

water, for example, in carbon-impregnated plastic and in crumpled sheets of aluminum foil. Even subjects who cannot hear microwaves when directly radiated by them can readily perceive clicking sounds when a piece of energy-absorbing material is interposed between the head and a radiator of pulsed microwave energy. Oddly enough, the mass of the interposed material does not seem to be too critical; I successively used smaller and smaller pieces of material as sonic transducers until it was necessary to impale tiny pieces on a toothpick, yet the clicking sounds induced in the material by microwave pulses were clearly audible to me.

The demonstration of sonic transduction of microwave energy by materials lacking in water lessens the likelihood that a thermohydraulic principle is operating in human perception of the energy. Nonetheless, some form of thermoacoustic transduction probably underlies perception. If so, it is clear that simple heating as such is not a sufficient basis for the Frey effect; the requirement for pulsing of radiations appears to implicate a thermodynamic principle. Frey and Messenger (1973) demonstrated and Guy, Chou, Lin, and Christensen (1975) confirmed that a microwave pulse with a slow rise time is ineffective in producing an auditory response; only if the rise time is short, resulting in effect in a square wave with respect to the leading edge of the envelope of radiated radio-frequency energy, does the auditory response occur. Thus, the rate of change (the first derivative) of the wave form of the pulse is a critical factor in perception. Given a thermodynamic interpretation, it would follow that information can be encoded in the energy and "communicated" to the "listener." Communication has in fact been demonstrated. A. Guy (Note 1), a skilled telegrapher, arranged for his father, a retired railroad telegrapher, to operate a key, each closure and opening of which resulted in radiation of a pulse of microwave energy. By directing the radiations at his own head, complex messages via the Continental Morse Code were readily received by Guy. Sharp and Grove (Note 2) found that appropriate modulation of microwave energy can result in direct "wireless" and "receiverless" communication of speech. They recorded by voice on tape each of the single-syllable words for digits between 1 and 10. The electrical sine-wave analogs of each word were then processed so that each time a sine wave crossed zero reference in the negative direction, a brief pulse of microwave energy was trig-

gered. By radiating themselves with these "voice-modulated" microwaves, Sharp and Grove were readily able to hear, identify, and distinguish among the 9 words. The sounds heard were not unlike those emitted by persons with artificial larynxes. Communication of more complex words and of sentences was not attempted because the averaged densities of energy required to transmit longer messages would approach the current 10 mW/cm² limit of safe exposure. The capability of communicating directly with a human being by "receiverless radio" has obvious potentialities both within and without the clinic. But the hotly debated and unresolved question of how much microwave radiation a human being can safely be exposed to will probably forestall applications within the near future.

The U.S. limit of 10 mW/cm² is actually an order of magnitude below the density that many investigators believe to be near the threshold for thermal hazards (Schwan, 1970). There are two camps of investigators in the United States, however, who believe that the limit is not sufficiently stringent. In the first camp of conservatives are those who accept the Soviet's belief that there are hazardous effects unrelated to heating from chronic exposures to fields of low density (< 1 mW/cm²); some agree with Milton Zaret (1974), a New York ophthalmologist, who holds that severely debilitating subcapsular lesions of the eyes may develop years, even decades, after exposure to weak microwave fields. Others tend to reject the notion that weak microwave fields produce this anomalous cataract, because of lack of substantiating evidence from the clinic or the laboratory (Appleton & Hirsch, 1975). But these conservatives are possessed of a vague unease simply because the Soviet's limit of continuous permissible exposure is three orders of magnitude below that of the United States.³

The other camp of conservatives tends to reject the possibility of hazardous nonthermal effects,

³ The Soviet's exposure limit of 10 μ W/cm² is three orders of magnitude below the exposure limit in the United States, but a different, that is, *emission*, limit holds for microwave ovens purchased for use in the American kitchen. In the United States at the present time, a newly purchased microwave oven may not emit radiation at a density greater than 5 mW/cm² as measured at a distance of 5 cm from the oven's surface. A user who stands 1 m from an oven that emits energy at the maximum permissible quantity would probably be exposed to a density of only a few microwatts per square centimeter—this is because electromagnetic energy when radiated from a point source attenuates markedly as it propagates through space.

****eau****, par exemple, dans du plastique imprégné de carbone et dans des feuilles d'aluminium froissées. Même les sujets qui ne peuvent pas entendre les micro-ondes lorsqu'ils sont directement irradiés peuvent facilement percevoir des cliquetis lorsqu'un morceau de matériau absorbant l'énergie est interposé entre la tête et un émetteur d'énergie micro-ondes pulsée. Curieusement, la masse du matériau interposé ne semble pas être trop critique ; j'ai utilisé successivement des morceaux de plus en plus petits de matériau comme transducteurs soniques jusqu'à ce qu'il soit nécessaire d'enficher de minuscules morceaux sur un cure-dent, pourtant les cliquetis induits dans le matériau par les impulsions micro-ondes étaient clairement audibles pour moi.

La démonstration de la transduction sonore de l'énergie micro-ondes par des matériaux dépourvus d'eau diminue la probabilité qu'un principe thermohydraulique opère dans la perception humaine de l'énergie. Néanmoins, une forme de transduction thermoacoustique est probablement à la base de la perception. Si c'est le cas, il est clair que le simple chauffage en tant que tel n'est pas une base suffisante pour l'effet Frey ; l'exigence de pulsation des rayonnements semble impliquer un principe thermodynamique. Frey et Messenger (1973) ont démontré et Guy, Chou, Lin et Christensen (1975) ont confirmé qu'une impulsion micro-ondes avec un temps de montée lent est inefficace pour produire une réponse auditive ; seulement si le temps de montée est court, résultant en effet en une onde carrée par rapport au front montant de l'enveloppe de l'énergie de radiofréquence rayonnée, la réponse auditive se produit. Ainsi, la vitesse de changement (la première dérivée) de la forme d'onde de l'impulsion est un facteur critique dans la perception. Étant donnée une interprétation thermodynamique, il s'ensuivrait que l'information peut être encodée dans l'énergie et « communiquée » à « l'auditeur ». La communication a en fait été démontrée. A. Guy (Note 1), un télégraphiste compétent, a arrangé pour son père, un télégraphiste ferroviaire à la retraite, d'actionner une clé, chaque fermeture et ouverture de laquelle entraînait le rayonnement d'une impulsion d'énergie micro-ondes. En dirigeant les rayonnements vers sa propre tête, des messages complexes via le code Morse continental ont été facilement reçus par Guy. Sharp et Grove (Note 2) ont trouvé qu'une modulation appropriée de l'énergie micro-ondes peut entraîner une communication « sans fil » et « sans récepteur » directe de la parole. Ils ont enregistré par la voix sur bande chacun des mots monosyllabiques pour les chiffres entre 1 et 10. Les analogues en onde sinusoïdale électrique de chaque mot ont ensuite été traités de sorte qu'à chaque fois qu'une onde sinusoïdale traversait la référence zéro dans la direction négative, une brève impulsion d'énergie micro-ondes était déclenchée. En s'irradiant avec ces micro-ondes « modulées par la voix », Sharp et Grove ont pu facilement entendre, identifier et distinguer les 9 mots. Les sons entendus n'étaient pas sans rappeler ceux émis par des personnes avec des larynx artificiels. La communication de mots plus complexes et de phrases n'a pas été tentée parce que les densités moyennes d'énergie requises pour transmettre des messages plus longs approcheraient la limite actuelle d'exposition sûre de 10 mW/cm². La capacité de communiquer directement avec un être humain par « radio sans récepteur » a des potentialités évidentes tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la clinique. Mais la question vivement débattue et non résolue de la quantité de rayonnement micro-ondes à laquelle un être humain peut être exposé en sécurité empêchera probablement les applications dans un avenir proche.

La limite américaine de 10 mW/cm² est en réalité d'un ordre de grandeur en dessous de la densité que de nombreux chercheurs croient être proche du seuil des dangers thermiques (Schwan, 1970). Il y a cependant deux camps de chercheurs aux États-Unis qui estiment que la limite n'est pas suffisamment stricte. Dans le premier camp des conservateurs se trouvent ceux qui acceptent la croyance soviétique qu'il existe des effets dangereux non liés au chauffage dus à des expositions chroniques à des champs de faible densité (<1 mW/cm²) ; certains sont d'accord avec Milton Zaret (1974), un ophtalmologiste new-yorkais, qui soutient que des lésions sous-capsulaires sévèrement

débiliter des yeux peuvent se développer des années, voire des décennies, après une exposition à de faibles champs micro-ondes. D'autres ont tendance à rejeter l'idée que de faibles champs micro-ondes produisent cette cataracte anormale, en raison du manque de preuves substantielles de la clinique ou du laboratoire (Appleton & Hirsch, 1975) : Mais ces conservateurs sont en proie à un vague malaise simplement parce que la limite d'exposition continue permise des Soviétiques est de trois ordres de grandeur en dessous de celle des États-Unis.³

L'autre camp de conservateurs tend à rejeter la possibilité d'effets non thermiques dangereux,

³ La limite d'exposition soviétique de $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ est de trois ordres de grandeur en dessous de la limite d'exposition aux États-Unis, mais une limite différente, c'est-à-dire d'émission, s'applique aux fours à micro-ondes achetés pour être utilisés dans la cuisine américaine. Aux États-Unis à l'heure actuelle, un four à micro-ondes nouvellement acheté ne doit pas émettre de rayonnement à une densité supérieure à $5 \text{mW}/\text{cm}^2$ mesurée à une distance de 5 cm de la surface du four. Un utilisateur qui se tient à 1 m d'un four qui émet de l'énergie à la quantité maximale permise serait probablement exposé à une densité de seulement quelques microwatts par centimètre carré — cela parce que l'énergie électromagnétique, lorsqu'elle est rayonnée à partir d'une source ponctuelle, s'atténue considérablement lors de sa propagation dans l'espace.