E. EVRARD

General-major médecin e. r.
Membre de l'Académie Internationale de Médecine Aéronautique et Spatiale
Membre de l'Académie Internationale d'Astronautique.

PRÉCIS DE MÉDECINE AÉRONAUTIQUE ET SPATIALE

Préface de Charles A. Berry, M.D., M. PH.

46 figures

MALOINE S.A. EDITEUR
27, rue de l'Ecole-de-Médecine - 75006 Paris
1975

CHAPITRE XXIII

Pathologie professionnelle du personnel chargé de la sécurité de la circulation aérienne

1re Section

LES EFFETS BIOLOGIQUES DES HYPERFREQUENCES DU RADAR (rayonnements électromagnétiques U.H.F.)

Si l'idée du radar remonte à la fin de la première Guerre mondiale, le début de ses applications sur une grande échelle date de la guerre 1939-1945 pour répondre à des besoins militaires. Déjà, à cette époque, des craintes ont été émises parmi les personnes des stations de radar sur la possibilité d'effets nocifs que ce rayonnement pourrait exercer sur les tissus de l'organisme humain. Elles se sont ensuite répétées périodiquement.

Depuis ce temps, les progrès technologiques ont étendu les usages et la puissance du radar d'une manière considérable. Le radar de surveillance va du radar géant de surveillance intercontinentale au radar miniature de contrôle routier ; entre ces limites, on trouve les radars des ports et des aéroports, les radars des navires, les radars des avions. Le radar astronomique est devenu courant. Le radar a également pénétré dans l'industrie et même dans la maison d'habitation : des fours radar sont utilisés pour le chauffage et la cuisson de céramiques, de porcelaines, de matières plastiques, pour la décongélation et la cuisson de divers aliments.

En raison de la prolifération des émetteurs et de l'accroissement considérable de l'énergie de faisceaux émis dans certaines applications, il paraît justifié de poser le problème des effets nocifs qui pourraient éventuellement résulter de l'exposition humaine à ce rayonnement.

En bref, le radar peut-il être dangereux pour l'homme ?

Dans l'affirmative, il convient de protéger le personnel contre ses effets nocifs.

Considérés sur un plan théorique, les dangers principaux peuvent relever de deux causes :

a) de la haute tension des émetteurs ;
b) de l'énergie rayonnée par les radars à grande puissance.

Les dangers résultant de l'application de hautes tensions à l'organisme humain sont graves, mais ils sont bien connus. Il est donc facile de mettre en œuvre toutes les mesures qui assureront une protection efficace du personnel travaillant au contact des émetteurs.

Les dangers résultant de l'énergie rayonnée sont beaucoup moins connus. Ils continuent à faire l'objet de recherches. Les mesures de sécurité présentent des caractères spécifiques dont il importe de connaître les bases scientifiques expérimentales.

Dans la mise au point succincte qui va suivre, les dangers relevant de la haute tension des dispositifs émetteurs ne seront pas abordés, puisqu'ils font partie intégrante des dangers propres à l'emploi des diverses formes du courant électrique. Seuls seront traités les problèmes liés aux effets de l'énergie rayonnée par les installations de radar sur l'organisme humain.

Les aspects suivants seront successivement abordés :

1) les formes de l'énergie émise par les appareils de radar à grande puissance ;
2) les résultats des recherches effectuées sur les effets biologiques des rayonnements électromagnétiques de haute fréquence ;
3) les mesures de sécurité destinées à protéger le personnel exposé contre toutes les formes de danger possibles.

I) ENERGIE LIBEREE PAR LE RADAR

Le radar, dans ses applications aéronautiques, est un système complexe qui permet de déceler l'existence d'objets réfléchissants et de connaître leur position par l'observation des réflexions qu'ils produisent sur les ondes électromagnétiques. La nécessité de diriger le mieux possible les ondes utilisées, avec un minimum de perte de flux, conduit à employer des fréquences élevées.

Selon les modèles de radar et les utilisations envisagées, la *longueur d'onde* varie entre 1 centimètre et 1 mètre, (d'où l'appellation d'« ondes centimétriques »). La *fréquence* (1) varie entre 30 Gigahertz (GHz) et 300 Mégahertz (MHz), (d'où l'appellation d'« hyperfréquences »). Entre ces limites, diverses gammes ont été définies et désignées par des lettres.

Le tableau ci-après fournit les désignations qui ont été mises en usage le 1er janvier 1972 dans les pays de l'OTAN pour les diverses bandes de fréquences.

Désignations	Bandes de fréquences
Bande A	0 - 250 MHz
Bande B	250 - 500 MHz
Bande C	500 - 1 000 MHz
Bande D	1 000 - 2 000 MHz
Bande E	2 000 - 3 000 MHz
Bande F	3 000 - 4 000 MHz
Bande G	4 000 - 6 000 MHz
Bande H	6 000 - 8 000 MHz
Bande I	8 000 - 10 000 MHz
Bande J	10 000 - 20 000 MHz
Bande K	20 000 - 40 000 MHz
Bande L	40 000 - 60 000 MHz
Bande M	60 000 - 100 000 MHz

(1) La fréquence d'émission f est liée à la longueur d'onde (λ) par la relation $\lambda = \frac{c}{f}$, C étant la vitesse de la lumière.

Dans le spectre électromagnétique, les fréquences du radar se situent donc entre celles des ondes radiophoniques courantes et celles des rayons infrarouges.

L'émetteur de ces ondes centimétriques est, dans l'état présent de la technique, un tube dénommé *klystron*. Le principe en est le suivant : un canon à électrons fournit un faisceau électronique cylindrique qui passe successivement dans une région à modulation de vitesse, puis dans un espace de glissement, enfin, dans une région d'utilisation, avant d'aboutir à l'anode.

Au lieu du klystron, on se sert, dans certaines installations, d'un tube dénommé magnétron. Celui-ci est une diode cylindrique dans laquelle cathode et anode sont coaxiales et que l'on soumet à un champ magnétique uniforme parallèle à l'axe de révolution de l'ensemble. Celui-ci produit les courants de fréquence très élevée qui sont nécessaires. Il est un excellent oscillateur d'hyperfréquences et se laisse facilement moduler en amplitude.

L'énergie émise par le klystron ou le magnétron se présente sous quatre formes : des rayons ultra-violets, des rayons infrarouges, des rayons X, un rayonnement électromagnétique centimétrique. Tous les efforts pour améliorer les klystrons et magnétrons tendent évidemment à augmenter cette dernière forme d'énergie.

L'énergie *ultra-violette* et l'énergie *infrarouge* sont beaucoup trop faibles pour qu'il en soit tenu compte dans l'évaluation des dangers biologiques qu'elles pourraient présenter ; la protection locale est d'ailleurs aisée à réaliser.

Les rayons X, produits au niveau de l'anode, sont arrêtés par les gaines protectrices disposées dans la région du tube où ils sont émis. Le danger qu'ils pourraient créer est donc bien connu et les construc-

teurs prennent les mesures nécessaires de protection. Une règle simple consiste à adopter une épaisseur de blindage correspondant à l'affaiblissement d'un rayonnement supposé émis à la tension maximale disponible sur l'émetteur, de telle sorte qu'il ne dépasse pas 0,25 milliroentgen par heure à un mètre.

L'aspect essentiel du problème se délimite ainsi clairement : les dangers que pourrait courir le personnel exposé ne peuvent provenir, en fait, que des *radiations à hyperfréquences*.

La fréquence d'émission, qualifiée de « porteuse », est modulée d'une façon qui est spécifique à la technique radar.

L'émission peut se faire de *façon continue :* elle est dite « C.W. » (continuous wave). C'est le cas pour assurer les télécommunications, pour guider les engins-fusées (illuminateurs de but), ou, encore, pour chauffer les fours radar.

L'émission peut aussi se faire en *ondes pulsées :* c'est généralement le cas pour la détection radar. Cette modulation par impulsions est caractérisée par la durée des impulsions - en général de l'ordre de quelques microsecondes - et leur fréquence de répétition, de l'ordre du kilocycle. Cette forme d'émission est imposée par le voisinage généralement obligatoire d'un émetteur qui doit être le plus puissant possible pour obtenir une grande portée, et d'un récepteur qui doit être le plus sensible possible pour exploiter au mieux la fraction réfléchie du rayonnement. On réalise alors un compromis en émettant une grande quantité d'énergie pendant un intervalle de temps très court et en ne recommençant qu'après avoir laissé au récepteur le temps de fonctionner.

La différence entre les modes d'émission pulsée et d'émission continue se répercute sur la puissance d'émission. Les émetteurs en ondes pulsées peuvent avoir actuellement une puissance de crête (peak power) qui dépasse le mégawatt. Mais la modulation réduit cette puissance de crête à une puissance moyenne (mean power) au moins 1 000 fois plus faible.

Les émetteurs en émission continue ont une puissance moyenne qui est égale à la puissance de crête, mais elle est bien inférieure à la puissance de crête des émetteurs pulsés.

Le rayonnement produit par l'émetteur est conduit à l'antenne (ou aérien) et, après sa réflexion, de l'antenne au récepteur, par un conducteur creux appelé « guide d'onde » ou encore par un câble coaxial.

L'aérien qui assure la formation du faisceau a des caractéristiques propres et surtout un gain, qui déterminent la géométrie du faisceau, en particulier sa concentration et l'existence de lobes latéraux ou postérieurs plus ou moins importants. Enfin, cet aérien est souvent animé de mouvements de rotation ou d'oscillation pour assurer un balayage de l'espace par les ondes.

Le récepteur est souvent protégé contre un apport énergétique éventuellement excessif par un coupe-circuit appelé « T.R. - Tube », (Transmit - Receive Tube), constitué essentiellement d'une enceinte ionisée par un élément radio-actif, et contenant deux électrodes.

Une propriété de ces ondes, celle qui leur a valu de si nombreuses utilisations, est le fait qu'elles se réfléchissent sur les obstacles qu'elles rencontrent. En fait, le rayonnement qui atteint une cible peut être réfléchi par la cible, ou y pénétrer et y être absorbé, ou pénétrer dans la cible et la traverser sans guère y abandonner d'énergie, ou encore contourner la cible. On assiste le plus souvent à une combinaison de ces diverses modalités, selon la présence et l'importance de plusieurs facteurs : fréquence du rayonnement utilisé, nature et surface de la cible (angle d'incidence, structure physique et chimique de la cible).

Le champ électromagnétique 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 ». L'unité est le Watt par mètre carré ; mais il est généralement plus pratique d'utiliser le milliwatt par centimètre carré (mW/cm^2). Cette densité de puissance est actuellement, dans la pratique, le seul

critère retenu, dans la gamme des fréquences du radar, pour évaluer les dangers éventuels.

Le champ électromagnétique étant formé de deux composantes perpendiculaires et égales entre elles, une électrique et une magnétique, la mesure pourra porter sur l'une ou l'autre. Habituellement la composante électrique est plus facile à mesurer. Il est aussi possible de déterminer la densité de puissance par l'échauffement d'un capteur sensible. C'est le procédé du bolomètre dont le principe est le suivant : le courant induit dans un solénoïde placé dans un champ centimétrique modifie la température de ce solénoïde, par effet Joule, et par conséquent, sa résistance au passage d'un courant continu appliqué à ses deux extrémités. Ces variations de débit de courant continu sont fonction de la quantité d'énergie centimétrique captée par le solénoïde. Mais si le principe du bolomètre est simple, son emploi ne l'est pas et de telles mesures ne sont pas également possibles partout.

L'étude d'un faisceau radar permet de déterminer 3 zones différentes :

a) *Une zone éloignée,* dite de Fraunhofer, où le faisceau est bien constitué. A ce moment, en particulier, les deux composantes du champ sont bien égales et perpendiculaires ; la densité de puissance obéit à la loi de décroissance en fonction du carré de la distance et il est possible de la mesurer de façon valable.

b) *Une zone proche,* dite zone de Fresnel, où le faisceau n'est pas encore constitué : les deux composantes ne sont pas perpendiculaires ni égales, et la densité de puissance est sujette à de grandes variations entre deux endroits proches l'un de l'autre ; les mesures sont alors beaucoup plus délicates ; il est alors préférable de mesurer les deux composantes séparément ou d'utiliser un système de mesure global.

c) *Une zone intermédiaire,* entre les deux précédentes.

L'étendue de ces zones dépend de la fréquence, de la puissance et du gain de l'antenne. Il est donc possible, théoriquement, de calculer la densité de puissance en un endroit donné. Mais ces calculs font le plus souvent appel à des hypothèses simplificatrices (assimilation du rayonnement à une onde plane, absence de réflexions, etc.), qui se rencontrent rarement en pratique.

De plus, la coexistence possible de plusieurs rayonnements de fréquence et de polarisation différentes est une source de complication du problème. Aussi, la mesure des densités de puissance, problème simple au stade du laboratoire, peut devenir insoluble ou donner des résultats aberrants dans certaines conditions pratiques. C'est souvent le cas dans certaines bases aériennes où l'ambiance électromagnétique de diverses régions est formée par la composition de plusieurs rayonnements et de leurs réflexions sur des obstacles tels que les bâtiments.

II) EFFETS BIOLOGIQUES DU RAYONNEMENT ELECTRO-MAGNETIQUE U.H.F.

On distingue les effets *thermiques* et les effets *spécifiques.*

On appelle « effets thermiques », ceux dus manifestement à une production de chaleur.

On appelle « effets spécifiques », ceux pour lesquels on est obligé de faire appel à une interaction entre le champ électromagnétique et les processus intra-cellulaires et où cette interaction n'a aucun rapport direct avec un dégagement de chaleur.

A) LES EFFETS THERMIQUES

Une onde électromagnétique transporte de l'énergie. Rencontrant un obstacle, elle va se réfléchir : c'est cette onde réfléchie qui sera utilisée pour la détection des aéronefs et des fusées. Mais l'onde initiale n'est que rarement réfléchie en totalité et il existe une partie non réfléchie qui va être partiellement *absorbée* par l'obstacle et partiellement *transmise.*

Comme il a été mentionné plus haut, le coefficient de réflexion qui régit le rapport entre les deux ondes, réfléchie et transmise, dépend des propriétés de la matière qui constitue l'obstacle. De ce point de vue, la matière vivante, donc le corps de l'homme ou des animaux, se comporte de façon analogue à la matière inerte, avec des caractéristiques telles que la perméabilité magnétique, la constante diélectrique, etc. que l'on peut mesurer ou déterminer par le calcul. On constate que la matière vivante se comporte plutôt comme les semi-conducteurs.

En connaissant au départ les paramètres qui définissent le champ électromagnétique dont on veut étudier les effets, il est possible de déterminer le devenir de ce champ à l'intérieur d'un organisme et de vérifier expérimentalement la validité des calculs théoriques.

Comme il a été dit plus haut, une partie de l'énergie électromagnétique transportée par l'onde *transmise* est *absorbée* et se transforme en chaleur. La *pénétration* du rayonnement et son *absorption* dépendent de la fréquence de ce dernier et de la nature de la matière exposée à sa pénétration : les hyperfréquences sont généralement bien absorbées par la matière vivante en raison de sa teneur élevée en eau. La molécule d'eau, globalement neutre mais électriquement asymétrique, vibre à l'unisson du champ centimétrique incident jusqu'aux fréquences de ± 20 milliards de cycles par seconde. Il en résulte une dégradation de l'énergie électromagnétique en énergie mécanique, puis thermique. Mais alors que les ondes dont la fréquence est de l'ordre de 10 à 20 gigacycles par seconde sont *absorbées* en quasi-totalité par les couches superficielles cutanées, celles de fréquence plus petite, de l'ordre de 10 mégacycles par seconde, pénètrent plus profondément. Dans ce dernier cas, la production de chaleur se fera simultanément en surface et en profondeur, déterminant des brûlures des organes profonds et des brûlures de la peau.

1) **Effets des expositions générales du corps au rayonnement**

a) *Brûlures :*

Le danger des brûlures par effet thermique du radar réside dans le fait que des lésions internes graves, atteignant des organes profonds, peuvent être causées par le rayonnement bien avant que la sensation de chaleur ne soit perçue par le sujet et ne déclenche alors une réaction de fuite. En effet, deux facteurs interviennent dans ce phénomène pour lui donner une spécificité de gravité :

1) la brûlure des organes profonds est toujours plus grave que celle de la peau, quant au pronostic vital ;

2) des lésions internes graves peuvent être causées par le rayonnement radar avant que le sujet ne soit alerté par la sensation de chaleur. En effet, les récepteurs thermiques ont une localisation cutanée. Dans les cas habituels d'échauffement d'origine extérieure, par rayonnement infra-rouge par exemple, la chaleur atteint d'abord la peau, puis diffuse vers l'intérieur et les organes profonds par conduction et par transport sanguin. Il en résulte que l'organisme est prévenu de l'échauffement avant que celui-ci ait atteint les organes profonds. Au contraire, dans le cas de l'élévation thermique par radar, la production de chaleur se fait simultanément dans les tissus superficiels et les organes profonds. Lors du passage de l'énergie à travers des couches successives de tissus dissemblables, il peut se produire des ondes stationnaires, c'est-à-dire une accumulation d'énergie à la surface de séparation de deux tissus ou de deux organes, ou dans des viscères creux, en raison des différences de constante diélectrique entre les deux tissus ou les deux organes ou en raison de la forme de l'organe creux. Le radar ne prévient pas, ou prévient trop tard (Joly et Servantie). Effectivement, on a observé expérimentalement sur des chiens, pour des expositions de 0,2 watt/cm² pendant 2 heures, l'apparition d'une brûlure profonde à ses débuts et ne se manifestant que le sixième jour, d'une manière soudaine, sous la forme de lésion épidermique, alors qu'à ce moment, la cicatrisation est déjà en cours dans les tissus sous-jacents.

b) *Augmentation de la température interne du corps :*

C'est le deuxième effet thermique des ondes centimétriques. Une exposition de la

totalité ou d'une grande partie de l'organisme provoque une augmentation de la température interne.

Une telle élévation thermique est dangereuse pour l'homme si elle dépasse 42 ou 43°C. Il faut qu'une densité de puissance très importante s'applique sur une grande surface du corps pour que la situation puisse revêtir un aspect dangereux dans les conditions climatiques normales. En effet, les mécanismes par lesquels l'organisme assure la déperdition de chaleur interne (vasodilatation cutanée, sudation) sont habituellement suffisants dans ces situations. Toutefois, dans certaines conditions climatiques ou opérationnelles, les possibilités de régulation thermique peuvent être facilement dépassées par l'apport de ce supplément de chaleur. Il en résulte alors l'équivalent d'un coup de chaleur (voir chapitre XIV).

Pour des densités plus faibles de puissance d'irradiation, on note de l'hémoconcentration, une augmentation du débit cardiaque, de l'hyperpnée.

Le stress hypothalamo-hypophysaire est manifeste, avec chute des éosinophiles et des lymphocytes.

La phase terminale de l'hyperthermie, lorsqu'elle évolue vers la mort, s'accompagne d'acidose et de tétanie.

L'autopsie des animaux dont la mort est due à cette hyperthermie provoquée met en évidence de la congestion et de l'hyperémie des tissus ; les viscères présentent des hémorragies microscopiques ou macroscopiques, des perforations et des nécroses par brûlures.

2) Effets thermiques dus à une exposition localisée au rayonnement

En dehors d'une exposition générale, il peut exister des expositions localisées au rayonnement centimétrique. Ce sera le cas d'un technicien procédant à des réparations à proximité d'une antenne en fonctionnement, ou celui d'un technicien qui regarde à l'intérieur d'un guide d'onde pour voir s'il n'est pas obturé.

Certaines régions limitées du corps peuvent ainsi être soumises à des densités très élevées de puissance. Les résultats sont très variables en fonction de l'organe atteint, de sa forme, de ses dimensions et de sa vascularisation. Ainsi qu'il a déjà été mentionné plus haut, certains organes creux sont très sensibles en raison de leur conformation même, car celle-ci peut être responsable de la création d'ondes stationnaires engendrant des points chauds. C'est à ce mécanisme que l'on attribue des perforations intestinales. Mac Laughlin a signalé en 1957 un cas de perforation intestinale avec péritonite plastique, suivie de décès, chez un technicien qui au cours de son travail se trouva, pendant quelques secondes, dans le faisceau d'émission à environ 10 pieds de l'antenne.

L'irradiation de la tête est aussi très dangereuse ; elle déclenche expérimentalement chez le chien et le singe un état convulsif dont l'issue peut être fatale.

L'appareil génital mâle, plus particulièrement les testicules, s'est montré très thermo-sensible chez les animaux d'expérience (dégénérescence de l'épithélium des tubes séminifères, diminution du nombre et de la maturation des spermatocytes, stérilité transitoire). Ces altérations répondent aux exigences thermiques de la spermatogénèse. La chute des hormones androgènes indique la sensibilité du tissu endocrine à l'irradiation centimétrique. Mais le degré de sensibilité de l'appareil génital mâle n'a pas encore été déterminé chez l'homme, notamment la valeur-seuil d'apparition des lésions testiculaires pour une irradiation de durée indéfinie.

Le cristallin s'est montré très sensible aux effets thermiques du radar. Une irradiation importante cause une cataracte dont la localisation dépend de la fréquence du rayonnement. Elle se situe à la face postérieure du cristallin pour les fréquences de l'ordre d'un gigahertz et, au contraire, à la face antérieure, pour les fréquences de l'ordre de 10 gigahertz. L'apparition de ces cataractes dépend de la densité de puissance et du temps d'exposition ; l'expérimentation montre qu'il faudra 700 mW/cm² pendant 5 minutes ou 120 mW/cm² pendant 270 minutes. En outre, des expositions répétées sont plus dangereuses qu'une seule exposition. La valeur-seuil de densité de

puissance pour l'apparition des cataractes est l'objet de controverses : pour certains expérimentateurs, il faut la fixer à 100 mW/cm² ; d'autres auteurs citent pour l'homme des cas de cataracte qui seraient survenus après plusieurs années d'exposition à des densités de puissance de quelques mW/cm². Les ondes pulsées paraissent être plus dangereuses que les ondes continues, en ce qui concerne l'origine de la cataracte. Ceci est une exception à la règle générale, selon laquelle les effets thermiques sont indépendants de la modulation du rayonnement et une émission en ondes continues est plus efficace qu'une émission en ondes pulsées.

Néanmoins, on peut dire que l'importance de l'effet thermique est en relation avec l'importance de la formation de chaleur, résultant d'une transformation de l'énergie électromagnétique.

B) LES EFFETS SPECIFIQUES

Ce sont les chercheurs soviétiques qui ont, les premiers, décrit les effets spécifiques, ne relevant pas d'une origine thermique. Ils s'appuient sur des enquêtes épidémiologiques menées chez des ouvriers et techniciens travaillant dans des usines et des ateliers d'électronique. Le « syndrome des hyperfréquences » ainsi décrit consiste en une dystonie neuro-végétative, présentant tous les degrés de gravité. On mentionne chez le personnel exposé l'apparition éventuelle des troubles suivants : bourdonnements d'oreille, pulsations dans le crâne, prurit au niveau des oreilles, impression d'électricité au niveau des obturations dentaires, fatigue, céphalées, douleurs oculaires, asthénie, réactions végétatives anormales, irritabilité, insomnie, arythmie sinusale, allongement du temps de conduction auriculo-ventriculaire avec diminution de l'amplitude du tracé E.C.G., hypotension, bradycardie, hyperactivité thyroïdienne.

Des opacités du cristallin ont été aussi attribuées à des facteurs non thermiques, à la suite de l'exposition, répétée ou non, à des doses de 240 à 280 mW/cm² sur une fréquence de 2,45 gigahertz, pendant une durée comprise entre 6 et 25 minutes selon les doses. Dans le domaine hématologique, on note chez environ 25 % des sujets exposés, une diminution des polynucléaires neutrophiles ($<$ 55 %), un accroissement des éosinophiles ($>$ 4 %) et des monocytes ($>$ 6 %), une augmentation du temps de coagulation.

Une « névrose des ondes centimétriques », objectivée par des altérations du tracé électroencéphalographique, est reconnue comme maladie professionnelle en U.R.S.S. et dans d'autres pays d'Europe de l'Est.

De nombreuses recherches expérimentales se poursuivent actuellement pour essayer d'analyser ces manifestations pathologiques. Elles s'effectuent sur des matières mortes, des micro-organismes, des plantes et des animaux de laboratoire. L'expérimentation sur l'homme ne peut être envisagée dans ce cas, en raison des nombreuses inconnues qui existent ; il faut, notamment, tenir compte des difficultés rencontrées pour mesurer avec précision l'énergie réellement reçue par le sujet, et, a fortiori, par un organe particulier.

Les expérimentations de laboratoire ont permis de trouver des altérations portant sur les systèmes neuro-végétatifs et endocriniens et des modifications du comportement. Diverses manifestations ont été démontrées au niveau de l'*organe isolé* ou de la *cellule :* aberrations chromosomiques, perturbations de la mitose, troubles de conduction de l'influx nerveux.

En France, Jolly et Servanties, en soumettant des rats et des souris à un rayonnement pulsé de 3 gigahertz, ayant une densité de puissance au plus égale à 5 mW/cm², pendant des périodes de quelques jours à plusieurs mois, ont mis en évidence un certain nombre de modifications, attribuées au rayonnement.

Ce sont :

— des variations de réactivité du système réticulo-histiocytaire, variations biphasiques suivies d'un retour à la normale ;

— des altérations de l'activité électrique de l'encéphale, altérations précises suivies d'une récupération après suppression du rayonnement ;

— modification de la sensibilité à diverses substances pharmacologiques.

Ces phénomènes, qui demandent encore à être élucidés, relèvent, semble-t-il, du mécanisme d'action des champs électromagnétiques au niveau de la cellule et au niveau de l'organe. Expérimentalement, les effets spécifiques non thermiques relèveraient d'un des trois mécanismes suivants :

1) **Un mécanisme d'orientation électromagnétique**

Il a été observé sur des particules inertes (particules de polystyrène, de fécule de pomme de terre) et sur des micro-organismes : ces particules et micro-organismes, placés dans un champ centimétrique, orientent leur axe selon les lignes de force du champ, puis s'alignent en chaînes.

Pour chaque type de particules, il existe une fréquence propre qui donne le maximum d'effet d'orientation de chaîne pour le minimum de puissance.

Avec du matériel biologique, cette spécificité de fréquence est encore plus évidente.

En outre, pour une fréquence propre, différente de la fréquence initiale, on observe la possibilité d'orienter les particules et micro-organismes, non plus selon les lignes de force du champ, mais bien perpendiculairement à ces lignes.

Si l'on augmente les puissances utilisées, les effets d'orientation disparaissent pour faire place à des effets thermiques (cuisson des micro-organismes).

2) **Un mécanisme de saturation diélectrique**

Il est caractérisé par la précipitation de solutions non saturées exposées au faisceau centimétrique. Ce phénomène s'explique par l'orientation des chaînes latérales, responsables des liaisons d'hydratation, selon les lignes de force du champ, ce qui ne les rend plus disponibles. Il en résulte une dénaturation non thermique des molécules et leur précipitation. L'effet est surtout marqué pour les macromolécules.

Des modifications dans les caractéristiques moléculaires des protéines ont été attribuées à ces deux mécanismes : notamment des altérations chromosomiques, des perturbations dans les mitoses, la formation de chaînes dans des solutions d'érythrocytes, dans la lymphe, le lait, le sang, des troubles de la rétraction du caillot, des phénomènes de fragilité capillaire anormale, du purpura, des troubles enzymatiques, etc.

C'est à ces mécanismes que l'on attribue encore le fait que, sous l'effet des hyperfréquences, des matières solides en suspension se groupent en chaînes d'agrégats ronds, semblables à des perles, dont l'orientation se fait dans la direction des lignes de force du faisceau d'ondes.

Il est clair que si de tels phénomènes se passent à l'échelle moléculaire, la distribution naturelle des constituants tissulaires peut être profondément perturbée et que l'on doit s'attendre à des effets biologiques importants.

3) **Un mécanisme sensori-moteur** dont l'explication n'a encore pu être fournie.

Dans le domaine moteur, on a constaté la paralysie transitoire des pattes de poulets irradiés : elle cesse dès la fin de l'émission.

Dans le domaine des sensations et perceptions, on lui rattache des hallucinations visuelles et auditives signalées chez l'homme, sans fournir d'explications vraiment acceptables. On lui rattache aussi « l'effet acoustique » du radar. Cet effet désigne la faculté possédée par certaines personnes et certains animaux d'« entendre » les radars : le « son » entendu ne correspond pas à la fréquence de l'onde porteuse, fréquence qui est bien au-delà des limites du spectre audible, mais correspond à la fréquence de répétition des impulsions. Ce « son » s'entend pour des densités de puissance très basses et varie en fonction de la fréquence de la porteuse. En outre cette sensation auditive est perçue directement au niveau de l'encéphale, l'oreille n'intervenant absolument pas dans le mécanisme.

Les études en cours sur les effets spécifiques des hyperfréquences montrent qu'ils sont principalement liés aux caractéristiques de la modulation et à la durée d'exposition, alors que les effets thermiques sont liés à la densité de puissance.

En outre, les effets mis en évidence sont d'ordre fonctionnel plus qu'organique. Il semble donc qu'en cas d'irradiation prolongée, dans des conditions qui paraissent isothermiques, il faille faire appel aux notions d'orientation électromagnétique et de dénaturation protéinique par saturation diélectrique pour expliquer beaucoup des effets spécifiques signalés.

III) NORMES DE SECURITE POUR LE PERSONNEL EXPOSE

Comme il a été dit plus haut, la puissance d'émission du matériel radar a suivi une progression qui s'est considérablement accélérée à partir de 1960, grâce au développement des engins et véhicules spatiaux. Jusqu'à cette époque, la puissance émise par le matériel courant en service n'avait jamais été considérée comme dangereuse pour autant que certaines prescriptions élémentaires de sécurité fussent respectées. Il en est résulté que, jusqu'à cette époque, les effets biologiques d'une exposition à des faisceaux d'hyperfréquences n'ont suscité qu'un intérêt très limité, particulièrement dans le domaine de la recherche.

Depuis lors, il n'en est plus de même et il existe actuellement des normes d'exposition qui ont été établies pour assurer la sécurité du personnel.

Deux systèmes de normes sont en usage : les normes américaines, qui sont aussi appliquées dans les pays d'Europe occidentale et dans les Forces armées de l'OTAN, et les normes soviétiques, également appliquées dans les pays de l'Est. Elles sont très différentes parce qu'elles reposent sur des conceptions différentes.

a) Les normes américaines sont basées sur les effets *thermiques* des hyperfréquences ; les normes soviétiques, établies d'après des enquêtes épidémiologiques portant sur le personnel professionnellement exposé, tiennent compte des effets *thermiques* et des effets *spécifiques*.

b) Les Soviétiques introduisent probablement des facteurs de sécurité plus sévères que les Américains et paraissent exiger un seuil de sécurité en dessous duquel on peut raisonnablement espérer qu'il n'y aura plus d'effets biologiques d'aucune espèce à redouter, y compris des effets cellulaires sans répercussions opérationnelles.

A) NORMES AMERICAINES

Deux critères ont été pris en considération pour l'évaluation du seuil de danger : le critère anatomo-pathologique et le critère thermique.

Chez les animaux soumis à expérimentation (rats, chiens), les lésions causées par les radiations d'hyperfréquences dans les différents tissus furent reconnues de nature thermique : en effet, les tissus convertissent en chaleur la plus grande partie de l'énergie électromagnétique qu'ils absorbent. La chaleur interne suffisait à expliquer les phénomènes et il semblait qu'il n'y avait pas lieu de faire intervenir d'autres facteurs étiologiques pour expliquer les lésions constatées ni pour établir les normes de protection. De tous les organes, les testicules et les yeux se sont montrés les plus vulnérables : d'où l'importance que prennent leurs lésions dans la fixation des valeurs-limites acceptables.

Toutefois, lorsque l'analyse des faits expérimentaux fut entreprise dans le but de fixer un seuil de sécurité pour le personnel exposé, il devint immédiatement évident que de nombreuses variables devaient entrer en ligne de compte, notamment les fréquences de l'énergie absorbée, le caractère total ou limité de l'exposition, sa durée, sa répétition, etc. Aussi, lorsque les autorités de l'aviation militaire des Etats-Unis décidèrent d'établir des seuils de sécurité pour leur personnel, elles durent se borner à fixer un seuil valable pour toutes les fréquences. La doctrine de sécurité fut donc bâtie sans qu'il fût possible de dissiper de nombreuses incertitudes. L'organe le plus rapidement perturbé est le testicule : le niveau de densité de puissance de 0,01 Watt/cm^2 fut d'abord accepté comme valeur-seuil d'apparition des lésions testi-

culaires pour une irradiation de durée indéfinie. Puis, tenant compte du caractère réversible de ces lésions, on fixa la valeur-limite acceptable à 0,1 Watt/cm². On admit ensuite qu'une exposition prolongée, indéfinie, à un niveau de 0,1 Watt/cm² ne cause ni dommage oculaire, ni hyperthermie mesurable, chez l'homme.

Ceci amena les autorités à adopter le niveau de 0,1 Watt/cm² comme seuil en dessous duquel on peut raisonnablement ne pas escompter d'effets biologiques vraiment appréciables. Un facteur de sécurité de 10 fut ensuite introduit, en raison surtout des apports accidentels provenant d'autres appareils électroniques.

La valeur-limite fixée par les autorités de l'OTAN pour un temps de travail normal est de 0,01 Watt/cm², quelles que soient les fréquences. Ce niveau est un niveau moyen et non un niveau de pointe : les effets nocifs de nature purement thermique, les seuls qui soient actuellement bien établis, dépendent de la densité de puissance moyenne et non de la puissance de pointe.

Il a été aussi tenu compte que certains auteurs (Bell Laboratories) ont suggéré une marge de sécurité plus grande et ont fixé la valeur-limite à 0,001 Watt/cm². C'est celle qui a été adoptée pour les lieux de repos et les lieux publics.

Les normes américaines, en usage en Europe occidentale et dans les Forces armées de l'OTAN, s'établissent comme suit :

— densité de puissance admise dans les lieux de repos et les endroits publics ..... 0,001 W/cm²

— densité de puissance pour un temps de travail normal .. 0,01 W/cm²

— temps d'exposition permis (en minutes) pour une densité de puissance (W) supérieure à 0,01 W/cm² .... $T = 6\,000/W^2$

— limite supérieure à ne jamais dépasser ..... 0,1 W/cm²

B) NORMES SOVIETIQUES

Les normes soviétiques sont beaucoup plus sévères. Il est probable que leurs critères de base prennent en considération des perturbations qui sont causées à certains mécanismes vitaux, mais qui ne semblent pas, jusqu'à présent, être dangereuses par elles-mêmes ni retentir sur les capacités opérationnelles de l'individu (troubles enzymatiques, perturbations électroencéphalographiques). Ces critères visent à exclure toute atteinte au bien-être, alors que ceux adoptés par les pays de l'Ouest visent à éviter des troubles somatiques. Les normes soviétiques sont :

— pour une exposition permanente .... 0,000 01 W/cm²

— pour moins de deux heures par jour ..... 0,000 1 W/cm²

— pour 15 à 20 minutes par jour (avec port de lunettes spéciales) .... 0,001 W/cm²

Les normes polonaises sont identiques aux normes soviétiques.

Les normes de sécurité utilisées en *Tchécoslovaquie* se rapprochent des valeurs soviétiques. Il est important de noter qu'elles établissent une différence selon le mode d'émission, continu ou pulsé, le premier étant considéré comme moins nocif que le second (voir tableau 51).

Tableau 51 - *Valeurs maximales par jour, calculées sur une semaine*

Fréquences	Techniciens	Autres
De 300 MHz à 300 GHz (émission continue)	200 (25 μW/cm²)	60 (2,5 μW/cm²)
De 300 MHz à 300 GHz (émission pulsée)	80 (10 μW/cm²)	24 (1 μW/cm²)

N.B. : Le premier nombre est le produit du temps en heures par la valeur maximale de la densité de puissance. Le deuxième nombre est la valeur maximale de la densité de puissance.

IV) MESURES DE SECURITE DANS LES INSTALLATIONS DE RADAR

En l'absence de données précises concrètes, que seul un programme de recherches à long terme sera capable de fournir, il est essentiel de s'assurer que le niveau de sécurité, arbitrairement fixé, n'est pas dépassé dans les installations actuellement utilisées. En outre, il importe que le personnel de ces installations soit informé qu'il ne doit pas s'exposer sans nécessité à cette forme d'énergie qu'est le rayonnement centimétrique.

Lorsqu'on demeure sur le plan des réalités, on constate que l'application des mesures de prudence est simple et ne pose pas de problème compliqué ni insoluble.

A) AMENAGEMENT DES POSTES DE TRAVAIL

L'objectif est d'éviter que le technicien ne soit exposé, non seulement aux rayonnements directs, mais aussi aux rayonnements réfléchis, souvent imprévisibles.

1) La première mesure à prendre doit donc consister à déterminer les densités de puissance dans la région considérée, à établir une sorte de cartographie de l'ambiance électromagnétique du poste de travail et de la région avoisinante.

Deux conditions permettent d'établir une base importante, voire essentielle, de sécurité, pour le personnel qui travaille dans le voisinage des appareils radar.

a) Le radar est destiné à la recherche d'objectifs *au-dessus* de la *surface du sol.* Le faisceau radar est donc forcément incliné par rapport au plan horizontal. Il est à remarquer toutefois que, dans le domaine militaire, il est impérieux de réduire au minimum cet angle que forme le faisceau avec le plan horizontal, afin de pouvoir détecter les avions volant à très basse altitude. Pour atteindre cet objectif, il faut donc pouvoir balayer tout le champ à partir de la surface du sol.

b) L'énergie émise est réfléchie par les corps solides suivant des lois très voisines de celles de la lumière : l'antenne d'émission doit donc occuper une situation suffisamment élevée pour permettre au rayonnement de ne pas être réfléchi par des obstacles voisins.

Il est facile de déterminer, après l'installation des antennes, tous les points que l'on pourrait considérer comme dangereux en raison de la réflexion de l'énergie émise sur des obstacles proches. On déterminera les zones autorisées pour le repos et la circulation générale, celles où peuvent s'exercer les activités professionnelles et, enfin, celles à interdire sauf cas exceptionnel. La délimitation de ces zones se fera par un balisage ne prêtant à aucune ambiguïté : des panneaux et des feux clignotants rouges serviront à marquer les limites de la zone dangereuse, suivant le critère de 0,01 W/cm².

2) On interdit tous les travaux de réparation des antennes pendant leur fonctionnement. Pour les opérations de réglage qui obligent les techniciens à s'approcher de l'antenne en émission, ceux-ci doivent être soustraits à toute exposition voisine des niveaux-seuils en étudiant au préalable les gestes à faire et les positions à prendre qui réduiront la durée de l'exposition et en procédant à des contrôles bolométriques pendant le travail.

3) Parfois, il est nécessaire de placer des panneaux de matière absorbante (mousse de caoutchouc imprégnée de graphite, par exemple) ou, encore, des blindages métalliques pour obtenir un abaissement suffisant des valeurs de densité de puissance.

4) Au laboratoire, les bancs d'essai sont implantés face à de larges baies de matière plastique, le verre à vitre réfléchissant trop le rayonnement centimétrique ; en outre, ils doivent être suffisamment écartés les uns des autres pour éviter l'apparition de zones chaudes par sommation de deux rayonnements réfléchis.

5) S'il s'avère inéluctable que le faisceau de radar, au cours de son balayage, tombe sur une zone occupée par du personnel ou un groupe quelconque de population, il reste une solution technique qui consiste à couper l'alimentation de l'antenne pendant la période où le faisceau frapperait la zone occupée par le groupe humain.

B) MOYENS DE PROTECTION INDIVIDUELLE

Ces moyens ne sont d'application que si les procédés de prévention technique sont insuffisants ou inapplicables.

Pour certains spécialistes, le port de vêtements protecteurs est nécessaire, afin que l'énergie qui les frappe dans la traversée d'endroits balayés par le faisceau soit réfléchie ou pour leur permettre un séjour momentané dans des zones dangereuses.

Ces vêtements consistent en des combinaisons faites en tissu à trame métallique ou en tissu métallisé, capable de réfléchir les ondes incidentes. La cagoule comporte une visière grillagée ou métallisée (feuille d'or), pour protéger spécialement les yeux. Des précautions particulières doivent être prises par les sujets qui portent des lunettes afin d'éviter la concentration d'ondes stationnaires dans les milieux transparents de l'œil.

C) SURVEILLANCE DES SUJETS EXPOSES

Il est nécessaire de surveiller les sujets exposés aux radiations en recherchant par l'instrumentation appropriée (bolomètre) quel est le personnel qui court réellement des dangers au lieu de se contenter de celui qui manipule les radars.

On ne perdra pas de vue, par exemple, que les lobes latéraux et postérieurs du rayonnement d'un aérien peuvent soumettre le personnel à une exposition parfois importante, alors qu'il n'est pas placé devant l'aérien.

On voit donc que si l'imagination populaire a, dans le passé, créé des dangers inexistants, la prise en considération de la nature exacte des dangers réels a fait préconiser des solutions adaptées à ces risques, en ramenant toutefois ces derniers à leur juste proportion.

On retiendra aussi que l'application des normes de sécurité se heurte souvent à de nombreuses difficultés quand il s'agit d'interpréter les chiffres de mesure de densité de puissance des faisceaux de radar et d'évaluer de nombreux facteurs, tels que : la réflexion par le sol ou les bâtiments voisins, la proximité des antennes et la multiplicité des rayonnements.