



## CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES : DE LA DOSIMÉTRIE À LA SANTÉ HUMAINE

Méthodologie en expérimentation: des résultats à l'interprétation

Methodology in experiment: from the results to the interpretation

---

**C. Yardin<sup>\*</sup> and A. Perrin<sup>\*\*</sup>**

*<sup>\*</sup> Département d'Histologie, de Biologie Cellulaire et de Cytogénétique, Hôpital de la Mère et de l'Enfant, CHU de Limoges, Faculté de Médecine, 87042 Limoges Cedex, France*

*<sup>\*\*</sup> Département de Radiobiologie, Centre de Recherches du Service de Santé des Armées (IRBA-CRSSA), BP 87, 38702 La Tronche Cedex, France*

---

Mots-clefs : méthodologie – dosimétrie – contrôles - sham

methodology – dosimetry – controls - sham

---

### **Résumé**

Les travaux portant sur les effets des radiofréquences sont particuliers puisque leur méthodologie fait appel à une double compétence : une compétence en physique et une compétence en biologie. Il est en effet nécessaire du point de vue physique qu'un système d'exposition adapté ait été utilisé, et qu'un calcul du débit d'absorption spécifique (DAS) rigoureux ait été réalisé ainsi que des mesures physiques, c'est-à-dire que l'étude présente une dosimétrie validée. Versant biologique, en plus des critères de qualité classiquement requis pour toute étude biologique (exemples : pertinence du modèle, analyse statistique adéquate, analyse en aveugle, voire en double aveugle...), de nombreux contrôles ou témoins sont nécessaires dans le cadre des effets des RF: contrôles négatifs, contrôles « sham », contrôles positifs. De plus certains paramètres peuvent faire varier les résultats et doivent impérativement être pris en compte, comme par exemple l'habituation des animaux au système d'exposition. Une analyse de tous ces critères est présentée.

## Introduction

Les études en laboratoire portant sur les effets biologiques des radiofréquences nécessitent une double compétence : l'une dans le domaine de la physique afin de paramétrer exactement les conditions d'exposition, l'autre dans le domaine de la biologie. Cette pluridisciplinarité ne peut être atteinte que par la collaboration d'équipes spécialisées dans l'un et l'autre de ces domaines. Ceci explique le petit nombre de scientifiques travaillant sur le sujet, et le grand nombre d'études qui présentent des lacunes méthodologiques.

Au delà de 10 MHz, les effets thermiques des radiofréquences (RF) sont connus de longue date et utilisés largement pour des applications domestiques, médicales qu'industrielles (fours à micro-ondes, traitement radiofréquences des métastases hépatiques, thermocollage, *etc.*). S'agissant des RF utilisées pour les télécommunications sans fil, il existe une réglementation visant à éviter les effets thermiques par une limitation des niveaux d'exposition. Considérant le développement exponentiel de ces technologies au cours des dernières décennies, la question principale qui se pose est celle de l'existence éventuelle d'effets non thermiques qui pourraient se produire en dessous des valeurs limites réglementaires. Il est dès lors crucial que les expérimentations soient conduites dans des conditions irréfutables en termes de dosimétrie (caractérisation de l'exposition) pour pouvoir affirmer qu'un effet observé n'est pas un effet thermique.

Pour la partie biologique, en plus des critères de qualité classiquement requis pour toute analyse biologique, un certain nombre de points particuliers doivent être vérifiés dans le cadre d'études portant sur les effets potentiels des RF.

L'évaluation du risque est fondée sur les résultats d'études scientifiques non seulement publiées dans des revues à comité de lecture, mais de qualité méthodologique correcte. Dans cet article, nous faisons le point sur les critères permettant d'analyser la méthodologie employée dans les parties physique et biologique d'une étude scientifique afin de pouvoir en évaluer la validité sur des critères objectifs.

## Analyse de la méthodologie de la partie physique

Les principaux critères de validité retenus sont :

- la qualité du système d'exposition,
- la « dosimétrie », ou caractérisation de l'exposition.

Il est nécessaire en premier lieu de disposer d'un système d'exposition qui permette de réaliser des expériences avec des conditions d'exposition contrôlées (fréquence, modulation, puissance, température, ventilation, *etc.*). Celui-ci doit être adapté au type d'étude et décrit de façon détaillée.

Le terme « dosimétrie », bien qu'impropre en l'absence de définition exacte, définit ce que serait une « dose » de rayonnement radiofréquences. Ce terme est couramment utilisé par les

chercheurs du domaine. Il faudrait plutôt parler d'« exposimétrie » et de dosimétrie biologique, c'est-à-dire de la caractérisation de l'exposition aux RF des modèles cellulaires, animaux ou humains permettant d'accéder à la valeur du Débit d'Absorption Spécifique (DAS).

Il est en effet indispensable de connaître le DAS, exprimé en W/kg, qui est le paramètre qui caractérise le niveau d'exposition. Sans cette valeur, les conditions expérimentales ne sont pas définies (cela reviendrait au même que de tester la toxicité d'un produit sans avoir une idée de la quantité utilisée). Le DAS doit être obtenu par deux méthodes au moins : simulation numérique et mesure physique de température et/ou du champ électrique. La température sous exposition ne peut être mesurée correctement qu'avec des sondes non métalliques, généralement par fibres optiques. Cette valeur du DAS étant délicate à obtenir, la méthode dosimétrique employée doit être examinée en détail pour chaque publication afin de connaître la validité de la valeur du DAS annoncée par les auteurs.

Lors de l'analyse des articles de recherche, différents cas de figures sont rencontrés :

- la méthode d'obtention du DAS est bien décrite : calculs numériques + mesures physiques (dosimétrie validée) ;
- l'estimation du DAS est faite par des calculs à partir de mesures physiques (approximation plus ou moins grossière) ou par simulation numérique uniquement. Il manque une validation soit numérique soit expérimentale (dosimétrie incomplète) ;
- la valeur du DAS est mentionnée, mais il n'y a pas de description ou de référence à une autre publication expliquant comment il a été obtenu (dosimétrie non décrite) ;
- l'absence de dosimétrie, les conditions d'exposition sont inconnues, aucune valeur de DAS n'est fournie (néant).

Notons qu'un téléphone mobile ne peut pas être utilisé comme système d'exposition pour des expériences *in vitro* ou sur des animaux pour mimer l'effet d'un téléphone sur un humain. En effet, la puissance (en Watts) normalement dissipée dans environ 1,4 kg de tissu cérébral humain est alors absorbée par 10 g dans le cas du cerveau d'un rat par exemple. Le système est alors considéré comme irrecevable et l'étude ne peut être prise en compte.

Selon le système d'exposition utilisé, les études peuvent être faites en champ proche ou en champ lointain et c'est toujours la valeur de DAS qui reste le critère de référence pour évaluer le niveau d'exposition. Lorsqu'il s'agit d'un DAS localisé (au niveau de la tête, du cerveau ou de la peau par exemple), la valeur du DAS au niveau de la partie étudiée, ou « DAS local », est plus élevée que le DAS « corps entier » qui est une moyenne sur la totalité du corps.

## Analyse de la méthodologie de la partie biologique

Les effets biologiques des radiofréquences sur le vivant peuvent être examinés à plusieurs niveaux :

- *in vitro* sur des cellules humaines, animales, végétales ou de bactéries en culture,
- *in vivo* sur des animaux ou des humains.

Les études *in vitro* et *in vivo* sont réalisées pour élucider des effets sur des mécanismes métaboliques, des fonctions physiologiques ou des altérations des systèmes vivants. Les études *in vivo* et *in vitro* se complètent.

Pour les études *in vitro*, les cellules peuvent être fraîchement isolées à partir d'organes ou de prélèvements sanguins (lymphocytes), utilisées directement ou mises en culture pour une courte durée (on parle alors de cultures primaires). Il peut s'agir également de lignées cellulaires : soit des cellules cancéreuses provenant de divers types de tumeurs, soit des cellules immortalisées par modifications génétiques. Pour les études *in vivo*, les modèles animaux les plus fréquemment utilisés sont les rats et les souris. Ces dernières peuvent être génétiquement modifiées et présenter un caractère particulier utile aux études réalisées, comme une prédisposition au développement de certaines tumeurs.

En ce qui concerne la durée de l'exposition, il est question d'exposition « aiguë » lorsque la durée est courte (quelques minutes à plusieurs heures selon le modèle) et d'exposition chronique lorsque cette durée s'étale pendant une grande partie de la vie de l'animal ou de l'humain. Compte tenu de la durée de vie d'un rat ou d'une souris, une exposition de 1 an ou deux est considérée comme chronique. Entre les deux, pour quelques jours à quelques mois, l'exposition est dite semi-chronique (ou sub-chronique). S'il s'agit de cellules en culture, ces notions de chronique ou semi-chronique sont difficilement transposables, néanmoins, il est question d'exposition aiguë pour quelques minutes ou quelques heures, et chronique ou de longue durée si l'exposition persiste durant plusieurs générations de cellules.

Les critères de qualité classiquement requis pour les études biologiques doivent être évidemment respectés dans le cadre de l'étude des effets des RF, notamment :

- la pertinence du modèle,
- la validité des techniques (fiabilité, sensibilité, etc.),
- la puissance de l'étude : nombre de cas (taille de l'échantillon), nombre de répétitions,
- les tests réalisés en aveugle, voire double aveugle pour les études sur l'homme,
- les tests statistiques utilisés...

Idéalement, les expériences doivent également être conduites en aveugle, en particulier celles où l'analyse des résultats met en jeu la subjectivité de l'expérimentateur, comme des observations au

microscope ou des comptages non automatisés d'événements. Lors d'expositions humaines, il est préférable d'avoir recours aux expériences en double aveugle : sujets exposés et expérimentateurs ne savent pas si l'exposition est réelle ou sham.

En plus de ces critères généraux valables pour toute étude biologique, plusieurs types de témoins doivent être réalisés dans le cadre d'exposition aux RF, que ce soit pour des études *in vivo* ou *in vitro*:

- Expositions factices dites « *sham* » qui permettent de comparer les résultats obtenus avec et sans exposition aux radiofréquences. En pratique, l'expérience est réalisée dans deux systèmes identiques ; la présence ou l'absence du champ électromagnétique doit être l'unique paramètre qui varie entre exposé et sham. Ceci est fait dans la grande majorité des travaux. Ces expositions sham permettent de s'assurer que l'effet observé n'est pas dû au système d'exposition lui-même (dit aussi « effet cage ») mais bien causé par le champ électromagnétique.

- Témoins négatifs ou « contrôles » (contrôle cage pour les animaux). Ces contrôles laissent le modèle expérimental dans ses conditions habituelles, c'est-à-dire soit en conditions de culture habituelle dans un incubateur pour les cellules, soit en condition d'élevage habituel pour les animaux, sans les soumettre à une exposition réelle ou sham. Ces témoins négatifs permettent de vérifier que les manipulations des cellules ou des animaux pour les différentes expositions ne sont pas source de résultats erronés.

- Témoins positifs ou contrôles positifs. Pour ce type de contrôles, un facteur d'induction connu de l'effet recherché est utilisé : par exemple un agent mutagène sera utilisé si l'on recherche des effets sur l'ADN. Ces témoins positifs permettent de s'assurer qu'un effet, s'il existe, est bien détecté avec la technique employée. Ils servent donc à valider la technique utilisée. L'absence de ces contrôles « positifs » ne permet pas de conclure si aucun effet n'est observé, car on ne peut savoir si la technique utilisée est appropriée pour rechercher l'effet ciblé.

D'autres paramètres dans ce cadre particulier peuvent également faire varier notablement les résultats. Ainsi, selon le système utilisé pour les études *in vivo*, les animaux peuvent être contraints (immobilisés) pendant l'exposition et donc subir un stress important susceptible de fausser les résultats (stress de contention). Des dispositions doivent être prises pour limiter ce stress, notamment en habituant les animaux à cette situation. L'absence d'habituation peut conduire à l'observation de différences entre les rats exposés et les « contrôles cages », mais dans ce cas les mêmes effets doivent être observés chez les exposés et les sham qui subissent les mêmes manipulations.

Toutefois, même si la méthodologie employée semble être correcte, deux notions sont importantes également à considérer dans l'analyse bibliographique des travaux concernant les effets des RF: la réplication des résultats d'une étude et la convergence de résultats de plusieurs études.

En effet, nombre d'études font état d'effets « positifs » dans le domaine des RF. Bien qu'il s'agisse le plus souvent d'études de qualité méthodologique discutable, notamment dans la partie physique, c'est le cas aussi de certaines études bien menées. Néanmoins, les résultats d'une publication ne peuvent être réellement validés que lorsqu'une autre équipe a reproduit les résultats publiés dans des conditions expérimentales similaires. Cette notion de réplication est très importante dans l'étude des effets des RF. La non-reproductibilité d'un résultat dans les mêmes conditions expérimentales remet en question les résultats obtenus, comme c'est d'ailleurs toujours le cas en science. Ainsi de nombreuses études « positives » ont été répliquées sans retrouver les résultats initiaux. Il ne convient pas alors de réfuter les premiers résultats parus, mais soit de faire intervenir une troisième équipe, soit de demander à la première équipe de répliquer ses propres résultats. Pour ce qui concerne les effets des RF, il n'est pas rare que l'équipe de départ publie alors des seconds résultats différents des premiers.

En résumé, la plausibilité d'un effet observé dans une étude méthodologiquement validée pourra être renforcée si cet effet peut être mis en évidence par plusieurs équipes. La cohérence de cette observation par rapport au corpus disponible est appréciée en prenant du recul par rapport à l'ensemble des travaux disponibles sur le sujet. Par exemple, dans le rapport AFSSET 2009<sup>1</sup> aucune convergence dans les résultats des études expérimentales montrant des effets n'a pu être retrouvée, c'est-à-dire que les effets observés étaient très disparates et non concordants avec ceux rapportés par de nombreuses études de qualité. De plus nombre d'entre eux étaient obtenus pour des DAS susceptibles d'engendrer des effets thermiques. Alors que la mise en évidence par différentes équipes de résultats convergents pourrait constituer un argument en faveur d'un mécanisme commun, l'absence de convergence remet en cause la significativité des résultats considérés non isolément mais dans leur ensemble.

## **Conclusion**

Dans le domaine de recherche sur les effets des RF, une analyse méthodologique rigoureuse et systématique de la part des « reviewers » des différentes revues permettrait vraisemblablement une homogénéisation des résultats et une meilleure lisibilité de l'ensemble des publications.

<sup>1</sup> Afsset, rapport « les Radiofréquences », octobre 2009,  
[http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/964737982279214719846901993881/Rapport\\_RF\\_20\\_151009\\_1.pdf](http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/964737982279214719846901993881/Rapport_RF_20_151009_1.pdf)