Problèmes biologiques et médicaux posés par l'utilisation des ondes ultra-courtes du radar

I. RAPPEL PHYSIQUE. PROBLÈMES BIOLOGIQUES (expérimentations animales)

R. DELAHAYE (*)

(Manuscrit reçu le 3 décembre 1976)

RÉSUMÉ

Cette mise au point envisage l'action des ondes électromagnétiques émises par le radar à l'aide de son antenne dans un but de détection. Après un bref rappel de physique on étudie l'action biologique des ondes radar à l'aide de nombreuses expérimentations animales. Puis, on envisage les problèmes médicaux posés par l'utilisation des ondes ultra-courtes chez l'homme. La dernière partie sera consacrée à la protection et aux réglementations actuelles.

ABSTRACT

This review considers the effects of electromagnetic waves emitted by radar antennas for detection purposes. The physical fundamentals are stated. The biological effects of radar waves are considered through many animal experimentation as well as the medical problems raised by the use of ultrashort waves in man. The final part will be devoted to safety and present regulations.

(*) École d'application du Service de Santé pour l'Armée de l'air, chaire d'électroradiologie et de biophysique aérospatiale, Paris et Service de Radiologie, Hôpital Begin, 69, avenue de Paris, 94160 Saint-Mandé.

INTRODUCTION ET LIMITES DU SUJET

Le mot *radar* est un condensé de l'expression anglaise *Radiodetection and ranging* (détection et télémétrie par radio). Le radar est employé universellement (aviation, marine, artillerie, gendarmerie, police). Cette généralisation de la détection électromagnétique a suscité de nombreux travaux biologiques et médicaux. Il faut remarquer que sous l'expression « effets biologiques des ondes radar » ont été rangés divers troubles d'origine différente [4, 10, 20, 21, 24, 61] :

- effets des rayons X et des particules ionisantes émis par le générateur;
- fatigue visuelle et psychique des lecteurs des oscilloscopes cathodiques;
- action des ondes radar émises à l'aide de l'antenne.

Cette mise au point n'envisagera que l'action des ondes électromagnétiques émises par le radar à l'aide de son antenne dans un but de détection.

Après un bref rappel de physique, nous étudierons l'action biologique des ondes radar à l'aide de nombreuses expérimentations animales. Puis, nous envisagerons les problèmes médicaux posés par l'utilisation des ondes ultra-courtes chez l'homme. La dernière partie de ce mémoire sera consacrée à la protection et aux réglementations existant actuellement.

1. LES ONDES ULTRA-COURTES DU RADAR RAPPEL PHYSIQUE

1.1. CARACTÉRISTIQUES [21, 37, 38, 40, 61].

Les ondes ultra-courtes du radar sont des ondes électromagnétiques caractérisées par leur longueur d'onde exprimée en centimètres ou par leur fréquence F en cycles par seconde ou hertz.

Les radars utilisés en aviation émettent sur des groupes de fréquence appelés *bandes* dont les principales sont : la bande X ($\lambda = 3$ cm, $F = 10\,000$ MHz), la bande S ($\lambda = 10$ cm, $F = 3\,000$ MHz), la bande L ($\lambda = 12$ cm, $F = 2\,500$ MHz) et la bande M ($\lambda = 24$ cm, $F = 1\,250$ MHz).

La plupart des radars sont basés sur le principe d'une *émission discontinue* d'impulsions très brèves et de grande amplitude fournissant une forte puissance instantanée (dite de crête) séparée de la suivante par un intervalle de temps très long par rapport à sa propre durée. Par exemple, l'impulsion d'une puissance de 1 MW dure 1 ms et est séparée de l'impulsion suivante par une pause de quelques millisecondes.

Cette fréquence d'émission qualifiée de *porteuse* est ensuite modulée. La fréquence de répétition est le nombre d'impulsions par seconde qui peut varier de 50 à 9 000 par seconde.

Certains types de radar, certains fours spéciaux à usage industriel ou domestique où l'énergie électromagnétique est convertie en chaleur (cuisson des céramiques, des aliments) ont une émission continue dite CW (continuous wave).

1.2. PUISSANCE DES ÉMISSIONS RADAR

La différence entre les modes d'émission, pulsée ou continue, se répercute sur la puissance d'émission.

Pour chaque émetteur fonctionnant en impulsions, il existe deux puissances d'émissions :

- une *puissance de crête*, P_c , développée instantanément à chaque impulsion, s'évaluant en watts, hectowatts ou mégawatts;
- une *puissance moyenne* P_m , qui est la puissance d'une émission à régime constant émettant la même énergie dans le même temps :

$$P_m = P_c \cdot t_p \cdot F_r$$

t_p : durée de l'impulsion; F_r : fréquence de répétition (récence).

Les émetteurs en ondes pulsées ont une puissance de crête qui dépasse le mégawatt. Les émetteurs en continu ont une puissance moyenne égale à la puissance de crête, bien inférieure à la puissance de crête des émetteurs pulsés.

1.3. FAISCEAU D'ONDES RADAR

Le réflecteur aérien, selon la destination de l'appareil, concentre l'énergie hyperfréquence émise par le cornet dans un ou plusieurs plans privilégiés de l'espace. Un angle dièdre est ainsi déterminé : c'est l'*angle d'ouverture* du faisceau dans le plan déterminé, horizontal ou vertical.

1.4. MESURE ET CALCUL DES DENSITÉS DE PUISSANCE

1.4.1. La densité de puissance

Le champ magnétique qui se propage dans l'espace transporte une certaine quantité d'énergie. En un endroit donné, la valeur du champ s'exprime en *densité de puissance* :

- puissance par unité de surface (W/m^2);
- puissance par unité de volume (W/m^3).

Pour évaluer les dangers éventuels d'un radar on emploie la densité de puissance exprimée en milliwatts par centimètres carrés. Le champ électromagnétique étant formé de deux composantes perpendiculaires proportionnelles, l'une électrique, l'autre magnétique, on peut concevoir la mesure des champs électriques (en volts par mètre) ou des champs magnétiques (en œersteds).

1.4.2. Les différentes zones

Il existe trois zones près d'une antenne : une zone proche, une zone intermédiaire, une zone éloignée.

La *zone proche de l'antenne ou zone de FRESNEL*. Au départ de l'antenne, le faisceau d'ondes n'est pas bien délimité par suite de phénomènes locaux

d'ordre physique, souvent très complexes (réflexion, absorption, diffusion). Jusqu'à une certaine distance de l'antenne, il n'y a pas réellement un faisceau unique mais « une ambiance électromagnétique » dans laquelle se trouvent plusieurs faisceaux plus ou moins distincts.

La zone éloignée ou zone de FRAUNHOFER où le faisceau d'ondes est bien défini. Il existe une densité de puissance électromagnétique qui est fonction :

- de l'éloignement du point par rapport à la source;
- du plan médian du faisceau.

La zone intermédiaire. Aucune formule ne s'applique dans cette zone. Pour un axe donné, les densités de puissance sont comprises entre celles données par les formules des zones de FRESNEL et de FRAUNHOFER. L'étendue de chaque zone varie avec la forme de l'aérien.

1.4.3. On peut mesurer les densités de puissance par deux méthodes :

Le calcul mathématique ne tient pas compte des réflexions des ondes sur le terrain ou des divers obstacles proches (bâtiments, grillages, plaques métalliques).

La mesure directe, difficile et délicate, ne peut s'appliquer qu'à la zone de FRAUNHOFER où l'énergie est bien définie. Un appareillage particulier, le bolomètre, étalonné au laboratoire, permet la mesure de la densité de puissance en un point. Il existe un bolomètre différent par bande de fréquences.

Il faut savoir que le calcul mathématique ou la mesure directe ne permettent pas de connaître de façon précise la densité de puissance existant en un point soumis à l'action de plusieurs sources d'ondes ultra-courtes [67]. Or, dans certaines stations radar, sur les bateaux, il y a toujours plusieurs émetteurs fonctionnant simultanément. Des recherches nombreuses tendent à mettre au point un détecteur personnel.

2. ACTION BIOLOGIQUE DES ONDES ULTRA-COURTES (RADAR)

2.1. HISTORIQUE

Pendant la guerre 1939-1945, de très nombreuses installations de radar sont mises en service et simultanément des chercheurs américains commencent l'étude biologique des ondes ultra-courtes. Dès 1943, des rumeurs alarmistes circulent parmi le personnel de plusieurs stations : le radar serait à l'origine d'alopécie, de stérilité. Le commandement allié ordonne une enquête confiée à L. E. DAILY [18]. Parmi les membres d'un laboratoire de l'U.S. Navy spécialisé dans l'étude et la mise au point d'émetteurs radar, on n'a remarqué ni lésions de la peau ou du cuir chevelu, ni altérations hématologiques. B. I. LINDMAN et C. COHN [46] vérifiant l'état de santé de techniciens radar ne mettent pas en évidence de faits particuliers.

Dès 1945, les recherches aux U.S.A. portent essentiellement sur l'effet thermique des ondes ultra-courtes. Ces études apaisent les craintes qui se manifestent chez les techniciens des stations radar. Elles permettent de penser que l'énergie des ondes ultra-courtes est dépourvue d'effets pathologiques sur l'organisme. Néanmoins, tous les chercheurs reconnaissent que ces résultats ne sont pas définitifs et qu'il faudra tenir compte de l'augmentation croissante des émetteurs.

Vers 1955, les soviétiques soutiennent qu'à côté des effets thermiques, il faut retenir la présence d'effets spécifiques [77]. Alors qu'aux U.S.A. et en Europe occidentale, les seuls effets thermiques servent de base à l'élaboration des normes de protection, en U.R.S.S. et en Europe de l'Est, l'aspect thermique est négligé au profit de la description de nombreux effets spécifiques. Les soviétiques fixent des normes de protection cent fois plus faibles que celles en vigueur aux U.S.A. et en Europe occidentale.

L'accord parmi les chercheurs, les hygiénistes est loin d'apparaître dans les travaux les plus récents [53, 56, 58] et les recherches, malgré les moyens mis en œuvre, semblent très difficiles. Il s'agit d'un domaine situé aux confins de la physique et de la biologie, dans une région mal connue des physiciens et des biologistes [87].

Deux organismes, en France, possèdent une section de recherches sur l'action biologique des ondes radar (le centre de recherches de médecine aéronautiques, à Paris, et le Centre d'études et de recherches biophysiques appliquées à la marine, à Toulon).

2.2. LES DEUX TYPES D'EFFETS BIOLOGIQUES DES ONDES ULTRA-COURTES

Les ondes radar ne se trouvent que devant le réflecteur d'onde du radar. En effet, au niveau de l'émetteur-récepteur et des guides d'ondes, ces ondes ultra-courtes, parfaitement canalisées, ne diffusent nullement à l'extérieur des installations. Les ondes ultra-courtes ont une énergie trop faible pour provoquer l'ionisation de la matière. Par contre, elles peuvent induire des mouvements de molécules ou d'ions responsables de la production de chaleur, par effet Joule. Cette transformation énergétique serait à l'origine des effets biologiques thermiques. Il existe deux types d'effets des ondes ultra-courtes.

L'effet thermique apparaît si les ondes ultra-courtes agissent sur le système biologique par l'intermédiaire de la chaleur engendrée. C'est l'énergie thermique qui est responsable de l'effet sur l'organisme. Depuis plus de 60 ans, les électrologistes utilisent, à des fins thérapeutiques, les courants de haute fréquence sous forme d'application de diathermie ou d'ondes courtes. Cet emploi est basé sur deux grands principes définis par d'ARSONVAL :

- les courants où ces ondes, même sous une intensité élevée, ne produisent aucun effet sensitif ou moteur ;
- la chaleur prend naissance à l'intérieur des tissus.

Un effet « non thermique » devrait correspondre à l'interaction directe des vecteurs électriques et magnétiques des hyperfréquences avec le système

biologique. Il existe des perturbations biologiques nombreuses et très diverses. Les chercheurs soviétiques ont utilisé de faibles densités de puissance pour mettre en évidence des effets « non thermiques » ou spécifiques. Si la densité de puissance s'élève, l'effet thermique risque de masquer l'effet non thermique. Remarquons que la frontière entre ces deux types d'action semble difficile à établir expérimentalement.

2.3. EFFETS THERMIQUES CHEZ L'ANIMAL

Quand les ondes ultra-courtes atteignent une cible, elles peuvent :

- se réfléchir sur la surface;
- pénétrer ou être absorbées;
- la traverser complètement.

Si les ondes ultra-courtes rencontrent le corps d'un mammifère vivant, la majeure partie de l'énergie est absorbée par les tissus et elle se transforme en chaleur, entraînant une élévation de température, en fonction de la loi de Joule [39] :

$$W = JQ = RI^2t = Pt.$$

La quantité d'énergie est proportionnelle à la durée d'exposition (t) et à la puissance subie (P). Cette puissance P dépend :

- de la densité de puissance au lieu considéré;
- de la surface du corps réellement exposée.

Nous étudierons successivement les facteurs modifiant la répartition de l'effet thermique et les conséquences objectives de ces effets thermiques des ondes ultra-courtes.

2.3.1. Facteurs modifiant la répartition de l'effet thermique

Ce sont la durée de l'exposition, les conditions de thermo-régulation, la quantité exacte d'énergie absorbée par les tissus.

2.3.1.1. Durée d'exposition

C'est un élément fondamental qu'il faut toujours préciser soigneusement en tenant compte de la périodicité éventuelle du balayage (mouvement de l'antenne).

Tous les résultats expérimentaux concordent pour montrer qu'il existe une bonne corrélation entre la durée de l'exposition au rayonnement et l'élévation de température.

D'après les travaux de J. E. BOYSEN [9] chez des lapins qui reçoivent une densité de puissance de $0,1 \text{ W/cm}^2$ à 358 kHz, la température rectale s'élève de $0,4^\circ\text{C}$ en 10 min, de $1,3^\circ\text{C}$ en 15 min, de $2,9^\circ\text{C}$ en 25 min et de $4,6^\circ\text{C}$ en 30 min.

H. W. HINES et J. E. RANDALL [31], suivent l'évolution de la température au niveau de l'iléon, du crâne, chez des lapins anesthésiés soumis à l'action d'ondes ultra-courtes (2 500 MHz, $\lambda = 12$ cm). Dans l'iléon, l'élévation de température est de 1,2°C après 1 min d'exposition, de 2,9°C après 10 min et 4,2°C au bout de 30 min. Au niveau du cerveau d'un lapin, pendant l'irradiation de la tête avec les mêmes longueurs d'onde, la température locale atteint 45,8°C après 20 min d'irradiation.

H. P. SCHWANN et son équipe [83, 84] déterminent la tolérance du corps humain à l'apport calorigène. Ils rappellent les travaux de H. F. COOK, J. F. HERRICK [14, 15, 30]. Un homme est soumis à l'exposition d'ondes ultra-courtes d'une puissance de 100 W se répartissant sur une surface de 100 cm². L'élévation de température atteint 5°C pendant les 5 premières minutes d'exposition. L'organisme peut supporter 0,01 W/cm² pendant des temps très longs (plusieurs heures). Puis, une densité de puissance variant de 0,10 à 1 W/cm² entraînera une élévation de température de 1°C/min. C'est la limite maximale pour des temps très courts de l'ordre de la minute. Ces éléments expérimentaux sont à la base de l'établissement des normes de protection (U.S.A., OTAN, R.F.A., Armée française) mais ce ne sont que des moyennes.

2.3.1.2. Surface du corps réellement exposée

Le rapport entre la surface exposée et le poids du corps intervient évidemment pour la tolérance de l'ensemble de l'organisme. De petits animaux absorberont relativement plus d'énergie que les gros, ce qui diminue leur tolérance globale [33].

Les conditions de la thermorégulation sont susceptibles de modifier la tolérance à l'apport thermique (température ambiante, déshydratation éventuelle du sujet). Lorsque la température ambiante est basse, la durée de survie augmente. J. W. HOWLAND et coll. [34] démontrent que la survie des chiens exposés aux ondes ultra-courtes augmente s'ils boivent librement. Les auteurs estiment que les effets nocifs de ces ondes sont dus presque exclusivement à l'hyperthermie.

— *Protection des téguments.* La fourrure des animaux d'expérience joue certainement un rôle assez important dans l'effet de protection mais, inversement, elle gêne leur thermolyse.

La nature et la vascularisation de chaque organe modifient la tolérance à l'apport thermique des ondes ultra-courtes [7, 8, 38, 61]. Le sang qui irrigue un organe a un rôle très important dans la lutte contre l'hyperthermie locale. Il entraîne les calories, les disperse et tend à les répartir de façon homogène dans l'ensemble de l'organisme, favorisant leur élimination. Les organes les plus richement vascularisés et les mieux irrigués sont, par conséquent, ceux qui accumulent le moins de chaleur. Par contre, les organes mal vascularisés (le globe oculaire par exemple) subissent une élévation de température importante. C'est le cas également des organes creux (vésicule biliaire, estomac, vessie, certaines parties de l'intestin), dont le réseau vasculaire a la charge d'éliminer la chaleur produite par les ondes ultra-courtes dans la masse des liquides biologiques qu'ils contiennent.

2.3.1.3. *Quantité d'énergie absorbée par les tissus*

Il n'est pas possible de déterminer par calcul la quantité d'énergie absorbée par les tissus car plusieurs facteurs particuliers interviennent : réflexion cutanée, profondeur de pénétration des ondes ultra-courtes, nature et forme des organes irradiés, position et orientation du corps dans le champ électromagnétique.

— *La réflexion cutanée, la profondeur de pénétration des ondes ultra-courtes et le niveau de son absorption maximale* varient en fonction de la longueur d'onde incidente [84].

La profondeur de pénétration est grossièrement évaluée au dixième de la longueur d'onde [99]. Les ondes millimétriques sont absorbées par la peau; les ondes centimétriques et surtout décimétriques atteignent les organes profonds, en particulier le système nerveux central. Les ondes métriques traversent l'organisme de part en part. Des observations montrent, par exemple, que pour les ondes ultra-courtes de longueur d'onde supérieure à 30 cm, 30 p. cent du rayonnement est absorbé en profondeur. Elles sont 3 fois mieux tolérées que celles dont la longueur d'onde varie de 10 à 30 cm, absorbées à près de 100 p. cent (ce sont, à cet égard, les plus nocives). Enfin, si la longueur d'onde est inférieure à 10 cm, on observe 40 p. cent d'absorption profonde. Les effets étant superficiels, la tolérance est meilleure.

— *La nature et la forme des organes irradiés* interviennent; en particulier, la teneur en eau et en graisse joue un rôle considérable [84]. Les graisses du tissu adipeux contiennent peu d'eau et la constante diélectrique de ce tissu varie avec la teneur en eau [84]. L'eau possède une constante diélectrique élevée et la graisse une constante faible. Par conséquent, lorsque la teneur en eau du tissu adipeux augmente, sa constante diélectrique augmente.

Les propriétés diélectriques de certains tissus, en particulier des organes creux, sont sans doute à l'origine de l'entretien d'ondes stationnaires dont les effets thermiques se manifestent uniquement en certains points chauds expliquant la non-homogénéité des effets caloriques dans l'organisme. Des perforations intestinales peuvent, par exemple, s'expliquer ainsi.

Il faut retenir l'importance des effets secondaires. Les micro-échauffements superficiels des terminaisons sensibles sont parfois à l'origine d'effets neuro-végétatifs importants à distance (effets vasomoteurs par exemple).

— *Position et orientation du corps dans le champ électromagnétique.* C. M. OSBORN [71] soumet des chiens à l'action d'ondes de 2 000 MHz ($12\text{ cm} < \lambda < 13\text{ cm}$). La mort apparaît lorsque la température du corps s'élève en moyenne de 5°C en 15 min; elle survient moins vite chez des chiens orientés perpendiculairement à la direction du champ électromagnétique.

2.3.2. *Conséquences objectives des effets thermiques des ondes ultra-courtes*

Deux types d'effets thermiques doivent être étudiés séparément :

- les effets létaux par irradiation totale ou localisée;
- les effets localisés sur un organe par irradiation partielle.

2.3.2.1. Effets létaux par irradiation généralisée

Une hyperthermie généralisée peut entraîner, si elle est suffisante, la mort de l'animal d'expérience (rats, cobayes, hamsters, lapins, chiens). Le temps d'irradiation pour cet effet léthal dépend de la longueur d'onde et de la densité de puissance. La cause de la mort est l'*hyperthermie irréversible*. Un faisceau d'ondes ultra-courtes, s'il possède une énergie suffisante peut tuer rapidement un animal. Ce fait a été démontré par H. M. HINES et S. E. RANDALL [31]. Ces auteurs exposent des rats, des lapins et des hamsters à des ondes ultra-courtes, de longueur d'onde variant entre 10 et 12 cm, ayant une puissance de 3 000 à 4 000 W pour l'ensemble du champ. Bien que les animaux n'absorbent qu'une faible partie de l'énergie totale, une exposition très courte de quelques dizaines de seconde suffit à les tuer. Lors de la nécropsie, on découvre des hémorragies viscérales multiples. HINES et RANDALL attribuent l'action mortelle des ondes à une *hyperthermie généralisée qui provoque la paralysie thermique du centre respiratoire*.

Les expériences de J. E. BOYSEN [9] intéressent uniquement le lapin soumis à des ondes modulées de 3 580 MHz ($\lambda = 9$ cm). Après 30 à 40 min d'irradiation, tous les animaux présentent une hyperthermie très élevée qui atteint dans certains cas 45 ou 46°C. Tous les animaux dont la température rectale dépasse 44,6°C à la fin de l'exposition succombent en moins de 24 heures.

Au début de l'irradiation par les ondes ultra-courtes les lapins présentent une forte augmentation du rythme et de l'amplitude des mouvements respiratoires, de la diarrhée non sanglante, une irritation de la conjonctive qui se traduit par un écoulement lacrymal abondant. Les lapins succombent par asphyxie avec dyspnée, convulsion et cyanose.

Chez les animaux morts au cours de l'exposition on trouve, à l'autopsie, des hémorragies du myocarde, de la trachée, des poumons, de la paroi du jéjunum et de l'iléon. BOYSEN n'a jamais constaté d'opacités de la cornée et du cristallin chez les lapins qu'il a exposés.

2.3.2.2. Effets létaux par irradiation localisée

L'exposition d'une région limitée du corps entraîne parfois la mort, mais il semble que le mécanisme physiopathogénique soit différent.

A. M. HINES et J. F. RANDALL irradient l'abdomen de lapin avec des ondes ultracourtes modulées à 3 000 MHz ($\lambda = 10$ cm). La mort est précédée de symptômes s'apparentant à ceux du choc traumatique ou du choc consécutif aux brûlures. Des irradiations localisées de la tête de singe ont été entreprises au Centre de Recherche Rome (New York) de l'U.S. Air Force [7]. Le singe est attaché dans une cage, à la partie supérieure de cette dernière se trouve une antenne qui est dirigée vers le milieu de la tête du singe (densité de puissance égale à 1 W/cm²). Quelques secondes après le début de l'irradiation, on observe successivement : une somnolence de courte durée; une agitation intense; des convulsions; la mort. Cette dernière est attribuée à une élévation excessive de la température dans les centres nerveux. Cependant, l'examen histologique

du cerveau ne révèle aucune lésion susceptible d'entraîner la mort. Les singes qui subissent une exposition trop brève pour être mortelle se rétablissent après avoir présenté, pendant quelque temps, des symptômes analogues à ceux que l'on observe chez l'homme dans la maladie de Parkinson.

2.3.2.3. Effets des irradiations localisées

Les organes les plus étudiés sont l'œil, le cerveau et les organes génitaux.

L'œil

Il faut noter avec G. PERDRIEL la facilité d'apparition des cataractes chez le lapin dont la forme et les proportions de l'œil se rapprochent beaucoup de celles de l'œil humain.

L. E. DAILY et son équipe [19] produisent des cataractes chez le chien et plus tard chez le lapin soumis à des ondes ultra-courtes de 2 500 MHz ($\lambda = 12$ cm) avec une puissance de 100 W. La température intra-oculaire augmente d'environ 3°C chez le chien. Les cataractes qui siègent dans les parties antérieures du cristallin apparaissent dans les 24 heures; ces opacités régressent rapidement; 9 semaines après l'exposition, des cataractes postérieures se développent.

D. R. WILLIAMS, J. P. MONOHAN et W. J. NICHOLSON [102] cherchent à déterminer en fonction du temps d'exposition *la densité de puissance minimale capable de produire une opacité du cristallin*. L'expérimentation a porté sur 58 lapins. Un œil de chaque animal est irradié par des ondes de 2 500 MHz ($\lambda = 12$ cm), l'autre œil sert de témoin. Le temps d'exposition varie de quelques minutes à 4 h 30 mn pour des densités de puissance allant de 0,59 à 0,12 W/cm². D. B. WILLIAMS et coll. [102] remarquent que *la gravité des lésions varie en sens inverse* du temps qui s'écoule avant leur apparition. Les opacités diffuses se manifestent les premières, puis apparaissent les opacités circonscrites, bénignes. Le seuil d'intensité varie de 0,59 W/cm² pour une exposition de 5 min à 0,29 W/cm² pour une durée de 90 min. La cataracte est généralement accompagnée de lésions moins importantes : œdème de la paupière, œdème de la conjonctive, exophtalmie, myosis.

La répartition des lésions varie en fonction de l'hyperthermie. A. W. RICHARDSON, T. D. DUANE et H. M. HINES [81, 82] ont mesuré les températures en différents points d'un œil de bœuf énucléé soumis à différentes longueurs d'ondes. La plus forte élévation de température se situe au niveau de la face postérieure du cristallin avec des ondes de $\lambda = 12$ cm. Avec des longueurs d'onde de 1,5 et 3 cm, la température la plus élevée apparaît à la face antérieure du cristallin et dans la chambre antérieure. Ces différentes zones d'hyperthermie maximale coïncident exactement avec les emplacements des opacités observées sur le cristallin d'un œil exposé *in vivo* à différentes longueurs d'onde.

W. C. MILROY et S. M. MICHAELSON [59] discutent de la validité de toutes les expérimentations animales. Les ondes ultra-courtes dont la fréquence varie de 2 000 à 3 000 MHz produisent des *cataractes postérieures*. Les fréquences

inférieures à 1 000 MHz ne sont pas cataractogènes : en effet, la dose cataractogène est supérieure à la dose létale. Les ondes ultra-courtes dont la fréquence varie de 3 000 à 10 000 MHz créent des cataractes antérieures.

Notons que les *conditions expérimentales* sont, pour la plupart, *peu réalistes*. Elles ne rétablissent pas chez l'homme les conditions normales d'utilisation. D'après les résultats de D. B. WILLIAMS et coll. [102], le seuil de densité de puissance à partir duquel les ondes de 10 000 MHz ($\lambda = 3$ cm) peuvent engendrer des opacités du cristallin, se situe aux environs de $0,30 \text{ W/cm}^2$ pour des expositions prolongées. Cette observation est plutôt rassurante. En effet, si l'homme est soumis à une densité de puissance de cet ordre de grandeur, il éprouve rapidement au niveau des yeux des sensations pénibles et même douloureuses qui l'avertissent du danger. Il pourrait alors quitter le champ du radar bien avant qu'apparaissent des lésions du cristallin [7, 21].

Le cerveau

L'hyperthermie de l'encéphale produite par les ondes ultracourtes entraîne la mort dont l'origine ne peut être précisée. AUSTIN et HORUATH (cité d'après H. BOITEAU) étudient l'effet des irradiations localisées de la tête. Les souris présentent des convulsions qui durent 2 à 3 min et la température mesurée à l'intérieur du cerveau immédiatement après la fin des convulsions atteint $43,5^\circ\text{C}$. L'examen histologique ne décèle pas de modifications pathologiques qui auraient permis d'expliquer l'origine de ces convulsions. M. L. KEPLINGER [42] note la présence de perturbations de l'électro-encéphalogramme accompagnant les convulsions du rat (irradiations localisées).

Les organes génitaux

Les testicules des mammifères sont particulièrement sensibles à l'hyperthermie. Les expériences de C. G. IMIG et coll. [35] portent sur des rats exposés à des ondes de 2 500 MHz ($\lambda = 12$ cm). Une température centrale des testicules supérieure à 35°C engendre toujours des lésions testiculaires, pratiquement identiques à celles qui se produisent au cours de l'irradiation par les infrarouges : dégénérescence très marquée des tubes séminifères, troubles de la fécondité.

Cette hyperthermie prolongée, nécessaire pour observer des lésions histologiques, n'est guère imaginable chez un sujet humain conscient.

2.4. EFFETS NON THERMIQUES (OU SPÉCIFIQUES) CHEZ L'ANIMAL

A la suite d'expositions complètes ou localisées d'animaux (souris, rats, lapins) qui ne font pas apparaître d'effet thermique décelable, des effets variés ont été enregistrés.

2.4.1. *Effets sur le système nerveux*

2.4.1.1. *Recherches russes*

Les travaux de Z. V. GORDON [27] font état de diverses modifications des rapports entre l'excitation et l'inhibition dans l'écorce cérébrale. Ces altérations de l'électro-encéphalogramme sont attribuées à une réaction des zones corticales. Ces changements s'observent aussi bien dans les expositions répétées qu'isolées. Les ondes inhiberaient l'activité motrice. GUSAROV [28] constate que des souris entraînées à la nage puis exposées ($1 \text{ à } 10 \text{ mW/cm}^2$) s'immobilisent et finissent par se noyer. Il existe, pour les auteurs russes, des modifications du comportement animal qui rappelleraient certains syndromes humains (étude des réflexes conditionnés) spécifiques des ondes ultra-courtes. Pour les auteurs américains et plus particulièrement S. MICHAELSON [54], les recherches soviétiques sont trop marquées par les concepts « pavloviens » soutenant que les actes moteurs de l'organisme animal sont toujours contrôlés par le système nerveux central. Les réponses non nerveuses auraient une importance secondaire, le système nerveux central représentant l'intermédiaire responsable de toute action induite par les ondes.

A. S. PRESMAN et LEVITINA [79] affirment que les ondes ultracourtes agissent non seulement sur les récepteurs thermiques de la peau, mais aussi sur d'autres récepteurs sensoriels cutanés (pour les fréquences supérieures à $1\,000 \text{ MHz}$) et sur les centres hypothalamo-hypophysaires (pour $600 \text{ à } 1\,000 \text{ MHz}$). Sous l'effet de faibles densités de puissance, des variations biochimiques (cholines-térase, acides nucléiques, amino-acides) sont observées.

2.4.1.2. *Recherches françaises*

Depuis 1963, B. SERVANTIE, G. BERTHARION et R. JOLY, du Centre d'études et de recherches de biophysologie appliquée à la marine, Hôpital Sainte-Anne, Toulon, s'intéressent à l'action biologique des ondes ultra-courtes. Ils ont entrepris un programme de recherches très intéressantes [5, 6, 36, 38, 40, 88]. Ils disposent d'un émetteur fournissant des ondes de 10 cm de longueur d'onde. Les animaux testés sont placés dans des cages spéciales en plexiglass ne modifiant pas le champ et disposées en chambre anéchoïque spécialement adaptée. Les témoins sont en cage de Faraday éclairée, ventilée et sonorisée identiquement. Les irradiations sont pratiquement continues (23 heures sur 24) et prolongées habituellement pendant de longues périodes (semaines ou mois suivant le cas). Les densités de puissance subies par les animaux sont très faibles : $5 \text{ mW/cm}^2 \pm 2$. B. SERVANTIE et coll. mettent en évidence des modifications électrocorticographiques chez des rats blancs exposés pendant un temps plus ou moins long. Il apparaît des épisodes formés de pointes avec parfois quelques complexes pointe-onde. En dérivation occipitale, on note la présence d'un rythme pointu, accompagné de quelques pointes isolées. Ces troubles ne surviennent qu'après 48 heures d'exposition continue. Ils seraient dus à une action directe sur la substance réticulée. Dès que l'émission est supprimée, les animaux récupèrent assez rapidement.

M. KLEIN et C. L. MILHAUD [43], du Centre de recherches de médecine aéronautique de Paris, reprennent le même type d'irradiation chez le primate (macaque). Les premiers résultats de cette expérimentation ont été négatifs. Par contre, chez le rat, ils observent des anomalies de l'électro-encéphalogramme du même type que celles décrites par R. JOLY et B. SERVANTIE. Il faut noter que ces deux types de recherches ont employé des ondes de longueur différente.

2.4.2. Effets sur l'appareil cardiovasculaire

Des soviétiques, N. V. TYAGIN [96], A. S. PRESMAN et N. A. LEVITINA [78, 79] observent des modifications portant sur la pression sanguine et le rythme cardiaque.

T. COOPER et coll. [16] obtiennent, chez le lapin, une tachycardie après exposition (densité de puissance : 50 à 100 mW/cm², durée 10 à 140 min). Ils estiment que les effets constatés seraient dus à l'action thermique des ondes ultra-courtes. I. T. KAPLAN [41] reprend les expériences de PRESMAN pour essayer de reproduire la tachycardie qui n'apparaît qu'à partir de 100 mW/cm².

Ces contradictions révèlent, une fois de plus, les nombreuses imprécisions expérimentales (fréquence, densité de puissance, etc.) qui rendent très difficiles les comparaisons.

2.4.3. Effets sur le système réticulo-histiocytaire

L. MIRO, R. LOUBIÈRE et A. PFISTER [65], grâce à l'emploi de la méthionamine marquée au ³⁵S et à une étude anatomo-pathologique démontrent que l'irradiation par les ondes ultra-courtes entraîne une hyperplasie réticulaire et histiocytaire au niveau de la rate, du foie et du thymus de l'animal. R. JOLY et coll. [38], après 6 mois d'exposition à des seuils inférieurs à ceux des effets thermiques, n'observent pas de modifications histologiques au niveau du foie, de la rate. En particulier, ils ne décèlent pas, en microscopie électronique, de modifications ultrastructurales. Par contre, ces recherches révèlent l'existence de modifications fonctionnelles du système réticulo-endothélial :

- action diphasique chez la souris, mise en évidence par les variations de l'index phagocytaire d'Halpern;
- baisse des gammaglobulines sériques du rat avec variation inverse de l'albumine et des alpha-2-globulines.

Cette diminution du taux des gammaglobulines pouvant entraîner des modifications immunitaires traduirait, pour de nombreux auteurs, une *influence primaire* possible sur le système réticulo-endothélial qui joue un rôle essentiel dans les mécanismes de défense de l'organisme.

2.4.4. Effets sur le sang

Des modifications hématologiques (nombre de globules rouges, formule leucocytaire) chez le chien n'apparaissent que pour un champ électromagnétique dont la densité de puissance est supérieure à 50 mW/cm². Elles seraient surtout caractéristiques d'un stress thermique [51].

R. JOLY, B. SERVANTIE et coll. [38] trouvent, chez des rats soumis à l'irradiation aux ondes ultra-courtes pendant 6 mois, une tendance générale à l'anémie au bout de quelques mois, mais sans altération de la durée de vie des hématies et de la résistance globulaire. Il existe, de plus, des modifications variables et inconstantes de la formule leucocytaire.

S. BARANSKI [1] rapporte les résultats d'une expérimentation réalisée à Varsovie chez 100 cobayes et 100 rats irradiés par des ondes ($\lambda = 10$ cm) continues ou pulsées pendant 3 mois, à raison de 3 heures par jour avec une densité de puissance de $3,5 \text{ mW/cm}^2$. Il apparaît une *leucocytose* due à une lymphocytose, le nombre de polynucléaires restant constant. Le nombre de globules rouges est inchangé. Cette lymphocytose reste élevée jusqu'à 2 semaines après la fin de l'irradiation et le nombre de lymphocytes se normalise à partir de la troisième semaine après la fin de l'irradiation. Au niveau de la moelle osseuse, il n'existe pas de modifications quantitatives. BARANSKI estime que les faits observés ne peuvent être expliqués par les effets thermiques puisqu'en aucun moment, la température des animaux ne s'est modifiée.

2.4.5. Effets croisés

Des recherches importantes du point de vue pratique, mais souvent contradictoires, concernent l'action combinée des ondes électromagnétiques et d'autres rayonnements : rayons X, rayonnements alpha, bêta, gamma, lasers; des substances pharmacologiques (strychnine, nicotine, cresol); des particules inhalées : silice, poussières variées.

S. MICHAELSON et coll. [50, 93, 94] trouvent une inhibition partielle de l'action nocive des rayons X par les ondes ultra-courtes (prolongation de la survie de souris irradiées).

L. MIRO et coll. [63] étudient deux lots identiques de bactéries irradiées à l'aide de rayonnements gamma, un lot avait été préalablement exposé à des *micro-ondes*. Jusqu'à 6 000 R, les résultats sont identiques. Par contre, pour des doses de 24 000 à 48 000 R, la survie est augmentée d'au moins 10 fois par exposition aux ondes ultra-courtes.

R. JOLY et coll. [38] estiment, en se basant sur leurs recherches personnelles, qu'il ne semble pas exister d'effet croisé net avec les radiations ionisantes. Ils irradient des globules rouges par contactothérapie (20 000 R). La sortie du potassium des hématies n'est pas précipitée par les ondes (8 mW/cm^2) appliquées pendant 16 heures immédiatement après l'irradiation.

L'effet apparemment radiorestaurateur obtenu par exposition à des ondes ultra-courtes (30 mW/cm^2) sur des couches de *coli* B après irradiation X semble essentiellement lié à l'augmentation de température des colonies ou du milieu.

L'exposition prolongée aux ondes ultra-courtes (20 jours à $1,5 \text{ mW/cm}^2$) n'a pas d'influence sur le cycle sexuel de la femelle de cloportes (*Porcellio dilatatus*) précédemment irradiée par des rayons X (4 000 à 9 000 R) et sur leur survie ($DL_{50/30}$ égale à 9 000 R).

Des recherches portant sur la DL_{50} de la souris (race C17 Duplan germ-free) irradiée par des rayonnements gamma n'ont montré aucun effet notable des ondes ultra-courtes ($5 \text{ mW/cm}^2 \pm 2$) pendant 1 mois pour le premier cas, 15 jours pour le second.

2.4.6. Action sur le développement

VAN UMMERSEN [98] observe un développement *anormal d'embryons de poulets* : inhibitions de la différenciation des yeux, du cœur, du cerveau, arrêt du développement des parties postérieures. R. L. CARPENTER et E. M. LIVSTONE [11] irradiant des pupes d'insectes (*Tenebrio militaris*) constatent l'existence d'anomalies de développement, notamment une absence de métamorphose de la partie postérieure. Ces auteurs estiment qu'un facteur extrathermique est responsable des anomalies rencontrées. Malheureusement, ces expériences n'ont pu être reproduites par d'autres chercheurs. Elles ne semblent pas constituer une preuve solide de l'existence des effets non thermiques. R. JOLY et coll. [38] n'observent, chez des souris soumises à des ondes ultracourtes pendant de longues périodes :

- ni modifications de la croissance en poids et en taille de souris exposées du 1^{er} au 2^e mois de la vie;

- ni troubles de la reproduction (fertilité et proportion des sexes) par irradiation de l'un ou l'autre sexe du 1^{er} au 4^e mois.

2.4.7. Effets sur les micro-organismes

Les micro-organismes sont un matériel de choix pour étudier les interactions au niveau cellulaire.

2.4.7.1. Protozoaires

Le comportement *migrateur des amibes* ou des paramécies varie selon que les ondes sont continues ou pulsées. Pour des fréquences différentes, les unicellulaires se déplacent soit le long des lignes du champ, soit perpendiculairement à ces lignes [89]. *L'excitabilité des paramécies* est modifiée, ce qui indiquerait une action au niveau de la membrane cellulaire. Une excitabilité semble suivre le régime de l'émission.

2.4.7.2. Bactéries

Des fréquences définies (66,71 et 73 GHz) diminuent la vitesse de division des bactéries *E. coli* tandis que la fréquence de 68 GHz l'augmente [300]. Les résultats comparés aux spectres d'absorption des ondes ultra-courtes par les cellules et les macromolécules biologiques (ADN et ARN, protéines) indiquent que, seules, les fréquences absorbées électivement par les bactéries interviennent sur le mécanisme de la croissance. Ainsi, la fréquence stimulatrice de 68 GHz correspond à un pic d'absorption de l'ARN et les fréquences inhibitrices de 66 et 73 GHz correspondent respectivement aux maximums d'absorption de l'ADN et des protéines.

D'autre part, WEBB et BOOTH [100] démontrent que la fréquence de 66 GHz retarde l'incorporation des précurseurs des biosynthèses de l'ADN et des protéines. Il y aurait une altération du mécanisme enzymatique de la synthèse protéique qui dépend de la replication préalable de l'ADN. Il semble que les ondes ultra-courtes interviennent sur les macromolécules (enzymes, acides nucléiques), nécessaires au métabolisme bactérien.

2.5. MÉCANISME D'ACTION NON THERMIQUE DES ONDES ULTRA-COURTES

Plusieurs théories tendent à expliquer les mécanismes responsables de l'action des faibles densités de puissances des ondes ultra-courtes sur les systèmes biologiques :

- effet perlé;
- excitation électrique des membranes biologiques;
- résonances macromoléculaires;
- théorie microthermique.

2.5.1. Effet perlé (*pearl chain effect*).

Des champs électromagnétiques peuvent engendrer des forces responsables de l'orientation de particules en suspension. Il se forme alors des *chaines de perles* aussi bien avec des particules d'amidon qu'avec des gouttelettes lipidiques ou des globules sanguins. Il en est de même avec les ondes ultra-courtes; les érythrocytes sont orientés en fonction de la fréquence des ondes et de la conductivité du milieu [89].

L'effet perlé traduisant une induction de charges électriques dans les particules (dipôles), des réarrangements moléculaires du même type, à l'intérieur des cellules vivantes, pourraient avoir lieu. Cependant, des études théoriques indiquent que pour obtenir un effet d'orientation dans l'organisme humain, il faudrait des particules de 30 μm de diamètre, libres de se mouvoir [90]. Or, il n'existe pas de telles particules dans le corps. En admettant leur existence, l'énergie nécessaire à leur orientation provoquerait un échauffement très important des tissus.

2.5.2. Excitation électrique des membranes biologiques

En présence d'un champ électromagnétique, le potentiel d'action induit dans une fibre nerveuse dépend de la fréquence de l'onde. D'après H. P. SCHWAN [85], l'excitation du nerf exige une différence de potentiel notable, ce qui ne semble pas le cas avec les ondes ultra-courtes qui engendrent des potentiels 10^5 à 10^6 fois plus faibles que le potentiel de repos du nerf.

Cependant, certains auteurs comme FREY [26] s'opposent à ces conceptions. Ils affirment qu'on est loin de connaître parfaitement le fonctionnement du système nerveux (codage, transfert et stockage des informations). De plus, ils remarquent que le potentiel de repos ne constitue pas un modèle réaliste du

système nerveux complet d'un animal. J. R. SEGAL [86] démontre que la surface d'axones géants est porteuse de charges électriques liées à l'état électrophysiologique. Cette surface qui n'est pas passive, est particulièrement sensible aux champs électriques qui correspondent à des fractions du potentiel d'action. Diverses approches tendent à prouver la possibilité d'action du vecteur magnétique sur le système nerveux. MCGREGOR [48] note que les champs électriques à l'intérieur du crâne associés à une exposition aux ondes ultra-courtes peuvent induire des potentiels trans-membranaires de quelques dizaines de millivolts dans les cellules nerveuses. Ces potentiels qui atteignent leur valeur maximale pour les ondes radar seraient à l'origine de troubles nerveux.

2.5.3. *Résonances macromoléculaires*

H. P. SCHWAN [85] a étudié le phénomène des résonances dans des solutions de macromolécules biologiques (protéines) soumises à l'action des ondes à fréquences très élevées.

Les chaînes latérales polaires de ces molécules s'orientent dans la direction des lignes du champ électrique, ce qui a pour conséquence la rupture de liaisons chimiques faibles (liaisons hydrogène, interactions hydrophobes intra et inter-moléculaires). La zone d'hydratation qui entoure chaque macromolécule serait modifiée, entraînerait la dénaturation protéique (perte de la structure moléculaire tri-dimensionnelle, responsable de la diminution d'activité biologique). Les gammaglobulines et les enzymes exposés aux ondes ultra-courtes vont donner un diagramme électrophorétique anormal. L'activité immunologique ou enzymatique est modifiée, ce qui pourrait expliquer les désordres métaboliques observées après exposition prolongée aux ondes ultracourtes.

2.5.4. *Théorie microthermique d'OSIPOV*

La mesure des variations de température n'étant pas très précise, OSIPOV [72] attribue les effets biologiques liés à de faibles densités de puissance à des modifications microthermiques. Les systèmes biologiques étant électriquement hétérogènes, les ondes auraient une action thermique sélective sur les tissus. La distribution inégale de la chaleur serait responsable d'effets thermiques très localisés.

Cette théorie est à rapprocher de celle de MCAFEE [47] : en élevant localement la température des nerfs périphériques d'un chat avec une électrode chauffante (ondes ultra-courtes ou infrarouges), la réaction est identique (théorie des micro-échauffements).

2.5.5. *Autres théories des effets non thermiques*

Pour concevoir l'action des ondes ultra-courtes sur l'activité nerveuse, FREY et SIFFERT [25] envisagent la conception de SZENT-GYORGYI'S [92]. Les processus cellulaires sont avant tout des transports d'électrons et d'énergie. En particulier, les ondes ultra-courtes modifieraient la répartition des ions H^+ au niveau de l'eau intracellulaire quand les nerfs se dépolarisent. D'après WEI [101], le neurone est assimilable à un transistor. Les médiateurs chimiques

tels que l'acétylcholine sont des pôles pouvant s'orienter sous l'action des ondes et produire un champ électrique suffisant pour déplacer les ions + à travers « la barrière de jonction » représentée par la membrane post-synoptique. ELUL [23], ayant observé le déplacement de cellules nerveuses dans un champ électrique, suggère la possibilité d'effets de forces électrocinétiques produisant une déformation locale de la membrane cellulaire responsable de l'information au niveau des synapses dans les conditions normales.

2.5.6. Discussion [7, 21, 38]

Il persiste des incertitudes concernant :

— *L'appareillage*. Divers types de générateurs sont employés par les chercheurs et il est impossible de comparer les différentes expérimentations.

— *Le type d'onde émise*. La fréquence est un facteur important du point de vue de l'absorption et des effets engendrés. Il faut tenir compte des types d'émission (continue, pulsée) et des paramètres de modulation.

— *Les animaux d'expérience*. On doit considérer l'anatomie du corps, la sensibilité dans le faisceau, la présence de poils, le pouvoir thermorégulateur, l'état physiologique.

— *Les conditions d'environnement*. Température ambiante, humidité, mouvements de l'air.

(La bibliographie sera publiée avec la deuxième partie de l'article, *Radioprotection*, vol. 12, n° 4.)