuée durant le séchage. Cette méthode est, par la force des choses, utilisable seulement lorsque des échantillons peuvent effectivement être prélevés. Elle ne permet notamment pas de déterminer la teneur en eau dans les parois de bâtiments, et encore moins de déduire le profil de distribution.

Or, dans les murs de bâtiments, la présence d'eau et plus particulièrement d'un gradient d'humidité est un sérieux facteur de dégradation. Les changements climatiques déplacent les profils d'humidité et de température et produisent des contraintes qui peu à peu affaiblissent la structure. Le résultat, bien connu sur les murs en molasse, est un décollement par plaques successives de la surface. Pour pouvoir mettre au point des méthodes efficaces de protection, il est essentiel d'abord de bien comprendre les mécanismes de dégradation, ce qui n'est possible que si l'on peut mesurer cette distribution d'humidité (sans détruire le mur!). A l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, le Laboratoire des matériaux pierreux s'intéresse tout particulièrement à ce problème dans le cadre de la protection de bâtiments historiques.

Il est bien connu que l'eau est une substance polaire, qui possède une permittivité importante. La présence d'eau, même en petites quantités, influence de façon significative le champ électrique. Cette présence peut de ce fait être détectée de façon indirecte par des mesures électriques. La permittivité de l'eau dépend de la fréquence et de la température (fig. 1), elle présente notamment une bande d'absorption dans les hyperfréquences (env. 300 MHz-300 GHz), centrée au voisinage de 22 GHz [1][1].

Deux méthodes fondamentalement différentes peuvent être envisagées pour mesurer l'humidité au moyen d'hyperfréquences: la transmission d'un signal à travers la paroi, ou sa réflexion par cette paroi. La mesure par transmission nécessite un émetteur et un récepteur, placés de part et d'autre de l'élément à mesurer (fig. 2). Le signal capté est comparé au signal émis, l'affaiblissement ainsi mesuré étant dû en partie à l'absorption dans le matériau, en partie aux réflexions sur les deux surfaces de séparation. Ces deux contributions sont difficiles à séparer en pratique. De plus, si l'humidité est distribuée de façon inhomogène, la mesure n'en donne qu'une valeur moyenne, mais non pas sa distribution spatiale.

La mesure par réflexion fait usage du principe du radar [2]: on compare le signal reçu au signal émis, le même élément (sonde, capteur) servant simultanément à l'émission et à la réception. Seul le signal réfléchi par la surface est mesuré: on n'a donc pas ici d'ambiguïté entre deux effets comme dans la méthode précédente. L'amplitude et la phase de la réflexion sont liées directement à la nature de la discontinuité, dépendant notamment de la permittivité du matériau, elle-même affectée par la teneur en eau. Des mesures préliminaires effectuées à la ligne fendue [3] ont montré qu'une très grande sensibilité peut être obtenue (fig. 3). Dans le cas particulier, la réflexion est presque nulle pour l'une des valeurs de l'humidité, ce qui augmente considérablement la précision de la mesure.

Les mesures à la ligne fendue sont toutefois fort longues et fastidieuses, difficiles à automatiser. Dans le cadre du projet, on a donc cherché à mettre au point un dispositif qui soit facile à utiliser en pratique.

2. L'humidimètre

Le choix du capteur, destiné à la mesure de l'humidité sur des surfaces planes, s'est porté sur une cavité résonnante ouverte (fig. 4). Il s'agit d'une section de ligne coaxiale, court-circuitée à une extrémité et ouverte à l'autre, longue d'un quart de longueur d'onde environ à sa fréquence de résonance choisie dans la bande des 2450 MHz (bande industrielle, scientifique et médicale ISM).

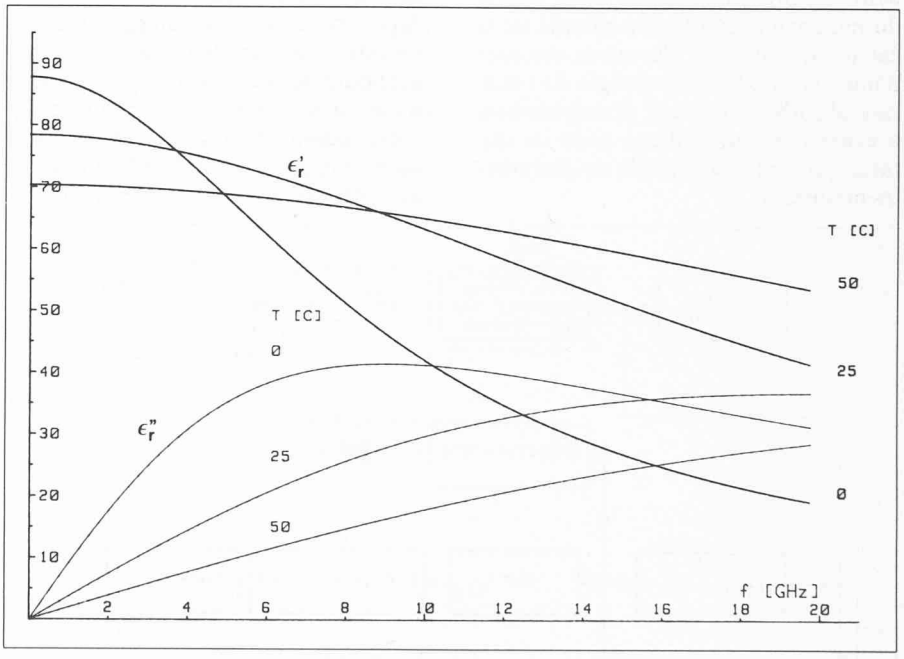

Fig. 1. — Partie réelle (ε_r') et imaginaire (ε_r'') de la permittivité complexe de l'eau en fonction de la fréquence et de la température.

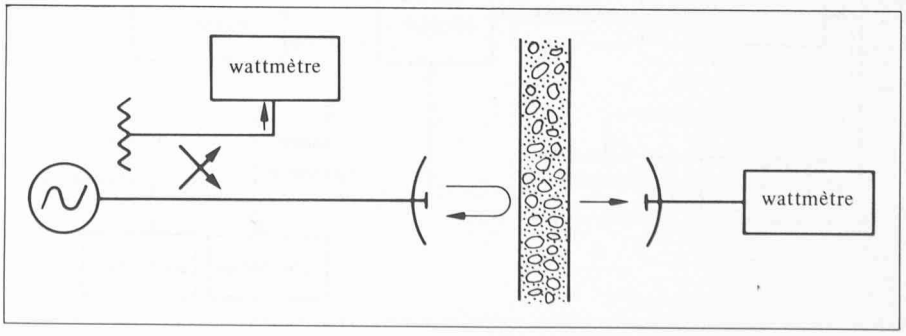

Fig. 2. — Dispositif de mesure en transmission.

[1] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

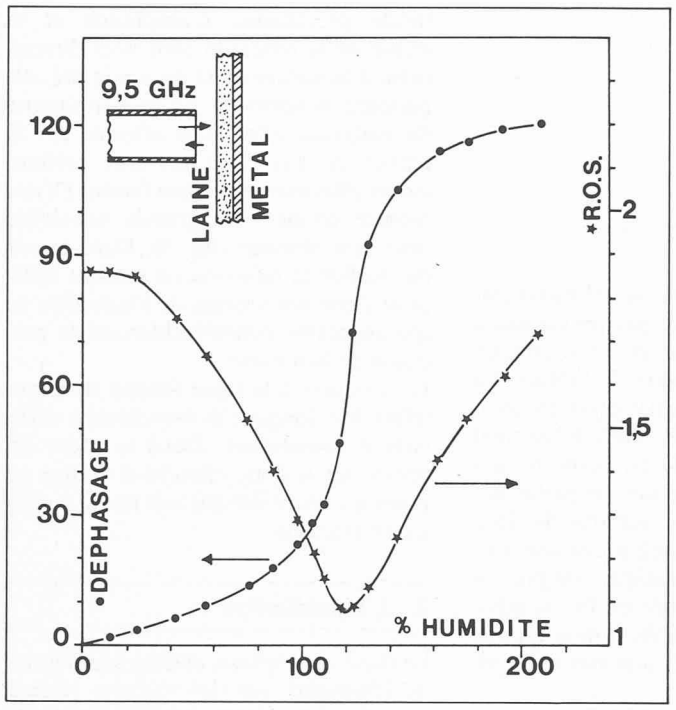

Fig. 3. — Réflexion mesurée dans un guide d'ondes de bande X (R.O.S. et déphasage) pour de la laine, en fonction de sa teneur en eau (en % du poids sec).

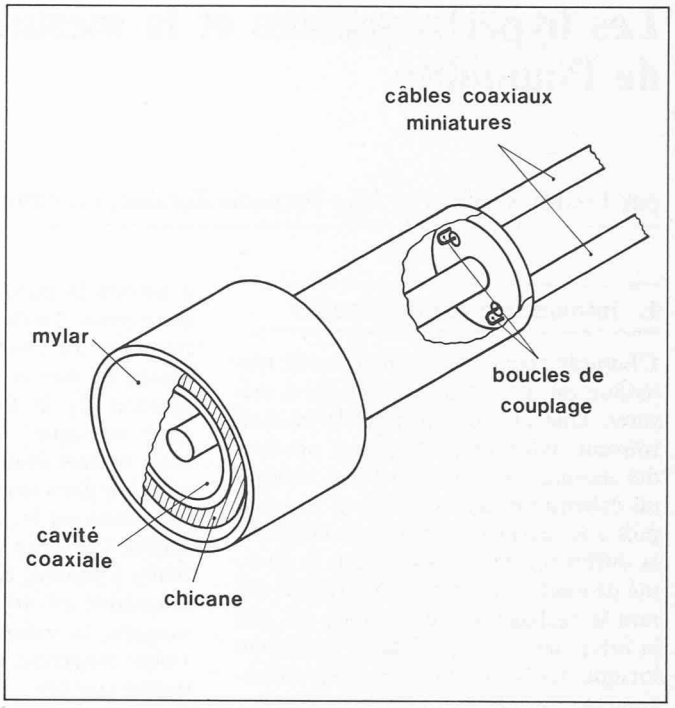

Fig. 4. — Cavité coaxiale ouverte utilisée pour la mesure de matériaux.

L'extrémité ouverte est placée en contact avec la surface plane du matériau à mesurer; la fréquence de résonance et le facteur de qualité sont tous deux modifiés, dépendant de la nature du matériau (perturbation externe de la cavité). La sonde est elle-même entourée d'une chicane (choke) chargée de matériau absorbant, qui sert principalement à éviter l'excitation d'une onde de surface, qui serait susceptible de perturber les mesures.

L'extrémité ouverte de la cavité est recouverte d'une feuille mince de matière synthétique (mylar), qui évite que de la poussière ou de l'humidité ne pénètrent dans la sonde. Deux boucles de couplage, l'une connectée à un générateur, la seconde à un détecteur, servent à l'alimentation de la cavité. L'ensemble de la cavité est monté dans une poignée par l'intermédiaire d'un cardan, et un ressort assure une pression uniforme sur la surface (plane) du matériau à mesurer [4].

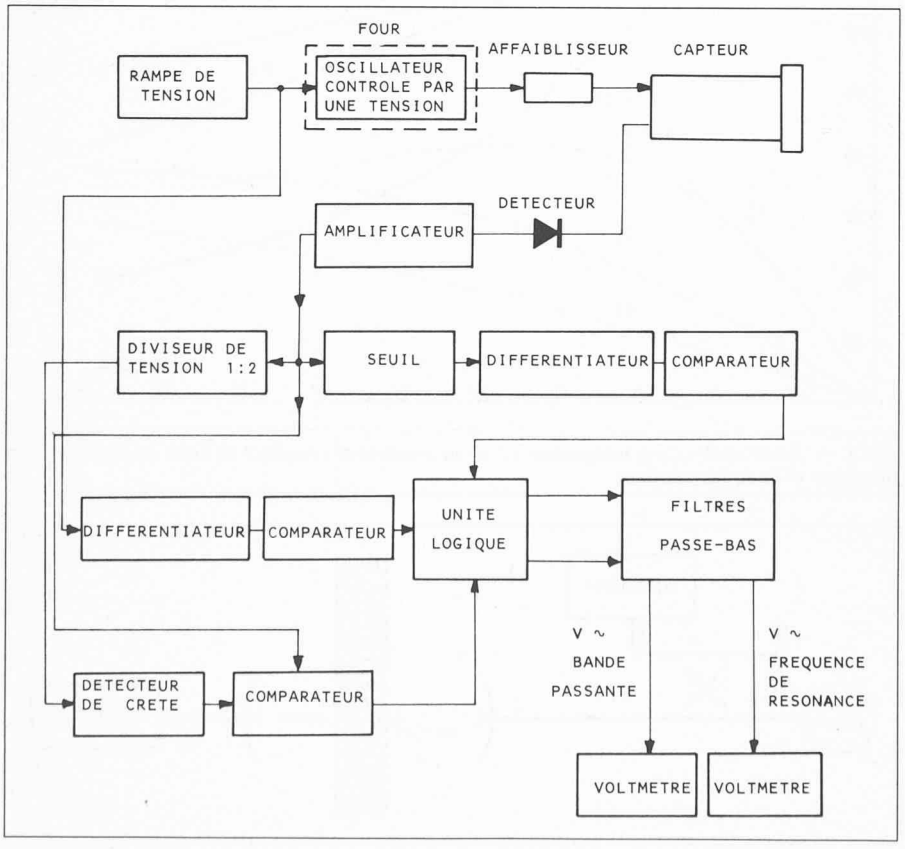

Fig. 5. — Principe de l'appareil automatique de mesure de cavités.

Il n'en reste pas moins que la mesure d'une cavité est, elle aussi, difficile et compliquée si l'on fait usage des méthodes classiques [5]. Un appareillage électronique spécialisé a donc été mis au point pour effectuer cette mesure de façon entièrement automatique (fig. 5). Un générateur d'hyperfréquences à balayage (transistor) fournit un signal, qui ne traverse la cavité que lorsque sa fréquence coïncide avec la résonance de celle-ci (filtre passe-bande à bande étroite). Le signal transmis est alors détecté, la fréquence de résonance de la cavité et son facteur de qualité étant déterminés par la position et par la largeur de la courbe de réponse. L'analyse est effectuée par un dispositif électronique. L'appareil ainsi mis au point est portable, facile à calibrer et d'un usage simple, même pour des personnes non initiées à la technique [6].

3. Calibrage et mesures

La fréquence de résonance et le facteur de qualité de la sonde sont liés de façon univoque à la permittivité du matériau, elle-même fonction de sa teneur en eau. Comme ces relations ne sont pas simples, on a d'abord eu recours à la méthode expérimentale pour les déterminer.

Plusieurs matériaux ont été mesurés, donnant lieu à des milliers de mesures [7]. Si l'effet de l'humidité peut effectivement être décelé, les premiers résultats ont été entachés d'une dispersion considérable et d'une mauvaise répétabilité. Ceci était dû, en partie tout au moins, à l'effet de la température, qui n'avait pas été contrôlée systématiquement pendant

les mesures. On peut voir l'influence de la température sur la permittivité de l'eau dans la figure 1. Cette influence se répercute sur la permittivité de mélanges comportant de l'eau. Dès que les mesures furent faites dans un environnement soigneusement contrôlé, les résultats devinrent plus répétitifs.

Pour calibrer la sonde, on a veillé à maintenir tous les paramètres aussi constants que possible, en ne faisant varier que la teneur en eau. La procédure à suivre est devenue fort élaborée et assez longue. Tout d'abord, un grand nombre d'échantillons furent découpés du même bloc de matériau, lui-même sélectionné soigneusement pour son homogénéité. Nous avons bénéficié pour cela des services du Laboratoire de matériaux pierreux de l'EPFL. Tous les échantillons ont la même orientation, pour éviter les erreurs dues à l'anisotropie. Les dimensions choisies pour les échantillons de molasse sont de 50 mm de diamètre et 25 mm d'épaisseur: elles résultent d'un compromis. Les dimensions doivent être suffisantes par rapport à la profondeur de pénétration du signal, mais pas trop grandes pour que le temps d'homogénéisation ne soit pas trop long. Tous les échantillons furent soigneusement polis pour assurer un contact étroit avec la sonde de mesure.

Les échantillons sont d'abord tous séchés sous vide (10 mm/Hg) à 100 °C pendant au moins une semaine. On considère qu'ils ont alors atteint le 0% d'humidité. Tous les échantillons sont alors pesés et numérotés. Certains d'entre eux sont conservés secs dans des bocaux en verre rodé en présence de dessicant. Les autres sont imprégnés d'une quantité d'eau calibrée, correspondant à une classe donnée d'humidité, puis enfermés dans des bocaux rodés. Tous les bocaux sont alors placés dans une pièce climatisée à 20 °C et 90% d'humidité relative et laissés là pour deux semaines au moins, permettant à l'eau de se répartir de façon homogène dans les échantillons.

Pour assurer une bonne stabilité du signal, l'appareil de mesure est enclenché au moins deux heures avant le début des mesures. La fréquence de résonance f_0 à vide et le facteur de qualité Q_0 à vide de la cavité sont mesurés, ils serviront de référence et de contrôle périodique pour l'appareil. Chaque bocal est alors ouvert, et trois mesures sont effectuées sur chacune des faces planes de l'échantillon, la moyenne des trois valeurs est retenue. Chaque échantillon est alors pesé, et en comparant avec son poids à sec on détermine sa teneur en eau moyenne. On peut alors tracer des courbes de calibrage, telles la figure 6 pour de la molasse. Elle représente la variation de la fréquence de résonance de la cavité lorsqu'on place la sonde sur l'échantillon, en fonction de la teneur en eau (rapport de poids). On voit que les points de mesure ainsi obtenus sont bien alignés dans le diagramme. En fait, on peut définir deux droites, l'une pour les faces supérieures, l'autre pour les faces inférieures. Cela signifie que la répartition de l'eau n'est pas uniforme, l'humidité est plus faible sur la face supérieure que sur la face inférieure, suite à l'effet de la gravité.

Les résultats de mesure sont bien reproductibles, à $\pm 0{,}5\%$ de la teneur en eau. Pour obtenir une telle précision, de nombreuses précautions ont été nécessaires, bon contact de la sonde sur le matériau à mesurer, contrôles fréquents de la sonde à vide (valeurs f_0 et Q_0), nettoyage éventuel de la fenêtre de mylar de la sonde. Pour ce matériau et dans la gamme d'humidité considérée, on peut admettre qu'il existe une relation linéaire.

La technique développée, bien qu'à première vue fort séduisante, présente bien des limitations: un calibrage comme celui décrit ci-dessus n'est valable que pour un matériau à une température. La procédure devrait être répétée pour tous les matériaux que l'on souhaite mesurer, à toutes les températures auxquelles les mesures seront effectuées... Ceci à moins qu'il ne soit possible de trouver par voie théorique la relation liant la teneur en eau à la variation de fréquence.

4. Etude théorique

Il ressort de la section précédente que la procédure de calibrage est longue et fastidieuse, que de plus elle ne donne que des indications partielles pour un matériau donné à une température donnée. On peut donc se demander s'il ne serait pas possible de la remplacer par une analyse théorique. En effet, la variation des paramètres de la cavité est liée à la permittivité complexe du matériau qui, elle, est liée à la teneur en eau.

La première de ces relations a été obtenue par voie théorique pour une ligne coaxiale ouverte [7]. Les champs dans la ligne coaxiale comportent une onde incidente, dans le mode TEM, et un en-

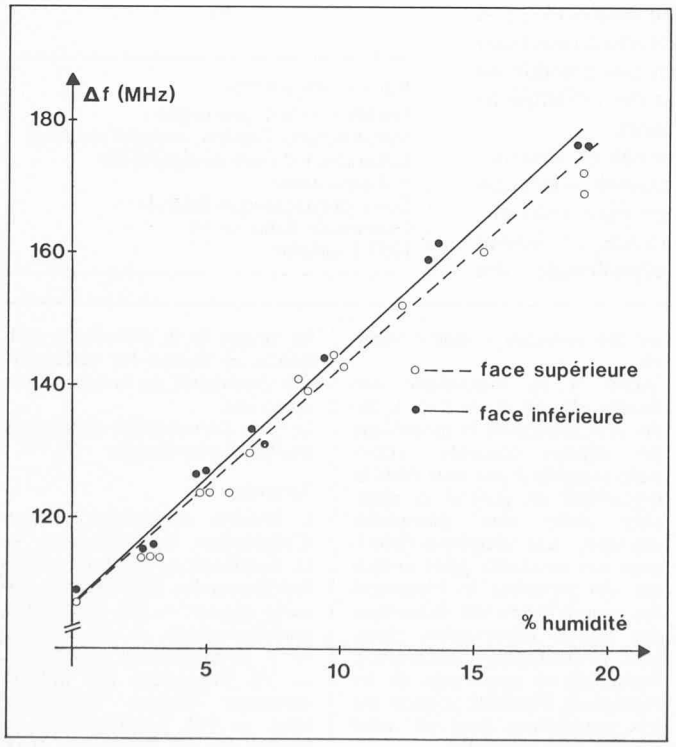

Fig. 6. — Courbe expérimentale de calibrage obtenue pour de la molasse.

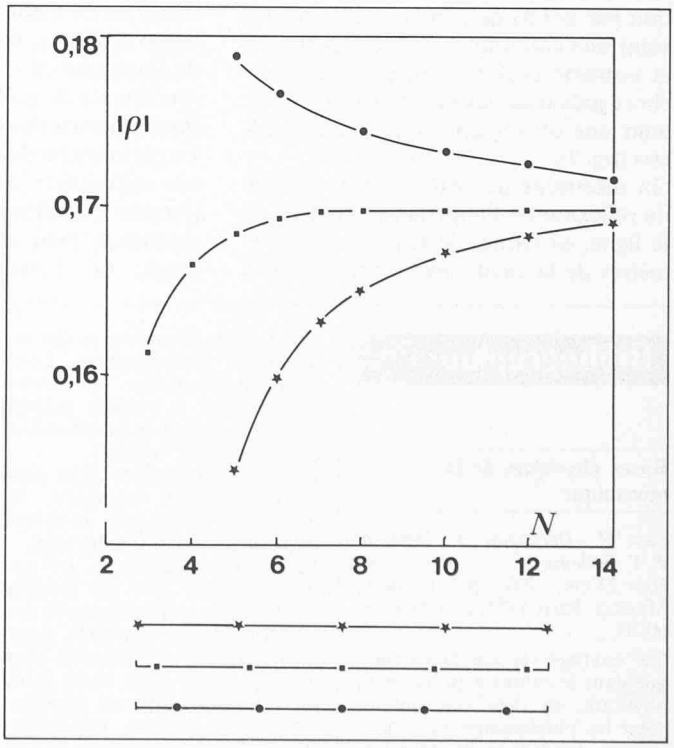

Fig. 7. — Convergence de la valeur calculée du facteur de réflexion en fonction du nombre de points et du positionnement de ces points (pour un cas particulier). L'exemple de positionnement correspond à N = 5.

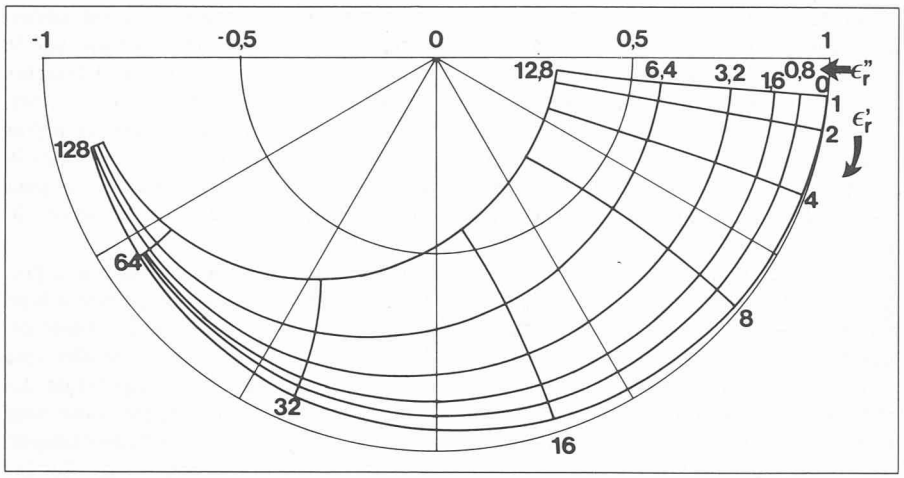

Fig. 8. — Diagramme polaire du facteur de réflexion d'un guide coaxial de type SR7 à 3 GHz en fonction de la permittivité relative complexe $\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ du matériau placé devant l'ouverture du guide.

semble de réflexions dans le mode TEM et les modes supérieurs excités par l'ouverture. Suite à la symétrie axiale de la structure, ces derniers font tous partie du sous-ensemble des modes TM_{on}. Dans le matériau, les champs rayonnés par la ligne ouverte sont déterminés en faisant usage de la théorie des ouvertures. On doit toutefois ici déterminer le champ proche, de sorte que la théorie du rayonnement mise au point pour l'étude des antennes n'est pas suffisante. Les composantes tangentielles des champs électrique et magnétique doivent être continues dans le plan de l'ouverture. On obtient ainsi une relation intégrale, dont l'intégrant comporte une somme infinie de fonctions de Bessel de première et de seconde espèce. La série est tronquée pour qu'on puisse effectuer les calculs par voie numérique. On fait usage d'une méthode de collocation par points qui, en l'occurrence, devient une collocation par cercles suite à la symétrie circulaire du problème. Un choix judicieux des rayons permet d'obtenir une convergence rapide des résultats (fig. 7).

On détermine de cette façon le facteur de réflexion ou l'impédance d'entrée de la ligne, en termes de laquelle les paramètres de la cavité résonnante peuvent être déterminés à leur tour. Connaissant ces derniers, on peut trouver la permittivité complexe du matériau (fig. 8).

Il reste encore à trouver la relation liant la permittivité à la teneur en eau et, éventuellement, à d'autres paramètres du matériau. C'est là un problème relativement complexe de physique des matériaux, qui n'est malheureusement pas près d'être résolu dans le cas général.

5. Conclusion

Une méthode simple à mettre en œuvre pour mesurer les propriétés diélectriques des matériaux a été développée. Le capteur utilisé est une cavité résonnante, dont une extrémité ouverte est placée en contact avec le matériau. Celui-ci doit posséder au moins une face plane pour qu'on puisse effectuer la mesure. La méthode est de nature non destructive, son usage peut donc être étendu à beaucoup de situations où il n'est pas possible ou souhaitable de prélever des échantillons pour effectuer des mesures.

La permittivité du matériau est déterminée en fonction des paramètres mesurés (facteur de réflexion en ligne coaxiale, résonance pour une cavité) en faisant usage de l'étude approfondie des champs électromagnétiques au voisinage de l'ouverture.

La permittivité est à son tour liée à la teneur en eau, grandeur physique que l'on souhaite déterminer dans beaucoup de cas pratiques. En l'absence d'une théorie générale liant la permittivité à la teneur en eau, il est pour l'instant nécessaire de déterminer pour chaque matériau cette dépendance par calibrage.

Bibliographie

[1] STOGRYN, A.: *Equations for calculating the dielectric constant of saline water*, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, vol. MTT-19, pp. 733-736, août 1971.

[2] GARDIOL, F.: *Hyperfréquences*, vol. XIII du Traité d'électricité de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Editions Georgi, Saint-Saphorin, 1981.

[3] RAMACHANDRAIAH, M. S., GARDIOL, F.: *A nonresonant method for the measurement of water content in materials*, Microwave Power Symposium, Ottawa, Canada, pp. 38-41, mai 1972.

[4] RAMACHANDRAIAH, M. S.: *A microwave probe for measuring moisture content in buildings and materials*, Journal of Microwave Power, vol. 11, pp. 196-198, juin 1976.

[5] GINZTON, E. L.: *Microwave Measurements*, McGraw Hill, New York 1957.

[6] NEY, M., GARDIOL, F.: *Mesure automatique des cavités résonnantes en hyperfréquences*, Bull. Association suisse des électriciens (ASE-SEV), vol. 68, n° 2, pp. 85-88, janvier 1977.

[7] MOSIG, J. R., BESSON, J. CL., GEX-FABRY, M., GARDIOL, F.: *Reflection of an open-ended coaxial line and applications to nondestructive measurement of materials*, IEEE Transactions Instrum. Measurement, vol. IM-30, n° 1, pp. 46-51, mars 1981.

Adresse des auteurs:
Freddy Gardiol, professeur
Jean-François Zurcher, premier assistant
Laboratoire d'électromagnétisme
et d'acoustique
Ecole polytechnique fédérale
Chemin de Bellerive 16
1007 Lausanne

Bibliographie

Bases physiques de la mécanique

par *M. Decuyper, J. Deutsch, P. Y. Willems.* — Un vol. 16 × 24 cm, 232 p., Editions Masson, Paris 1981, prix broché: 60 ffr.

Cet ouvrage replace la mécanique dans le contexte global de la physique, en détaillant notamment les phénomènes physiques qui sous-tendent les modèles fréquemment utilisés en mécanique. Ainsi, les deux premiers chapitres dégagent, à partir de la structure de la matière et des interactions fondamentales, l'origine microscopique de divers phénomènes à modèle macroscopique, comme le frottement et la viscosité par exemple.

Deux domaines sont alors plus particulièrement examinés: la gravitation d'une part, la mécanique des fluides, d'autre part.

En ce qui concerne la gravitation, l'auteur part du modèle d'interaction gravitationnelle entre deux points matériels, pour aller jusqu'à l'interaction la plus générale entre deux corps étendus. Ensuite diverses applications sont traitées, essentiellement relatives aux orbites et à la balistique extérieure. La propulsion des engins est également traitée, en ce comprise une théorie des systèmes à masse variable.

Quant à la mécanique des fluides, elle est située dans le cadre plus général de la mécanique des milieux continus, celle-ci étant intégrée à son tour dans la mécanique en général et rattachée donc aux précédents ouvrages. Les chapitres théoriques ont en réalité pour unique but de permettre le traitement des grands sujets de mécanique des fluides élémentaires (pression hydrostatique, Archimède, Bernoulli) en ayant soin de les considérer d'emblée comme cas très particuliers, dans un cadre général déjà bien posé.

L'ouvrage se conclut sur un chapitre d'introduction à la relativité restreinte, qui met en évidence les limites de la mécanique galiléenne et donne les rudiments des spécificités de la mécanique relativiste.

Le livre est complété d'exercices résolus et commentés.

Sommaire

I. Théorie atomistique. Forces d'interaction fondamentales. — II. Applications des interactions fondamentales. Phénomènes macroscopiques. — III. Interaction gravitationnelle. — IV. Orbites. — V. Propulsion et trajectoires. — VI. Mécanique des milieux continus. Notions fondamentales. — VII. Spécificités de la mécanique des fluides. — VIII. Mécanique des fluides; applications. — IX. Eléments de relativité restreinte.