



Frédéric Elie on
ResearchGate

Sur la nocivité des téléphones portables

Frédéric Elie
29 janvier 2003

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Le domaine des hyperfréquences ($f > 30$ MHz) contient ceux des rayonnements microondes et radars et celui des téléphones cellulaires. Des risques potentiels existent dans ces domaines. Toutefois, sans être spécialiste de la téléphonie mobile, je pense que, pour invoquer le principe de précaution, il faut d'abord préciser les objets du domaine auquel il s'applique. Dans la jungle des informations issues d'organismes, de lobbies ou d'associations il faut identifier les arguments minimisés ou bien exagérés, aussi disparates que les intérêts divergents qu'ils servent. De quoi parle-t-on, en somme?

SOMMAIRE

- 1 - D'abord éliminons la confusion qui règne encore trop souvent entre les rayonnements microondes et les rayonnements ionisants
- 2 - Les rayonnements hyperfréquences
- 3 - Examinons maintenant les principales perturbations que les effets décrits ci-dessus peuvent apporter de manière spécifique aux structures biologiques et aux organismes
 - 3.1 - Effets des hyperfréquences sur les bio-macromolécules
 - 3.2 - Effets des hyperfréquences sur les membranes cellulaires
 - 3.3 - Effets globaux sur l'organisme des hyperfréquences
- 4 - Que faire alors, et pour quoi ?
 - 4.1 - Rôle de la puissance en propagation électromagnétique
 - 4.2 - Que se passe-t-il avec les puissances actuelles pour les risques sur l'organisme?
 - 4.2.1 - Evaluation des performances avec les puissances actuelles
 - 4.2.1.1 - Antennes relais en émission
 - 4.2.1.2 - Téléphones portables
 - 4.3 - Quel seuil raisonnable choisir et quelles conséquences sur les performances de transmission ?
 - 4.4 - Discussion, conclusion... provisoires !
- Annexe 1 – Rappels sur les transmissions électromagnétiques
 - A1.1 – Rayonnement très loin de l'antenne (champ libre)
 - A1.2 – Gain de l'antenne d'émission
 - A1.3 – Réception
 - A1.4 – Aires d'absorption et de diffusion
 - A1.5 – Combinaison émission-réception
 - A1.6 – Champ proche
 - A1.7 – Ouverture à -3 dB du faisceau émis
 - A1.8 – Rapport signal/bruit entre l'émission et la réception
- Annexe 2 – Marche suivie pour les évaluations numériques de l'étude
 - A2.1 – Calcul de la densité de puissance absorbée (DAS) à partir de l'estimation du champ électrique
 - A2.2 – Résultats des calculs
- Bibliographie

1 - D'abord éliminons la confusion qui règne encore trop souvent entre les rayonnements microondes et les rayonnements ionisants

Bien que tous deux de nature électromagnétique, leurs interactions avec la matière sont radicalement différentes. Les premiers, de par leurs fréquences sont situés au-dessous des rayonnements infrarouges. Les seconds sont situés au-dessus des rayonnements ultraviolets. Entre les deux se trouve la gamme des fréquences correspondant à la lumière visible (de 4,1 à 7,5 centaines de milliers de gigahertz). Remarquons déjà que les hyperfréquences correspondent alors à des rayonnements de fréquences relativement basses dans le spectre électromagnétique (bandes UHF et SHF de 30 MHz à 30 GHz): leur appellation est en fait relative aux ondes radio de fréquences plus faibles (quelques milliers de Hz pour VLF jusqu'à 300 MHz pour VHF) que l'on utilise sans problème en radiophonie ou, télévision. Au-delà du spectre visible, bien après l'ultraviolet existent des fréquences encore bien plus élevées et qui présentent des dangers: les rayons X (centaines de millions de GHz), les rayons gamma (dizaines de milliards de GHz), les rayons cosmiques (au-delà) et le fatras de rayonnements exotiques que prévoient la physique quantique et la relativité (on parle même d'un rayonnement du vide responsable de l'effet Casimir, mais c'est une autre histoire!...).

Les rayons X et gamma sont dangereux parce qu'ils ont la propriété d'ioniser les atomes qu'ils rencontrent (c'est-à-dire leur enlever des électrons). Ces rayons accompagnent les émissions radioactives (qui envoient aussi d'autres saletés comme les particules bêta, les particules alpha, les neutrons...) mais ils peuvent avoir bien d'autres sources. Ils sont ionisants (donc modifient l'intérieur même des molécules! voilà leur danger) parce qu'à ces fréquences si élevées leur énergie atteint le seuil du potentiel d'ionisation des atomes. En effet, à une onde de fréquence f correspond une énergie W donnée par la relation de Born:

$$W = hf \text{ (où } h \text{ constante de Planck),}$$

et que pour ioniser un électron d'un atome il faut apporter l'énergie $W = eU$ (e charge de l'électron, U potentiel d'ionisation caractéristique de l'atome). L'onde incidente ionise donc l'atome si sa fréquence est au moins égale à $f = eU/h$. Il se trouve que pour les atomes constituants en majorité les biomolécules (C, H, O, N) cela correspond à l'ultraviolet et plus. Interagir avec les atomes et les molécules des êtres vivants peut évidemment induire des modifications profondes sur les structures (protéines, ADN, ARN, etc) donc sur la messagerie cellulaire et génétique.

2 - Les rayonnements hyperfréquences

Ils ne sont pas des rayonnements ionisants parce que leurs fréquences sont... trop faibles. Ils n'ont même pas d'action sur l'activation chimique ni sur le mouvement brownien des molécules (comme l'ont montré Priou, Berteaud, Dardalhon, 1985). Cela ne les rend pas plus sympathiques pour autant: leurs effets sur la matière sont de nature thermique, non pas par une agitation moléculaire (contrairement à ce qui peut parfois être lu !), mais par action sur les moments dipolaires des milieux. Explications rapides :

Les milieux biologiques (et a fortiori l'eau qui les baigne) sont de nature diélectrique: cela veut dire que, sous l'action d'un champ électrique extérieur, ils peuvent emmagasiner de l'énergie électrique (comme un condensateur) et se polariser, c'est-à-dire présenter une distribution de charge dissymétrique par déformation moléculaire qui tend à s'aligner suivant le champ extérieur, créant ainsi à son tour un champ électrique interne (champ polarisé induit). Il est important de connaître le moment dipolaire des molécules \mathbf{p} ainsi que son évolution au cours des interactions avec le champ extérieur \mathbf{E} , parce que ce moment est responsable d'un couple \mathbf{C} qui tend à faire tourner la molécule sur elle-même suivant le produit vectoriel:

$$\mathbf{C} = \mathbf{p} \wedge \mathbf{E}$$

cette rotation est responsable de la chaleur dégagée du fait des frottements intermoléculaires qu'elle induit, d'où son importance. Le champ électrique interne au milieu induit par polarisation due au champ \mathbf{E} est noté \mathbf{E}' : il s'aligne sur le champ externe \mathbf{E} et modifie la polarisation \mathbf{p} du milieu par l'intermédiaire d'une grandeur moléculaire appelée polarisabilité du milieu (notée α). Les champs \mathbf{E} , \mathbf{E}' et la polarisation \mathbf{p} induite sont donc proportionnels par l'intermédiaire de la polarisabilité α , la permittivité diélectrique relative ϵ_r (caractérise l'aptitude du milieu à modifier le champ électrique interne ou, ce qui revient au même, à se comporter comme un condensateur) : on démontre les relations entre champ externe \mathbf{E} , champ induit \mathbf{E}' et polarisation induite \mathbf{p} pour N molécules par unité de volume du milieu:

$$\mathbf{E}' = (\epsilon_r + 2) \mathbf{E} / 3$$

$$\mathbf{p} = N \alpha (\epsilon_r + 2) \mathbf{E} / 3$$

et la **relation de Clausius-Mosotti** reliant les grandeurs caractéristiques du milieu:

$$N \alpha / 3 \epsilon_0 = (\epsilon_r - 1) / (\epsilon_r + 2) \quad (\epsilon_0 \text{ permittivité du vide} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm})$$

La même situation se produit aussi bien pour un champ électrique statique qu'alternatif (oscillant avec une fréquence f)

Ces notions étant rappelées, le fond du problème propre aux microondes réside dans le phénomène de relaxation diélectrique: relaxez-vous! je vais vous dire simplement ce que c'est:

Il y a **relaxation diélectrique** lorsque, une fois annulé le champ électrique externe, la polarisation induite ne s'annule pas tout de suite et met un certain temps à s'annuler. On dit aussi hystérésis. Pendant ce laps de temps la rotation moléculaire évoquée plus haut continue et reste source de chaleur sous l'action du couple exercé entre \mathbf{p} et cette fois le champ induit \mathbf{E}' . Un champ électrique alternatif haute fréquence \mathbf{E} appliqué s'annule toutes les $1/f$ secondes et donc la relaxation diélectrique du milieu a lieu autant de fois. Pour fixer les idées avec une fréquence de 1 GHz on a un milliard de relaxations par seconde! mais en fait, par recouvrement, ces relaxations interfèrent et se superposent. Le temps de relaxation τ , c'est-à-dire le temps nécessaire pour retrouver un champ électrique interne induit nul lorsque le champ externe disparaît, est directement lié à la viscosité η du milieu, au volume caractéristique V de la molécule et à la température T; c'est une caractéristique propre du milieu, indépendante de la fréquence d'excitation:

$$\tau = 4 \pi V \eta / k T \quad (\text{relation de Debye, 1929}), \text{ k est la constante de Boltzmann}$$

cela signifie que plus les molécules du milieu sont grosses et plus elles opposent du frottement (viscosité), plus la durée de relaxation est longue. Or, en présence d'un champ électrique externe haute fréquence, la permittivité diélectrique se décompose en une composante de dispersion ϵ' et une composante de dissipation ϵ'' responsable de pertes diélectriques convertibles en chaleur; bien sûr ces composantes dépendent de la fréquence excitatrice f. Pour la partie dissipative, qui nous intéresse ici, on démontre en classe de sixième qu'elle varie avec f comme:

$$\epsilon'' = (\epsilon_s - n^2) 2\pi f \tau / (1 + (2\pi f \tau)^2)$$

(ϵ_s permittivité en situation statique, n indice de réfraction optique du milieu).

Cette composante dissipative est maximale lorsque la fréquence d'excitation coïncide avec celle de la relaxation : $f = 1 / \tau$. Par conséquent ce ne sont pas n'importe quelles fréquences

d'excitation qui vont entraîner une dissipation thermique dans le milieu cible.

Mais ne vous faites pas d'illusions: la réalité est bien plus compliquée. Dans un même milieu chimique (une solution de mélanges par exemple), et a fortiori un milieu biologique, il y a non pas une seule mais plusieurs résonances de relaxation en réponse à un même champ électrique incident, car elles proviennent des nombreux constituants biochimiques et de leurs différents états thermodynamiques. A ce titre l'exemple de l'eau est déjà évocateur: à température ambiante et en l'absence de champ l'eau a une permittivité relative $\epsilon_r = 81$, mais en présence d'un champ de 3 GHz elle est décroît de 80 et 52 pour une température comprise de 2°C à 95°C et sa composante dissipative ϵ'' relative décroît de 24,8 à 2,44 sur cette même plage. L'absorption de l'eau est maximale à 10 GHz mais présente de nombreuses dissipations thermiques (ϵ'' élevées) sur des gammes de fréquences ISM courantes (915 MHz à 2,45 GHz) selon son état physicochimique (liaison avec d'autres molécules, transition solide-liquide, etc... nombreux travaux: Hasted, Barker, Freymann, Itagaki, Schwan, etc).

Pour terminer avec ce très bref aperçu des principes des effets thermiques des microondes, et avant de décrire par quoi ils se traduisent sur les milieux vivants, n'oublions pas ce que l'on appelle l' "**effet de peau**" des ondes électromagnétiques situées en-deçà de l'infrarouge, cet effet contribuant de façon importante aux effets thermiques puisqu'il en conditionne l'extension dans le milieu cible. L'effet de peau définit tout simplement la profondeur dans laquelle un champ électromagnétique (alternatif) peut interagir avec la matière: la valeur de cette profondeur, appelée profondeur de pénétration, est d'autant plus grande que la fréquence est faible, c'est pourquoi elle est quasi-inexistante au-dessus des infrarouges (par contre en rayonnement basse fréquence on l'utilise par exemple pour le contrôle des défauts des métaux et alliages par la méthode des courants de Foucault). Cette épaisseur d , directement calculable grâce aux équations de Maxwell connues depuis la maternelle, suit la loi:

$$d^2 = 1 / (2 \pi^2 f^2 \mu \epsilon ((1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1))$$

où μ est la perméabilité magnétique et $\tan \delta$ est le facteur de perte diélectrique, c'est-à-dire le rapport entre ϵ'' et ϵ' (plus il est élevé plus les effets dissipatifs sont importants dans le milieu). La puissance transmise au milieu est confinée dans cette épaisseur suivant une décroissance exponentielle

$$P(z) = P_{\max} \exp -2z/d$$

et se transforme en dissipation de chaleur par le biais des mécanismes indiqués plus haut. C'est dans ce domaine d'épaisseur de l'organisme que les éventuels effets thermiques dus à la rotation dipolaire et à la relaxation diélectrique sont susceptibles d'apparaître, mais, bien entendu, la chaleur dégagée en ces zones limitées va se communiquer (par agitation moléculaire cette fois) de proche en proche aux régions voisines non directement exposées (donc j'insiste: sous l'action des microondes la cause première est un processus complexe lié aux propriétés diélectriques, tandis que l'agitation moléculaire est un effet secondaire qui n'apparaîtrait jamais sans lui).

3 - Examinons maintenant les principales perturbations que les effets décrits ci-dessus peuvent apporter de manière spécifique aux structures biologiques et aux organismes

En préambule je précise que les effets décrits dans la suite ne sont pas obligatoirement ceux obtenus avec les téléphones mobiles, mais qu'ils recouvrent les effets possibles (théoriques ou quasi-expérimentaux) produits par le vaste domaine des microondes. Les effets propres à la téléphonie mobile, dimensionnés par les faibles densités de puissance de ce domaine, seront précisés en temps utile.

Les microondes ont pour action sur la matière biologique d'une part les modifications des

permittivités diélectriques (relaxation, résonances) qui affectent principalement les comportements ioniques des membranes cellulaires, et d'autre part les modifications des polarisations des macromolécules qui constituent le milieu biochimique interne des êtres vivants. Très souvent ces deux familles de modifications sont combinées, voire mutuellement inextricables. Je signale dès à présent l'extrême difficulté à isoler de manière expérimentale ces divers effets, tant par la méthode (mesures), que par l'énorme sensibilité au type d'organismes auxquels elle s'adresse: de très nombreux travaux méritoires sont conduits depuis 1931 mais ont souvent l'inconvénient d'être, par nature, difficilement transposables d'une situation réelle à l'autre. Il est tout bonnement irrationnel de tirer des conclusions simplistes, réductrices et démagogiques dans un sens comme dans l'autre des intérêts recherchés. Je ne trouve rien de plus raisonnable et honnête que cette phrase de Jacques Thuéry, ingénieur à ALCATEL-ESPACE ("*Les microondes*", TECDOC 1989) qui invite au principe de précaution, sur des bases scientifiques et rigoureuses, sans tomber dans l'hystérie collective: "*La physiologie de l'homme et des autres espèces vivantes est le produit de millions d'années de compromis avec les émissions électromagnétiques naturelles, essentiellement d'origine solaire et cosmique. Elle n'est pas adaptée à des rayonnements normalement inexistant, ou négligeables, au niveau de la biosphère. L'interaction avec ce milieu électromagnétique nouveau est donc a priori susceptible de s'accompagner d'effets nocifs, dont la nature et l'évaluation préoccupent autant les scientifiques que les pouvoirs publics, si l'on en juge par la quantité des travaux et règlements qui leur sont consacrés*".

3.1 - Effets des hyperfréquences sur les bio-macromolécules

Les constituants de base de la cellule vivante sont: acides aminés, protides, acides nucléiques. Ces molécules se répartissent en plusieurs familles et sous-familles:

- protides:
 - peptides
 - protéides:
 - hétéroprotéides
 - protéines
- acides aminés: composés formés d'une fonction acide carboxyle -COOH et amine base -NH₂. Les peptides et protéines sont obtenus par l'assemblage des acides aminés
- acides nucléiques: les fameux ADN et ARN; les ARN en structure simple hélice interviennent dans la synthèse des protéines au niveau du cytoplasme (notamment élaboration des enzymes). Quant aux ADN, structure double hélice, je n'apprends rien à personne (tant ils sont à la mode dans les questions d'OGM, de test ADN, de clonage, de thérapie génique, de course au génome, etc, bref les [®]LEGO ou les [®]PLAYMOBIL des généticiens) en rappelant qu'ils assurent dans le noyau cellulaire la conservation et la transmission de la messagerie génétique.

Comment toute cette merveille réagit-elle aux hyperfréquences?

Cas des protéines: les molécules de protéine sont généralement immergées dans une enveloppe d'eau avec une certaine concentration, leur moment dipolaire est assez bien connu par la **relation d'Oncley**:

$$p^2 = 2kT\varepsilon_s M (\varepsilon_s - n^2) / N C (1 + \psi)$$

(M masse moléculaire de l'ordre de 6000 à plusieurs millions, N nombre d'Avogadro, ψ facteur dépendant de l'orientation des molécules d'eau voisines); cette relation montre que la polarisation est d'autant plus facilitée que les protéines sont diluées, par contre elle est généralement très élevée à cause de leur masse importante (macromolécules), mais l'inertie

des molécules due à cette masse s'oppose d'autant plus à la rotation dipolaire que les fréquences sont élevées ($f > 50$ MHz), ce qui a pour effet d'en limiter la portée: ainsi malgré la présence des hyperfréquences la polarisation n'agit plus sur les propriétés diélectriques des molécules; c'est ***l'effet de "tétanisation"*** (Copson, 1974). Par conséquent, les protéines pures ne présentent pas de relaxation (et donc pas de dissipation thermique) sous l'action des hyperfréquences, ces relaxations dites β n'apparaissent qu'au dessous de 50 MHz (bandes LF, MF, HF) et sont sans conséquences car très peu énergétiques. Reste que les fréquences agissent alors sur l'enveloppe aqueuse de ces molécules, avec les phénomènes de relaxation de l'eau présentés plus haut: ainsi de 200 MHz à 2 GHz, une relaxation dite γ de l'eau avoisinant les protéines apparaît. De plus, malgré le phénomène de Copson aux hyperfréquences, certaines portions des protéines normalement bloquées, peuvent entrer en rotation indépendante par relaxation dite δ sur cette même plage de fréquences (Hasted, Relyveld). Les choses ne sont donc pas si simples pour les protéines!

Cas des peptides et acides aminés: beaucoup plus petites que les protéines, ces molécules résonnent dans la gamme hyperfréquences. Souvenons-nous en effet que la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la taille des molécules (voir relation de Debye).

Cas des acides nucléiques (ARN et ADN): les ARN, simples hélices, sont polaires et, étant de masse élevée, peuvent résonner comme les protéines aux basses fréquences sans conséquence. Quant aux ADN leur structure double hélice les rend non polaires donc insensibles aux rotations dipolaires. Toutefois la présence d'ions (particules polaires) périphériques aux ADN peut induire une relaxation basse fréquence par déplacement des ions: on montre (Hasted, Swicord, Edwards, Stuchly, 1984) que cette fréquence de résonance est inversement proportionnelle au carré de la longueur de la molécule ADN. Donc dans tous les cas pas d'effets hyperfréquences.

En résumé, pour l'ensemble des macro-biomolécules les conditions de résonance entre 100 MHz et 1GHz (limite basse des hyperfréquences) sont très disparates car les propriétés diélectriques sont extrêmement sensibles aux concentrations, aux types de liaisons, à l'orientation spatiale, et à la viscosité du milieu où elles baignent.

3.2 - Effets des hyperfréquences sur les membranes cellulaires

Les membranes des cellules biologiques, épaisses de 10 nm, protègent la cellule et assurent la régulation des échanges ioniques et moléculaires avec le milieu. L'intérieur de la cellule (cytoplasme) et le milieu aqueux extérieur ont des permittivités différentes, ce qui entraîne une accumulation de charges électriques de part et d'autre de la membrane: celle-ci se comporte alors comme un condensateur (capacité surfacique de $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$). La membrane va subir des relaxations sous l'action d'un champ alternatif mais son comportement capacitif a pour effet, aux hautes fréquences (plusieurs centaines de MHz), d'éliminer toute tension induite parce que la membrane se met en court-circuit et laisse passer le courant électrique. Sa conductance est donc modifiée à partir des hautes fréquences et c'est cette situation qui rend les membranes cellulaires extrêmement sensibles aux champs électromagnétiques: des flux ioniques entre le cytoplasme et le milieu, normalement inexistantes en l'absence de champ, vont apparaître, ou au contraire normalement existantes en l'absence de champ, vont disparaître parce que la conductance de la membrane va évoluer sous l'action du champ de différentes manières selon la nature chimique des ions échangés (sélectivité). On comprend que cela va modifier l'équilibre dynamique de la cellule vis-à-vis de son milieu, d'autant que, comme l'a montré Cain (1980), les flux ioniques membranaires deviennent continus sous l'action d'un champ alternatif: la perturbation est donc permanente ! Mais il faut pour cela des densités de puissances des ondes très élevées (plusieurs dizaines de mW/cm^2 pendant plusieurs heures, ce qui est hors domaine téléphonie mobile, mais du domaine radar et microondes de puissance).

Dans le cas particulier des neurones, les flux ioniques qui les traversent et qui sont responsables des influx nerveux n'échappent pas à cette situation. Dans l'état naturel (absence de champ haute fréquence), le potentiel de membrane du neurone v (en mV) créé par les échanges d'ions, génère un courant électrique i (en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) qui va commander l'influx nerveux selon l'inoubliable équation différentielle de l'influx nerveux de Hodgkin-Huxley (que j'ai simplifiée ici):

$$i = C \, dv/dt + Av - B$$

où C est la capacité de la membrane du neurone ($1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$), A et B regroupent différents paramètres bioélectriques, relatifs aux ions sodium et potassium échangés, et vérifient une série d'équations différentielles qu'il est inutile de rappeler ici. Or l'action d'un champ électrique alternatif intense haute fréquence a justement pour effet de modifier ces paramètres et, par le **mécanisme de Hodgkin-Huxley**, de modifier considérablement le courant cellulaire, les conductances du neurone et donc l'influx nerveux; de plus les ions auxquels le neurone est sensible ne sont plus les mêmes (par exemple le neurone n'échange plus d'ions potassium K^+ sous 9,2 GHz au bout de deux heures d'exposition... nombreux travaux: Barnes, Hu, Cain, Yova, Loukas, Boudouris, MacGregor, etc, etc).

3.3 - Effets globaux sur l'organisme des hyperfréquences

A partir des processus élémentaires décrits dans tout ce qui précède comment espérer prédire des effets sur l'ensemble de l'organisme ou sur certaines de ses parties comme les organes? La chose est très difficile car l'organisme est un système complexe, aux rebouclages multiples, non linéaires, multi-échelles: vis-à-vis des hyperfréquences, le comportement de l'ensemble n'est pas la somme des comportements individuels de ses composantes (principe de l'émergence en théorie des systèmes: Von Bertalanffy, Mesarovic, Lemoigne, Atlan, etc...).

Par exemple, une expérience où l'on constate des effets thermiques sur un échantillon biologique isolé, n'est pas transposable au cas où cet échantillon est normalement intégré dans l'organisme car interviennent les effets non-séparables de régulation thermique, de métabolisme, de défenses immunitaires, etc procurés par l'ensemble du système. Pour les mêmes raisons, la taille de l'être vivant, son poids, son espèce, son mode de nutrition ou de synthèse et dépense de l'énergie... empêchent toute extrapolation à l'homme de résultats obtenus sur les animaux. Ce constat, pessimiste en termes de prédiction scientifique, mais rassurant en termes d'impact sur l'homme, est formulé par le **principe d'extrapolation de Gandhi**, 1974 et qui s'énonce ainsi: "*Les expériences menées sur animaux de laboratoire pour des fréquences élevées ne sont transposables à l'homme qu'à des fréquences beaucoup plus basses*" (par exemple les résonances obtenues à 2,45 GHz (hyperfréquences SHF) sur des petits animaux ne se retrouvent chez l'homme qu'à 300 MHz (limite haute VHF) de façon plus atténuée).

Pour évaluer de façon globale (et sans entrer dans les mécanismes élémentaires) l'élévation de la température d'un organisme sous l'action des microondes on est amené à introduire la notion de puissance massique absorbée P_m (en W/kg) qui mesure la dose de rayonnement accumulée sous forme thermique par un système biologique (Guy, Ho, Johnson, Justesen, Susskind...) comme cela se fait pour la dosimétrie des rayonnements ionisants en nucléaire. Quoique permettant des approximations grossières, cette grandeur présente plusieurs avantages:

- elle est directement reliée à la fréquence et à la puissance du champ électrique local E , elle-même directement reliée à la puissance du champ électrique incident:

$$P_m = (1/\rho) 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E^2 \quad (\rho \text{ densité, } \varepsilon_r'' \text{ composante dissipative de la permittivité})$$

or c'est précisément le choix et le seuillage de la puissance électrique incidente qui fait

l'objet de controverses et de recherche de normes (voir plus bas),

- elle permet, une fois déterminée expérimentalement, de prédire par un calcul simple mais très grossier l'accroissement de la température d'un corps exposé pendant une durée Δt à un rayonnement microonde (Durney, Johnson, Neuder, Bowman, Stuchly, Berteaud Et Dardalhon, Czernski...):

$$\Delta T = 1/c P_m \Delta t \text{ (c capacité calorifique massique du corps en J/kg/K)}$$

- elle permet d'évaluer le temps (en secondes) au bout duquel la mort survient lors d'une exposition directe, par la formule aussi simple que fatale (Miller, Brodwin, Cember, 1982):

$$t_{\text{mort}} = 42 (420/P_m)^D \text{ (où D, comme "death", est compris entre 1,3 et 2)}$$

relation qui montre que ce temps est raccourci si la dose absorbée est élevée, mais rallongé si la densité est grande (ce qui est au fond du bon sens). On montre que l'aboutissement est fatal lorsque la chaleur engendrée par le rayonnement hyperfréquence est supérieure au double du métabolisme basal, au-dessous les processus thermorégulateurs de l'organisme permettent de maintenir l'équilibre vital (Tell, Harlen). A titre d'exemple (horrible) des expériences ont montré que des rats exposés à 250 mW/cm² à 24 GHz meurent en 34 minutes (Michaelson) mais restent en vie si leur cage est réfrigérée de manière appropriée (Samaras, Muroff, Anderson)! Bien entendu ces conditions sont bien plus sévères que celles du domaine de la téléphonie mobile et n'ont rien à voir avec lui (quelques mW/cm² au plus et fréquences n'excédant pas 2 ou 3 GHz), on les trouve par contre dans les fours à microondes (bien protégés et étanches) et les radars (si on est contre l'antenne!)

Pour éviter au mieux les expériences in vivo, qui de toutes façons sont limitées par le principe de Gandhi, et pour avoir une gamme étendue des paramètres et conditions physicochimiques que l'on peut ajuster à loisir, la puissance absorbée et "l'équation de la mort" sont expérimentées grâce à des fantômes. Ceux-ci sont des squelettes artificiels multicouches, enrobés de matériaux biologiques simulés (non, je ne délire pas, j'emploie des termes officiels !) très élaborés (mais pas au point de ressembler encore à des Terminator). Leurs premières études remontent à 1961 (Mermagen) et continuent jusqu'à aujourd'hui avec un nombre impressionnant de chercheurs qui sont bien plus gentils que des docteurs Moreau (Conover, Allen, Webb, Rukspollmuang, et une foultitude d'autres...). Ont été également simulés le sang (Van Look) et les poumons (Kraszewski, Hartsgrrove selon la théorie de Polder et Van Santen).

Il serait absolument rébarbatif de passer en revue tous les effets observés in vivo ou simulés pour chaque type de cellules, de tissus ou d'organes de différents animaux et humains: des monographies à n'en plus finir abondent sur ces sujets. Je donne juste un aperçu très très très succinct de quelques résultats:

- système immunitaire: tendance sous 2,45 GHz pendant quelques minutes sous quelques mW/cm² à diminuer chez le rat l'immunité inflammatoire par une baisse de production d'histamine (Liburdy, Ortnier, Galvin...), baisse de l'activité phagocytaire (absorption et destruction par les anticorps des cellules et virus étrangers) sur la gamme P à Q (46 GHz à 300 MHz) sous 3 mW/cm² au bout de 20 jours pour de petits mammifères (Zaliubovskaia, Kischelev, Szmigielski...). Certains travaux sujets à discussions indiqueraient aussi une tendance à stimuler le circuit hypophysio-surrénal qui affecterait le système immunitaire à 2,45 GHz pour 10 à 20 mW/cm² (Lotz, Michaelson, Liburdy).

- système nerveux: influence d'une onde de 1 GHz modulée en fréquence entre 6 à 12 Hz, avec 0,1 à 1 mW/cm², sur la variation du flux d'ions calcium des neurones du cerveau de poulet, le champ induit local, identique au champ incident étant alors de 19,4 à 61 V/m dans les neurones, susceptible alors de perturber la perception par les oiseaux du champ électromagnétique terrestre ELF valant 0,001 V/m maximum qui leur permet de s'orienter (MacGregor). Mais ce cas d'école est trop spécifique pour alerter la communauté! Signalons plutôt un résultat qui intéresse le domaine de la téléphonie mobile de par les fréquences et la puissance utilisées: une puissance de 50 μW/cm² est appliquée de 1,6 à 2,375 GHz au système nerveux du rat; au bout de plusieurs jours d'exposition le métabolisme des neurotransmetteurs est perturbé (Grin, Merritt, Hartzell, Frazer...).

Mais il faut souligner aussi l'intérêt des microondes pour certaines maladies touchant le cerveau et basé sur le fait que les microondes peuvent agir sur la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (BHE). En effet la BHE est étanche à certains médicaments chimiothérapeutiques, les empêchant d'agir dans le cas de cancers cérébraux, tandis que, malheureusement, elle laisse passer facilement des virus comme celui du VIH (SIDA). Pouvoir agir de façon sélective par les microondes sur la perméabilité de la BHE revêt alors une importance capitale en médecine (Albert, Justesen, Goldstein, Betz, Schmeck...)

- système auditif: il a été établi que les hyperfréquences UHF modulées en impulsions produisent chez les animaux et chez l'homme des sensations auditives, même chez les malentendants, sous des flux de 100 μW/cm² entre 1,2 et 2,45 GHz (donc dans les domaines de la téléphonie mobile)! Cette découverte due à Frey (1962) est d'un immense intérêt pour pallier à la surdité pourvu que le limaçon soit intact (Borth, Cain, Chou, Galambos, Guy, Lin, Chan-Lin, Lam et bien d'autres). Fort bien, mais on me dira sans doute que, dans ces domaines d'émission, le sujet bien portant peut être affecté acoustiquement par son portable, de façon très limitée certes ? Possible... pas d'info à ce sujet.
- système neuro-végétatif: le transit intestinal du rat s'accélère sous 2,45 GHz à 4 mW/cm² après 8 heures d'exposition (Santini, Deschaux...). On s'en fiche de la digestion du rat ? Bon, alors que dites-vous de ceci: la stimulation UHF thérapeutique des contractions utérines pour l'accouchement de la femme lui provoque des dystonies neuro-végétatives (Daels, 1976) également observées chez des sujets professionnellement exposés aux microondes (Orlowski, Silverman). Ces valeurs sont toutefois bien supérieures à celles de la téléphonie mobile.
- système endocrinien: sans entrer dans des détails bien trop nombreux, les travaux montrent, pour 1 à 3 GHz et quelques dizaines de mW/cm², une interaction directe avec l'hypophyse et l'hypothalamus qui, comme chacun sait, sont les chefs d'orchestre du système hormonal et sexuel humain (Baranski, Ostrowski, Stodolnik-Baranka, Magin, Lu, Michaelson, Smirnova et Sadtchikova (thyroïde), Domart, Bourneuf, Michaelson, Thomson, Novicku, Murashov, Pettit (surrénales), Kondra, Smith, Imig, Ely, Goldman, Varma, Traboulay (glandes Sexuelles), Lu, Lotz, Michaelson, Tell, Harlen (hormones de croissance), etc, etc). Pour l'histoire je mentionne en particulier la dégénérescence testiculaire accidentelle chez huit militaires américains exposés brutalement à un radar de 10 MW en 1957, ainsi que chez un opérateur radar météorologique en 1968. Messieurs, pas d'affolement pour les portables: ceux-ci sont du domaine du watt alors que ces malheureux accidents arrivent sous dix millions de watts!
- lésions par brûlure: les brûlures par microondes sont d'autant plus profondes que la fréquence est basse (effet de peau, voir plus haut) et la puissance importante. Des cas

de telles brûlures des mains et avant bras par fours microondes domestiques défectueux ont été rapportés pour seulement 27 MHz (bande HF) et plusieurs centaines de watts (Budd, 1985)

- etc, etc, etc

4 - Que faire alors, et pour quoi ?

Pour fonder les bases d'une discussion sur la nocivité et la prévention des effets de la téléphonie mobile, au vu de ma misérable présentation ci-dessus, il ressort qu'il faut se focaliser sur un nombre en définitive assez restreint de paramètres: notamment la fréquence de l'onde électromagnétique transmise et la densité de puissance ou, ce qui revient presque au même, la valeur du champ électrique. Le paramètre dosimétrique qu'est la puissance absorbée massique résume presque à lui seul la plupart des rôles des différents facteurs: les mesures de prévention doivent viser à la rendre la plus faible possible. Etant proportionnelle au carré du champ électrique induit, celui-ci doit donc être le plus faible possible. Etant proportionnelle à la permittivité dissipative donc aux pertes diélectriques, responsables des échauffements thermiques par rotation dipolaire, il faut limiter la fréquence qui, par ailleurs intervient aussi directement dans la valeur de cette puissance massique absorbée. Malheureusement, l'effet de peau, responsable de l'étendue des lésions éventuelles, est important aux basses fréquences (bandes VHF et au-dessous): il ne faut donc pas non plus recourir à la fois à des fréquences trop basses et à des puissances élevées. Voici en gros les exigences qualitatives, et de cela tout le monde en convient. La difficulté de consensus, on s'en doute, est quantitative.

La différence entre les ondes de la téléphonie mobile et les autres technologies hyperfréquences (radars, sources industrielles microondes, ou fours microondes domestiques) tient essentiellement au niveau de la densité de puissance ou du champ. Pour les radars (dont les fréquences peuvent aller jusqu'à plusieurs dizaines ou centaines de GHz) les niveaux à la source sont de l'ordre de plusieurs milliers de volts par centimètre. Les effets de peau sont négligeables ou inexistantes à ces fréquences où, de plus, l'absorption moléculaire par l'air et les matériaux est considérable. A ces pertes de niveau s'ajoute la perte par divergence géométrique qui augmente avec l'inverse du carré de la distance à l'émetteur. Certains radars présentent donc de réels dangers si l'on est situé devant et près de la source émettrice. Quant aux fours microondes ou aux sources industrielles (qui ont de nombreuses utilités technologiques et médicales) leurs fréquences sont surtout dans la partie haute de la bande UHF (300 MHz - 3 GHz) comme en téléphonie mobile, mais les niveaux sont nettement plus élevés (plusieurs centaines de watts à la source). Cependant, l'utilisation se fait par définition en zone confinée et étanche, sur de très courtes portées (généralement en champ proche de Rayleigh).

Quant au téléphone portable, objet de la discussion, on ne peut faire un débat intelligent que si on sait faire la relation entre les performances requises de ses transmissions et le seuil du niveau du champ électrique (ou du flux de puissance) admissible pour éliminer tout risque biologique ou physiologique. J'ai déjà (trop longuement ?) présenté les risques possibles sur l'organisme des hyperfréquences dont celles de la téléphonie mobile font partie, et j'ai souligné les énormes difficultés de leur validation. Reste à présent à rappeler les critères qui conditionnent les transmissions de bonne qualité: désolé, je vais faire encore un peu de technique.

Comme chacun sait, en téléphonie mobile, le territoire est divisé en cellules, c'est-à-dire des zones de formes hexagonales de quelques kilomètres de diamètre (typiquement 10 km) appelées "cellules" (d'où l'appellation de téléphone cellulaire pour désigner aussi la téléphonie mobile ou portable). Au centre de chaque cellule un central de télécommunication BSS ("Base Station Subsystem") abrite un système d'émission/réception et ses antennes, contrôlé par un

ordinateur. Ce central reçoit des téléphones portables (MS "Mobil Station") répartis sur la cellule des signaux de faible puissance qu'il réémet à un autre téléphone portable ou un poste fixe par l'intermédiaire de ses propres antennes si les usagers sont sur la même cellule, ou par l'intermédiaire d'antennes de cellules adjacentes si les usagers ne sont pas sur la même cellule ou changent de cellule en se déplaçant. Il permet aussi la liaison du MS vers le sous-système réseau fixe NSS ("Network Sub System") pour atteindre les postes fixes (RTC, RNIS, etc). L'ordinateur permet entre autres d'identifier et de localiser les correspondants ("roaming" et "paging"), d'orienter leurs appels, d'assurer la liaison avec le réseau câblé et de procéder au multiplexage des signaux sur un même canal (c'est-à-dire commuter des échantillons de messages d'origines différentes un très grand nombre de fois par seconde de façon qu'en une seconde un grand nombre de correspondants puissent envoyer et recevoir des signaux sur la même fréquence modulée sans qu'il y ait interférence entre ces signaux).

La notion de multiplexage et de débit d'écoulement des informations (mesuré en Mégabits ou Gigabits/seconde Mbps ou Gbps) apporte une contrainte fondamentale sur d'une part le choix des fréquences des ondes électromagnétiques et d'autre part la bande passante de ces ondes, c'est-à-dire la gamme de fréquences que les signaux utilisent pour leurs modulations et l'utilisation par un grand nombre d'usagers simultanés: cela impose des fréquences élevées (hyperfréquences partie haute UHF de 900 MHz à 3 GHz) et des bandes passantes relativement larges (plusieurs dizaines de MHz). Ces caractéristiques en fréquences sont des données d'entrée incontournables pour la pérennité des systèmes de téléphonie mobile par ailleurs assez variés de par leurs modes d'exploitation:

- GSM ("Global System for Mobile communications") avec ses cartes SIM ("Subscriber Identity Module") de fréquence 900 MHz (GSM900 avec 2 bandes de 45 MHz et 124 canaux) et une puissance disponible au niveau des portables de 2 watts crête (soit une puissance moyenne de 250 mW à l'émission),
- DCS ("Digital Cordless System") de fréquence 1,8 GHz (GSM1800 avec 2 bandes de 75 MHz et 374 canaux soit 2992 communications simultanées dans une même cellule) avec une puissance crête disponible au niveau des portables de 1 watt (soit 125 mW de puissance moyenne à l'émission),
- les projets futurs ou en cours préparant essentiellement la liaison avec une centaine de satellites, comme GLOBALSTAR (INMARSAT), IRIDIUM (MOTOROLA), ICO, ODISSEY, etc.

Sans oublier, en marge de la téléphonie d'autres systèmes utilisant les hyperfréquences en télécommunication civile faible puissance, comme:

- les systèmes de diffusion multicanaux par voie aérienne MMDS ("Multichannel Multipoint Distribution Services") utilisant des relais mixtes échangeant par voie aérienne des informations avec un site central et qui les rediffusent à des sites de réception; ils travaillent à 2,6 GHz avec une bande passante de 200 MHz,
- les systèmes LMDS ("Local Multipoint Distribution Services") répartis sur des cellules et ayant pour fonction un traitement globalisé et simultané des informations téléphoniques, télévisuelles, informatiques (INTERNET...) chez un même usager, à l'aide d'un système concentrateur transmettant vers les antennes circulaires des habitations. La polyvalence de ce système exige des fréquences très élevées (29 GHz) et de très larges bandes passantes (4000 MHz)
- etc...

Peut-on alors abaisser les puissances sans nuire aux performances de ces systèmes?

Aujourd'hui, pour la téléphonie mobile, ces puissances s'échelonnent de 1 à 8 watts. Pour tenter de répondre à cette question je vais expliquer rapidement ce qu'on entend par puissance et quelles sont leurs importances pour la qualité des transmissions.

4.1 - Rôle de la puissance en propagation électromagnétique

Une onde (ou champ) électromagnétique est la combinaison en chaque point de l'espace d'un champ électrique \mathbf{E} et d'un champ magnétique \mathbf{H} se propageant au cours du temps. Cette propagation obéit aux lois de la théorie de Maxwell, l'un des plus beaux mais aussi plus difficiles édifices fondamentaux de la physique. On montre, dans cette théorie, que le flux de puissance (c'est-à-dire la puissance traversant une unité de surface) est véhiculé par le vecteur de Poynting (produit vectoriel des deux champs):

$$\mathbf{P} = 1/2 \mathbf{E} \wedge \mathbf{H}$$

et que son intensité est directement reliée à celle du champ électrique seulement pourvu que l'on soit suffisamment éloigné de la source d'émission (on dit que l'on est en "champ libre" ou en "**zone de Fresnel**"):

$$P = E^2 / 240\pi \text{ (P en W/m}^2 \text{ et E en V/m)}$$

Remarquons alors déjà que dans les débats on a donc raison de chercher des seuils sur E (V/m) mais que, s'agissant du risque de contact des antennes d'émission, ces critères ne marchent plus (car on est dans une zone de champ proche de l'antenne appelée "**zone de Rayleigh**", j'y reviendrai plus tard).

Restons pour le moment dans le cas du champ libre de loin le plus courant. Si l'on connaît le flux de puissance en un lieu où se trouve une antenne de réception (ou tout autre objet conducteur), on peut calculer la puissance effective, reçue en ce même lieu, par cette antenne: de façon très simplifiée (car les calculs rigoureux sont compliqués), cette puissance reçue W_R (en watts W) est égale au flux P en ce lieu réparti sur la surface équivalente d'interception de l'antenne S_R (en m²):

$$W_R = P S_R$$

(en réalité j'ai fait des hypothèses simplificatrices comme: antenne adaptée en charge, adaptée en polarisation, antenne résonnante... qui sont des notions inutiles ici pour notre recherche en ordres de grandeurs). L'antenne de réception n'a pas le même niveau de sensibilité pour toutes les directions spatiales, il existe une direction angulaire du faisceau d'ondes pour lequel la puissance reçue est maximale: on dit qu'elle a une directivité et celle-ci crée un gain (une amplification) en puissance reçue pour ce pinceau de direction, noté G_R (grandeur sans dimensions). Ce gain dépend de la forme et des dimensions de l'antenne, ainsi que de sa hauteur par rapport au sol; c'est un paramètre extrêmement important pour les performances de transmissions. La théorie simplifiée montre qu'il est relié à la surface équivalente d'interception et qu'il dépend de la fréquence de l'onde incidente:

$$S_R = G_R c^2 / 4\pi f^2 \text{ (en m}^2\text{), c est la vitesse de la lumière,}$$

la puissance reçue est donc reliée au champ électrique incident par:

$$W_R = (1/240) E^2 G_R c^2 / 4\pi^2 f^2$$

D'autre part le champ électrique E , produit par une puissance électrique W_E est émis par une

antenne d'émission de gain à l'émission G_E et son intensité décroît avec le carré de la distance R séparant les antennes d'émission et de réception (loi de propagation en champ libre ou de décroissance par "divergence géométrique"):

$$E^2 = 60 G_E W_E / R^2$$

En définitive le rapport entre la puissance reçue et la puissance émise (ou rendement de la transmission hertzienne) prend la forme très simple:

$$W_R/W_E = (c/4\pi R f)^2 G_E G_R$$

son inverse s'appelle atténuation A . Les spécialistes des transmissions ont l'habitude d'exprimer les rapports de puissance ou d'énergie sur une échelle logarithmique en décibels (dB) : cela permet d'une part de comparer les énergies à des références généralement très faibles, et d'autre part de manipuler des rapports très élevés de plusieurs ordres de grandeurs, fastidieux en données brutes, avec des nombres aisés à manipuler.

Ainsi pour l'atténuation la formule ci-dessus prend la forme en dB:

$$A \text{ (dB)} = 10 \log A = 32,45 + 20 \log f + 20 \log R - (G_E \text{ (dB)} + G_R \text{ (dB)})$$

où la distance R est en km et la fréquence f en MHz. Cette atténuation est importante: plusieurs dizaines de dB (pour 1 GHz, 10 km, des gains émission-réception de 30 dB par exemple), ce qui rend les transmissions hertziennes peu aptes à véhiculer de *l'énergie directement utilisable*, par contre elles sont aptes à véhiculer de faibles *puissances d'information*, par nature destinées à déclencher chez le système destinataire des mises en oeuvre d'énergie élevée grâce à des actionneurs. Pourvu, bien sûr, que le signal reçu à l'arrivée soit d'un niveau suffisant pour être exploité par un système de traitement du signal, condition qui introduit un autre concept de la transmission: le rapport signal / bruit (noté S/B).

A partir d'un signal reçu, pour permettre à la fois une discrimination suffisante entre les données élémentaires ou bits (dynamique) et leur circulation en débit élevé (plusieurs Gbits/seconde), il faut que la puissance de ce signal puisse se distinguer des signaux parasites qui constituent les bruits de fond du système: il faut donc que le rapport signal/bruit soit élevé de plusieurs ordres de grandeurs (plusieurs dizaines de dB). Hors de question de traiter ici cette théorie imbuvable qui fait un couplage entre la thermodynamique statistique, physique quantique, électronique et électromagnétisme. On se contentera de dire que le bruit de fond B est d'autant plus élevé que le sont: la largeur de la bande passante Δf , la température équivalente de bruit T , différents coefficients de pertes d'origines très diverses propres au système d'émission A_E , de réception A_R , ou d'origine externe A_P comme l'absorption atmosphérique, très variable avec l'heure ou la météo, les obstacles, les signaux parasites dus aux interférences ou aux rayons cosmiques...), le tout via un facteur de bruit F lié aux technologies de transmission du système d'exploitation. Bref, la puissance de bruit est donnée par:

$$B = F k T \Delta f A_E A_R A_P$$

où $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K constante de Boltzmann. Le rapport signal sur bruit S/B s'écrit donc en données brutes et en niveau dB:

$$S/B = (c/4\pi f R)^2 W_E G_E G_R / B$$

ou:

$$(S/B)_{dB} = 20 \log (c/4\pi f R) + 10 \log W_E + G_E(dB) + G_R(dB) + 228 - 10 \log F - 10 \log T - 10 \log \Delta f - (A_E(dB) + A_R(dB) + A_P(dB))$$

Par ailleurs, le rapport signal/bruit et la bande passante interviennent, comme je l'ai dit plus haut, dans les performances de transmission de l'information. Parmi celles-ci figure la capacité du canal de transmission: c'est le débit maximum de bits que peut véhiculer un canal d'information. Elle est donnée par la **formule de Shannon**:

$$Q = 3,3 \Delta f \log (1 + S/B) \text{ (en bits/s: bps)}$$

Plus Q est élevée, plus le système peut véhiculer de signaux et procéder à leur multiplexage avec une bonne dynamique. Par exemple, en système GSM900, les données citées plus haut, jointes avec un S/B requis minimum de 30 dB, permettent une capacité de 445 Mbps (ce qui revient pratiquement à passer en moins de 13 secondes le contenu d'un CD ROM de 700 Mbytes !) (Attention : 1 byte ou octet = 8 bits).

En combinant les critères visant à obtenir l'atténuation la plus faible, le rapport signal/bruit le plus élevé, la capacité la plus élevée, on voit qu'il faut, à fréquence de travail fixée:

- augmenter les gains d'antenne en émission et en réception G_E et G_R en agissant sur la géométrie et l'emplacement en hauteur des antennes. Typiquement, on montre qu'une antenne dipolaire de longueur L rayonnant une onde de fréquence f émet à la source une puissance maximale W_E si sa longueur est multiple entier de la demi-longueur d'onde: $L = c/2f$ (antenne demi-onde); ainsi pour 1 GHz les longueurs possibles sont 15 cm, 30 cm, 45 cm, etc., mais il y a bien d'autres types d'antennes. La dimension de l'antenne agit aussi directement sur l'ouverture du faisceau où la plus grande partie de la puissance est émise: cette largeur du faisceau s'appelle ouverture à -3dB (parce qu'en dehors du faisceau on a perdu déjà la moitié de la puissance soit 3dB):

$$\Phi = 50,5 c / f L \text{ (en degrés)}$$

ainsi, avec de grandes dimensions et/ou avec des fréquences élevées on obtient un faisceau d'émission très directif et on augmente le gain dans cette direction. Ces notions introduites pour l'émission valent aussi pour la réception. Il faut savoir aussi que, à géométrie et à fréquence données, on peut améliorer l'ouverture en appliquant au signal électrique des pondérations électroniques en amplitude et en phase...

- élargir la bande passante pour améliorer la capacité, malheureusement cela va dans le sens d'un accroissement du niveau de bruit: donc on ne touche pas à la bande passante qui, de toutes façons est une donnée opérationnelle;
- diminuer la distance entre émetteurs et récepteurs: mais alors il faudrait augmenter dans une même cellule le nombre d'antennes relais, ce qui ne va pas dans le sens de la volonté de l'opinion publique et qui, à mon avis, favorise des risques liés au champ proche comme je l'indiquerai plus loin; la tendance et la volonté des opérateurs téléphoniques est bien cependant d'accroître ce nombre de relais sur les immeubles;
- diminuer la température des systèmes électroniques (par refroidissement, chose qui existe déjà pour les centraux). Le recours à des matériaux supraconducteurs offre des perspectives intéressantes pour les prochaines décennies (un matériau supraconducteur est un matériau qui ne dissipe pas de chaleur lorsqu'il est parcouru par un courant électrique, ou **effet Joule**, et qui reste conducteur même à très basse température);
- diminuer autant que possible les pertes propres aux émetteurs et récepteurs

(problème technologique donc de R&D), sachant que l'on ne peut pas grand chose pour les pertes externes; ces pertes propres sont de quelques dB;

- diminuer autant que possible le facteur de bruit de ces mêmes émetteurs et récepteurs (autre problème technologique); typiquement ils sont de l'ordre d'une dizaine de dB;
- et bien sûr, augmenter la puissance d'émission à la source W_E , mais l'imposition pour elle d'un seuil est au coeur des controverses.

Comme les antennes et les postes mobiles sont tantôt émetteurs et tantôt récepteurs, tout ce qui vient d'être dit concerne aussi bien les antennes relais réparties sur les cellules que les téléphones mobiles portés et tenus à la main par les usagers, mais ces derniers ayant des gains d'antenne assez misérables il faut choyer les antennes relais.

4.2 - Que se passe-t-il avec les puissances actuelles pour les risques sur l'organisme?

Je ne dispose pas de toutes les données sur les systèmes de transmission et sur les téléphones portables en téléphonie mobile: j'ignore par exemple quels sont les gains d'antennes relais, les facteurs de pertes et de bruit, les portées réelles, le type d'antennes utilisés (il y en a une flopée !), les températures d'exploitation, le rapport signal/bruit requis donc les capacités de canaux... Si certains en disposent, je suis preneur. Je vais devoir donc faire des hypothèses en ordre de grandeur, et, après tout, ce qui compte c'est de voir comment évolue le rapport S/B si l'on diminue la puissance d'émission à la source, et donc en un lieu distant de R de celle-ci, en vérifiant si cela remet réellement en cause les performances actuelles. Pour évaluer la puissance au-dessous de laquelle plus aucun risque physiologique ne survient je vais bien sûr utiliser les informations sur les interactions hyperfréquences-organisme, avec toutes les difficultés que j'ai signalées. Je vais comparer avec les normes actuelles qui varient d'un coin à l'autre de la planète (pourquoi faire simple ?) en me limitant à l'Union Européenne. Je vais enfin voir si les éventuelles diminutions de puissance qu'elles réclament peuvent encore être diminuées dans le sens indiqué dans les articles joints au message de Pascal, et si oui, si cela entraîne des impacts techniques sur les dispositifs de téléphonie mobile actuels.

Dans cette discussion, le cas du champ proche sera surtout examiné: car il concerne les situations où une personne risque de s'approcher et toucher une antenne relais en émission, et où l'antenne du téléphone portable de l'utilisateur risque d'être au contact d'une portion de surface de son corps.

4.2.1 - Evaluation des performances avec les puissances actuelles

Pour les deux configurations GSM900 et DCS1800 je distingue le cas de l'antenne relais en émission et le cas du téléphone portable en réception et en émission où j'évalue pour chacun la densité de puissance absorbée.

4.2.1.1 - Antennes relais en émission

4.2.1.1.1 - GSM 900: avec une fréquence d'émission de 900 MHz les antennes relais d'émission présentent un gain de 15,5 dB (cf un rapport sénatorial). J'évalue pour le bruit une température de 20°C (293 K), un facteur de bruit à 15 dB (raisonnable), des pertes propres égales chacune à 3 dB. La puissance crête d'émission à la source est donnée à 20 W. Tout calcul fait cela me donne:

- une atténuation de 80,5 dB entre deux antennes de central séparées par l'espacement 10 km d'une cellule;

- un rapport signal sur bruit estimé à 38 dB (acceptable);
- une capacité pour l'ensemble des canaux de 569 Mbps (la bande passante étant de 45 MHz).

Résultats estimés sur le champ électrique:

- *au bout des 10 km (limite de la cellule) le champ électrique n'est plus que de 15 mV/m, ce qui est bien au-dessous de l'ordre de grandeur des 41 V/m définis aujourd'hui comme seuil de sécurité au voisinage des antennes relais dans un rapport du Directeur de la Santé (cas des antennes type KATHREIN).*
- *tout près de la source d'émission par contre le champ vaut 109 V/m selon mes calculs, et ceci jusqu'à la limite de la zone de Fresnel que j'évalue ici égale à 2,4 m (en admettant que le comportement de l'antenne est du type demi-onde). Etre au voisinage de la source signifie être en zone de Fraunhofer, c'est-à-dire à moins de la distance de Rayleigh de la source R_L : cette zone est d'autant plus étendue que la fréquence et la taille de l'antenne sont grandes:*

$$R_L = L^2 f / 2c \text{ (en m, L dimension caractéristique de l'antenne, liée à la surface équivalente de rayonnement),}$$

dans cette zone, la puissance rayonnée est constante et reste élevée, puis cette puissance émise décroît très rapidement avec la distance au-delà de la distance de Fresnel (champ libre) donnée par:

$$R_F = 4 R_L$$

Il faut donc que les individus soit éloignés d'une distance au moins égale à la distance de Fresnel de l'antenne, donc présentement de 2,4 m. Des simulations numériques (rapport Zmirou) montrent que, pour le GSM 900, le seuil de 41 V/m est atteint dès que l'on se trouve à moins de 2 m de l'antenne (mes estimations, plus pessimistes, donnent un éloignement de 5 m pour ce même seuil, c'est-à-dire deux fois la distance de Fresnel, mais l'ordre de grandeur est correct). Puis au-delà le champ diminue selon mes calculs ainsi: 14,6 V/m à 10 m, 7,3 V/m à 20 m, 2,8 V/m à 50 m, etc... ces valeurs sont du même ordre que celles obtenues par simulation numérique (rapport Zmirou, France Telecom Mobiles) qui donnent respectivement 15 V/m, 7 V/m, 3 V/m...

On peut évaluer la densité moyenne de puissance absorbée (W/kg) pour la valeur du champ électrique proche de l'antenne. Pour le savoir, il faut tenir compte du fait que les pertes diélectriques évoluent avec la fréquence. Plusieurs modèles existent à ce sujet: Debye, Cole, Havriliak-Negami, Jonscher... Tous prévoient un maximum vers 10 GHz fréquence de relaxation de l'eau. Pour nos fréquences étudiées ces pertes augmentent donc avec la fréquence et je vais choisir le modèle de Debye selon lequel elles lui sont proportionnelles. J'évalue ainsi ces pertes diélectriques à 6 pour 900 MHz à 20°C. D'autre part je suppose une densité du corps humain moyenne de 500 kg/m³, et que le champ induit dans les tissus reste du même ordre de grandeur que celui du champ excitateur: tout ceci me donne une estimation de P_m égale à 7,1 W/kg à moins de 2 m de l'antenne, 1 W/kg à 5 m (seuil des 41 V/m; les normes actuelles donnent 1,1 W/kg pour ce seuil ce qui est cohérent), 128 mW/kg à 10 m, 32 mW/kg à 20 m, 4,7 mW/kg à 50 m, 47 microW/kg à 500 m, etc.

4.2.1.1.2 - DCS 1800: avec une fréquence d'émission de 1,8 GHz le calcul me permet

d'extrapoler à 22,5 dB le gain des antennes (à partir de la valeur de 15,5 dB connue pour 900 MHz ci-dessus). Les données relatives au bruit sont prises identiques à celles du cas GSM 900, et la puissance crête d'émission à la source est donnée à 30 watts. Ceci conduit à:

- une atténuation de 74,5 dB entre deux antennes de central séparées de 10 km
- un rapport signal/bruit estimé à 44 dB,
- une capacité pour l'ensemble des canaux de 1 Gbps.

Résultats estimés sur le champ électrique:

- *au bout des 10 km (limite de la cellule)* le champ électrique n'est plus que de 35,5 mV/m;
- *tout près de la source d'émission* le champ vaut 137 V/m à moins de la distance de Fresnel de l'antenne, estimée par le calcul ici à 4,7 m. La densité de puissance absorbée pour 1,8 GHz et un champ proche de 137 V/m s'obtient comme plus haut en supposant que les pertes diélectriques sont proportionnelles à la fréquence si celle-ci est < 10 GHz (modèle de Debye); on trouve 45,1 W/kg. Au-delà de la limite du champ proche, le champ et la densité de puissance absorbée décroissent selon mes calculs ainsi: 35,6 V/m à 10 m (3 W/kg), 17,8 V/m à 20 m (0,8 W/kg), 7,1 V/m à 50 m (121 mW/kg), etc...

REMARQUE IMPORTANTE: à 1,8 GHz le seuil des 41 V/m est franchi pour une distance de 8,7 m de la source. Cependant il ne donne pas la même densité de puissance absorbée qu'à 900 MHz (1 W/kg). Si l'on veut retrouver celle-ci il faut abaisser le seuil à 20 V/m pour 1,8 GHz, valeur atteinte pour un éloignement de 17 m environ. Mais de toutes façons je crois qu'une telle valeur de densité de puissance est trop élevée par rapport aux résultats obtenus par certaines études officielles (voir plus bas).

4.2.1.2 - Téléphones portables

4.2.1.2.1 - Téléphones portables en réception: En réception le niveau du champ reçu par le téléphone portable émis par une antenne relais est très faible. Utilisant les mêmes hypothèses que ci-dessus, considérons par exemple une antenne d'émission de 1,8 GHz placée à 20 m d'altitude (immeuble de 6 étages) qui envoie une onde inclinée de 5° par rapport au sol. La largeur du pinceau où la puissance est maximale (ouverture à 3dB, voir plus haut) est faible à la fréquence étudiée: $\Phi = 4^\circ$ maxi. La puissance reçue au sol est maximale pour un usager placé dans l'axe de plus grande directivité à une distance au sol D de l'antenne. Tout calcul fait: D = 229 m et le champ en ce point ne dépasse pas 1,5 V/m. Pour toute autre distance au sol (plus près ou plus loin de l'antenne) le champ reçu est beaucoup moins important parce que la puissance transportée chute de plusieurs dB en-dehors du faisceau principal. Dans cette condition la plus sévère de réception en champ libre, cette valeur du champ correspond à une densité de puissance absorbée P_m de l'ordre de 7,5 mW/kg, ce qui est tout à fait acceptable. Le cas du GSM 900 est évidemment encore plus négligeable.

4.2.1.2.2 - Téléphones portables en émission: Par contre, en émission, le téléphone portable présente un comportement différent: l'utilisateur risque en effet d'être dans le champ proche de son antenne d'émission lorsqu'il colle l'appareil à ses oreilles ou lorsqu'il le porte sur lui en le laissant allumé.

Evaluons alors la distance de Fresnel pour le téléphone portable ainsi que la densité de puissance absorbée en-deçà de cette zone, pour les deux cas GSM 900 et DCS 1800.

Après calculs, et en admettant un comportement de type demi-onde du téléphone (faute de mieux) je trouve que pour les deux fréquences envisagées la tête de l'utilisateur se trouve toujours à l'intérieur de la zone de champ proche lorsqu'il porte l'appareil à son oreille: 16 cm pour 900 MHz et 8 cm pour 1,8 GHz. Il en est de même lorsque l'utilisateur porte l'appareil en fonction sur lui: la partie du corps avoisinant est dans le champ proche, car lorsqu'il est allumé l'appareil émet et reçoit des signaux périodiquement. Par exemple le coeur est dans le champ proche lorsque l'on porte le téléphone allumé dans la poche interne de sa veste. En champ proche, il n'y a pas de loi de décroissance du niveau de puissance avec l'éloignement, et celle-ci y reste maximale. Ces considérations sont tout à fait en phase avec nombre d'études menées

Reste à évaluer les flux, les champs et les densités de puissance en champ proche. Théoriquement c'est un problème très compliqué car en champ proche le champ magnétique, en plus du champ électrique, joue un rôle important et les fluctuations du champ électromagnétique ainsi que sa polarisation doivent être prises en compte.

Pour me faciliter la vie (et celle du pauvre lecteur !) je considère que le portable est omnidirectionnel et que, par conséquent, le champ émis devient libre à partir d'une surface sphérique centrée sur l'appareil et de rayon égal à sa distance de Fresnel. Le flux de puissance qui traverse cette surface reste le même à l'intérieur de toute la zone qu'elle renferme. Si j'ose utiliser en champ proche la formule reliant le flux au champ comme en champ libre (tant pis pour les puristes !) je peux alors estimer le champ et par suite la densité de puissance absorbée. Alors essayons !

Pour mener à bien mon calcul un peu bidon, j'ai besoin de connaître la puissance émise par le portable. En GSM 900 on a 2 watts maxi d'émission et en DCS 1800 on a 1 watt maxi. En réalité, par le système TDMA qui permet à 8 usagers de se partager le même canal simultanément, cela correspond à des puissances moyennes effectives de 250 mW et 125 mW respectivement présentes en champ proche. Il s'agit vraiment des puissances émises maximales; en pratique, la plupart du temps elles sont bien plus faibles de par le dispositif de contrôle de puissance: l'appareil ajuste sa puissance en fonction de la proximité de l'utilisateur à l'antenne relais. Lorsque l'utilisateur appelle un correspondant, la puissance d'émission est d'abord maximale (125 mW moyenne pour DCS 1800 par exemple) puis réduite par paliers de 2 dB en quelques secondes jusqu'à stabilisation à un niveau minimal compatible avec les performances de communication, ce qui peut aller jusqu'à 10 mW seulement. Sur cette gamme de puissances ainsi ajustées les niveaux de transmission vont de 30 dBm à 2 dBm pour un GSM 1800 et 33 dBm à 5 dBm pour GSM 900. Mais je vais me placer dans les situations les plus sévères d'émission à la puissance maximale.

Avec toutes ces approximations, mes calculs donnent:

- pour GSM 900: niveau de champ proche 24 V/m et densité de puissance absorbée 0,35 W/kg. Oh miracle ! les simulations et des essais sur fantômes (FTRD, ENST, CENELEC, IEEE, RNRT etc) aboutissent à une valeur très proche: 1,1 W/kg au niveau de la tête, avec 0,4 W/kg au niveau de l'oreille interne, de loin la plus exposée. C'est réconfortant pour les valeurs extrapolées à 1,8 GHz ci-après,
- pour DCS 1800: niveau de champ proche et densité de puissance absorbée estimés respectivement à 34 V/m et 2,8 W/kg. Cette fois-ci on est au-dessus du seuil estimé plus haut de 1 W/kg. Il faut de toutes façons abaisser cette densité.

4.3 - Quel seuil raisonnable choisir et quelles conséquences sur les performances de transmission ?

Entre toutes les valeurs extrêmes vues ci-dessus existent des plages d'études menées sur les effets (cf un rapport sénatorial). Par exemple, Tice a montré qu'entre 5 et 10 W/kg une exposition de 24 h pouvait induire des micronoyaux dans les lymphocytes humains. Toujours aux environs de ces fréquences et densités de puissance, Aubineau, dans le cadre du programme COMOBIO a établi un changement de la perméabilité des vaisseaux cérébraux à

partir de 3 W/kg. Par contre, concernant la BHE (barrière hémato-encéphalique, voir plus haut), les travaux de Tsurita concluent à l'absence d'effet sur sa perméabilité à 10 W/kg. Bien entendu ces exemples sont loin d'être exhaustifs et la densité de puissance absorbée varie considérablement d'une partie à l'autre de l'organisme humain (ainsi elle vaut 30 mW/kg en moyenne au niveau de la tête vers 900 MHz et 400 mW/kg pour l'oreille interne à cette même fréquence.)

Les dangers potentiels sur l'organisme commencent donc à être avérés à partir de 3 ou 4 W/kg pour les animaux. Mais, à la suite des conclusions provisoires des diverses commissions (ICNIRP Commission Internationale de Protection Contre les Rayonnements Non Ionisants, OMS Organisation Mondiale de la Santé, IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers, EMF Project, etc), par mesure de sécurité et pour prendre en compte les incertitudes liées à l'extrapolation d'un modèle animal à l'homme (principe de similitude de Gandhi), la limite d'exposition a été abaissée d'un facteur 10, soit 0,4 W/kg corps entier, seuil qui constitue la restriction de base. De plus une réduction d'un facteur 5 a été choisie pour la population générale pour tenir compte de la diversité des caractéristiques individuelles (âge, santé, sensibilités, environnement, modes de vie ou de nourriture, etc), *ce qui conduit au seuil de 80 mW/kg* (plutôt qu'à la limite actuelle du champ 41 V/m).

J'adopte donc cette valeur comme seuil admissible. Un tel seuil de densité de puissance absorbée correspond à un seuil sur le champ de:

- 11,5 V/m pour GSM 900
- 5,8 V/m pour DCS 1800.

Ces seuils n'entraînent aucune conséquence sur l'extension des zones de champ proche (qui ne dépendent que de la fréquence et de la géométrie de l'émetteur). Par contre elles entraînent un abaissement des puissances d'émission qui peut impacter la qualité des transmissions. Ainsi mes calculs (toujours bidons) donnent une diminution drastique des performances si l'on veut respecter ces seuils même près des antennes (champ proche):

- *pour GSM 900:*
 - *antennes relais:*
 - puissance d'émission 110 mW contre la source. Mais si l'on conserve la puissance d'émission actuelle à la source (20 W) il faut s'éloigner d'une distance de sécurité égale à 13 m pour retrouver un champ compatible à la norme de sécurité
 - rapport signal/bruit sur 10 km de cellule 18,7 dB,
 - capacité de débit 279 Mbps.
 - Si l'on veut restituer les performances initiales (rapport signal/bruit et débit) il faut rapprocher les antennes relais (taille minimale des cellules 1 km selon mes calculs, donc une grande démultiplication du nombre d'antennes relais !)
 - *portables:*
 - puissance d'émission 56 mW,
 - distance de sécurité (si puissance initiale conservée 250 mW) égale à 34 cm, ce qui pose quelques problèmes pratiques.
- *pour DCS 1800:*
 - *antennes relais:*
 - puissance d'émission 27 mW contre la source,

- distance de sécurité (si puissance initiale à la source maintenue 30 W) égale à 61 m (ce qui commence à faire beaucoup),
- rapport signal/bruit sur 10 km de cellule 16,4 dB,
- capacité de débit 408 Mbps.
- si l'on veut restituer les performances initiales il faut rapprocher les antennes relais à seulement 426 m (densité élevée d'antennes relais).

- *portables:*
 - puissance d'émission 3,6 mW
 - distance de sécurité si puissance initiale maintenue (125 mW) égale à 47 cm (problème !)

4.4 – Discussion, conclusion... provisoires !

Il y a eu et il y aura de nombreuses études et commissions sur ce sujet de santé publique. Certaines d'entre elles, basées sur des modèles animaux, révèlent des effets biologiques sans conséquences sanitaires graves aux fréquences et aux puissances actuellement utilisées en téléphonie mobile. Aucune relation de cause à effet n'a été prouvée pour le développement ou l'aggravation des tumeurs cancéreuses, elle est de toutes façons inexistante dès que l'éloignement aux antennes relais excède quelques mètres. Néanmoins l'exploitation d'études épidémiologiques, au demeurant très difficiles sur un plan méthodologique, conduira à des conclusions supplémentaires d'ici 2005 : DGS, AFSSE, OMS, CIRC, ICNIRP, COST, étude INTERPHONE, programmes européens et français PerformB, RAMP, REFLEX, GUARD... Si risque il y a, il se trouve surtout au niveau de la manipulation des téléphones portables parce qu'ils placent obligatoirement l'utilisateur au contact de leurs champs proches. Des études menées dans cette perspective dans le programme français COMOBIO, tout en invoquant des risques de perturbations cérébrales chez les animaux, ne conclut à aucune conséquence néfaste sur la santé humaine. Ceci est vrai pour les seuils actuels de 41 V/m pour le champ, ou de 1,1 W/kg pour la dose absorbée.

On a vu cependant qu'en vertu d'une part des incertitudes d'extrapolation des expériences animales (principe de Gandhi), d'autre part d'une grande variété des états physiologiques et sanitaires des individus, et enfin des inévitables erreurs de modélisation et de mesures physiques, il convenait, même pour se situer en-dehors du domaine du risque décelé chez l'animal, de *réduire sévèrement ce seuil à une dose de 80 mW/kg*. En d'autres termes, avec ce seuil, on est absolument sûr de supprimer toute polémique (encore que certaines associations veulent arriver à un seuillage du champ de 1 V/m, ce qui correspond à 0,6 mW/kg à 900 MHz : cela est selon moi parfaitement inutile et au demeurant complètement irréaliste en terme de performances de transmissions téléphoniques ; en outre je répète qu'il vaut mieux raisonner sur la dose de puissance plutôt que sur le champ électrique, comme démontré plus haut). Ce seuil de 80 mW/kg, on l'a vu, est préconisé par beaucoup d'organismes de par le monde.

Mes évaluations ont montré que le respect de ce seuil pose de gros problèmes sur les performances de traitement de l'information des systèmes de téléphonie mobile (effondrement des rapports signal/bruit, des capacités de débit et donc du nombre de canaux et/ou de la vitesse des échanges dans ceux-ci, etc) et que, pour récupérer les performances actuelles il faudrait augmenter la densité des antennes relais pour les rapprocher. Mais ce ne sont que mes évaluations. A supposer qu'elles ne soient pas complètement idiotes, les conséquences seraient :

- une nécessaire évolution technologique des systèmes de téléphonie pour restituer une bonne qualité de service : on peut faire confiance, pour cela, aux programmes de R&D des industriels qui sont pour eux l'occasion de conserver une longueur d'avance sur la concurrence. Au fond, on peut se demander si les débats qui ont lieu autour des

conséquences sanitaires de la téléphonie mobile, apparemment sources d'ennui pour ces industriels, n'inspirent pas en réalité leurs nouveaux moteurs de marketing : finalement, à performances égales entre deux produits concurrents, ce qui se vend désormais est la sécurité (cela est vrai dans bien d'autres domaines techniques, heureux effets du principe de précaution !). Et puisque je suis à ce genre de considérations, j'ajouterai que, pour avoir été membre jadis d'une commission de travail de l'AFNOR affiliée à l'ISO (International Standards Organization), je sais combien de travaux et de mobilisation d'énergies demande l'élaboration des normes. Inutile de souligner alors que les études commanditées par les organismes officiels aux innombrables instituts et autres centres de recherche de France, d'Europe et du Monde sont pour eux des sources d'activités intéressantes, surtout lorsqu'elles ont trait au très délicat médiatico-socio-politique domaine de la santé. D'autant que, pour les politiques, c'est toujours une occasion renouvelée d'asseoir leurs prérogatives et leurs raisons d'être dans l'étape finale du processus qui consiste, à partir des aspects scientifiques du problème traités scientifiquement par des scientifiques, de prendre les décisions sur les aspects sociaux et humains qui doivent, quant à eux, être traités par les acteurs sociaux et politiques (c'est pas moi qui le décrète, c'est la Commission Européenne : "*Traiter scientifiquement les problèmes scientifiques et socialement les problèmes de société.*"). L'exemple du problème du téléphone portable, malgré les apparences, est donc une source de satisfaction pour tous les acteurs : les spécialistes pour les études que cela suscite, les industriels pour l'avance concurrentielle, les citoyens pour l'écoute de leurs inquiétudes et de leur contre pouvoir, les politiques pour l'occasion supplémentaire de confirmer leurs pouvoirs décisionnaires... Le Meilleur des Mondes a trouvé son moteur dans le Principe de Précaution : je ne saurais l'en blâmer tant qu'il est utilisé avec intelligence, honnêteté et... précautions !

- une densification des cellules de téléphonie mobile (comme on l'a vu au § 4.3) qui doit nécessairement s'accompagner d'une intensification des directives normatives sur les systèmes relais qui prévoient non seulement des contraintes matérielles mais aussi une obligation de concertation entre les pouvoirs publics, les citoyens et les industriels. Ces directives sont déjà nombreuses. Je citerai pour mémoire et de façon incomplète :

- les normes UTE (Union Technique de l'Electricité et des communications, par délégation de l'AFNOR) et en particulier la commission UEF106 spécialisée aux interactions corps humain-champs électriques (normes NF C99-100, NF C99-101 et NF C99-010 transcriptions des normes européennes EN50360, 50361 et 50371)

- la directive 1999/5/CE dite directive RTTE du 9 mars 1999, relative à la mise sur le marché, la libre circulation et la mise en service des équipements hertziens et terminaux, dans l'optique de la préservation de la santé

- le décret du 3 mai 2002 concernant la gestion des risques liés aux expositions aux champs électromagnétiques. Il prévoit en particulier que "*lorsque plusieurs équipements ou installations radioélectriques émettent dans une même zone, les opérateurs doivent veiller à ce que les champs électromagnétiques émis globalement par l'ensemble des équipements et installations concernés soient conformes aux niveaux de référence (...)* Les opérateurs doivent communiquer aux administrations ou autorités affectataires de leurs fréquences un dossier relatif à chaque installation contenant une déclaration selon laquelle l'antenne est conforme aux normes (...). Ce dossier doit préciser les actions engagées pour assurer qu'au sein des établissements scolaires, crèches ou établissements de soins qui sont situés dans un rayon de 100 mètres de l'équipement ou de l'installation, l'exposition du public au champ électromagnétique émis par

l'équipement ou l'installation est aussi faible que possible tout en préservant la qualité du service rendu. "

- la circulaire interministérielle du 16 octobre 2001 (DGS/7D, UHC/QC, D4E, DIGITIP) s'appliquant aux installations nouvelles sans délai et aux antennes existantes dans un délai de 6 mois. Dans son annexe 1 il est dit : *" Il appartient donc aux opérateurs exploitants de réseaux de mettre en place les mesures nécessaires pour éviter toute exposition prolongée des personnes dépassant les niveaux de référence. L'opérateur exploitant est notamment tenu de matérialiser le périmètre de sécurité (...)*

Le rayonnement émis par une station de base de radiotéléphonie est susceptible à courte distance d'entraîner un dysfonctionnement des prothèses implantables actives (pacemakers par exemple). Comme en atteste le rapport du groupe d'experts présidé par le Dr Zmirou, ces dysfonctionnements ne sont jamais observés en dehors des périmètres de sécurité préconisés dans la présente annexe. Des panneaux d'information pour les personnes concernées devront être installés à proximité des antennes et appareils. "

En somme, avec les puissances d'émission actuelles ou futures, comme il n'est guère possible de réduire les périmètres du champ proche étant données les fréquences imposées par les impératifs de service, il est nécessaire et rendu obligatoire d'avertir le public sur l'étendue des périmètres de sécurité, sur les risques encourus en-deçà et sur les caractéristiques des antennes et installations de base. En l'occurrence il doit être rendu impossible de pouvoir être au contact d'une antenne active lorsqu'elle est en fonction, pour toute personne susceptible de devoir s'en approcher pour raisons de service (techniciens opérateurs, tout intervenant sur les toits comme couvreur, électricien, plombier, chauffagiste, etc) et donc il faut que l'antenne s'arrête d'émettre si nécessaire. S'agissant des informations, l'ANFR (chargée de coordonner l'implantation des stations) doit fournir à la demande les informations techniques aux services administratifs de l'Etat qui relaieront vers les citoyens.

- Enfin, les téléphones portables pourraient voir une baisse de niveau d'émission afin de réduire l'exposition de l'utilisateur placé nécessairement dans le champ proche de l'appareil. Paradoxalement, le fait de devoir rapprocher les stations de base va dans le sens d'une diminution des niveaux d'émission des portables par le système de contrôle de puissance (cf § 4.2.1.2.2 ci-dessus) : des niveaux tout à fait acceptables de l'ordre de 5 mW seraient alors émis. Ceci vient du fait que dans le cas d'une densification des antennes relais, tout portable serait à distance réduite de l'antenne la plus proche. La seule contrainte majeure, dans l'hypothèse d'une densification des antennes relais, est que celles-ci soient à plus de cent mètres du sommet de l'immeuble de même hauteur le plus proche, ce qui est tout à fait compatible avec les contraintes de l'urbanisme.

Reste la question de l'esthétique, mais cela est une autre histoire ! Après tout, les antennes TV ornent nos toits depuis 40 ans sans que beaucoup de gens s'en émeuvent ! Mais il est vrai qu'elles travaillent à des fréquences de plusieurs ordres de grandeurs beaucoup plus basses donc absolument inoffensives : dans " Bonne nuit les petits ", Gros Nounours qui venait sur le nuage du Magicien parmi la forêt d'antennes des HLM n'était pas exposé à des risques sanitaires, hormis lorsqu'il employait l'échelle de cordes pour arriver par la fenêtre chez Pimprenelle et Nicolas... (pom popopom popopom pom pom !...)

Voilà, nous n'avons pas fait le tour complet de la question de l'éventuelle nocivité des téléphones portables car c'est absolument impossible tant le problème est techniquement et scientifiquement riche et tant les aspects sociaux et économiques sont importants. J'ai voulu montrer ici et à l'occasion combien ce type de problème ne saurait se satisfaire de réponses

simplistes et démagogiques. Une réelle connaissance technique est déjà indispensable pour en saisir toute la portée et j'ai seulement esquissé ses aspects physiques et biophysiques.

Annexe 1 – Rappels sur les transmissions électromagnétiques

A1.1 – Rayonnement très loin de l'antenne (champ libre)

Au-delà de la distance de Fresnel le champ électrique \mathbf{E} est relié au champ magnétique \mathbf{H} par :

$$\mathbf{E} = \mu c \mathbf{H} \wedge \mathbf{u}$$

avec $\mu c = \eta = 120\pi = 377 \Omega$, et \mathbf{u} vecteur unitaire. Vecteur de Poynting :

$$\mathbf{\Pi} = 1/2 \mathbf{E} \wedge \mathbf{H}^*$$

donc :

$$\mathbf{\Pi} = (1/240 \pi) \mathbf{E} \mathbf{E}^* \mathbf{u}$$

soit :

$$\Pi = |\mathbf{E}|^2 / 240\pi \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Or:

$$\mathbf{E} = 30 j k \iiint (\mathbf{l} \wedge \mathbf{u}) \wedge \mathbf{u} (\exp -jkr' / r') dv$$

avec $r' = MP$, $r = OP$ donc $r' \approx r$, d'où :

$$\mathbf{E} = 60 j I_0 (\exp-jkr / r) \mathbf{F}(\mathbf{u}) \quad (2)$$

où I_0 intensité du courant de référence et \mathbf{F} vecteur fonction caractéristique de rayonnement, dépend des directions θ et φ , de la fréquence f et du courant de référence :

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}) = \mathbf{F}(\theta, \varphi) = 1/2 \iiint (k I / I_0 \wedge \mathbf{u}) \wedge \mathbf{u} (\exp jk \mathbf{OP} \cdot \mathbf{u}) dv$$

Puissance rayonnée à travers une surface loin de la source :

$$W = \iint_S \mathbf{\Pi} \cdot \mathbf{n} dS \text{ (W)}$$

(1) donne:

$$W = 1/240\pi \iint_S E^2 dS \text{ (W)} \quad (3)$$

Puissance par unité d'angle solide $d\Omega$:

$$\Phi(\theta, \varphi) = dW/d\Omega = E^2 dS/240\pi d\Omega$$

or $d\Omega = \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} dS/r^2 = dS/r^2$ d'où :

$$\Phi(\theta, \varphi) = E^2 r^2 / 240\pi \text{ (W/sr)} \quad (4)$$

donc:

$$W = \int \Phi(\theta, \varphi) d\Omega$$

Remarque: si l'antenne est isotrope, c'est-à-dire $\Phi(\theta, \varphi)$ est indépendant des directions donc puissance moyenne rayonnée par unité d'angle d'une antenne directive :

$$\Phi_m = W/4\pi = E^2 r^2 / 240\pi \text{ (W/sr)} \quad (5)$$

d'où:

$$E^2(r) = 60W/r^2 \text{ où } E \text{ en V/m}$$

De façon générale, (2) et (3) donnent :

$$W = 15/\pi I_0^2 \iint_S F^2(\mathbf{u}) dS/r^2 \quad (6)$$

Exemple : antenne verticale au-dessus du sol de longueur L, (2) donne :

$$E(\theta) = 60 (I_0 / r) |\cos(kL\cos\theta) - \cos kL| / |\sin \theta|$$

Le champ émis E est donc maximal si $L = \lambda / 2$ soit $L = c/2f$

Par exemple : $f = 1 \text{ GHz} : L = 15 \text{ cm} ; f = 3 \text{ GHz} : L = 5 \text{ cm}.$

A1.2 – Gain de l'antenne d'émission

Fonction directivité : rapport de la puissance émise dans une direction, à la puissance moyenne rayonnée :

$$D(\mathbf{u}) = \Phi(\mathbf{u})/\Phi_m = 4\pi \Phi(\mathbf{u}) / W \quad (7)$$

Gain absolu : soit W_E puissance d'émission à la source avec rendement 1, le gain absolu est le rapport entre la puissance rayonnée et la puissance à la source $W_E/4\pi$ considérée omnidirectionnelle :

$$G(\mathbf{u}) = 4\pi \Phi(\mathbf{u}) / W_E \quad (8)$$

Rendement en puissance : comme $G(\mathbf{u}) = (4\pi / W_E)(W/4\pi) D(\mathbf{u}) = (W/W_E) D(\mathbf{u})$, et posant le rendement $\rho = W/W_E$ on a donc :

$$G(\mathbf{u}) = \rho D(\mathbf{u}) \quad (9)$$

D'après (8) et (4) : $G(\mathbf{u}) = (4\pi/W_E) (E^2 r^2 / 240\pi) = E^2 r^2 / 60W_E$, d'où la loi de décroissance du champ électrique en champ libre, connaissant la puissance à la source et le gain de l'antenne d'émission (loi de divergence géométrique) :

$$E^2(\mathbf{u}) = 60 G(\mathbf{u}) W_E / r^2 \quad (10)$$

On peut calculer le gain d'antenne à partir du courant de référence, de la puissance à la source et de la fonction directivité, en effet d'après (2) : $E^2(\mathbf{u}) = I_0^2 (60/r)^2 F^2(\mathbf{u}) = (60/r^2) G(\mathbf{u})W_E$ d'où :

$$G(\mathbf{u}) = 60 I_0^2 F^2(\theta, \varphi) / W_E \quad (11)$$

A1.3 – Réception

Puissance fournie au récepteur :

$$W_R = 1/2 Z I_R^2 \quad (\text{en W})$$

avec Z impédance de charge, I_R courant de sortie.

Soit Z_p impédance propre de l'antenne de réception, alors la puissance électrique générée à la réception est

$$W_T = W_R + W_D = 1/2 (Z + Z_p) I_R^2$$

où W_D puissance re-diffusée par l'antenne de réception. Si V tension de sortie $V = (Z + Z_p)I_R$ alors :

$$W_T = 1/2 V^2 / (Z + Z_p) \quad W_D = 1/2 Z_p V^2 / |Z + Z_p|^2 \quad W_R = 1/2 Z V^2 / |Z + Z_p|^2 \quad (12)$$

Partie active $W_R = \text{Re}(W_R)$, $W_D = \text{Re}(W_D)$; comme $Z = R + jX$ alors :

$$W_R = 1/2 R V^2 / |Z + Z_p|^2 \quad \text{et} \quad W_D = 1/2 R_p V^2 / |Z + Z_p|^2 \quad (13)$$

Champ incident E : (1) donne

$$P = E^2/240\pi \quad (\text{où } E^2 = |E|^2)$$

Gain absolu à l'émission de l'antenne de réception si elle émettait une puissance W_E' : (11) donne

$$G'(\mathbf{u}) = 60 I_0'^2 F'^2(\mathbf{u}) / W_E'$$

Or $W_E' = 1/2 R_p I_0'^2$ donc:

$$G'(\mathbf{u}) = 120 F'^2(\mathbf{u}) / R_p \quad (14)$$

où $F'(\mathbf{u})$ fonction directivité de l'antenne de réception.

D'après le théorème de réciprocité la tension de réception V est liée au champ incident E par la directivité à la réception selon :

$$V = 2 E F'(\mathbf{u}) / k \quad (15)$$

avec $k = 2\pi/\lambda$, donc $V^2 = (\lambda/\pi)^2 |E F'(\mathbf{u})|^2$

Mais en introduisant le facteur de polarisation : $p(\mathbf{u}) = |E F'(\mathbf{u})|^2 / E^2 F'^2$, on a compte tenu de (1) $E^2 = 240\pi P$ et de (14) $F'^2 = R_p G(\mathbf{u})/120$:

$$V^2 = (\lambda/\pi)^2 240\pi (R_p/120) G(\mathbf{u}) p(\mathbf{u})$$

$$W_R = (\lambda^2/4\pi) 4RR_p P G(\mathbf{u}) p(\mathbf{u}) / |Z + Z_p|^2 \quad (16)$$

(13) donne:

$$W_D = W_p R_p/R \quad (17)$$

Posant $\delta = 4RR_p/|Z + Z_p|^2$, il vient pour la **puissance rediffusée** :

$$W_D = (\lambda^2/4\pi) P G(\mathbf{u}) \delta p(\mathbf{u}) \quad (18)$$

Si la charge est adaptée à l'antenne alors $\delta = 1$

Le récepteur est adapté si $W_D = W_R$

Si l'antenne est court-circuitée et résonnante, il n'y a pas de puissance absorbée mais diffusion de la puissance reçue par un facteur 4.

La puissance absorbée est maximale si la polarisation est adaptée : $p(\mathbf{u}) = 1$

Valeur moyenne de la puissance reçue de l'espace :

$$\langle W_R \rangle = 1/4\pi \int \int \int W_R(\mathbf{u}) d\Omega$$

Gain absolu à la réception :

$$\Gamma(\mathbf{u}) = W_R(\mathbf{u}) / \langle W_R \rangle \quad (19)$$

Si $p = 1$ on a

$$\langle W_R \rangle = 1/4\pi \int \int \int \lambda^2/4\pi P G(\mathbf{u}) \delta p(\mathbf{u}) d\Omega = (\lambda^2/4\pi) (P \delta /4\pi) \int \int \int G(\mathbf{u}) d\Omega$$

$$W_R = (\lambda^2/4\pi) P \delta G(\mathbf{u})$$

Par conséquent:

$$\Gamma(\mathbf{u}) = 4\pi G(\mathbf{u}) / \int \int \int G(\mathbf{u}) d\Omega$$

avec $G(\mathbf{u}) = 4\pi \Phi(\mathbf{u})/W_E$ et $\Phi(\mathbf{u}) = dW/d\Omega$. Donc pour $p = 1$:

$$\int \int \int G(\mathbf{u}) d\Omega = \int \int \int (4\pi /W_E)(dW/d\Omega) d\Omega = (4\pi /W_E) \int dW = 4\pi$$

donc :

$$\Gamma(\mathbf{u}) = G(\mathbf{u}) \text{ si } p(\mathbf{u}) = 1 \quad (\text{polarisation adaptée}) \quad (20)$$

A1.4 – Aires d'absorption et de diffusion

Si S surface équivalente en onde plane, la puissance la traversant est :

$$W = \int P dS = PS$$

donc à toute puissance, pour un flux connu P, correspond une aire :

$$S = W/P \quad (21)$$

Donc $W_T = W_R + W_D$ correspond à $S_T = W_R/P + W_D/P = S_R + S_D$ (où on suppose que P est le même pour R et D), avec S_R aire d'absorption, S_D aire de diffusion.

D'après la relation (18) : $S_R = (\lambda^2/4\pi) G \delta p$ qui est maximale pour $\delta = 1$ et $p = 1$:

$$S_{Rmax} = (\lambda^2/4\pi) G(\mathbf{u}) \quad (22)$$

De même si $p = 1$ et si la charge est adaptée ($Z = Z_p^*$) on a

$$S_D = S_{Dmax} = S_{Rmax} \quad (23)$$

A1.5 – Combinaison émission-réception

On admet les conditions d'adaptation réalisées. La puissance reçue par l'antenne de réception l'est par l'intermédiaire du gain en réception et concerne un champ électrique dont la puissance est émise à la source par un gain à l'émission. La combinaison des deux (émission-réception, ou transmission) donne :

$$E^2 = 60 G_E(\mathbf{u})W/r^2$$

$$W_R = (\lambda^2/960\pi^2) 60W G_E G_R / r^2$$

où W puissance émise par l'antenne émettrice. Donc

$$W_R = (\lambda /4\pi)^2 W G_E G_R \quad (24)$$

rendement à la réception par rapport à l'émission $\eta = W_R/W$ ou son inverse **l'atténuation** :

$$a = 1/\eta = (4\pi r/\lambda)^2 / G_E G_R \quad (25)$$

En niveau (dB) l'atténuation s'exprime par la **formule du CCIR** :

$$A \text{ (dB)} = 10 \log a = 32,45 + 20 \log r(\text{km}) + 20 \log f(\text{MHz}) - (G_E(\text{dB}) + G_R(\text{dB})) \quad (26)$$

A1.6 – Champ proche

Tout proche de l'antenne, zone de Rayleigh :

$$R_L = D^2/2\lambda$$

Pour $0 < r < R_L$, la puissance est constante donc $W = W_E$ (pas d'effet de surface équivalente ni de directivité), D dimension caractéristique de l'antenne d'émission.

Zone de Fresnel :

$$R_F = 2D^2/\lambda = 4 R_L$$

Pour $R_L < r < R_F$ la puissance est fluctuante.

Zone de Fraunhofer ou de champ libre : $r > R_F$ dans cette zone propagation selon la décroissance en $1/r$, effet de directivité et de la surface de capture.

A1.7 – Ouverture à -3dB du faisceau émis

Si D dimension caractéristique de la source dans le plan de coupe des angles θ , on montre que l'ouverture à -3dB du faisceau émis (en-dehors de ce faisceau la puissance est inférieure à la moitié du maximum) s'écrit

$$2\theta_{-3\text{dB}} (\text{°}) = 50,5 \lambda / D \quad (27)$$

A1.8 – Rapport signal/bruit entre l'émission et la réception

Bruit d'origine thermique dans l'antenne de réception et son système d'exploitation :

$$B \text{ (W)} = F k_B T \Delta f$$

Où F facteur de bruit de l'antenne de réception, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K constante de Boltzmann, T température de bruit (en K), Δf largeur de la bande passante (Hz). D'autres atténuations propres aux antennes interviennent : A_E pertes de l'émetteur, A_R pertes du récepteur, A_P pertes de propagation atmosphérique. Finalement le **rapport signal/bruit** est :

$$(S/B) = (\lambda / 4\pi r)^2 W G_E G_R A_E A_R A_P / (F k_B T \Delta f) \quad (28)$$

Pour améliorer le rapport S/B il faut donc : augmenter les gains d'antennes à l'émission et à la réception (ou produit émission-réception), diminuer la bande passante, augmenter la puissance à l'émission, diminuer la distance, diminuer la température (réfrigérer), minimiser les pertes propres.

En niveau le S/B s'exprime par :

$$(S/B)_{dB} = 10 \log (S/B) = 20 \log (c/4\pi fr) + 10 \log W_E + (G_E + G_R)_{dB} + 228 - F(dB) - 10 \log T(K) - 10 \log \Delta f (Hz) - (A_E + A_R + A_P)_{dB} \quad (29)$$

Annexe 2 – Marche suivie pour les évaluations numériques de l'étude

A2.1 – Calcul de la densité de puissance absorbée (DAS) à partir de l'estimation du champ électrique

La densité de puissance absorbée est :

$$P_m (W/kg) = (1/\rho) 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' E^2$$

ε_0 permittivité du vide = $8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm. Pour l'eau on admet que les pertes diélectriques ε_r'' croissent linéairement avec la fréquence avant 10 GHz (relaxation de l'eau) donc

$$\varepsilon_r'' \propto f$$

Pour évaluer E à la distance r de la source, il faut évaluer le flux de puissance à la source (à la limite de la zone de Fresnel) P donc il faut estimer la surface de capture à la source à cette frontière, notée Σ . Pour cela on admet que cette surface est délimitée par les faisceaux à $-3dB$ dans les deux plans perpendiculaires et est située à la distance de Fresnel R_F de la source :

$$\Sigma = 2 R_F \tan (\theta_{-3dB} / 2) 2 R_F \tan (\varphi_{-3dB} / 2) \approx R_F^2 (\theta_{-3dB} / 2) \tan (\varphi_{-3dB} / 2)$$

puisque le faisceau est très directif dans l'un des plans (site) : attention les angles sont ici en radians !

Alors :

$$P_E = W_E (\Sigma) / \Sigma$$

Et :

$$E (\Sigma) = (240\pi P_E)^{1/2}$$

A la distance de Fresnel la DAS se calcule avec cet E (Σ) et à la distance $r > R_F$ elle se calcule avec E (r) donné par le gain à l'émission G_E et la distance :

$$E(r) = (60 G_E W_E (\Sigma))^{1/2} / r$$

Il faut donc aussi estimer le gain d'antenne. Il est donné par

$$G_E = 4\pi S/\lambda^2$$

Si les dimensions sont suffisamment grandes devant la longueur d'onde la surface équivalente S est égale à la surface de la source par ailleurs donnée par les ouvertures à 3dB :

$$S = ab \text{ avec } a = 50,5 \lambda / 2\theta_{-3dB} \text{ et } b = 50,5 \lambda / 2\varphi_{-3dB}$$

Quand les fréquences évoluent les gains changent dans le rapport de leurs carrés :

$$G_E (f') = G_E (f) (f' / f)^2$$

Pour les téléphones portables, en émission, on admet qu'ils se comportent comme des demi-ondes $L = \lambda / 2$ et que leur gain est du type YAGI :

$$G_R = 5\lambda / L \text{ donc } = 2,5 \text{ donc } G_R(\text{dB}) = 10 \log G_R = 4 \text{ dB}$$

On suppose aussi la distance de Rayleigh donnée par

$$R_L = L^2/2\lambda = \lambda / 8$$

La surface d'émission à la distance de Fresnel que traverse la puissance émise du portable W_E est supposée construite pour le cas omnidirectionnel (antenne petite), donc :

$$\Sigma = 4\pi R_F^2$$

d'où un flux égal à :

$$P_E = W_E/\Sigma$$

Et donc un champ électrique en champ proche que l'on suppose encore calculé comme en champ libre (ce qui est faux en toute rigueur !) :

$$E = (240\pi P_E)^{1/2}$$

Puis dans le champ proche du téléphone portable la DAS se calcule normalement.

A2.2 – Résultats des calculs

Pour les calculs qui suivent pour les fréquences 900 MHz et 1,8 GHz on suppose, pour calculer P_m que les permittivités relatives ϵ_r de pertes valent 6 à 900 MHz et donc 12 à 1,8 GHz selon la courbe de Debye, et on choisit une densité moyenne du corps $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$. On obtient les tableaux suivants pour les cas :

- Tableau 1 : antennes relais à l'émission : évaluation de E et P_m en champ proche et avec l'éloignement, avec les puissances actuelles (20W à 900 MHz et 30W à 1,8 GHz)
- Tableau 2 : téléphones portables en émission : évaluation de E et P_m en champ proche, avec les puissances moyennes actuelles 250 mW à 900 MHz et 125 mW à 1,8 GHz
- Tableau 3 : conséquences du choix du seuil de DAS à 80 mW/kg

Fréquences	900 MHz	1,8 GHz
Bande passante Δf	45 MHz	75 MHz
Gain à l'émission $G_E = 4\pi S/\lambda^2$	15,5 dB (donné)	21,5 dB (calculé)
Ouverture site à -3dB : $2\theta_{-3\text{dB}}$	8° (donné)	4° (calculé)
Ouverture gisement à -3dB : $2\varphi_{-3\text{dB}}$	90° (donné)	45° (calculé)
Dimension site $a = 50,5 \lambda / 2\theta_{-3\text{dB}}$	2,10 m (calculé)	2,10 m (calculé)
Dimension gisement $b = 50,5 \lambda / 2\varphi_{-3\text{dB}}$	0,19 m (calculé)	0,19 m (calculé)
Surface d'émission $S = ab$	0,39 m ² (calculé)	0,39 m ² (calculé)
Distance de Rayleigh $R_L = S/2\lambda$	0,6 m (calculé)	1,17 m (calculé)
Distance de Fresnel $R_F = 4R_L$	2,4 m (calculé)	4,68 m (calculé)

Fréquences	900 MHz	1,8 GHz
Puissance d'émission à la source W_E	20 W (donné)	30 W (donné)
Surface d'émission à la limite de Fresnel : $\Sigma = R_F^2 (2\varphi_{-3dB}) (2\theta_{-3dB})$	0,63 m ² (calculé)	0,60 m ² (calculé)
Puissance émise à travers Σ : la puissance considérée est la moitié de celle à la source car on est dans le faisceau à -3dB : $W_E(\Sigma)$	10 W (estimée)	15 W (estimée)
Flux de puissance en limite de Fresnel : $P_E(\Sigma) = W_E(\Sigma) / \Sigma$	16 W /m ² (calculé)	25 W/m ² (calculé)
Champ électrique en limite de Fresnel : $E = (240\pi P_E)^{1/2}$	109 V/m à 2,4 m (calculé, 41 V/m selon la littérature)	137 V/m à 4,68 m (calculé)
DAS à la limite de Fresnel : P_m	7,1 W/kg (calculé)	45 W/kg (calculé)
$E(r) = (60G_E W_E(\Sigma))^{1/2} / r$ à la distance r (et P_m associé)	5m : 41V/m (1W/kg) 10m : 14,6 V/m (128 mW/kg) 20m : 7,3 V/m (32 mW/kg) 50m : 2,8 V/m (4,7 mW/kg)	10m : 35,6 V/m (3 W/kg) 20m : 17,8 V/m (0,8 W/kg) 50m : 7,1 V/m (121 mW/kg)
Atténuation à 10 km	80,5 dB (calculé)	74,5 dB (calculé)
Rapport S/B à 10 km (hyp: T=293K, F = 15 dB, $A_E = A_R = -3dB$)	38,3 dB (calculé)	43,8 dB (calculé)
Capacité $C = 3,3\Delta f \log(1+S/B)$	569 Mbps (calculé)	1 Gbps (calculé)

Tableau 1 – Performances estimées des antennes relais à l'émission

Fréquences	900 MHz	1,8 GHz
Distance de Rayleigh $R_L = \lambda/8$	4 cm (estimé)	2 cm (estimé)
Distance de Fresnel R_F	16 cm (estimé)	8 cm (estimé)
Puissance moyenne émise W_E	250 mW (donné)	125 mW (donné)
Surface d'émission à la limite de Fresnel $\Sigma = 4\pi R_F^2$	0,32 m ² (estimé)	0,08 m ² (estimé)
Flux de puissance en champ proche $PE = W_E / \Sigma$	0,78 W/m ² (calculé)	1,56 W/m ² (calculé)
Champ électrique en champ proche $E = (240\pi P_E)^{1/2}$	24 V/m (calculé)	34,3 V/m (calculé)
DAS en champ proche P_m	0,35 W/kg (calculé)	2,8 W/kg (calculé)

Tableau 2 – Propriétés des portables en champ proche

Fréquences (seuil à 80 mW/kg)	900 MHz	1,8 GHz
Permittivité relative de pertes	6 (estimé)	12 (estimé)
Champ électrique correspondant à la DAS seuil de 80 mW/kg : E_m	11,5 V/m (calculé)	5,8 V/m (calculé)
Flux de puissance en champ libre correspondant à E_m : P_m	0,175 W/m ² (calculé)	0,045 W/m ² (calculé)

Fréquences (seuil à 80 mW/kg)	900 MHz	1,8 GHz
Surface d'émission ou équivalente en limite de FRESNEL : Σ	Antennes relais : 0,63 m ² (données précédentes) Portables : 0,32 m ² (données précédentes)	Antennes relais : 0,60 m ² Portables : 0,08 m ²
Puissance associée : $W_E = P_E \Sigma$	Antennes relais : 110 mW (calculé) Portables : 56 mW (calculé)	Antennes relais : 27 mW (calculé) Portables : 3,6 mW (calculé)
Si source inchangée (performances initiales) distance de sécurité pour avoir 80mW/kg : $R_s = (60W_E)^{1/2} / E_m$	Antennes relais : 13m (calculé) Portables : 34 cm (calculé)	Antennes relais : 61m (calculé) Portables : 47 cm (calculé)
Atténuation sur 10 km A (inchangée, ne dépend pas de W_E)	Antennes relais : 80,5 dB Portables : sans objet	Antennes relais : 74,5 dB Portables : sans objet
S/B avec les nouvelles puissances à la source W_E	Antennes relais : 18,7 dB (calculé) Portables : Sans objet	Antennes relais : 16,4 dB (calculé) Portables : Sans objet
Capacité C	Antennes relais : 279 Mbps (calculé) Portables : Sans objet	Antennes relais : 408 Mbps (calculé) Portables : Sans objet
Rapprochement des relais pour avoir le S/B initial	Antennes relais : 38,3 dB : R = 1 km (calculé) Portables : Sans objet	Antennes relais : 43,8 dB : R = 426 m (calculé) Portables : Sans objet

Tableau 3 – Performances avec un seuil de DAS à 80 mW/kg

Bibliographie

- Lorrain et Raoul: Rapport sénatorial n°52
- Rapport Zmirou
- ENSTA: Cours d'électronique
- Jacques Thuéry: Les micro-ondes et leurs effets sur la matière, TECDOC Lavoisier, 1989
- Roland Coelho et Bernard Aladenize: Les diélectriques, HERMES 1993
- Robert Du Bois: Structure et applications des émetteurs et des récepteurs, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 1996

Liste non exhaustive des organismes, programmes et sites sur le sujet :

ICNIRP (www.icnirp.org)

COST 244 bis (2000)

IEGMP, UK (www.iegmp.org.uk)

Rapport ESSOR Europe pour le STOA (2000)

Swedish Council for Work Life Research (Suède 2000)

Colloque CADAS (2000)

Rapport ZMIROU, France 2001 (www.sante.gouv.fr)

FDA (2001)

Malaysian Communications and Multimedia Commission (Malaysie 2001)

Royal Society of Canada (www.rsc.ca/english/Rfreport.html)

General Accounting Office GAO, USA 2001 (www.gao.gov)

STOA (2001)

COMOBIO rapport final 2001 (tsi.enst.fr/comobio)

Scientific Committee on Toxicity, ecotoxicity and the environment (CSTEE)

Health Council of the Netherlands (Pays Bas 2002)

ARPANSA Radiation protection standard 2002 (Australie)

Epidemiologic Studies of Cellular Telephones and Cancer Risk, Swedish Radiation Protection 2002