

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 98 (1972)  
**Heft:** 25

**Artikel:** Applications techniques des hyperfréquences  
**Autor:** Ramachandraiah, M.S. / Gardiol, F.E.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-71573>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

mission SIA 165 arrive au bout de ses peines avec le système unifié pour la préparation des listes de fers qu'elle a développé, qui doit être publié prochainement dans la recommandation SIA 165. Ces travaux seuls devraient éliminer une grande part des insuffisances qui ont, jusqu'ici, empêché le bâtiment d'utiliser pleinement toutes ses possibilités.

## 7. Remerciements

Le présent article expose un sujet dont les éléments furent réunis à l'occasion d'une conférence présentée le 2 février 1972 à l'Institut de la Construction Métallique (ICOM). Cette conférence a pu être donnée grâce à l'invitation de Monsieur le professeur J.-C. Badoux, chef du Département de génie civil à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. A cette occasion furent montrés et commentés des résultats qui furent préparés au sein de commissions et de groupe de travail et qui permirent à l'auteur d'exposer le problème de l'échange et de la préparation d'informations, sous un angle de vue très large. L'auteur remercie également vivement Monsieur Jean-Paul Jaccoud de la traduction du texte original allemand.

## LITTÉRATURE

1. LERNER, A. JA.: *Grundzüge der Kybernetik*. VEB Verlag Technik Berlin.
2. MAUCH, S. P.: *Die Ingenierfähigkeit als Entscheidungsprozess (Ein Gedankenmodell vom Standpunkt des Systems Engineering)*. Industrielle Organisation, Nr. 9, 1968.
3. HOFMANN, E., MAUCH, S. P.: *Methodik für die Projektierung komplexer Bauaufgaben*. Schweizerische Bauzeitung, Heft 20, 1970.
4. VON BENTHEIM, G.: *Schaffung einer integrierten Baudaten- systematik*. Schweizerische Bauzeitung, Heft 34, 1970.
5. VON BENTHEIM, G.: *Die schweizerische Baudaten- systematik kommt*. Hoch + Tiefbau, Spezialnummer 2, 71. Jahrgang, 1972.
6. Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung: *BKP, Baukostenplan Hochbau*. SNV 506 500, 1969.
7. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA): *SIA-Empfehlung 165, Ausgabe 1972, Anwendung von Standardformen und -listen für die Verarbeitung von Armierungsstählen*.

Adresse de l'auteur :

Ernst C. Glauser, Dr Ing.  
Bureau Basler & Hofmann  
Forchstr. 395  
8008 Zurich

# Applications techniques des hyperfréquences

par Dr M. S. RAMACHANDRAIAH, premier assistant EPFL, et Dr F. E. GARDIOL, professeur EPFL

## 1. Introduction

Le terme « hyperfréquences » ou « micro-ondes » (de l'anglais *Microwaves*) désigne généralement la bande de fréquences s'étendant de 300 MHz à 300 GHz, c'est-à-dire les signaux comportant de 300 millions à 300 milliards de cycles par seconde ( $3 \times 10^8$  à  $3 \times 10^{11}$  Hz, fig. 1). La période de ces signaux se situe donc entre  $3^{1/3}$  picosecondes et  $3^{1/3}$  nanosecondes et, pour une onde électromagnétique se propageant à la vitesse de la lumière, la longueur d'onde dans le vide varie de 1 mm à 1 m. Elle est donc du même ordre de grandeur que les éléments utilisés pour la génération ou la transmission de telles ondes. Les limites données ci-dessus sont fixées de façon plus ou moins arbitraire et servent à situer le domaine des hyperfréquences entre celui des ondes radio (fréquences plus basses) et celui des ondes infrarouges et lumineuses (fréquences plus élevées). Ce domaine possède des propriétés remarquables, en particulier par suite des interactions entre les ondes électromagnétiques et la matière apparaissant à ces fréquences.

Les hyperfréquences furent tout d'abord considérées pour les télécommunications. Leur développement connut ensuite un essor considérable à la suite de leur application au radar (1930-1950) et, plus récemment, aux télécommunications spatiales — rappelons ici que seules les hyperfréquences peuvent assurer des transmissions par satellites. Les radars et les télécommunications sont à l'heure actuelle les deux domaines « traditionnels » d'application des hyperfréquences. Ces domaines sont bien connus et bon nombre de livres et d'articles ont été publiés à leur sujet ; il n'est donc pas nécessaire de les décrire ici.

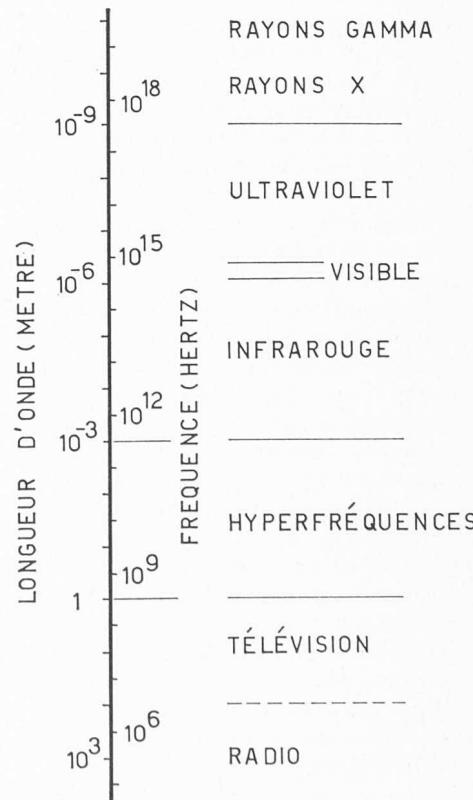


Fig. 1. — Subdivisions du spectre électromagnétique.

Plus récemment, de nouvelles applications, qu'on pourrait qualifier de « non-conventionnelles », des hyperfréquences ont vu le jour, dans des domaines industriels, agricoles et plus généralement dans toutes les sciences de l'ingénieur. Ces applications ont permis de mettre au point de nouvelles méthodes de mesure (densité, humidité, dimensions, vitesse) ou de traitement des matériaux (séchage, chauffage, stérilisation). Par opposition avec les méthodes traditionnelles, dans lesquelles les hyperfréquences détiennent une sorte de monopole (les coûts, quels qu'ils soient, devant être acceptés), les applications techniques s'inscrivent dans le cadre d'un processus de fabrication et les coûts tolérables doivent être comparables à ceux des méthodes similaires. Ce n'est donc que depuis l'apparition de sources hyperfréquences à faible prix de revient que les applications de caractère industriel ou technique ont pu se développer.

Les nouvelles applications ont pratiquement toutes été mises au point dans des pays anglo-saxons (U.S.A., Grande-Bretagne, Canada) et sont actuellement de plus en plus développées dans les pays nordiques et au Japon. Le but de cet article est de dresser une liste — dont les auteurs savent d'ores et déjà qu'elle ne peut être exhaustive — de ces applications et d'en donner une brève description. Par suite du grand nombre d'articles et de rapports de nature et de provenance très diverses qui ont paru et paraissent à un rythme rapide, il a été jugé préférable de ne pas présenter de bibliographie avec cet article. Il est bien entendu que les auteurs se tiennent à disposition des lecteurs qui souhaiteraient recevoir de plus amples informations sur les sujets traités dans cet article.

## 2. Généralités

Les progrès réalisés dans la production efficace et économique d'hyperfréquences, aux puissances basses et élevées, a grandement favorisé le développement des applications non-conventionnelles des hyperfréquences. Par exemple des magnétron de haute puissance en régime permanent, accordables électriquement en fréquence et pouvant fonctionner pendant des milliers d'heures avec un rendement de 60 à 70 % sont disponibles dans le commerce pour le chauffage industriel, le séchage ou la cuisson d'aliments. De même, l'apparition d'oscillateurs à semi-conducteurs (diodes Gunn ou diodes IMPATT), de faible encombrement, de prix peu élevé et dont la durée de vie est pratiquement illimitée (lorsqu'ils sont utilisés correctement) permet l'emploi d'hyperfréquences pour la détection, la mesure ou le diagnostic dans les domaines techniques, scientifiques et médicaux. Les champs d'applications des hyperfréquences s'étendent à l'alimentation, l'industrie, la médecine et la biologie, la chimie, l'océanographie, la détection d'orages et la prévision du temps, la géologie, la détection et le contrôle de la pollution, la recherche en physique, en plasmas, la technologie aérospatiale, etc.

Les applications en haute puissance (100 watts et plus) seront décrites tout d'abord dans la section 3 et sont suivies en section 4 par une description des méthodes de mesure et de détection en basse puissance (quelques milliwatts). Finalement une liste d'applications dans des nouveaux domaines est donnée en section 5. Les principes de base sont brièvement décrits dans le cadre des applications qu'ils concernent.

Afin d'éviter des interférences avec les télécommunications, l'utilisation des hyperfréquences pour des buts industriels, scientifiques et médicaux (I.S.M.) est limitée à cer-

taines bandes de fréquences bien définies. Pour les applications en haute puissance, les fréquences couramment utilisées sont 915 MHz et 2450 MHz.

Il faut encore noter qu'à l'instar des rayons U.V., X et gamma, les radiations hyperfréquences peuvent être nocives, en particulier par suite de l'échauffement provoqué. Il en résulte que les appareils fournissant des puissances importantes doivent être soigneusement blindés afin d'éviter des fuites. Ce blindage est toutefois très facile à réaliser en pratique, il suffit d'une fraction de millimètre de métal ou une faible couche d'eau pour bloquer complètement le rayonnement.

## 3. Application des hyperfréquences en haute puissance

### 3.1 Alimentation

L'utilisation d'hyperfréquences se développe rapidement dans l'industrie alimentaire grâce aux économies et à la rapidité apportées dans la cuisson et le traitement de la nourriture. Des fours hyperfréquences de plusieurs types sont disponibles sur le marché, permettant différents modes de cuisson ainsi que le séchage d'aliments, le réchauffage de mets précuits et de produits congelés. Dans certains pays, des fours à usage familial sont couramment utilisés : en Suède, une famille sur 20 possède son four hyperfréquences. Des appareils de vente automatique de saucisses ou autres casse-croûtes comportent un four hyperfréquence incorporé.

Une description succincte du phénomène physique provoquant l'échauffement par hyperfréquences d'aliments (et autres objets non conducteurs) est nécessaire ici. Lorsque des produits alimentaires, de nature principalement diélectrique, sont irradiés par des ondes électromagnétiques de fréquence adéquate, l'énergie de vibration et de rotation des grosses molécules augmente et produit une séparation des molécules d'eau. L'énergie mécanique de ces dernières s'accroissant, elles s'échauffent et se libèrent de leurs liens chimiques. L'énergie hyperfréquence pénétrant de façon égale dans tout le corps à chauffer — dont les propriétés diélectriques sont supposées homogènes — son échauffement sera donc uniforme. Dans les méthodes conventionnelles de chauffage, par contre, la surface extérieure est chauffée en premier et la chaleur se répand graduellement vers l'intérieur sous l'effet du gradient de température établi entre l'extérieur et l'intérieur du corps ; le chauffage n'est donc jamais uniforme. Les avantages exclusifs du chauffage par hyperfréquences sont les suivants :

1. Pénétration de la chaleur sans qu'il soit nécessaire d'établir une différence de température pour provoquer un transfert de chaleur.
2. Chauffage sélectif des différents composants d'un système diélectrique hétérogène.

D'autre part, le rendement du chauffage par hyperfréquences est de l'ordre de 80 % pour la plupart des produits alimentaires. Les méthodes courantes par infrarouge sont nettement moins favorables. La cuisson par hyperfréquences est plus rapide (car uniforme : on ne risque pas de brûler la surface extérieure si l'on chauffe plus fort), elle est aussi plus propre par suite de l'absence de produits de combustion ; de plus son contrôle est rapide et facile. En principe, tous les produits alimentaires que l'on doit chauffer peuvent être soumis à un procédé hyperfréquences d'un type ou d'un autre. Toutefois, la fréquence de fonc-

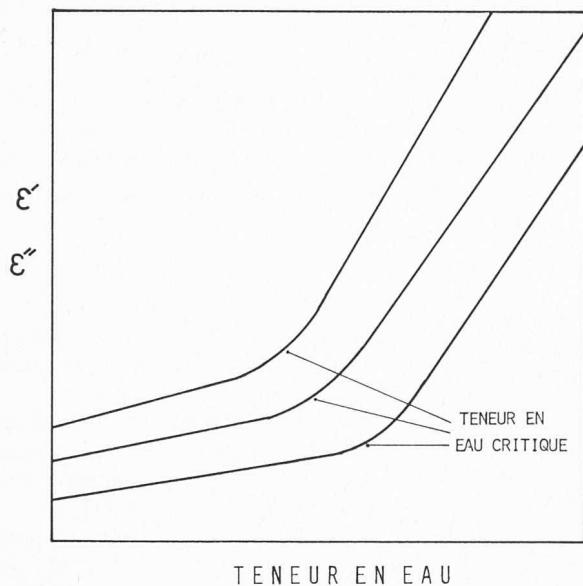


Fig. 2. — Comportement général des constantes diélectriques des solides mouillés en fonction de leur teneur en eau.

tionnement la plus favorable et le dispositif de chauffage adéquat doivent être choisis en fonction de l'application considérée. Les propriétés diélectriques de produits alimentaires courants sont présentés dans la table I.

TABLEAU I  
*Constantes diélectriques  
en hyperfréquences de produits alimentaires*

Produit	Tempéra-ture (degrés C)	Permitti-vité $\epsilon'_r$	Angle de pertes $\tan \delta$
Viande et poisson	-15	5	0,15
“	20	50,8	0,32
Bœuf (rôti) . . . . .	23	28	0,2
Graisse . . . . .	20	69	0,19
Beurre . . . . .	25	6,2	—
Huile . . . . .	25	2,5	0,064
Sucre . . . . .	24	39	0,2
Pommes de terre .	20	61	0,28
Blé . . . . .	24	2,7	0,09

Tiré de : S. O. NELSON : *Electrical Properties of Agricultural Products*, a review, 1971 Winter Meeting, American Society of Agricultural Engineers, Chicago, 1971.

### 3.2 Chauffage et traitement industriels

L'industrie requiert une amélioration continue de la qualité, des caractéristiques de production uniformes, une meilleure finition des produits, un traitement économique et rapide qui, de plus, soit facile à contrôler ou puisse être automatisé, et, plus récemment, des méthodes pour la prévention et le dépistage de pollution et de nuisances, etc. Ces facteurs ont en grande mesure pu être satisfaits par la mise au point de méthodes de production et de contrôle faisant usage d'hyperfréquences. Des appareils de séchage extraient l'humidité contenue dans les plastiques, le cuir, les colles, le papier et les tissus. Le chauffage par hyper-

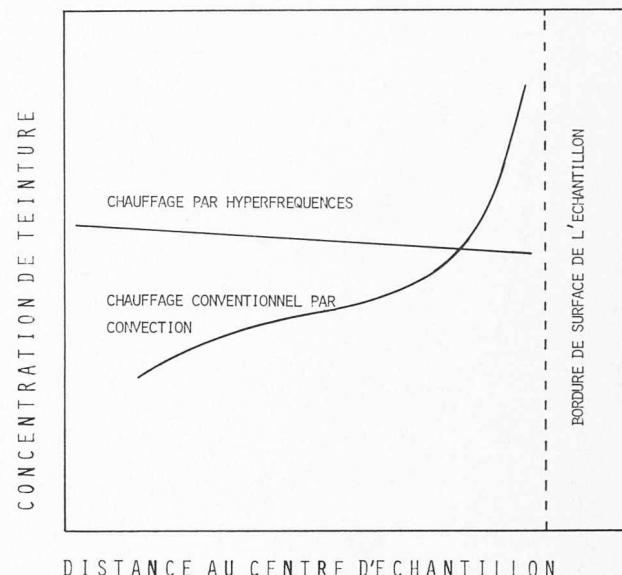


Fig. 3. — Concentration de teinture en fonction de la distance au centre dans un rouleau de textile chauffé conventionnellement et par hyperfréquences.

fréquences est utilisé dans la fabrication de mousse de polyuréthane, de moules en sable de fonderie, de matériaux abrasifs, en fibre de verre, en fibre synthétique, etc. Il permet aussi d'extraire les solvants de produits pharmaceutiques, de faire éclater des arcs, de sécher rapidement des adhésifs, des céramiques, des matériaux chimiques et fibreux (fig. 2). Les hyperfréquences occupent une place de choix dans l'industrie du caoutchouc où elles sont de plus en plus utilisées pour le préchauffage avant le moulage et le traitement de pièces à vulcaniser. Comme indiqué précédemment, le chauffage par hyperfréquences est rapide et uniforme, ne dégagent pas de fumée, de chaleur inutile ou d'odeurs désagréables. Le latex brut nécessaire à l'industrie du caoutchouc peut être amené à la température requise pour le découpage en 1 heure, qu'il faut comparer à 1 semaine de chauffage dans les fours conventionnels. Dans l'industrie des laines, le séchage par hyperfréquences permet d'éviter la migration des teintures que l'on constate lors du séchage traditionnel (fig. 3). Des séchoirs sont disponibles pour des feuilles minces, des tissus, des films, des reliures de livre, etc. Des fils synthétiques et des filaments peuvent être séchés à des vitesses allant jusqu'à 1 km par minute. Les niveaux de puissance utilisés se situent généralement entre 1 et 5 kW (régime permanent).

Les avantages suivants se retrouvent dans toutes les applications industrielles des hyperfréquences :

- réduction importante du temps nécessaire.
- régulation automatique (par exemple, un matériau à sécher absorbe d'autant moins d'énergie que son humidité est faible).
- transfert d'énergie élevé (seul le corps que l'on désire traiter est chauffé, et non le milieu environnant). On observe couramment des rendements de l'ordre de 80 %.
- uniformité (la chaleur est produite uniformément à l'intérieur du matériau traité).
- chauffage instantané (aucun préchauffage du milieu environnant n'est nécessaire).

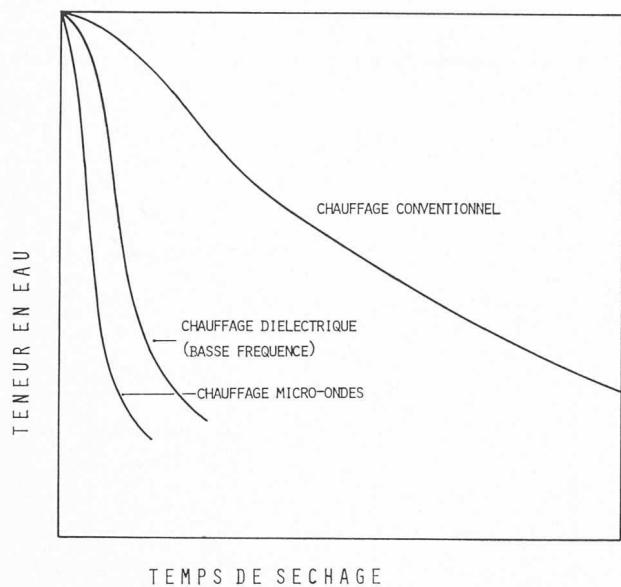


Fig. 4. — Réduction de la teneur en eau en fonction du temps de séchage pour différents moyens de séchage de grains.

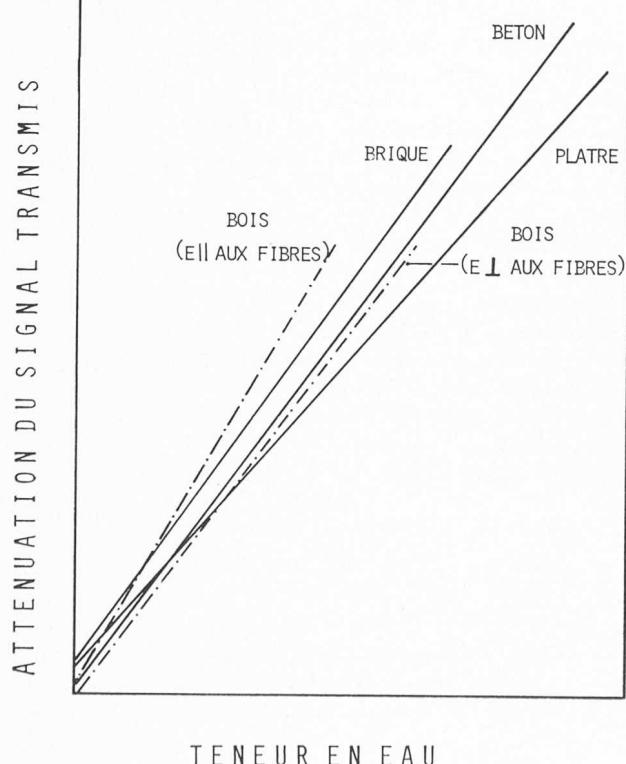


Fig. 5. — Comportement de l'atténuation des hyperfréquences en fonction de la teneur en eau dans les matériaux de construction.

- meilleur rendement en production (moins de déchet) et meilleure qualité dans beaucoup de cas.
- coût global plus faible dans la plupart des cas : si l'équipement hyperfréquences représente un investissement important, la rentabilité est assurée par les économies effectuées lors du processus de fabrication.
- chauffage propre (pas de produits de combustion et donc pas de pollution).

### 3.3 *Produits agricoles et forestiers*

Au Canada, des récoltes ont pu être protégées du gel et de températures bien en dessous de zéro en les irradiant avec des ondes hyperfréquences.

Une manière rapide de réduire l'humidité de céréales fraîchement récoltées consiste à les soumettre à un rayonnement hyperfréquences dans une enceinte métallique permettant un traitement continu (fig. 4). Le chauffage sélectif par hyperfréquences permet de détruire en même temps les insectes et leurs larves contenus dans le grain ; les pertes diélectriques de ces derniers étant bien supérieures à celles des grains avoisinants, la température des insectes monte rapidement à des valeurs léthales (environ 60°C) tandis que celle des grains n'augmente que de 1 à 2 degrés.

L'industrie forestière cherche principalement à réduire le temps de séchage et à mieux contrôler la qualité, deux exigences magnifiquement satisfaites par les hyperfréquences. Le temps de séchage du bois de chêne de l'Orégon a pu être réduite d'un an environ à 4 heures, tout en diminuant les risques de fissures. Les mêmes méthodes sont intéressantes pour le traitement et le séchage de revêtement, le collage de bois contre-plaqué ou de substrats artificiels, ainsi que pour détruire la pourriture et les vers du bois.

Des dispositifs pour le transfert d'énergie faisant usage de guides d'ondes fendus et de lignes à méandres permettent une conversion de 90 % et plus de la puissance électromagnétique appliquée en chaleur. Ces dispositifs sont ajustés individuellement au caractère spécifique du matériau à traiter.

D'autres applications intéressantes sont la prévention de moisissures, la destruction des mauvaises herbes, la stérilisation du sol, le rôtissage des arachides.

### 3.4 *Génie civil*

Les matériaux de construction comme le béton et les briques présentent une absorption importante aux fréquences élevées lorsqu'ils sont mouillés (fig. 5). L'application d'hyperfréquences fait solidifier plus rapidement ces matériaux, permettant un gain considérable de temps et d'argent. D'autre part, il est possible de faire sauter du béton et des roches en leur appliquant un faisceau très concentré d'hyperfréquences. Par exemple, en Angleterre, une plaque de béton de 23 cm d'épaisseur et de 3 m<sup>2</sup> s'est fendue après avoir été soumise pendant deux périodes de 3 minutes à une puissance de 2 kw. Un trottoir de béton a été démolie en 3 minutes. Au Japon, on a constaté que des blocs des pierres les plus dures (granit, basalte) se désintègrent après une dizaine de minutes de chauffage à 20 kw. On prévoit d'utiliser une telle méthode pour le forage de tunnels, ses avantages étant le silence (particulièrement apprécié pour des travaux dans des zones urbaines) et la concentration d'énergie dans une zone réduite : on ne risque pas d'endommager la roche ou le terrain avoisinant (comme le fait la dynamite), ni de créer des nuages de poussière et de débris.

### 3.5 Médecine et biologie

L'avènement d'oscillateurs de très haute puissance tels que magnétron, klystrons et amplitrons pouvant fournir 30 Mw de puissance de pointe et 150 kw de puissance de moyenne a permis la construction d'accélérateurs linéaires à électrons de très haute énergie (1000 MeV). Les rayons X produits par ces accélérateurs ont été utilisés avec succès dans le traitement du cancer, en particulier le cancer des ganglions lymphatiques ou maladie de Hodgkins.

Le sang réfrigéré peut être réchauffé très rapidement avant une transfusion permettant ainsi entre autre de faire face à des urgences. Un appareil de 1kw permet d'amener en une minute du sang de  $-30^{\circ}\text{C}$  à la température du corps.

Une autre réalisation est un séchoir-autoclave silencieux qui sèche en 5 minutes  $3\frac{1}{2}$  kg de linge tout en détruisant tous les microbes courants et les sources possibles de contamination. Le prix d'achat d'un tel séchoir est comparable à celui d'un séchoir ordinaire mais les frais d'utilisation sont réduits à 35 % seulement ; un usage intensif est donc prévu dans les laboratoires et hôpitaux. Des dispositifs spéciaux permettent de stériliser le liquide contenu dans des ampoules de verre après que celles-ci aient été scellées.

Certaines affections rhumatismales et arthritiques peuvent être traitées de façon particulièrement efficace par diathermie. Un générateur fournit une puissance d'une centaine de watts, qui est appliquée localement à l'aide d'une antenne spéciale, ce qui a pour effet de chauffer les tissus sous-cutanés. Il en résulte une activité métabolique accrue et une dilatation des vaisseaux sanguins favorisant la circulation et accroissant les réactions de défense de l'organisme.

Toutefois, comme mentionné précédemment, une trop grande exposition au rayonnement hyperfréquences peut être nocive. D'importants travaux de recherche sont en cours en vue de déterminer la nature exacte des interactions entre le rayonnement et les tissus vivants et déterminer scientifiquement les limites de tolérance.

### 3.6 Chimie

La nature sélective du chauffage par hyperfréquences permet d'obtenir des plasmas dont les ions (lourds) restent froids mais dont les électrons acquièrent une température élevée, permettant l'ionisation et l'obtention de radicaux libres en grande quantité. On obtient ainsi des gaz monoatomiques (H, N, O, B, Cl, Br, I) qui sont particulièrement réactifs et prennent part à la synthèse de nombreux corps chimiques.

### 3.7 Production et transport d'énergie

Toutes les applications décrites jusqu'ici sont soit fermement établies à l'heure qu'il est, soit en bonne voie de réalisation. D'autres applications possibles dans le domaine de l'énergie, de caractère spectaculaire ou même « futuriste », sont à l'étude.

Les hyperfréquences jouent un rôle important dans le chauffage et le confinement de plasmas très chauds nécessaires pour la fusion thermonucléaire contrôlée. Or, on sait que, si ce processus pouvait être réalisé, il serait en mesure de fournir des quantités pratiquement illimitées d'énergie tout en ne présentant pas de risques de pollution.

Un programme de recherche important est en cours aux U.S.A. en vue de transmettre à distance l'énergie nécessaire

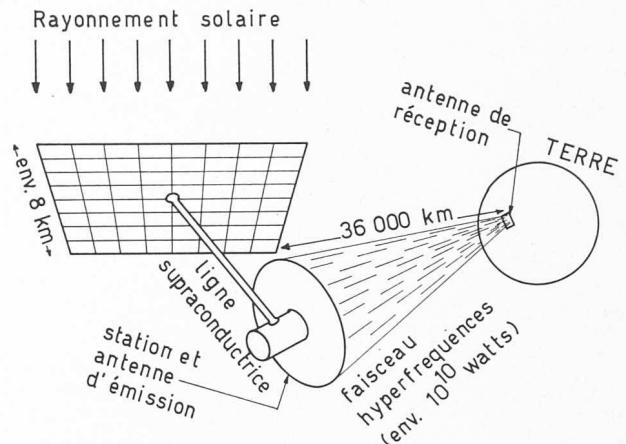


Fig. 6. — Diagramme d'une station orbitale destinée à capter, transformer et transmettre l'énergie solaire.

à la propulsion de véhicules. Un modèle expérimental d'hélicoptère électrique a été construit et a effectivement volé. L'énergie, transmise depuis le sol par un faisceau d'hyperfréquences, est captée et redressée par une antenne rectificatrice ou « rectenna » fixée sous le plancher de l'hélicoptère, puis transmise aux moteurs électriques de l'engin. La « rectenna » est réalisée par un réseau d'éléments rectificateurs semi-conducteurs qui captent l'énergie du faisceau et la transforment en courant continu avec un rendement de l'ordre de 60 à 70 %. Cette méthode de transfert sans contact a également été proposée pour la propulsion de véhicules à coussins d'air et moteur linéaire du type Aérotrain, qui pourraient assurer le transport rapide de passagers confortablement et sûrement à des vitesses allant jusqu'à 500 km/h.

Des guides d'ondes circulaires seront peut-être utilisés à l'avenir pour le transport de très grandes puissances, en tirant profit des très faibles atténuations présentées par certains modes de propagation. Il deviendrait ainsi possible de remplacer une ligne à haute tension, dont la valeur esthétique laisse souvent à désirer, par un tube métallique souterrain d'environ 1.3 m de diamètre transportant quelques Gw.

Une autre application possible sort tout droit des ouvrages de science-fiction : il s'agit tout bonnement de placer des stations nucléaires en orbite stationnaire autour de la terre ou, dans un autre projet, de capter à l'aide de gigantesques cellules solaires l'énergie de radiation disponible dans l'espace. Cette énergie serait alors transmise par faisceau hyperfréquences et captée sur terre par d'immenses réseaux d'antennes rectificatrices (rectennas, fig. 6). Aussi futuriste que puisse paraître un tel projet, il est sérieusement à l'étude aux USA et une session du « Microwave Power Institute » lui a été consacrée en 1970. Une étude approfondie des différents paramètres a montré que de telles stations orbitales sont en grande partie réalisables avec la technologie actuelle. Le principal avantage serait l'élimination pure et simple de la pollution créée par les centrales électriques, qu'il s'agisse des effets thermiques, des gaz de combustion, ou encore des déchets radioactifs des centrales nucléaires. Verrons-nous prochainement des stations électriques en orbite ? C'est ce que l'avenir nous dira.

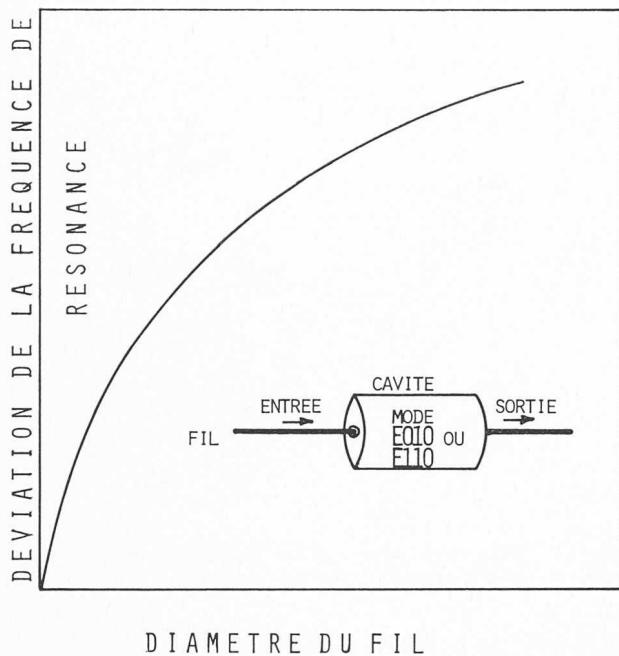


Fig. 7. — Variation de la fréquence de résonance d'une cavité cylindrique circulaire en fonction du diamètre du fil métallique.

#### 4. Applications des hyperfréquences de faible puissance

##### 4.1 Mesures industrielles

À de bas niveaux de puissance, des signaux hyperfréquences sont utilisés pour contrôler et suivre l'évolution d'un processus en cours ou pour mesurer les propriétés des matériaux et mettre au point en laboratoire les appareils destinés à une application industrielle en grande puissance. Tout nouveau procédé requiert une connaissance approfondie des propriétés des matériaux à traiter, et ceci pour toutes les conditions physiques auxquelles le matériau sera soumis pendant le traitement prévu. En particulier, il est nécessaire de connaître de façon précise des propriétés diélectriques en fonction de la température et de l'humidité avant de pouvoir mettre au point un dispositif de chauffage assurant un rendement convenable. On utilise généralement les méthodes développées précédemment pour les mesures dans les applications de radars, ainsi que des modifications de celles-ci, méthodes qui toutes considèrent des échantillons du matériau à mesurer. Si l'on désire contrôler de façon continue un processus, ce qui est de plus en plus demandé par l'industrie en vue d'automatiser la production en maintenant un niveau de qualité adéquat, des méthodes particulières sont nécessaires. C'est ici que les générateurs à semi-conducteurs, qui ne fournissent que quelques milliwatts, jouent un rôle primordial dans l'instrumentation nécessaire pour effectuer des mesures dans des conditions difficiles. La mesure de l'humidité (mesure indirecte de la permittivité) de papiers, textiles, fibres, films, feuilles, bois, matériaux de construction, produits alimentaires, agricoles, chimiques et pharmaceutiques peuvent être effectuées par des méthodes avec ou sans contact.

De même, on peut mesurer l'épaisseur, l'état de surface, la distance et le déplacement de pièces métalliques sans les toucher. Des méthodes similaires permettent de mesurer de façon très précise le diamètre de fils métalliques et de

câbles, avec ou sans couverture isolante (fig. 7), et la profondeur de fissures très étroites dans des plaques métalliques (fig. 8). Les méthodes sans contact sont nécessaires pour le contrôle et l'automatisation de la fabrication de matériaux qui ne doivent pas être touchés (métaux en fusion, produits en mouvement continu, substances stériles).

##### 4.2 Dispositifs de sécurité et anti-collision

Un générateur à semi-conducteur IMPATT fonctionnant en radar Doppler placé à l'avant d'un véhicule détecte les risques de collision avec le véhicule qui le précède et actionne les freins de manière proportionnelle à la réduction de distance entre les deux véhicules. Ce système de protection est actuellement à l'étude aux USA; il permettrait de réduire le nombre de collisions causées par les réactions erronées des conducteurs.

En Norvège, des systèmes hyperfréquences provoquent l'arrêt automatique d'un train si son conducteur ne respecte pas un feu rouge. La sécurité du trafic sera améliorée, particulièrement en cas de mauvaises conditions atmosphériques.

##### 4.3 Autres applications

Parmi les applications les plus intéressantes en basse puissance, on remarquera particulièrement les deux suivantes :

- Un dispositif faisant appel aux principes d'holographie en hyperfréquences permettrait de détecter des armes cachées. Il a été mis au point aux USA en vue d'éviter des détournements d'avions.
- Des dispositifs à hyperfréquences permettent de mesurer de façon continue la vitesse de combustion du propergol dans les fusées spatiales, probablement à l'aide de l'effet Doppler.

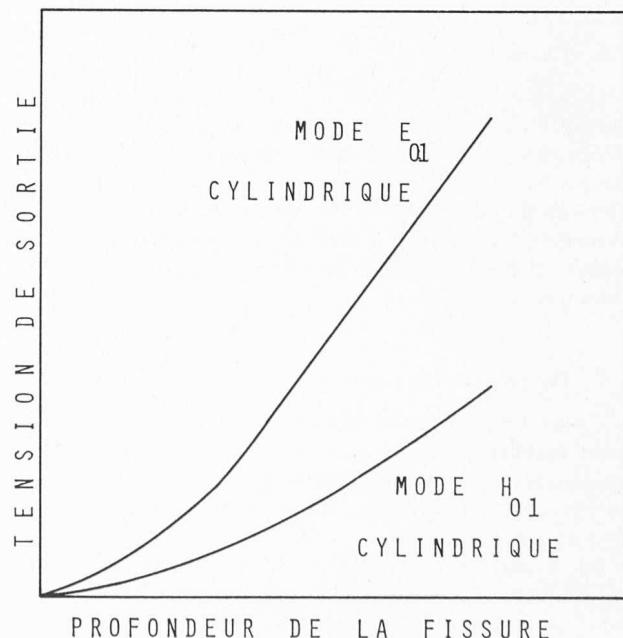


Fig. 8. — Tension de sortie (proportionnelle au taux de conversion du mode supérieur au mode dominant produit par la fissure) en fonction de la profondeur de la fissure dans une plaque métallique.

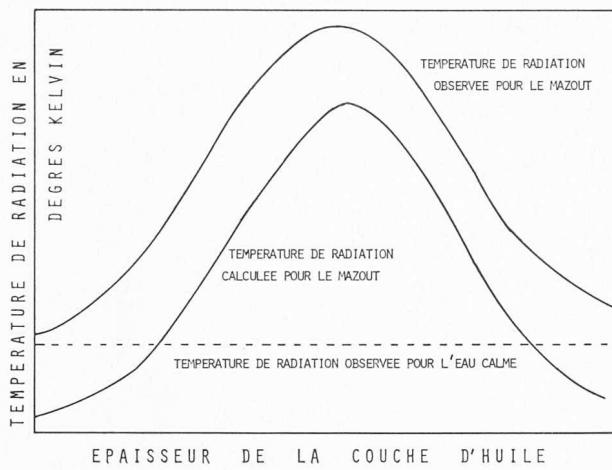


Fig. 9. — Mesures radiométriques en hyperfréquences de la température de radiation d'une couche de mazout sur une eau calme.

## 5. Etude de l'environnement

Dans l'étude de l'environnement également, les méthodes de détection électromagnétiques ont trouvé des applications diverses dont voici quelques exemples :

### 5.1 Détection de pollution par le mazout

Une méthode de radiométrie a été utilisée avec succès pour détecter la présence de mazout à la surface des mers. Ce dispositif permet de combattre la pollution en permettant de localiser le responsable. En présence d'une couche de mazout, la mer se calme et sa surface plus lisse présente une température de radiation plus basse. La température d'émission permet de déterminer l'épaisseur de la couche d'huile.

### 5.2 Prévision du temps

Les radars météorologiques déterminent les caractéristiques et l'évolution des nuages d'orage, permettant l'étude des phénomènes de convection dans la ceinture océanique tropicale (qui généralement détermine le temps dans le reste du monde). Des détecteurs radiométriques (passifs) en orbite seraient utiles pour l'étude des profils de température et d'humidité dans les nuages.

## 5.3 Géologie — Océanographie — Hydrologie

Des radars et des radiomètres placés sur une station orbitale permettent de déterminer les caractéristiques géologiques de la surface terrestre, la distribution et la circulation de l'eau, les courants marins (en vue de déceler la position de bancs de poissons), la présence d'icebergs, de pollutions diverses, etc.

## 6. Conclusion

Les principales applications actuelles des hyperfréquences ne relevant pas des domaines traditionnels des radars et des télécommunications ont été passées en revue dans les pages précédentes. Par suite de l'ingéniosité des nombreux utilisateurs, il est certain que cette liste n'est pas complète !

Cependant, quelques paroles de prudence ne seront pas superflues : bien que les hyperfréquences aient donné lieu à un grand nombre d'applications fort intéressantes et permettent souvent de résoudre de façon élégante des problèmes réputés absolument insolubles, il ne faudrait pas croire qu'elles représentent la panacée universelle. Elles sont en fait un outil de plus dans la panoplie de l'ingénieur moderne, à côté des « bonnes vieilles méthodes » et des autres méthodes nouvelles qui utilisent entre autre le laser, les phénomènes de résonance magnétique, le microscope électronique, etc. C'est à l'ingénieur qu'il appartient de choisir parmi les nombreux outils à sa disposition celui qui est le plus susceptible de fournir les résultats recherchés de façon précise, fiable, rapide et économique. Il faut bien se garder de sacrifier à la « mode » du jour, les applications de nouvelles méthodes n'ayant pas eu que des succès (les insuccès sont rarement publiés). La difficulté que présente l'emploi d'une nouvelle technique ne doit jamais être sous-estimée, en particulier lorsqu'il s'agit d'une application relativement complexe. Il faut donc s'assurer l'appui de personnes compétentes dans le domaine considéré en vue de mettre toutes les chances de succès de son côté.

Les auteurs espèrent attirer l'attention sur des méthodes encore peu connues en Suisse, mais qui sont appelées à jouer un rôle important au cours des années à venir. La chaire d'électromagnétisme et d'hyperfréquences de l'EPFL possède une importante documentation dans ce domaine, elle a établi des contacts avec des chercheurs et des centres de recherche à l'étranger et est ainsi en mesure de renseigner les lecteurs qui souhaiteraient des informations plus détaillées.

Adresse des auteurs :

D<sup>r</sup> M. S. Ramachandraiah et professeur F. Gardiol, chaire d'électromagnétisme et d'hyperfréquences de l'Ecole polytechnique de Lausanne, chemin de Bellerive 16, 1007 Lausanne.

## Bibliographie

**Hütte, des Ingénieurs Taschenbuch. — Physikhütte : Band 1, Mechanik.** 29<sup>e</sup> édition. Berlin, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1971. — Un volume 15×21 cm, xx + 495 pages, figures.

Avec le développement constant des sciences et des techniques, les éditions successives de l'aide-mémoire de l'ingénieur « Hütte » sont de plus en plus détaillées.

Le tome I de la « Physikhütte » est consacré à la *mécanique* et comprend les chapitres suivants :

1. Grandeur et unités. — 2. Normalisation. — 3. Théorie de la similitude et technique des modèles. — 4. Mécanique des

corps solides et des systèmes. — 5. Mécanique des corps déformables (résistance des matériaux). — 6. Vibrations mécaniques. — 7. Mécanique des fluides (liquides et gaz). — 8. Mécanique des corps à déformation plastique.

## Divers

### Un stand intéressant au Salon de l'assemblage, de la miniaturisation et de l'automatisation-SAMA 1972

Le Salon de l'assemblage, de la miniaturisation et de l'automatisation (SAMA) a eu lieu du 18 au 23 septembre