



# Rayonnement non ionisant – Environnement et santé

Synthèse du programme

Programme national de recherche PNR 57



FONDS NATIONAL SUISSE  
SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS  
FONDO NAZIONALE SVIZZERO  
SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

**Fonds National Suisse**

Division IV, Recherche orientée  
Programmes nationaux de recherche  
Wildhainweg 3, CP 8232, CH-3001 Berne,

Telephone +41 (0)31 308 22 22

Facsimile +41 (0)31 301 30 09

E-mail [nfp@snf.ch](mailto:nfp@snf.ch)

[www.snf.ch](http://www.snf.ch)

*Rédaction*

Dr. Sonja Negovetic, Dr. Sabine Regel  
et les membres du Comité de direction du PNR 57

*Traduction*

Gérard Gast, La Côte-aux-Fées

Le texte original anglais approuvé par le comité de direction fait foi.

## Tables des matières

<b>1.</b>	<b>Résumé</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Introduction et objectifs du PNR 57</b>	<b>13</b>
2.1	Cadre	13
2.2	Recherches antérieures et justification du programme	14
2.3	Objectifs	15
2.4	Projets sélectionnés et budget	16
2.5	Valorisation, communication et publications	18
<b>3.</b>	<b>Synthèse des résultats</b>	<b>21</b>
3.1	Module 1 : Dosimétrie et mesures d'exposition	21
3.2	Module 2 : Etudes en laboratoire et épidémiologie	24
3.3	Module 3 : Biologie cellulaire	29
3.4	Module 4: Perception du risque	34
<b>4.</b>	<b>Conséquences scientifiques et besoins futurs</b>	<b>39</b>
4.1	Module 1 : Dosimétrie et mesures d'exposition	39
4.2	Module 2 : Etudes en laboratoire et épidémiologie	40
4.3	Module 3: Biologie cellulaire	42
4.4	Module 4 : Perception du risque	43
<b>5.</b>	<b>Conséquences sur l'environnement et la santé</b>	<b>47</b>
5.1	Module 1 : Dosimétrie et mesures d'exposition	47
5.2	Module 2 : Etudes en laboratoire et épidémiologie	48
5.3	Module 3 : Biologie cellulaire	49
5.4	Module 4 : Perception du risque	49
<b>6.</b>	<b>Exécution du programme</b>	<b>51</b>
6.1	Physiologie et métabolisme cellulaire	51
6.2	Exposition aux CEM et effets sur la santé	53
6.3	Dosimétrie et mesures d'exposition	53
6.4	Perception du risque	53
6.5	Perspectives	54
<b>7.</b>	<b>Annexe</b>	<b>55</b>
7.1	Agenda	55
7.2	Organisation et gestion	56
7.3	Programme des ateliers du PNR 57	59
7.4	Bibliographie	60
7.5	Acronymes	61

### Qu'est-ce qu'un programme national de recherche (PNR)?

Les projets de recherche menés dans le cadre d'un PNR doivent apporter une contribution à la résolution de grands problèmes actuels. Sur la base de l'article 6, alinéa 2 de la loi sur la recherche du 7 octobre 1983 (état au 1er mars 2010), le Conseil fédéral définit les problématiques et les priorités qui doivent faire l'objet de recherches dans le cadre des PNR. L'exécution des programmes relève quant à elle de la responsabilité du Fonds national suisse, mandaté pour cela par le Conseil fédéral.

L'instrument des PNR est décrit comme suit à l'article 4 de l'ordonnance relative à la loi sur la recherche du 10 juin 1985 (état au 1er janvier 2009):

*«<sup>1</sup> Les programmes nationaux de recherche doivent inciter à l'élaboration et à l'exécution de projets de recherche coordonnés et orientés vers un objectif commun. Ils doivent permettre de créer, si nécessaire, un potentiel de recherche supplémentaire.*

*<sup>2</sup> Les problèmes susceptibles de faire l'objet de programmes nationaux de recherche sont en particulier:*

- a. Ceux dont l'étude scientifique est importante sur le plan national;*
- b. Ceux à la solution desquels la recherche suisse est en mesure de contribuer de façon particulière;*
- c. Ceux à la solution desquels les contributions de diverses disciplines à la recherche sont nécessaires;*
- d. Ceux qui ne ressortissent pas exclusivement à la recherche fondamentale pure, à la recherche de l'administration (recherche du secteur public) ou à la recherche proche de l'industrie;*
- e. Ceux dont l'étude approfondie est censée aboutir en l'espace de cinq ans environ à des résultats susceptibles d'être mis en valeur dans la pratique.*

*<sup>3</sup> Il s'agit aussi de considérer, lors du choix, si les programmes*

- a. Peuvent servir de base scientifique à des décisions du gouvernement et de l'administration;*
- b. Pourraient être traités dans un projet international présentant en même temps un grand intérêt pour la Suisse.»*

## 1. Résumé

Les appareils de la téléphonie mobile ainsi que les systèmes d'alimentation électrique, les dispositifs électriques et divers autres appareils émettent du rayonnement non ionisant (RNI) ou des champs électromagnétiques (CEM). Les téléphones portables ont connu une croissance spectaculaire : en 2010, on estimait en effet leur nombre à 5 milliards dans le monde. Rien qu'en Suisse, plus de 9 millions de connexions étaient actives en 2010. Des inquiétudes se sont exprimées au sujet de l'exposition aux champs électromagnétiques haute fréquence (CEM HF) émis par ces dispositifs, soupçonnés d'exercer des effets négatifs sur la santé. Bien qu'actuellement il n'existe aucune preuve en ce qui concerne des risques sanitaires éventuels, la question n'est pas réglée. L'incertitude provient aussi de la publication de rapports controversés sur les effets des CEM à faible dose sur les systèmes biologiques.

### **Origine du Programme national de recherche « Rayonnement non ionisant – Environnement et santé »**

En juin 2003, l'Office fédéral de l'éducation et à la recherche (OFES) a demandé au Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) d'évaluer la création d'un programme national de recherche (PNR) consacré aux effets potentiels du rayonnement non ionisant (RNI) sur la santé humaine. En juin 2004, le Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche (SER) a demandé au FNS d'établir un plan d'exécution pour un programme de recherches interdisciplinaire et transdisciplinaire de quatre ans assorti d'un budget total de CHF 5 millions. Un comité de direction (CD) a été institué et chargé de rédiger le plan d'exécution. L'objectif principal du plan était d'aborder des questions scientifiques clés concernant les effets potentiels négatifs du RNI émis par une gamme de technologies actuelles et futures. Le programme devait être complémentaire aux activités de recherche internationales en matière de RNI, en se concentrant sur des questions spécifiques définies dans le programme de recherche de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) concernant les champs électromagnétiques (CEM). Un accent particulier a été porté sur la mise en œuvre si bien que le programme s'est préoccupé de manière ciblée des inquiétudes accrues de la population suisse à l'égard des risques sanitaires potentiels encourus.

En mars 2005, le Conseil fédéral a approuvé le « PNR 57: Rayonnement non ionisant – Environnement et santé » et en novembre 2005 le Département fédéral de l'intérieur a approuvé le plan de mise en œuvre. L'appel d'offres de projets a été publié en décembre 2005. 36 propositions ont été soumises au CD et évaluées par celui-ci avec le concours d'experts externes. Le CD a proposé 11 projets, une recommandation qui a été approuvée par le Conseil de la recherche du FNS en novembre 2006. Les projets de recherche ont débuté en janvier 2007.

### **Objectifs et thèmes**

Les efforts internationaux étant principalement focalisés sur le cancer, le plan d'exécution spécifiait que le PNR porterait sur d'autres effets potentiels nocifs et viserait à élucider les mécanismes à l'origine des effets potentiels des CEM sur les systèmes biologiques. En conséquence, les thèmes principaux de la recherche ont été définis comme suit:

- \_ Dosimétrie et mesures d'exposition
- \_ Expériences d'exposition humaine et études épidémiologiques incluant le thème de l'hyperélectrosensibilité (HES)
- \_ Biologie cellulaire concernant les effets du RNI
- \_ Risque: management, stratification et communication

### **Résultats des projets**

Le présent rapport de synthèse (mai 2011) est fondé sur des rapports rédigés en septembre 2010. Or, à cette date, les résultats de certains projets étaient encore en cours d'analyse. On se référera donc aux publications scientifiques correspondantes pour de plus amples renseignements.

### Dosimétrie et mesures d'exposition

Jusqu'à présent, la grossesse n'a pas été prise en considération de manière particulière en ce qui concerne les valeurs limites d'exposition. De plus, il n'existe que des données limitées concernant l'exposition du fœtus à des champs proches. Le projet de *Nicolas Chavannes et Andreas Christ de la fondation IT'IS à Zurich* concernait la quantification des champs électromagnétiques et leur absorption spécifique par les tissus de la femme enceinte et de l'enfant à naître à différents stades de la grossesse, dans des conditions d'exposition quotidiennes.

L'absorption a été simulée au moyen de modèles mathématiques et de techniques numériques. Des modèles anatomiques informatiques précis de la femme enceinte à trois stades de la grossesse (3<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> mois) ont été développés. Les modèles ont ensuite été exposés à des champs électromagnétiques représentatifs des situations quotidiennes. Les champs correspondaient à des expositions provenant de sources situées à grande distance, telles que les dispositifs de surveillance électronique opérant dans diverses gammes de fréquences, les plans de cuisson à induction ainsi que les dispositifs sans fil opérant dans l'environnement immédiat de l'abdomen. Les résultats ont montré que les valeurs limites de base étaient immanquablement respectées lorsque le champ incident respectait les niveaux de référence définis pour la population en général. En revanche, lorsque la femme enceinte est exposée dans des conditions correspondant aux conditions limites définies pour les expositions dans un cadre professionnel, le fœtus peut subir des expositions dépassant les valeurs limites de base définies pour la population en général.

Le projet de *Niels Kuster et Sven Kühn de la fondation IT'IS à Zurich* a abordé la question de l'exposition du système nerveux central. L'objectif était de déterminer l'exposition cumulée de celui-ci aux CEM HF provenant des sources proches et lointaines, les plus importantes de notre environnement social. L'étude a couvert la gamme de fréquences de 30 MHz à 6 GHz, par conséquent les dispositifs et les sources actuelles et futures comprenant les téléphones mobiles, les stations de base, les téléphones sans fil, les dispositifs de surveillance, les dispositifs de réseaux sans fil et les kits mains libres. En outre, d'autres facteurs influençant l'exposition, tels que la technologie de communication, le comportement de l'utilisateur (p.ex. les effets de la main qui tient le téléphone) et l'environnement (p.ex. la conduite d'une voiture) ont également été pris en compte pour une évaluation réaliste de l'exposition aux CEM HF dans le temps. Alors que les champs électriques incidents dus à des sources lointaines ont été mesurés dans un espace libre, les champs induits par les sources proches ou les taux d'absorption spécifique (TAS) ont été mesurés sur des fantômes présentant les propriétés électriques du corps humain. Des modèles anatomiques, concernant enfants et adultes des deux genres, dérivait d'images de résonance magnétique de volontaires en bonne santé.

L'étude a montré que le téléphone portable constitue la source de CEM exposant le cerveau le plus fortement. Dans ce cas, l'exposition dépend de la manière d'utiliser le téléphone et du type de téléphone, comme p. ex. la conception de celui-ci, l'utilisation de kits mains libres (leur utilisation réduit l'exposition d'un facteur supérieur à 10), le choix d'un téléphone UMTS ou seulement GSM (l'UMTS réduit l'exposition moyenne d'un facteur supérieur à 100), etc.

L'étude a également montré de grandes variations en ce qui concerne l'exposition de différentes régions du cerveau entre différents types de téléphones mobiles, variations pouvant aller au-delà d'un facteur 1000. Les sources lointaines ou quasi lointaines engendrent des expositions bien moindres du cerveau. En moyenne, les niveaux de TAS induits par des stations de base situées à l'intérieur, par exemple celles des téléphones sans fil ou les points d'accès de réseaux sans fil, sont du même ordre de grandeur que les niveaux de TAS dus aux stations de base de téléphonie mobile situées à l'extérieur.

Au cours du projet de *Andreas Christ et Myles Capstick de la fondation IT'IS à Zurich*, un système d'imagerie de pointe permettant de suivre directement les processus ayant lieu dans les cultures cellulaires durant l'exposition à des champs magnétiques très basse fréquence (CM TBF) a été développé. Cela supposait l'intégration du dispositif dans un système de microscopie. Ce système d'exposition TBF inédit permet une analyse flexible du signal, le suivi des procédures d'exposition intermittentes ainsi que toute une série de micromanipulations durant l'observation des cellules vivantes. Le système est facile à manipuler en raison d'un contrôle informatique automatisé ; il livre une information continue sur l'intensité du champ et la température cellulaire, et, en outre, il permet la réalisation de procédures en aveugle. Le système a été utilisé avec succès dans un autre projet du PNR 57 (Effets génotoxiques des rayonnements non ionisants).

### Expériences d'exposition humaine et études épidémiologiques

Il est admis que les CEM HF peuvent affecter les processus physiologiques du cerveau. Des effets sur les potentiels électriques du cerveau (électroencéphalogramme ; EEG) et sur le flux sanguin cérébral ont été décrits antérieurement. Le projet de *Peter Achermann de l'Université de Zurich* s'est focalisé sur les changements induits par les CEM HF sur l'EEG. Un premier sous-projet a été conçu pour examiner les caractéristiques critiques du signal. Les sujets ont été exposés pendant 30 min à des CEM HF présentant des composantes basse fréquence pulsées à 14 Hz ou à 217 Hz (composante la plus forte du signal GSM). Afin de vérifier si la composante de modulation lente à elle seule suffit à susciter un effet biologique ou si sa combinaison avec les CEM HF est requise, on a appliqué les conditions suivantes dans une seconde étape : CEM HF modulés par impulsions à 2 Hz et champ magnétique pulsé à 2 Hz. Parallèlement à toutes les expériences ont été effectués des essais de contrôle (absence de champ). Après exposition, les sujets allaient dormir et l'EEG était enregistré durant le sommeil. Les champs à modulation pulsée, à 2 Hz et à 14 Hz, ont provoqué une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil (12-15 Hz). Un champ magnétique pulsé à 2 Hz, donc en l'absence des composantes CEM HF, n'a pas induit un tel effet. La qualité du sommeil et les étapes de celui-ci n'ont été affectées dans aucun cas.

Un second sous-projet avait pour objectif de déterminer si le thalamus jouait un rôle dans la répercussion, sur l'EEG en phase de sommeil, des effets exercés par les CEM HF. Avant le sommeil, les sujets étaient exposés soit à un signal GSM (de type téléphone portable) dont la fréquence porteuse était de 900 MHz soit à un signal dont la fréquence porteuse était de 2140 MHz. Ce dernier a été choisi parce qu'il ne pénètre pas en profondeur. Toutefois, dans les deux cas, les changements typiques sont survenus dans l'EEG et ils concernaient de surcroît à chaque fois les deux hémisphères. C'est pourquoi il est peu probable que des structures subcorticales soient les principales cibles des CEM HF.

Le troisième sous-projet a été conçu pour tester l'éventuelle incidence des CEM HF sur les performances cognitives et l'EEG en phase éveillée dans la préadolescence, les téléphones mobiles constituant la source principale de CEM HF auxquels les jeunes sont exposés. Dans le programme de recherche 2006/2010 de l'OMS concernant les CEM, l'étude des effets induits par les CEM sur la cognition et l'EEG des enfants a été classée comme hautement prioritaire. Afin de tester si les composantes spécifiques de l'EEG en phase éveillée sont affectées dans une relation de dose à effet, 23 adolescents (âgés de 11 à 13 ans) ont été exposés à des signaux GSM de type téléphone portable, avec une fréquence porteuse de 900 MHz, à deux intensités différentes. Les résultats sont encore en cours d'analyse.

L'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) est le système de communication de troisième génération (3G) mobile. A ce titre, il constitue une technique de référence jouissant d'une forte expansion. Le projet de *Martin Wolf de l'Hôpital Universitaire de Zurich* a porté sur l'effet d'une exposition intermittente à des CEM HF UMTS, à deux intensités différentes, sur la circulation cérébrale. Les données ont été obtenues par imagerie proche infrarouge (PIR) qui est une méthode sensible, non invasive, pour l'imagerie de la circulation sanguine et la concentration en oxygène dans le cerveau. La technique PIR a été adaptée à la mesure de modifications à court terme (effets se produisant dans les 80 s) et à moyen terme (effets se produisant entre 80 s et 30 min) intervenant dans la circulation et l'oxygénation du sang cérébral en réponse à des expositions intermittentes à des CEM HF de type UMTS. Des effets induits par l'exposition ont été détectés sur la circulation sanguine cérébrale et le rythme cardiaque. Les effets à court terme ont été plus faibles que ceux observés durant une activation fonctionnelle normale du cerveau alors que les effets à moyen terme ont été de l'ordre des fluctuations physiologiques. Les effets à court terme n'ont été observés qu'à faible intensité, ce qui rend improbable l'implication d'effets thermiques.

L'objectif du projet de *Martin Röösli de l'Université de Bâle* était de caractériser la distribution de l'exposition aux CEM HF dans un échantillon de population, de développer et de valider la méthode d'évaluation de l'exposition et d'examiner la relation entre l'exposition aux CEM HF et les symptômes de problèmes de santé par le biais d'une étude de cohorte. Dans la première partie de ces investigations, l'exposition individuelle aux sources typiques de CEM HF a été mesurée au moyen d'exposimètres portables durant une semaine. L'exposition à des émetteurs fixes sur le lieu de résidence a été appréhendée par un modèle spatiogéographique utilisant des paramètres précis provenant de tous les émetteurs fixes de la région considérée. Ces données ont été utilisées pour

prédire les expositions en situation quotidienne subies par 1375 individus prenant part à une étude de référence, l'expérience portant sur des CEM HF de la gamme de fréquences de 88 à 2500 MHz tels qu'ils peuvent exister dans l'environnement. 1122 d'entre eux ont participé à une expérience de suivi effectuée une année plus tard. De surcroît, des données objectives sur l'utilisation des téléphones mobiles ont été recueillies à partir des enregistrements effectués par les opérateurs de téléphonie mobile de tous les appels entrant et sortant durant les six derniers mois. Les mesures ont mis en évidence une exposition moyenne de 0.21 V/m, valeur qui est bien en dessous des valeurs limites en vigueur. L'exposition aux CEM HF environnementaux lointains était principalement due aux téléphones mobiles d'autres personnes (39 %), aux systèmes de téléphonie sans fil (24 %, l'utilisation de son propre téléphone non comprise) et aux stations de base de téléphonie mobile (22 %). L'exposition à des CEM HF environnementaux au niveau de référence n'était pas reliée à des troubles de la santé une année après et, de manière similaire, un accroissement ou une diminution de l'exposition individuelle au cours d'une année n'a pas été accompagné par un changement correspondant dans les perturbations de la santé. Aucune relation entre les enregistrements par un actimètre durant le sommeil et l'exposition aux CEM HF dans la chambre à coucher n'a pu être mise en évidence. En ce qui concerne les sources opérant à proximité immédiate du corps, l'utilisation de téléphones portables et de téléphones sans fil n'a pas montré de relation avec aucun aspect de santé lié à la qualité de la vie. De même, l'étude n'a pas fourni d'indications selon lesquelles les individus se considérant comme hypersensibles aux CEM (hypersensibilité électromagnétique ; HSEM) seraient plus sensibles aux CEM HF que les individus non HSEM.

#### **Biologie cellulaire concernant les effets du RNI**

*Pierre Goloubinoff* de l'Université de Lausanne et *Meike Mevissen* de l'Université de Berne ont tous deux utilisé le nématode *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) comme espèce modèle dans leurs projets. Ce ver rond a une longueur d'environ 1 mm et une longévité de 2 à 3 semaines ; la séquence complète de son génome est inventoriée et chacune des 959 cellules somatiques de son corps transparent est identifiable au microscope. Il est donc facile de détecter des protéines fluorescentes (agrégats compris) s'accumulant dans les tissus des animaux génétiquement modifiés lorsque les bons gènes rapporteurs sont exprimés. Alors que *Pierre Goloubinoff* a détecté des effets biologiques significatifs à la suite de faibles variations de la température ambiante, l'exposition à des régimes continus ou intermittents de CEM HF n'a pas été suivie d'effets détectables. Même après avoir créé un sous-type de *C. elegans* plus sensible, du fait d'un affaiblissement supplémentaire de l'homéostasie protéique, aucune réponse à des CEM HF n'a pu être détectée. Des résultats négatifs ont également été obtenus chez une mousse transgénique. C'est pourquoi les CEM HF ne semblent pas affecter l'homéostasie protéique cellulaire, du moins au regard des paramètres examinés durant les expériences. *Meike Mevissen* quant à elle a focalisé ses expériences sur le facteur de transcription DAF-16, un acteur clé de la voie de transduction du signal de stress. Une fois activé, le DAF-16 subit une translocation dans le noyau cellulaire et active la transcription d'un grand nombre de gènes effecteurs. Ses résultats mettent en évidence que les CEM HF pourraient affecter, dans une souche transgénique de *C. elegans*, la signalisation relayée par le DAF-16. Un deuxième modèle utilisé par *Meike Mevissen* consistait en des cultures de cellules de mammifères (humaines et de rat) pouvant demeurer dans leur état originel (indifférencié) ou adopter certaines caractéristiques des neurones durant leur différenciation lorsqu'elles sont exposées à certaines substances. Pour analyser la réponse au stress, l'évolution des changements survenant dans la régulation des protéines du choc thermique a été examinée. Pour surveiller l'apoptose (mort cellulaire programmée), on a analysé la régulation de deux protéines impliquées dans ce processus. Des changements ont été observés au niveau du noyau de certaines cellules après 16 heures d'exposition aux CEM HF. De plus, certains changements ont été décelés dans l'évolution au cours du temps des protéines de choc thermique, ce qui pourrait indiquer que les CEM HF puissent constituer un authentique facteur de stress et activer des protéines dans la voie apoptotique.

Dans son projet, *Primo Schär* de l'Université de Bâle s'est penché sur la question de savoir si l'exposition aux CEM affecte l'intégrité du matériel génétique et a, par conséquent, la capacité potentielle de provoquer des effets négatifs sur la santé, associés à une instabilité génétique telle que le cancer ou le vieillissement prématuré. Des résultats expérimentaux controversés, issus de certaines études sur la génotoxicité, ont suggéré que l'exposition de certaines cellules humaines à des CEM haute ou basse fréquence provoquait la cassure de brins d'ADN nucléaire. Ces faits ont conduit l'OMS à classer le problème de l'instabilité génétique comme hautement prioritaire dans son programme



de recherche 2006 sur les CEM HF. Des discussions scientifiques ont porté sur la question de savoir si ces effets étaient fondés ou non, et peu d'efforts ont été entrepris pour parvenir à saisir ce qu'ils signifiaient et comment ils avaient à être interprétés. Les résultats étaient fondés sur l'essai comète consistant en une technique sensible de détection des dommages à l'égard de l'ADN au niveau des cellules isolées. Les effets rapportés antérieurement ont pu être reproduits sur des fibroblastes humains primaires exposés à des CM TBF, et en partie également pour des cellules exposées à des CEM HF. Plus particulièrement, il a été détecté que l'exposition intermittente, contrairement à l'exposition continue, de fibroblastes humains primaires à des CM à 50 Hz sinus à 1 mT induit une légère mais significative augmentation des cassures de brins d'ADN identifiable dans l'essai comète. De nouvelles connaissances ont été acquises en ce qui concerne l'origine et la nature de ces interactions. Il a en effet été montré que les petits impacts observés dans l'essai comète proviennent de perturbations mineures de la synthèse d'ADN et du déclenchement occasionnel de l'apoptose cellulaire plutôt que de la production de dommages à l'ADN. Il ressort nettement des résultats d'analyses biochimiques et d'expériences d'imagerie de cellules vivantes, que les effets génotoxiques apparents observés dans l'essai comète à la suite de l'exposition intermittente de fibroblastes humains à des CM TBF sont très probablement dus à une réponse cellulaire secondaire au champ plutôt que par des dommages causés directement ou indirectement à l'ADN par les CM TBF.

#### **Risque: management, stratification et communication**

On sait peu de choses au sujet des effets des expositions à long terme au rayonnement des téléphones mobiles et des stations de base de la téléphonie mobile. Les préoccupations à ce sujet sont de plus en plus largement partagées par la population. La difficulté d'établir des stratégies de communication efficaces réside dans la nature même du risque : le risque lié au RNI n'est en effet pas encore connu, informer la population en général d'une manière appropriée et complète constitue un défi.

Dans le cadre du premier sous-projet, *Peter Schulz de l'Université de la Suisse italienne* a procédé à deux analyses de contenu, l'une portant sur un forum Internet et l'autre sur la couverture des thèmes liés au RNI par les médias suisses. Les analyses ont montré qu'il existait sur le forum un groupe restreint de contributeurs, très prolifiques, alors que l'attention des médias s'est focalisée sur les stations de base, n'accordant ainsi aucune considération au risque potentiel lié aux appareils. Dans un deuxième sous-projet, ont été examinées les réactions de la population à un communiqué de presse portant sur les risques que présentent les stations de base sur la santé. Les résultats indiquent qu'en matière de perception du risque lié au RNI, c'est l'attitude préexistante à l'égard d'effets possibles exercés par le RNI sur la santé qui détermine l'opinion et non la source d'information et la crédibilité de celle-ci. Dans un troisième sous-projet, un sondage a été réalisé dans deux régions linguistiques de Suisse dans le but de tester de quelle manière la recommandation d'une mesure de précaution contre les effets du RNI, exposée dans une brochure d'informations, affecte la perception du risque, et de vérifier si l'effet est fonction de la formulation de la mesure. La comparaison de trois messages différents, un message neutre, un message digne de foi et un message axé sur la responsabilisation, a montré que le dernier d'entre eux a été le plus apprécié même si aucune différence n'a pu être constatée sur le plan des effets produits. Il ressort également de l'étude que les prédispositions affectaient les résultats de la communication. Les personnes qui perçoivent le risque lié au RNI comme élevé tendent à tourner à l'opposé les messages indiquant qu'il y a peu de raison d'être inquiet. Cet effet constitue un sérieux écueil à la planification de la communication.

Dans son projet, *Martin Siegrist de l'École polytechnique fédérale de Zurich* a investigué le rôle de l'affect, un facteur qui pourrait jouer un rôle important dans l'évolution des attitudes et des opinions à l'égard du RNI. L'affect est un important facteur déterminant de la perception et du comportement. Les réponses dues à l'affect sont rapides et automatiques. Le projet de recherche avait pour objectif d'examiner quels étaient les facteurs déterminant les risques et les avantages perçus en relation avec la communication mobile, et d'étudier la question de l'acceptation de cette technologie. Le test intitulé SC-IAT (Single Category Implicit Association Test) mesure les attitudes implicites par le biais des latences des réponses dans les évaluations automatiques.

Les résultats de tests effectués sur différents groupes de participants indiquent que les évaluations affectives de différents risques sont effectuées très rapidement. En outre, il est apparu que les stations de base provoquaient des associations implicites positives dans un groupe d'experts de la communication mobile, des associations neutres dans un groupe de profanes, mais des associations négatives dans un groupe d'opposants aux stations de base. Il a été trouvé en outre que la colère

déterminait fortement la perception des avantages et l'acceptation des stations de base de téléphonie mobile ; la peur quant à elle influençait fortement la perception du risque lié aux stations de base. En comparaison à d'autres caractéristiques, l'emplacement de la station de base est d'une importance capitale pour le citoyen. Les préférences concernant les emplacements des stations de base ont également été reliées à des croyances au sujet de la santé, à la confiance et à des variables démographiques. Finalement, le projet a démontré que les participants mis au bénéfice de connaissances techniques expriment des préférences quant aux emplacements des stations de base, qui vont davantage dans le sens d'une exposition moindre lors de l'utilisation du téléphone. Au total, il a été démontré que l'affect occupe une position centrale dans la perception des risques liés au RNI et qu'il est remarquablement différent selon que l'on est expert, opposant ou profane. L'ensemble des résultats implique que le simple affect sert à une première évaluation, rapide et simple des risques, en particulier de ceux liés à la communication mobile. Cette première évaluation nous montre si le stimulus est bon ou mauvais pour nous ou, en d'autres termes, s'il est significatif pour nous.

### Exécution et limites

Si les CEM affectent la santé, ils influent nécessairement sur des processus biologiques. L'objectif de cinq projets était de chercher à démontrer l'existence de tels effets. Une fois que ces effets ont été clairement démontrés et maintes fois reproduits, la recherche doit se poursuivre par la mise à jour du mécanisme d'action. Trois effets dus aux CEM HF décrits précédemment ont été confirmés et précisés : (1) l'augmentation de puissance de l'EEG en phase de sommeil dans une gamme de fréquences spécifique ; (2) les effets sur la circulation cérébrale et (3) une augmentation de la fragmentation de l'ADN. Deux des projets ont procuré des avancées dans la compréhension du mécanisme d'action.

- **Effets sur le cerveau.** Un des résultats les plus réguliers a été l'augmentation de puissance dans une gamme de fréquences spécifique (12-15 Hz) sur l'EEG en phase de sommeil. Cet effet avait été observé par Peter Achermann et al. au cours de quatre études antérieures ainsi que par un autre groupe de recherche, et a été confirmé par trois autres études réalisées dans le cadre du présent programme. En faisant varier les caractéristiques du champ auquel les sujets étaient exposés, on a montré que la modulation par impulsions était une condition nécessaire. La fréquence porteuse à elle seule ne provoque pas le changement typique observé sur l'EEG dans la gamme 12-15 Hz. De plus, il a été démontré que l'effet se manifeste également avec des champs dont la fréquence porteuse est plus élevée, qui pénètrent moins en profondeur dans le cerveau. Cette observation constitue une étape dans l'identification des structures cérébrales directement sensibles au rayonnement. Les effets des CEM HF sur la circulation sanguine cérébrale rapportés antérieurement ont également été confirmés. Martin Wolf a démontré l'existence d'un tel effet au moyen d'un système inédit d'imagerie non invasive s'appliquant plus facilement dans les études expérimentales que la tomographie par émission de positrons. De plus, il a été montré pour la première fois que les CEM HF UMTS exerçaient eux aussi ces effets. Toutefois, divers aspects participent aux difficultés d'interprétation des résultats et d'investigation future. Ce sont notamment la grande variabilité des effets sur l'EEG en fonction des individus et le délai dans lequel ils se manifestent. Il convient de noter que les effets induits par les CEM se sont concentrés strictement sur l'EEG, les étapes du sommeil et la qualité de celui-ci n'ayant pas été affectés.
- **Effets sur l'ADN.** Une publication antérieure selon laquelle la fragmentation de l'ADN dans les cellules des mammifères augmente après exposition aux CEM HF a suscité des craintes en ce qui concerne les conséquences potentielles d'une altération de l'ADN sur la santé. Primo Schär a confirmé l'effet sur l'ADN de fibroblastes humains. En outre, il a surtout montré que l'augmentation de la fragmentation de l'ADN après exposition à des CM TBF provenait en fait de perturbations mineures de la synthèse de l'ADN et du déclenchement occasionnel de l'apoptose cellulaire. Aucun dommage direct sur l'ADN ni aucun effet indirect dû à une augmentation du taux de dérivés réactifs de l'oxygène n'ont été observés. Le RNI n'induit pas de dommages irréparables à l'ADN comme ceux causés par le rayonnement ionisant. L'étude a non seulement confirmé l'effet en soi, mais elle apporte aussi une première contribution à la compréhension du mécanisme.
- **Systèmes modèles.** Les systèmes modèles peuvent servir à l'illustration des effets des CEM. Les résultats positifs des premières expériences effectuées sur le nématode *C. elegans* ont suscité un enthousiasme initial, tempéré ensuite par les résultats négatifs obtenus. Les études de Meike

Mevissen et Pierre Goloubinoff ont confirmé que ce système modèle, tout en étant extrêmement sensible à diverses influences environnementales, n'est pas prometteur pour des études futures liées aux CEM. Les données de *Mevissen* sur les changements induits par les CEM sur des protéines impliquées dans la réponse au stress et l'apoptose sont encore trop sujettes à caution pour pouvoir être interprétées définitivement.

- **Epidémiologie.** Dans l'étude de Martin Rösli, des données objectives de trafics concernant l'utilisation du téléphone mobile ont été utilisées pour la première fois pour examiner les effets potentiels sur certains symptômes, en particulier les maux de tête. Autres faits marquants, l'étude des effets de l'exposition aux CEM HF sur des cohortes pendant une période d'une année et les mesures d'exposition effectuées sur une semaine au moyen d'un dispositif portable. Ces tests ont permis une quantification du niveau d'exposition et la spécification de la contribution de diverses sources. Le résultat principal a été l'absence de relation entre problèmes de santé et exposition aux CEM HF dans l'environnement en situation quotidienne. En particulier, aucune relation n'a été observée entre le comportement au cours du sommeil et l'exposition dans la chambre à coucher. En outre, l'étude n'a pas fourni d'indications selon lesquelles les individus se considérant comme hypersensibles aux CEM (hypersensibilité électromagnétique ; HSEM) seraient plus sensibles aux CEM HF que les individus non HSEM. Au total, les résultats n'ont pas indiqué que la situation d'exposition aux CEM HF, telle qu'elle existe en Suisse, provoque des problèmes de santé. Cependant, l'étude connaît également ses limites. Par exemple, le niveau moyen d'exposition de la population a été très inférieur à la valeur limite de l'exposition actuellement appliquée en Suisse et le niveau d'exposition était entaché d'incertitudes. C'est la raison pour laquelle aucune conclusion ne peut être tirée en ce qui concerne des effets éventuels à des niveaux d'exposition supérieurs. D'autres limites pourraient provenir d'une éventuelle erreur systématique de sélection, de la taille de l'échantillon et de la durée (un an) de l'évaluation. Néanmoins, il importe de souligner que les résultats n'ont pas indiqué que la situation d'exposition actuelle aux CEM HF provoque des problèmes de santé. Ces considérations confirment la majorité des résultats publiés dans la littérature et renforcent le sentiment de l'innocuité de ces rayonnements.
- **Dosimétrie.** Le mérite du projet Niels Kuster et Sven Kühn réside dans le fait qu'ils ont mesuré précisément l'exposition du cerveau aux CEM HF. Et ceci, tant avec des sources à champ proche qu'avec des sources à champ lointain. Au départ, de nombreux paramètres étaient inconnus et les méthodes dosimétriques correspondantes faisaient défaut. Des fantômes présentant les propriétés électriques du corps humain et du cerveau, et des outils de simulation ont été développés et utilisés pour la mesure des TAS dans diverses régions cérébrales. De grandes variations ont été observées ; elles étaient dues à des différences de procédures expérimentales, de conception du dispositif et de caractéristiques du signal. Les modèles permettent de prédire les TAS induits par diverses sources dans les régions du cerveau. Ils seront précieux pour l'estimation de doses dans les études épidémiologiques et pour l'information du consommateur sur les risques de l'exposition des individus aux CEM HF. Pour mesurer l'exposition du fœtus, Nicolas Chavannes et Andreas Christ ont développé des modèles informatiques anatomiques détaillés de la femme enceinte à différents stades de la grossesse, qui englobaient les caractéristiques électriques des tissus. Les découvertes les plus remarquables ont été que les limites d'exposition dans un cadre professionnel sont trop élevées pour les femmes enceintes et que certaines normes de produits (plaques de cuisson à induction) doivent être révisées puisqu'elles pourraient conduire à des niveaux de TAS trop élevés pour le fœtus. Dans la troisième étude dosimétrique, Andreas Christ et Myles Capstick ont, en concevant et développant un système d'imagerie miniature en temps réel des expositions aux CEM TBF pouvant être intégré dans un système de microscopie, ouvert de nouvelles voies aux études cellulaires.
- **Communication du risque.** L'étude de Martin Siegrist a montré que les réactions affectives étaient cruciales dans la perception du risque. L'affect peut constituer un important raccourci dans la prise de décision. C'est pourquoi la confiance et d'autres éléments reliés à l'affect doivent être pris en considération dans la communication des risques. Il est intéressant de noter que l'acquisition de connaissances a permis de dissiper des idées fausses dans la mesure où elle a conduit à une évaluation plus réaliste de l'emplacement des stations de base, ce qui correspond davantage à des considérations de santé publique.

Il ressort du projet de Peter Schulz que les personnes qui considéraient les risques liés aux CEM comme très bas ont été rassurées encore davantage par un message rassurant alors que celles qui considéraient que les risques étaient élevés étaient encore plus inquiètes. Un message de précaution axé sur la responsabilisation apparaît comme le plus convaincant.

### **Perspectives**

Les thèmes de recherche couverts par le programme correspondent largement aux champs de recherche de haute priorité définis par le programme 2010 de l'OMS pour les champs à haute fréquence. Au vu des résultats, des études de suivi vont être particulièrement importantes en ce qui concerne l'action des CEM sur les fonctions cérébrales et le métabolisme de l'ADN. Ces approches ont montré qu'elles étaient des plus prometteuses en ce qui concerne la compréhension des mécanismes sous-jacents aux effets des CEM sur les systèmes biologiques. Alors que les effets physiologiques et cellulaires ont été démontrés dans les études correspondantes, leur signification quant à la santé n'a pas pu être établie ; elle nécessite des investigations supplémentaires. Il est évident que le PNR 57 a conforté la recherche helvétique en matière de CEM et augmenté les interactions entre les groupes de travail. Il a également augmenté la visibilité internationale de la recherche suisse. Pour profiter des connaissances et du savoir-faire accumulés durant l'exécution du programme, il sera important d'explorer les possibilités permettant de la recherche dans des projets clés. La recherche sur les CEM est une entreprise à long terme qui requiert des cadres organisationnel et financier appropriés. La rapide évolution des technologies constitue un défi qui ne peut être relevé que par une étroite collaboration entre experts en dosimétrie, en sciences de la vie et en épidémiologie. Le PNR 57 en a jeté les bases.

## 2. Introduction et objectifs du PNR 57

### 2.1 Cadre

Les projets de recherche menés dans le cadre d'un Programme national de recherche (PNR) doivent contribuer à résoudre des problèmes actuels importants. En vertu de l'art. 6, al. 2 de la loi du 7 octobre 1983 sur la recherche, le Conseil fédéral sélectionne les thèmes des PNR et confère au Fonds national suisse (FNS, Division IV) l'entière responsabilité de la mise en œuvre de ceux-ci. L'objectif et les contenus de l'instrument qu'est le PNR sont définis à l'art. 4 de l'ordonnance du 10 juin 1985 relative à la loi sur l'encouragement de la recherche et de l'innovation.

En juin 2003, l'Office fédéral de l'éducation et à la recherche (OFES) a demandé au FNS d'évaluer la création d'un PNR consacré aux effets potentiels du rayonnement non ionisant (RNI) sur la santé humaine. Cette initiative était fondée sur un rapport très complet de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) incluant une méta-analyse de plus de 200 publications scientifiques. La Division IV du Conseil de la recherche a examiné cette proposition quant à son caractère approprié et à sa faisabilité, tout en s'appuyant sur une évaluation globale émanant d'un groupe d'experts internationaux. Le résultat positif de l'étude de faisabilité (juin 2004) a initié la procédure formelle que doit suivre toute proposition de programme du FNS au gouvernement suisse. En juin 2004, le Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche (SER) a demandé au FNS d'établir un plan d'exécution pour un programme de recherches interdisciplinaire et transdisciplinaire de quatre ans assorti d'un budget total de CHF 5 millions.

Un comité de direction (CD) a été institué, chargé de rédiger le plan d'exécution. L'objectif principal du plan était d'aborder des questions scientifiques clés concernant les effets potentiels négatifs du RNI émis par une gamme de technologies actuelles et futures. Le programme devait être complémentaire aux activités de recherche internationales en matière de RNI, en se concentrant sur des questions spécifiques définies dans le programme de recherche de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) concernant les champs électromagnétiques (CEM). Un accent particulier a été porté sur la mise en œuvre si bien que le programme s'est préoccupé de manière ciblée des inquiétudes accrues de la population suisse à l'égard des risques sanitaires potentiels encourus du fait de la présence de RNI dans l'environnement.

Les efforts internationaux étant principalement focalisés sur le cancer, le plan d'exécution spécifiait que le PNR porterait sur d'autres effets potentiels nocifs et viserait à élucider les mécanismes à l'origine des effets potentiels des CEM sur les systèmes biologiques. Une meilleure compréhension de la relation de cause à effet entre le RNI et les réponses neurophysiologiques ainsi que les réponses au niveau cellulaire est censée faciliter l'évaluation du risque des technologies actuelles et futures. En conséquence, les thèmes principaux de la recherche ont été définis comme suit :

- \_ Dosimétrie et mesures d'exposition
- \_ Expériences d'exposition humaine et études épidémiologiques incluant le thème de l'hyperélectrosensibilité (HES)
- \_ Biologie cellulaire concernant les effets du RNI
- \_ Risque : management, stratification et communication

En mars 2005, le Conseil fédéral a approuvé le « PNR 57: Rayonnement non ionisant – Environnement et santé » et en novembre de la même année le Département fédéral de l'intérieur a approuvé le plan de mise en œuvre.

L'appel d'offres de projets a été publié en décembre 2005. 36 propositions ont été soumises au CD et évaluées par celui-ci avec le concours d'experts externes. Le CD a recommandé 11 projets, une proposition qui a ensuite été approuvée par le Conseil de la recherche du FNS en novembre 2006. Les projets approuvés ont « reçu leur feu vert » en janvier 2007 pour une durée de trois ans.

## 2.2 Recherches antérieures et justification du programme

Durant les 10 à 15 années précédant le PNR 57, des programmes de recherche internationaux (p.ex. le 5<sup>e</sup> programme cadre) et nationaux (p.ex. en Grande-Bretagne, Finlande, France, Italie, Japon et autres) ainsi que des programmes soutenus par l'industrie (p.ex. MMF, NTTDo-CoMo) ont été consacrés à ceux des thèmes du programme de recherche de l'OMS qui étaient directement rattachés à la problématique du cancer. Seul un petit nombre d'études avaient été consacrées à d'autres fins. De même, peu d'attention a été portée aux expositions autres que celles résultant des systèmes de téléphonie mobile ; en outre, quelques études seulement ont exploré les éventuels mécanismes d'interaction entre les CEM et les réponses biologiques. De nombreux résumés de recherche globaux ont été publiés par les agences nationales et internationales (incluant l'OMS, le U.S. National Institute of Environmental Health Sciences [NIEHS], le National Radiological Protection Board en Grande-Bretagne, l'Office fédéral de l'environnement en Suisse et des rapports des Pays-Bas, de France, du Canada et de Suède). Les conclusions de ces rapports ont débouché, généralement, sur le fait que de nombreuses questions concernant les effets possibles du RNI sur la santé humaine restaient ouvertes. A côté de la relation entre incidence croissante de la leucémie infantile et exposition à un champ magnétique à très basse fréquence (CM TBF), et de celle entre névrome acoustique et exposition aux hautes fréquences (HF), une série d'effets subtils ont été décrits chez l'animal, l'être humain et les cultures cellulaires. Il ressort des résultats de ces études que de tels effets pourraient dépendre de l'intermittence de l'exposition, des fréquences présentes dans le spectre de puissance et d'autres caractéristiques du signal, autant d'aspects divers augmentant les incertitudes quant à l'évaluation des risques sanitaires.

De nombreux organismes de recherche publics et privés, internationaux et nationaux, ont sollicité des projets visant à l'évaluation des éventuels effets du RNI sur la santé à des intensités inférieures aux niveaux recommandés par les directives de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (CIPRNI). La recherche internationale a été centrée sur les thèmes suivants :

- **Dosimétrie:** des progrès significatifs ont été réalisés durant la dernière décennie en dosimétrie. Des méthodologies, des appareillages et des procédures ont été développés aux fins d'analyses dosimétriques précises à la fois pour les études expérimentales et épidémiologiques, et pour l'évaluation des expositions consécutives aux technologies actuelles. Très peu d'études cependant ont pris en compte les nouvelles et futures technologies.
- **Etudes portant sur l'exposition humaine en environnement contrôlé:** des études de laboratoire portant sur les effets non cancérigènes chez l'être humain ont été très nombreuses et concernaient les effets du RNI sur l'activité cérébrale électrique (généralement mesurée par électroencéphalographie [EEG]), la physiologie du sommeil, les performances cognitives, la variabilité de la fréquence cardiaque, l'humeur, les taux hormonaux et la fonction immunitaire. Les résultats ont fourni peu de preuves quant à une relation entre RNI et fluctuation de la fréquence cardiaque, perturbations de l'humeur, fonctionnement du système immunitaire mesuré par diverses variables immunologiques (chimie sanguine, numération des leucocytes, lymphocytes, etc.) ou des modifications des taux hormonaux. Cependant, divers effets ont été observés dans les études consacrées à des paramètres de la physiologie du sommeil et à des performances cognitives. Ils incluaient des altérations de l'EEG induites par des HF de la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil lent (mouvement oculaires lents ; non MOR, non REM en anglais) ainsi que des fluctuations subtiles dans les performances cognitives évaluées par des tests de rapidité de réaction et de précision de la performance. Il ressort de ces observations que les fonctions cérébrales pourraient être influencées par les CEM. Du fait de la difficulté à concevoir des expériences appropriées, seul un petit nombre d'études a été consacré à l'hypersensibilité électromagnétique (électrohypersensibilité).
- **Epidémiologie:** des moyens financiers considérables ont été consacrés à des études multinationales à grande échelle (p. ex. Interphone Study) ciblant la relation entre exposition aux CEM émis par les téléphones et développement de cancers du cerveau ou d'autres formes de cancers. Les expositions dues aux lignes à haute tension et autres sources de TBF ont été classées comme « Peut-être cancérigènes » (catégorie 2B) tant par le Centre international de recherche sur le cancer CIRC que par le NIEHS. Concernant les effets sur la santé autres que le cancer, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a conclu, sur la base d'un certain nombre d'études ayant porté sur les effets possibles des CEM sur le bien-être (en considérant



des symptômes comme les maux de tête, le vertige, la fatigue, les insomnies ou le tinnitus), que, sur la base des données disponibles, aucun verdict concluant ne pouvait être rendu quant aux risques sur la santé humaine. Au regard des expositions TBF, le NIEHS a conclu quant à lui que les preuves sont minces, s'il en existe, allant dans le sens d'une relation entre expositions TBF et apparition d'affections neurodégénératives et de perturbations du comportement d'un point de vue neurologique, comme aussi de maladies cardio-vasculaires ou de gestation.

- **Etudes *in vitro*:** les études au niveau cellulaire sont essentielles pour déterminer les mécanismes des éventuels effets nuisibles. Quelques études ont examiné les effets du RNI sur la membrane cellulaire, l'expression des gènes et les voies de transduction du signal. Diverses études ont porté également sur la prolifération cellulaire *in vitro* et la régulation du cycle cellulaire, et ont mis en évidence des modifications ainsi que des effets génotoxiques et cytotoxiques potentiels. De plus, l'homéostasie du calcium et l'expression des protéines de stress (choc thermique) dans les cellules de mammifères ont été suivies sous exposition.
- **Etudes animales:** un certain nombre d'études animales à grande échelle portant sur la cancérogénicité ont été réalisées dans un cadre international. Les conclusions ont souligné l'absence de relations causales entre CEM et toute malignité particulière. Des études à petite échelle se sont concentrées sur des questions concernant l'être humain telles que le comportement, les effets sur l'oreille interne et la cochlée, la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique ainsi que les maladies neurodégénératives, mais aucune preuve concernant une relation n'a pu être rapportée. De manière similaire, aucune preuve concernant des effets dus au RNI n'a été trouvée en ce qui concerne les paramètres hématologiques, le système immunitaire, le développement et la reproduction.
- **Management du risque et communication:** plusieurs programmes de recherche ont comporté des projets sur la gestion du risque et la communication. Les études à ce sujet ont porté sur l'évaluation de l'impact des stratégies de communication du risque, la perception individuelle du risque, les systèmes de croyance (cartes cognitives) des personnes disant souffrir d'hypersensibilité électromagnétique ainsi que sur l'interprétation et l'évaluation de l'impact des mesures de précaution.

### 2.3 Objectifs

En dépit de nombreuses études menées dans un grand nombre de domaines de recherche, l'image que l'on doit se faire des effets éventuels de faibles doses de RNI sur la santé humaine demeure obscure. Du fait de cette incertitude persistante et compte tenu du fait que même des effets sanitaires discrets pourraient avoir des implications considérables sur la santé publique, certains services fédéraux ont demandé des recherches complémentaires dans ce domaine, recherches visant à combler les lacunes de connaissances en la matière. Un intérêt spécifique du PNR 57 a été la recherche portant sur les mécanismes de base sous-tendant les effets CEM sur les systèmes biologiques ; en effet, aucune initiative internationale n'avait été prise en ce domaine, tant sur les plans des études *in vitro* que de la physiologie cellulaire. Au vu de l'importance de telles études et de leur capacité potentielle à permettre l'identification des caractéristiques critiques des CEM, cette approche a été sélectionnée en tant que l'un des thèmes majeurs du PNR 57. Par ailleurs, l'optimisation des dispositifs d'exposition et une information dosimétrique complète étant des conditions préalables à toute étude CEM solide, la dosimétrie a été classée comme prioritaire. Un autre point clé du PNR 57 a concerné l'inquiétude croissante au sein de larges pans de la population suisse vis-à-vis du RNI, la gestion du risque RNI ainsi que la question des paramètres influençant la sensibilité et la perception de la population.

La recherche concernant l'exposition dans un cadre professionnel et les expositions dues à des traitements et des diagnostics médicaux ont été exclues du programme. En raison des coûts élevés et des nombreux efforts de recherches internationaux, ni les études animales à grande échelle ni les études de cohortes épidémiologiques et les études cas-témoins relatives au cancer n'ont été admises dans le cadre du PNR 57.

Le but premier du PNR 57 a été de s'efforcer d'aborder de manière coordonnée et globale certaines des lacunes de connaissances existant au sujet des effets du RNI à petites doses sur la santé humaine. Les résultats étaient supposés fournir des données sur la question de savoir si et comment les expositions aux CEM provoquent des modifications dans les systèmes biologiques ainsi que des

effets négatifs sur la santé. Aussi bien les autorités sanitaires que l'industrie ont besoin de davantage de données pour évaluer les risques potentiels des CEM sur la santé et le bien-être. Les évaluations et les recommandations fondées sur des preuves scientifiques accroîtraient la confiance du public envers un usage approprié de la technologie de communication actuelle. La promotion de la collaboration de la recherche au niveau international était un autre objectif, ce qui supposait des projets d'un haut niveau scientifique.

A plus long terme, une meilleure compréhension d'une part des paramètres d'exposition provoquant des réponses biologiques et d'autre part des mécanismes d'interaction correspondants favoriserait une évaluation globale des risques incluant l'évaluation du RNI provenant des nouvelles technologies. En outre, il a été admis que les projets de recherche du PNR 57 pourraient rendre la recherche suisse plus compétitive et de la sorte favoriser la participation d'équipes suisses à de grands programmes internationaux.

#### **2.4 Projets sélectionnés et budget**

Conformément aux procédures usuelles en matière de PNR, le CD du PNR 57 (cf. annexe 10.3) a adopté une procédure de soumission à deux phases pour les projets de recherche. Les projets ont été sélectionnés selon les critères décrits dans l'appel d'offres (annexe XY). L'assurance de la qualité a été conduite tout au long du programme comme spécifié dans le manuel du programme (cf. annexe 10.2.2.).

Le CD a évalué tous les projets avec le soutien d'experts internationaux en fonction des critères suivants :

- \_ Qualité scientifique et originalité : les esquisses de projet et les requêtes de recherche correspondent à un niveau international de pointe en ce qui concerne l'originalité scientifique et les normes méthodologiques.
- \_ Faisabilité et conformité aux objectifs du PNR 57 : les projets reflètent les objectifs scientifiques du programme et s'accorder au cadre global de celui-ci.
- \_ Applicabilité : les PNR sont explicitement supposés promouvoir les applications pratiques ; en conséquence, la priorité sera accordée aux projets orientés vers la valorisation et ayant une importante signification pratique.
- \_ Personnel et infrastructure : les projets sont effectués dans un environnement présentant une infrastructure et un personnel adéquats.

11 projets ont été sélectionnés et groupés en quatre modules :



**Module 1: Dosimétrie et mesures d'exposition**

Détermination de l'effet sur le fœtus des champs électromagnétiques en environnement non contrôlé <i>Dr Nicolas Chavannes, IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society, Zurich</i>	CHF 211'675.-
Exposition cumulative du système nerveux central dans une plage de temps et de fréquence <i>Prof. Dr Niels Kuster / Dr. Sven Kühn, IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society, Zurich</i>	CHF 296'909.-
Observations microscopiques de cellules pendant l'exposition aux champs électromagnétiques <i>Dr Andreas Christ, IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society, Zurich</i>	CHF 241'285.-

**Module 2: Etudes en laboratoire et épidémiologie**

Effets sur le cerveau humain des champs électromagnétiques à modulation pulsée de téléphonie mobile: paramètres clés, lieu de l'interaction et sensibilité au début de l'adolescence <i>Prof. Dr Peter Achermann, Institut de pharmacologie et de toxicologie, Université de Zurich</i>	CHF 563'828.-
Étude de cohorte prospective sur l'influence des champs électromagnétiques haute fréquence sur la qualité de vie associée à la santé <i>Prof. Dr Martin Röösli, Institut Tropical et, de Santé Publique Suisse, Université de Bâle</i>	CHF 553'255.-
Observation des effets des champs UMTS sur la circulation sanguine cérébrale par imagerie proche infrarouge <i>Dr Martin Peter Wolf, PD, Clinique de néonatalogie, Hôpital Universitaire de Zurich</i>	CHF 303'394.-

### Module 3: Biologie cellulaire

Effets des rayonnements non ionisants chez l'organisme modèle <i>Caenorhabditis elegans</i> <i>Prof. Dr Pierre Goloubinoff, Département de biologie moléculaire végétale, Université de Lausanne</i>	CHF 310'802.-
Effets des champs électromagnétiques in vitro et in vivo: interactions avec des facteurs de réponse au stress <i>Prof. Dr Meike Mevissen, Unité de Pharmacologie et de Toxicologie Vétérinaire, Faculté Vetsuisse Berne, Université de Berne</i>	CHF 480'554.-
Effets génotoxiques des rayonnements non ionisants <i>Prof. Dr Primo Schär, Institut de biochimie et de génétique, Département des sciences de biologie clinique, Université de Bâle</i>	CHF 695'850.-

### Module 4: Perception du risque

Structures et effets de la communication sociale sur les rayonnements non ionisants <i>Prof. Dr Peter J. Schulz, Health Care Communication Laboratory, Facoltà di Scienze della Comunicazione, Università della Svizzera Italiana</i>	CHF 166'750.-
Affect et perception des rayonnements non ionisants: conséquences pour la communication des risques <i>Prof. Dr Michael Siegrist, Consumer Behavior, Institute for Environmental Decisions (IED), EPF Zurich</i>	CHF 173'078.-

### Répartition du budget du programme en CHF

Module 1: Dosimétrie et mesures d'exposition	749'869.-
Module 2: Etudes en laboratoire et épidémiologie	1'420'477.-
Module 3: Biologie cellulaire	1'487'206.-
Module 4: Perception du risque	339'828.-
Valorisation et administration	1'002'620.-
<b>TOTAL</b>	<b>5'000'000.-</b>

### 2.5 Valorisation, communication et publications

Le débat public sur les risques et les avantages de la communication mobile ainsi que sur les inquiétudes au sujet de l'« électrosmog » soulève une controverse. C'est pourquoi la mise en œuvre a été centrée sur:

- \_ le transfert des connaissances des projets de recherche vers la pratique ;
- \_ la gestion des problèmes ;
- \_ la communication au sujet du processus de recherche et des résultats des projets ainsi que du programme global à différents groupes d'intérêts.

La communication visait à

- \_ informer les différents groupes d'intérêts sur le cadre et le déroulement du PNR 57 de manière opportune et transparente ;
- \_ donner une image réaliste des résultats attendus ;
- \_ présenter les projets de recherche dans le contexte de la recherche internationale ;
- \_ soutenir les équipes de recherche par la communication de leurs résultats à des groupes cibles hors de la communauté scientifique.

Pour atteindre ces objectifs, la mise en œuvre du PNR 57 visait plusieurs cibles :

**(1) La politique et les services fédéraux et cantonaux**

- \_ Parlementaires fédéraux
- \_ Partis politiques fédéraux
- \_ Conseil fédéral
- \_ Offices fédéraux (OFEV, OFSP, OFCOM, OFEN, METAS, ESTI, COMCOM)
- \_ Gouvernements cantonaux
- \_ Services cantonaux
- \_ Conseils communaux et régionaux

**(2) Economie et industrie**

- \_ Industrie des télécommunications en Suisse
- \_ Industrie de l'énergie
- \_ Organisations industrielles

**(3) Organisations non gouvernementales**

- \_ Associations des consommateurs
- \_ Organisations environnementales nationales
- \_ Organisations fédérales, cantonales et régionales concernées par la communication mobile
- \_ Organisations nationales liées à la santé

**(4) Grand public**

- \_ Médias nationaux
- \_ Journalistes scientifiques

Afin de fournir des informations générales, des sites Internet ont été développés, en allemand [www.nfp57.ch](http://www.nfp57.ch), français [www.pnr57.ch](http://www.pnr57.ch) et anglais [www.nrp57.ch](http://www.nrp57.ch), et lancés dès le début de la phase de recherche. En parallèle, une brochure générale a été éditée et distribuée aux groupes cibles mentionnés. A l'occasion du lancement du programme, le FNS a diffusé un communiqué de presse à l'échelle nationale.

Pour informer le public intéressé et discuter les questions spécifiques, le FNS a organisé deux rencontres à l'intention des hommes et des femmes politiques et des services fédéraux ainsi qu'à l'intention de l'industrie, des ONG et des médias. Durant le programme de recherche, le public intéressé a également été informé régulièrement de l'avancement du programme via le site Internet

et une newsletter électronique. Des publications choisies, issues des projets de recherche, étaient accompagnées par des communiqués de presse. En décembre 2010, une table ronde a été organisée à l'intention des parties prenantes à Berne dans le but de discuter des perspectives d'avenir.

Pour diffuser les résultats du PNR 57, un résumé à l'intention du profane sera présenté pour chaque projet de recherche sur le site Internet et une brochure des résultats et de l'appréciation par le CD sera largement distribuée aux groupes cibles. En outre, les résultats globaux ainsi que certains projets du PNR 57 seront présentés au cours d'une conférence de presse nationale que le FNS organisera le moment venu. Une séance ouverte au public sera organisée à Berne afin de discuter les résultats avec des groupes cibles spécifiques.

### 3. Synthèse des résultats

Ce chapitre est fondé sur les rapports des chefs de projet. De nombreux résultats n'ont pas encore été publiés dans les revues scientifiques à comité de lecture. Elaborées par le comité de direction, les évaluations des résultats et leurs implications figurent aux chapitres 4 à 6.

#### 3.1 Module 1 : Dosimétrie et mesures d'exposition

##### Détermination de l'effet sur le fœtus des champs électromagnétiques en environnement non contrôlé

PI : Dr Nicolas Chavannes/Dr Andreas Christ, IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society, Zurich

Le projet concernait la quantification des champs électromagnétiques et leur absorption spécifique par les tissus de la femme enceinte et de l'enfant à naître à différents stades de la grossesse, dans des conditions d'exposition quotidiennes. De telles mesures d'exposition sont essentielles dans l'optique du respect des valeurs limites d'exposition, car, jusqu'à présent, la grossesse n'a pas été prise en considération de manière particulière en ce qui concerne les valeurs limites. De plus, il n'existe que des données limitées concernant l'exposition du fœtus à des champs proches.

L'absorption a été simulée au moyen de modèles mathématiques et de techniques numériques. A cet effet, des modèles anatomiques informatiques, très précis, de la femme enceinte à trois stades de la grossesse (3<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> mois) ont été développés. Comparés aux modèles existants utilisés dans d'autres études, les modèles conçus dans le cadre du présent projet peuvent être considérés comme les plus précis et les plus détaillés. Les données nécessaires à l'élaboration de modèles anatomiques de la femme enceinte proviennent généralement de différentes sources, les contraintes éthiques interdisant en général la scannographie du corps entier. Jusqu'à présent, une douzaine de modèles de la femme enceinte a été décrite dans les études dosimétriques récentes. Cependant, les modèles développés dans le cadre du PNR 57 leur sont supérieurs sur différents points. Par exemple, les modèles consistent en environ 80 types de tissus différents chez la mère et jusqu'à 17 chez le fœtus (p. ex. os, tissu sous-cutané, etc.). Les caractéristiques électriques de ces tissus figurent dans une base de données appropriée ou dans la littérature scientifique récente. Cela permet une représentation plus réaliste du champ et de la distribution du courant dans les simulations.

Les modèles ont ensuite été exposés à des champs électromagnétiques représentatifs des situations quotidiennes. Les champs correspondaient à des expositions provenant de sources situées à grande distance, telles que les dispositifs de surveillance électronique opérant dans diverses gammes de fréquences, les plans de cuisson à induction ainsi que les dispositifs sans fil opérant dans l'environnement immédiat de l'abdomen. L'objectif était de caractériser l'exposition de la mère et du fœtus par un grand nombre de simulations numériques dans différentes situations d'exposition et en évaluant les courants induits ainsi que les rayonnements spécifiquement absorbés, de même que les élévations de température.

Aux fréquences supérieures à 100 kHz, les valeurs limites de base des normes de sécurité sont définies en termes de taux d'absorption spécifique (TAS). Le TAS constitue une mesure de la puissance de rayonnement absorbée par les tissus du corps humain ; il est donc relié à l'élévation de température de ceux-ci. Les valeurs limites locales, le pic spatial du TAS (spSAR en anglais) et le TAS corps entier (wbSAR en anglais) sont définis pour ces fréquences. Aux fréquences inférieures à 10 MHz, les courants induits dans les tissus du corps peuvent stimuler les nerfs et les valeurs limites d'exposition sont définies, en dessous de ce seuil, en termes de densité de courant moyenne à travers une petite section de tissu. Ces quantités ne pouvant pas être facilement mesurées dans des conditions d'exposition réelles, les directives concernant l'exposition aux CEM définissent des niveaux de référence ou des limites qui sont les valeurs du champ incident sans la présence d'une personne exposée. Ces niveaux de référence ont été tirés de l'utilisation de modèles mathématiques d'un corps humain moyen, en visant une évaluation prudente : si les niveaux de référence sont respectés, les valeurs limites de base devraient elles aussi être respectées partout. S'il en était autrement, la vérification du respect des valeurs limites nécessiterait la réalisation de mesures particulières.

Lorsque les niveaux de référence définis pour le grand public sont respectés à proximité du fœtus, les valeurs limites de base sont respectées dans tous les cas, tel est le résultat le plus important de

ce projet. Toutefois, en raison de la faible marge de sécurité, les données actuelles ne permettent pas de généralisation et il est nécessaire de poursuivre la recherche afin de mieux cerner les limites d'incertitude. Au contraire, lorsque la mère est exposée dans des conditions correspondant aux conditions limites définies pour les expositions dans un cadre professionnel, qui sont plus élevées que les niveaux de référence définis pour la population générale, le fœtus peut subir des expositions dépassant les valeurs limites de base définies pour la population en général. C'est pourquoi, lorsque les limites de sécurité pour le fœtus sont équivalentes à celles définies pour le grand public, les femmes enceintes devraient éviter d'être exposées à des niveaux supérieurs à ceux définis pour celui-ci. Aussi, le cas des femmes enceintes doit-il être pris en compte de façon particulière dans les normes de produits et certaines de ces normes doivent même être révisées puisque des expositions dépassant plus de dix fois les limites de sécurité pourraient survenir.

Un grand nombre d'études ont évalué l'exposition de la mère et du fœtus sous l'angle d'une exposition du corps entier à un champ lointain. Ces publications arrivent généralement à la conclusion que l'enfant à naître est suffisamment protégé par la mère et que, par conséquent, les valeurs limites de base sont respectées lorsque les niveaux de référence définis pour la population générale sont respectés. Malgré les grandes différences entre les modèles utilisés dans ces études, leurs résultats concordent au niveau de l'ordre de grandeur, et s'accordent bien, ou du moins de manière satisfaisante, avec les résultats de la présente étude. Peu de travaux ont été publiés jusqu'à présent sur les expositions à des champs proches, mais généralement les résultats concordent bien avec les résultats du présent projet. Une comparaison directe est cependant difficile à établir en raison des différences dans les anatomies considérées et du fait des différences de distance entre le tissu cible et les dispositifs émetteurs.

#### **Exposition cumulative du système nerveux central dans une plage de temps et de fréquence**

*PI : Prof. Dr Niels Kuster/Dr Sven Kühn, IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society, Zurich*

L'exposition de la population aux champs électromagnétiques du spectre des hautes fréquences (HF) a considérablement augmenté durant ces vingt dernières années. Cela est particulièrement vrai pour le maximum CEM HF induit dans le cerveau humain, qui a été classé en tant qu'organe primordial potentiellement sensible à de tels champs et susceptible de subir des dommages, particulièrement durant sa phase de développement. Toutefois, on ne sait que peu de choses au sujet des intensités réelles des champs électromagnétiques induites par des sources HF dans le cerveau humain et dans ses sous-régions fonctionnelles.

L'objectif du présent projet était donc d'établir une base permettant de déterminer l'exposition cumulée du système nerveux central (SNC) aux CEM HF provenant des sources proches et lointaines, les plus importantes de notre environnement social. Il est en effet primordial de bien cerner l'exposition du SNC à ces champs si l'on veut créer une matrice d'exposition significative pour les études épidémiologiques et améliorer la planification de l'exposition pour les futurs projets de recherche portant sur les effets négatifs pouvant atteindre le SNC. Il est également nécessaire de prendre en considération de manière appropriée les preuves expérimentales concernant les effets SCN et de fournir aux services fédéraux les bases leur permettant d'évaluer les expositions et aussi, si nécessaire, d'élaborer des recommandations adéquates aux fins de réduction de l'exposition de la population. En outre, une information précise au sujet de l'exposition du SNC pourrait contribuer à détecter les lacunes éventuelles présentes dans les normes de produits actuelles en ce qui concerne le respect des limites CEM.

L'étude couvre la gamme de fréquences de 30 MHz à 6 GHz, par conséquent les dispositifs et les sources actuelles et futures comprenant les téléphones mobiles, les stations de base, les téléphones sans fil, les dispositifs de surveillance, les dispositifs de réseaux sans fil et les kits mains libres. En outre, d'autres facteurs influençant l'exposition, tels que la technologie de communication, le comportement de l'utilisateur et l'environnement, ont également été pris en compte pour une évaluation réaliste de l'exposition aux CEM HF dans le temps. La population générale n'étant pas uniformément exposée aux CEM HF, l'étude fait la distinction entre différents types d'utilisateurs, par exemple ceux qui n'utilisent pas les téléphones mobiles et ceux qui en font grand usage.

Les dispositifs ont été classés en deux catégories : les sources à champ proche opérant directement à la tête de l'utilisateur, p.ex. les téléphones mobiles, et les sources lointaines opérant à des distances

plus grandes du corps. Comme il n'est pas possible de mesurer directement les CEM induits dans la tête et dans le corps, les champs électriques incidents dus à des sources lointaines ont été mesurés dans un espace libre.

Concernant les sources proches, les champs induits ou les taux d'absorption spécifique (TAS) ont été mesurés sur des fantômes présentant les propriétés électriques du corps humain. Le champ E et le TAS induits dans le fantôme homogène ont été mis en relation avec le TAS dans les divers tissus et régions cérébrales des modèles anatomiques humains au moyen de facteurs d'estimation ayant été obtenus grâce à des outils de simulation. A l'origine, ces modèles anatomiques, concernant enfants et adultes des deux genres, dérivait d'images de résonance magnétique de volontaires en bonne santé. La variabilité du TAS résulte des différences d'anatomie humaine entre les différents modèles. Un instrument de détermination du TAS dans les sous-régions cérébrales fonctionnelles, dont les fonctions n'ont pas un siège anatomique précis, a été développé.

L'exposition aux CEM HF des différents tissus du corps humain et de diverses régions du cerveau a été étudiée grâce aux outils développés. Le modèle a été utilisé pour comparer l'exposition due à différentes sources, plus particulièrement dans les régions sensibles du cerveau. Cela a été obtenu en adaptant le modèle en fonction du type de source CEM et pour des TAS induits spécifiques de la région étudiée. Ces modèles transformés ont ensuite été utilisés pour montrer comment différentes sources contribuent à l'exposition totale et à l'influence de facteurs tels que la durée et la modalité d'utilisation/exposition.

De grandes différences apparaissent entre les divers types de sources. Le téléphone portable constitue la source de CEM exposant le cerveau le plus fortement. Dans ce cas, l'exposition dépend de la manière d'utiliser le téléphone et du type de téléphone, comme p. ex. la conception de celui-ci, l'utilisation de kits mains libres (leur utilisation réduit l'exposition d'un facteur >10), le choix d'un téléphone UMTS ou seulement GSM (l'UMTS réduit l'exposition moyenne d'un facteur >100), etc. Les différences d'exposition entre UMTS et GSM résultent d'un contrôle de puissance très efficace implémenté sur l'UMTS, maintenant la puissance de sortie à un niveau minimal. Comparés à un téléphone UMTS, les téléphones sans fil utilisés dans les habitations pourraient causer des expositions plus importantes du cerveau.

L'étude a également montré de grandes variations en ce qui concerne l'exposition de différentes régions du cerveau entre différents types de téléphones mobiles, variations pouvant aller au-delà d'un facteur 1000. Pour diffuser ces connaissances dans la population et les services de santé, les résultats de la recherche ont été implémentés sur le système de mesure des TAS, le plus largement répandu. Chaque téléphone peut à présent être caractérisé en ce qui concerne l'exposition d'une région spécifique du cerveau, ce que ne permettent pas les valeurs de TAS actuellement publiées.

Les sources lointaines ou quasi lointaines engendrent des expositions bien moindres du cerveau. En moyenne, les niveaux de TAS induits par des stations de base situées à l'intérieur, par exemple celles des téléphones sans fil ou les points d'accès de réseaux sans fil, sont du même ordre de grandeur que les niveaux de TAS dus aux stations de base de téléphonie mobile situées à l'extérieur.

Avant le lancement du présent projet du PNR 57, un grand nombre de paramètres et de méthodes nécessaires pour effectuer de telles mesures dosimétriques faisaient défaut. Une des acquisitions majeures de ce projet a été d'établir une relation dosimétrique entre différentes sources électromagnétiques de haute fréquence. Le travail effectué a également permis de faire avancer l'état des connaissances en créant les fondements pour l'évaluation des changements concernant l'exposition à des téléphones mobiles usuels dans des réseaux réels des zones rurales et urbaines. L'évaluation du contrôle de puissance des réseaux réels est particulièrement importante puisque l'évaluation statistique des données relatives aux tests de conformité des téléphones mobiles a révélé que le système de communication constitue le facteur prédictif de l'exposition le plus important.

En outre, une méthode inédite de détermination du TAS des tissus et des régions spécifiques du cerveau à partir des champs incidents a été développée. Ce modèle sera utile pour estimer le TAS induit par des sources lointaines et quasi lointaines, ce qui est particulièrement important pour les estimations de doses dans les études épidémiologiques, la population générale étant presque constamment exposée à de faibles niveaux de CEM, du fait du nombre croissant des réseaux de téléphonie mobile et des dispositifs sans fil.



## Observations microscopiques de cellules pendant l'exposition aux CM TBF

PI : Dr Andreas Christ/Dr Miles Capstick, IT'IS Foundation for Research on Information Technologies in Society, Zurich

L'étude des effets biologiques dus à l'exposition de cultures cellulaires à des champs magnétiques de très basse fréquence (TBF) nécessite l'établissement de conditions d'exposition bien caractérisées et uniformes afin d'assurer la stabilité des conditions expérimentales. La démarche la plus courante consiste à exposer les cellules à des conditions de champ particulières durant des périodes de temps définies. Une très grande variété de conditions d'exposition in vitro a été utilisée par le passé. Généralement la réponse des cellules a été analysée après exposition, sur la base de paramètres cellulaires spécifiques. De telles expériences ont donné des résultats allant de l'absence d'effets à des nombres de cassures accrus de brins d'ADN. Cette approche peut être concluante en ce qui concerne le changement global induit durant l'exposition aux CM. Toutefois, le mécanisme exact des interactions provoquant les effets observés est resté inconnu, les réponses transitoires des cellules n'ayant pas pu être observées durant l'exposition elle-même. Ainsi, aucune information spécifique concernant les réponses cellulaires aux stimuli exercés par les CM ou concernant les processus impliqués dans les changements observés n'a pu être recueillie. En outre, un système expérimental permettant uniquement d'exposer des cultures cellulaires à des CM est inapproprié pour conclure sur des expériences biologiques dans lesquelles les résultats attendus sont extrêmement subtils et les différences entre cellules exposées et cellules non exposées sont très minimes. Un système de contrôle informatisé est nécessaire pour la mise en place, la surveillance et l'enregistrement du niveau d'exposition, et d'autres paramètres significatifs durant toute l'expérience. L'objectif du projet était de développer un instrument qui permettrait d'observer directement les réponses cellulaires aux expositions à des CM. Un tel système permettrait d'analyser le mécanisme générant des effets comme les cassures de brins d'ADN. L'instrument constituerait un outil extrêmement efficace pour l'étude des mécanismes d'interaction non thermique éventuels ; il permettrait en outre la réalisation de différentes micromanipulations concomitantes sans interférer avec le système de microscopie. Plus spécifiquement, l'objectif était de développer un dispositif d'exposition TBF miniature pouvant être intégré dans un système de microscopie, permettant de pratiquer l'imagerie de cellules vivantes et d'autres techniques microscopiques de pointe comme la scannographie confocale et la microscopie fluorescente durant l'exposition TBF. De surcroît, des outils numériques et expérimentaux incluant la scannographie à champ proche et des sondes thermiques rapides étaient nécessaires pour surveiller de façon précise les conditions d'exposition durant l'expérience. Ces exigences sont essentielles pour obtenir les informations nécessaires à la vérification de résultats expérimentaux obtenus par d'autres groupes de recherche.

Le système d'exposition TBF miniature final permet une approche directe des réponses cellulaires aux CEM, allant donc au-delà de l'analyse post-expérimentale classique. Il permet une analyse flexible du signal, le suivi des procédures d'exposition intermittentes ainsi que toute une série de micromanipulations durant l'observation des cellules vivantes. Le système est facile à manipuler en raison d'un contrôle informatique automatisé ; il livre une information continue sur l'intensité du champ et la température cellulaire, et, en outre, il permet la réalisation de procédures en aveugle. Les courants circulant dans la bobine et les températures des chambres d'exposition sont sous contrôle en permanence. Les différences de température entre cellules exposées et non exposées sont maintenues en dessous de 0.1°C avec des variations temporelles inférieures à  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  jusqu'à 3mT rms.

Le système expérimental final a été utilisé avec succès dans un autre projet du PNR 57 (*Effets génotoxiques des rayonnements non ionisants, du Prof. Primo Schär*). L'appareillage a été optimisé pour les expositions à des champs magnétiques uniformes et pour des différences minimales entre champs non magnétiques en ce qui concerne l'exposition et la non-exposition.

### 3.2 Module 2 : Etudes en laboratoire et épidémiologie

#### Effets sur le cerveau humain des champs électromagnétiques à modulation pulsée de téléphonie mobile: paramètres clés, lieu de l'interaction et sensibilité au début de l'adolescence

PI : Prof. Dr Peter Achermann, Institut de pharmacologie et toxicologie, Université de Zurich

Il est de plus en plus admis que les CEM HF tels qu'ils sont émis par les téléphones mobiles peuvent affecter les processus physiologiques du cerveau. Les effets sur les fonctions cérébrales sont



généralement étudiés en examinant les changements induits par les CEM HF dans l'EEG ou les altérations des performances cognitives telles que l'attention ou la mémoire. En outre, quelques études par imagerie ont cherché à mettre en évidence les éventuelles fluctuations du flux sanguin cérébral local.

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont porté sur les effets à court terme induits par une exposition aux CEM HF sur la physiologie cérébrale humaine. A ce jour, les effets les plus systématiques consistent en modifications de l'activité cérébrale électrique en phase éveillée et en phase de sommeil. La puissance spectrale de l'EEG dans la bande dite alpha (8-12 Hz) et dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil (12-15 Hz) sont en effet les deux variables affectées le plus systématiquement, respectivement en phase éveillée et en phase de sommeil lent (non-MOR, non-REM en anglais). De plus, il semble que la modulation par impulsions du champ soit essentielle pour induire un effet. Comparés aux effets sur l'EEG, les effets sur les performances cognitives ne sont pas cohérents. Alors que d'anciennes études avaient mis en évidence une augmentation de la performance due à une baisse des temps de réaction ou des scores de précision plus élevés, des études plus récentes ont révélé un affaiblissement des capacités mentales ou aucun effet du tout.

Le site d'action des CEM HF dans le cerveau reste inconnu. Le fait que les changements survenant dans l'EEG concernent les deux hémisphères tant pour les expositions unilatérales que bilatérales indique que les sites sensibles pourraient être situés en profondeur.

Pour étudier les mécanismes impliqués dans les effets des CEM HF sur les fonctions cérébrales, trois sous-projets ont été conçus. Le premier s'est penché sur la question de l'identification des composantes de la modulation basse fréquence des CEM HF émis par les téléphones mobiles, responsables des effets biologiques. L'hypothèse a été émise selon laquelle les composantes de la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil pourraient jouer un rôle majeur. Ainsi, dans une première étape, des champs modulés à 14 Hz (gamme de fréquences des fuseaux du sommeil) et à 217 Hz (composante la plus forte du signal GSM [Global System for Mobile Communications]) ont été appliqués parallèlement à des essais de contrôle (absence de champ). Afin de vérifier si la composante de modulation lente à elle seule suffit à susciter un effet biologique ou si sa combinaison avec les CEM HF est requise, on a appliqué les conditions suivantes dans une seconde étape : CEM HF modulés par impulsions à 2Hz, champ magnétique pulsé à 2 Hz et absence de champ (essai de contrôle).

Le second sous-projet avait pour objectif de déterminer si le thalamus, une structure cérébrale sub-corticale impliquée dans la régulation du sommeil, jouait un rôle dans la répercussion, sur l'EEG en phase de sommeil, des effets exercés par les CEM HF. On a supposé qu'une exposition relativement intense du thalamus (comme effectuée dans de nombreuses études antérieures) provoquerait un accroissement de la puissance spectrale de l'EEG alors qu'une exposition superficielle du cerveau, impliquant principalement le cortex cérébral, réduirait ou éliminerait cet effet, ou alors conduirait à des changements prédominants dans un des hémisphères. Les sujets étaient exposés à un signal GSM (de type téléphone portable) dont la fréquence porteuse était de 900 MHz (« exposition subcorticale » ou « exposition du thalamus ») ou de 2 140 MHz (« exposition superficielle » ou « thalamus non exposé »), ou alors ils n'étaient exposés à aucun signal (test de contrôle).

Chacun des deux sous-projets a été effectué avec le concours de 24 à 30 jeunes gens en bonne santé et selon une procédure commune consistant en trois sessions de deux nuits séparées par une semaine. Dans chaque session, une nuit d'adaptation a précédé la nuit d'expérimentation. La nuit d'adaptation a servi à familiariser les participants à la procédure liée à l'EEG et à l'environnement de laboratoire. Durant la nuit d'expérimentation, les participants ont été exposés à un champ ou non (condition de contrôle) pendant 30 minutes, directement avant que leur sommeil ne soit enregistré durant un épisode de nuit de 8 h. Les sujets ont également effectué, durant l'exposition, une série d'épreuves en liaison avec le temps de réaction et la mémorisation.

Le troisième sous-projet a été conçu pour tester l'éventuelle incidence des CEM HF sur les performances cognitives et l'EEG en phase éveillée dans la préadolescence, les téléphones mobiles constituant la source principale de CEM HF auxquels les jeunes sont exposés. Dans le programme de recherche 2006/2010 de l'OMS concernant les CEM, l'étude des effets induits par les CEM sur la cognition et l'EEG des enfants a été classée comme hautement prioritaire. Les enfants commencent à beaucoup utiliser les téléphones mobiles dans la préadolescence (11 à 13 ans) et l'on craint qu'ils puissent être particulièrement sensibles aux CEM HF dans la mesure où le développement de leur

cerveau n'est pas encore complètement achevé. Un certain nombre d'études antérieures portant sur de jeunes adultes en bonne santé ont mis en évidence une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG dans la gamme de fréquences alpha durant l'exposition aux CEM HF ou après celle-ci ; cependant, très peu de recherches ont été consacrées à l'existence et/ou à l'ampleur de cet impact chez l'enfant. Afin de tester si l'activité alpha de l'EEG en phase éveillée est affectée dans une relation de dose à effet, 23 préadolescents (âgés de 11 à 13 ans) ont été exposés à des signaux GSM de type téléphone portable, avec une fréquence porteuse de 900 MHz à 1.4 W/kg et 0.35 W/kg (trois sessions à une semaine d'intervalle, chaque participant subissant l'exposition au même moment de la journée). Le test a été complété par un essai de contrôle effectué en l'absence de signal. Durant l'exposition de 30 minutes, les adolescents ont effectué une série de d'épreuves en liaison avec le temps de réaction et la mémorisation. Un enregistrement de référence a été effectué avant l'exposition. L'EEG en phase éveillée (yeux clos durant trois minutes, puis yeux ouverts durant trois minutes) a été enregistré immédiatement après l'exposition et à nouveau 30 minutes, puis 60 minutes après celle-ci.

L'exposition à des CEM HF modulés par des impulsions à 2 et à 14 Hz a provoqué une augmentation de la puissance spectrale de l'EEG de sujets endormis, dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil. Cependant, un champ magnétique pulsé à 2 Hz, ne présentant pas les composantes CEM HF, n'a pas induit cet effet. Ces résultats, en accord avec les études antérieures, montrent que ni les impulsions à elles seules ni la fréquence porteuse du CEM HF à elle seule n'induisent le changement typique dans l'EEG en phase de sommeil ; ce fait a été observé de manière répétée chez des sujets ayant été exposés à des CEM HF à modulation pulsée.

Ces résultats indiquent que les composantes de la modulation pulsée de la gamme de fréquences physiologique (soit à 2 Hz et à 14 Hz) pourraient être importantes dans l'induction des modifications dans l'EEG. Quoique les champs modulés par impulsions à 14 Hz et à 2 Hz HF aient l'un et l'autre provoqué une augmentation significative de la puissance spectrale de l'EEG en phase de sommeil, les champs pulsés à 217 Hz, quant à eux, ont provoqué une augmentation moins importante et elle n'était pas significative. Cela suggère que la spécificité de la modulation par impulsions n'est pas le facteur le plus important dans la mesure où plusieurs fréquences différentes ont provoqué un effet dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil. Au regard des performances cognitives (première étude), la vitesse de réaction globale tendait à être plus faible durant les conditions d'exposition que durant la non-exposition alors que la précision des performances n'était pas affectée.

Les résultats du deuxième sous-projet ont mis en évidence le fait que l'exposition unilatérale aux CEM HF provoquait un accroissement de l'activité dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil dans les deux hémisphères malgré la profondeur de pénétration limitée du rayonnement. C'est pourquoi il est peu probable que des structures subcorticales telles que le thalamus soient les premières concernées par la répercussion de l'effet sur l'EEG. L'accroissement de puissance induit par les CEM HF dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil pourrait être provoqué, selon une autre hypothèse, par une implication indirecte du thalamus et/ou par une action sur le cortex cérébral. L'évolution de ces effets sur l'EEG au cours du temps a présenté quelque variabilité à travers l'étude : de fait, l'effet pouvait être observé durant tout le sommeil (modulation par impulsions à 2 Hz), son intensité pouvait augmenter au cours du sommeil (exposition subcorticale et superficielle) ou il pouvait n'être observé qu'à un moment donné de l'épisode de sommeil (modulation par impulsions à 14 Hz). Cette variabilité pourrait s'expliquer par la variabilité des conditions d'exposition elles-mêmes. Dans aucun cas d'exposition, l'architecture du sommeil n'a été affectée, confirmant ainsi les études antérieures selon lesquelles il n'y avait pas de coïncidence entre effets sur l'EEG et architecture ou qualité du sommeil.

Les résultats du troisième sous-projet sont en cours d'analyse.

#### **Observation des effets des champs UMTS sur la circulation sanguine cérébrale par imagerie proche infrarouge**

*PI : Dr Martin Peter Wolf, PD, Clinique de néonatalogie, Hôpital Universitaire de Zurich*

L'UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) est le système de communication de troisième génération (3G) mobile. A ce titre, il constitue une technique de référence jouissant d'une forte expansion. Cependant, seules quelques études ont porté sur les effets éventuels des CEM UMTS sur

la physiologie cérébrale humaine, la plupart des études effectuées jusqu'ici ayant utilisé, dans leurs expériences, des signaux GSM, correspondant à une technique de deuxième génération (2G).

L'incertitude au sujet des effets potentiels des CEM HF UMTS, combinée avec la mise en œuvre rapide de la technologie, engendre des inquiétudes dans la population de nombreux pays. Un certain nombre d'études récentes, fondées sur des techniques d'imagerie comme la tomographie par émission de positrons (TEP), montrent qu'il est probable que l'exposition aux CEM HF GSM provoque localement une augmentation du flux sanguin cérébral alors qu'aucune modification n'est observée avec les CEM UMTS. Le PIR (proche infrarouge), parfois aussi appelé spectroscopie proche infrarouge (SPIR), imagerie optique diffuse (IOD) ou topographie optique (TO en anglais), constitue une autre technique sensible et non invasive d'imagerie des fonctions cérébrales, du flux sanguin et de la teneur en oxygène. Le procédé utilise la lumière invisible du proche infrarouge (~ 650 nm à 1000 nm dans le spectre électromagnétique) et consiste en une source de lumière et un détecteur de celle-ci hautement sensible. La lumière pénètre profondément dans les tissus biologiques et est absorbée par l'hémoglobine oxygénée [O<sub>2</sub>Hb] et par l'hémoglobine désoxygénée [HHb]; l'intensité de l'activation cérébrale est déduite des caractéristiques du changement hémodynamique, étant donné que la décharge neuronale est fortement couplée au flux cérébral et au volume sanguins. D'autres paramètres pouvant éventuellement influencer la circulation sanguine sont également détectés.

Pour ce projet, la technique PIR a été spécifiquement adaptée à la mesure de changements à court terme (effets se produisant dans les 80 s) et à moyen terme (effets se produisant entre 80 s et 30 min) intervenant dans la circulation et l'oxygénation du sang cérébral (p.ex. la quantité de sang transportant l'oxygène) en réponse à des expositions intermittentes à des CEM HF de type UMTS, à des puissances typiques de celle d'un téléphone portable. Un appareillage standard a été rendu suffisamment insensible aux CEM par le développement de senseurs en fibre optique incluant un blindage. Chacun des participants a subi trois conditions d'exposition (0.18 W/kg, 1.8 W/kg les deux à une fréquence porteuse de 1.9 GHz, ainsi qu'un contrôle) et ceci sur trois jours différents. En outre, le quatrième jour le cerveau a été stimulé par un tapotement des doigts afin de comparer les effets potentiels des CEM HF de type UMTS à cette activation-là du cerveau. Chaque mesure consistait en 16 cycles : l'exposition/stimulation, (20 s) d'exposition CEM HF UMTS (ON) ou tapotement avec les doigts, alternait en effet avec 60 s de récupération (OFF). Chaque mesure durait 31 min au total, incluant des mesures de référence avant et après l'exposition. En plus des concentrations en oxyhémoglobine, en déoxyhémoglobine et en hémoglobine totale, ont été enregistrés le rythme cardiaque, le bien-être subjectif, la fatigue et la performance de comptage.

Les résultats ont mis en évidence une significative augmentation à court terme des concentrations en oxyhémoglobine et en hémoglobine totale à la suite d'une exposition à 0.18 W/kg. Une diminution de la concentration en déoxyhémoglobine dans la réponse à moyen terme, située dans les marges des fluctuations physiologiques, a été détectée en réponse aux expositions à 0.18 W/kg et à 1.8 W/kg. En outre, le rythme cardiaque à moyen terme était significativement plus élevé en réponse à l'exposition à 1.8 W/kg que dans les conditions de contrôle. Aucune autre variable n'a été affectée.

L'étude a révélé qu'une exposition intermittente aux CEM HF UMTS peut affecter la circulation sanguine cérébrale et le rythme cardiaque. Les effets à court terme ont été plus faibles que ceux observés durant une activation fonctionnelle normale alors que les effets à moyen terme ont été de l'ordre des fluctuations physiologiques. Les effets à court terme n'ont été observés qu'à faible intensité, ce qui rend improbable l'implication d'effets thermiques. Les effets à moyen terme pourraient être dus à une diminution de la consommation d'oxygène. Bien qu'un effet sur le rythme cardiaque ait été détecté, les résultats controversés de la littérature indiquent que ces études demandent confirmation.

En conclusion, la présente étude montre que les CEM HF UMTS pourraient également affecter la circulation et l'oxygénation cérébrales sanguines. Les intensités de champ appliquées correspondent à celles utilisées dans les portables, mais la modulation correspond à celle des stations de base. Dans des études futures, il conviendrait donc d'appliquer la modulation des portables afin que la simulation de l'exposition aux téléphones mobiles soit meilleure.

## Étude de cohorte prospective sur l'influence des champs électromagnétiques haute fréquence sur la qualité de vie associée à la santé

PI : Prof. Dr Martin Rössli, Institut Tropical et de Santé Publique Suisse, Université de Bâle

L'exposition aux CEM HF dans l'environnement s'est singulièrement amplifiée durant ces dernières décennies, générant des inquiétudes en ce qui concerne les effets sanitaires éventuels de technologies comme le téléphone mobile et les téléphones sans fil, les réseaux W-LAN ou les émetteurs radio. L'essentiel de ces appréhensions concerne une détérioration éventuelle de la qualité de la vie, due aux effets d'une exposition à long terme aux CEM HF dans l'environnement quotidien. Alors que les effets aigus dus aux expositions aux CEM HF ont été étudiés par le biais d'essais randomisés en double aveugle sur des volontaires dans des conditions de laboratoire, les effets à long terme doivent être étudiés par le biais d'études d'observation. Jusqu'à présent, de telles études étaient généralement des études transversales (bidimensionnelles), ce qui signifie que l'exposition et la santé ont été mesurées en même temps. Cette manière d'opérer limite cependant l'interprétation causale. De plus, en l'absence de méthodes d'évaluation fiables de l'exposition, plusieurs études antérieures étaient fondées sur des données d'exposition fournies par les personnes exposées elles-mêmes ou sur les distances entre le lieu de résidence et l'antenne la plus proche, ce qui limite encore d'autant la précision de l'évaluation. Entre temps, des exposimètres (appareils de mesure de l'exposition aux CEM HF) portables ont été développés. Grâce à eux, il est possible de quantifier l'exposition individuelle avec plus de précision. D'ailleurs plusieurs études ont démontré l'utilité des exposimètres dans des mesures portant sur des échantillons de population.

L'objectif du projet était de caractériser la distribution de l'exposition aux CEM HF dans un échantillon de population, de développer et de valider une méthode d'évaluation de l'exposition et d'examiner la relation entre l'exposition aux CEM HF et les symptômes de problèmes de santé par le biais d'une étude de cohorte. Il s'agissait essentiellement de mettre en évidence une relation éventuelle entre l'exposition quotidienne aux CEM HF et des problèmes de santé du genre maux de tête, difficultés de concentration ou insomnies. Dans la première partie de ces investigations, l'exposition individuelle aux sources typiques de CEM HF a été mesurée au moyen d'exposimètres portables sur 166 participants durant une semaine. L'exposition à des émetteurs fixes sur le lieu de résidence a été appréhendée par un modèle spatiogéographique utilisant des paramètres précis provenant de tous les émetteurs fixes de la région considérée. Ces données ont été utilisées pour prédire les expositions en situation quotidienne subies par 1375 individus prenant part à une étude de référence, l'expérience portant sur des CEM HF de la gamme de fréquences de 88 à 2500 MHz tels qu'ils peuvent exister dans l'environnement. 1122 d'entre eux ont participé à une expérience de suivi effectuée une année plus tard. La faisabilité et la reproductibilité des modèles spatiogéographique et d'évaluation prédictive de l'exposition avaient été démontrées préalablement. De surcroît, des données objectives sur l'utilisation des téléphones mobiles ont été recueillies à partir des enregistrements effectués par les opérateurs de téléphonie mobile de tous les appels entrant et sortant durant les six derniers mois.

Le temps de latence des éventuels effets sur la santé n'étant pas connu et aucun mécanisme biologique n'ayant été établi jusqu'à présent, diverses analyses ont été effectuées. En plus des analyses transversales (bidimensionnelles), une analyse longitudinale a été effectuée pour déterminer si l'exposition de référence pouvait être reliée à un changement dans l'état de santé une année après. En outre, on a évalué si une modification de la situation d'exposition par rapport à la situation de référence, intervenant durant le suivi de l'expérience, était accompagnée d'un changement correspondant dans l'état de santé.

Dans une sous-étude emboîtée, le comportement durant le sommeil a été enregistré chez 120 individus durant deux semaines au moyen de dispositifs actigraphiques portés au poignet (dispositifs mesurant les mouvements durant le sommeil). Le comportement durant le sommeil a été comparé à la situation d'exposition aux CEM HF dans la chambre à coucher.

Pour conclure, rien ne permet d'incriminer les conditions d'exposition aux CEM HF que nous connaissons en Suisse pour être à l'origine d'incidences sur la santé. Les mesures ont mis en évidence une exposition moyenne de 0.21 V/m, valeur qui est bien en dessous des valeurs limites en vigueur. Chez 131 participants, représentant la population générale, l'exposition aux CEM HF environnementaux lointains était principalement due aux téléphones mobiles d'autres personnes (39 %), aux systèmes de téléphonie sans fil (24 %, l'utilisation de son propre téléphone non comprise) et aux stations de base de téléphonie mobile (22 %). L'exposition à des CEM HF environnementaux au

niveau de référence n'était pas reliée à des troubles de la santé une année après et, de manière similaire, un accroissement ou une diminution de l'exposition individuelle au cours d'une année n'a pas été accompagné par un changement correspondant dans les perturbations de la santé. Aucune relation entre les enregistrements par un actimètre durant le sommeil et l'exposition aux CEM HF dans la chambre à coucher n'a pu être mise en évidence.

En ce qui concerne les sources opérant à proximité immédiate du corps, l'utilisation de téléphones portables et de téléphones sans fil n'a pas montré de relation avec aucun aspect de santé lié à la qualité de la vie. De même, l'étude n'a pas fourni d'indications selon lesquelles les individus se considérant comme hypersensibles aux CEM (hypersensibilité électromagnétique ; HSEM) seraient plus sensibles aux CEM HF que les individus non HSEM.

En adoptant une démarche de cohorte plutôt qu'un concept transversal, les analyses de la relation entre exposition aux CEM HF et symptômes non spécifiques de problèmes de santé, effectuées dans le cadre de cette étude du PNR 57, permettent de tirer des conclusions plus solides que les études antérieures sur le sujet. Une méthode d'évaluation générale des expositions a été utilisée en considérant les effets potentiels à la fois de l'exposition aux sources environnementales lointaines et l'exposition aux sources opérant à proximité immédiate du corps, et en exploitant des données d'exposition objectives dans les deux cas. Toutefois, dans les mesures et la modélisation des expositions, un certain degré d'incertitude demeure inévitable. L'incertitude liée au modèle d'exposition peut expliquer environ 50 % des écarts observés. L'écart non expliqué est supposé être réparti de manière aléatoire dans le collectif étudié. Lorsqu'il existe une relation de dose à effet, les erreurs aléatoires associées à l'évaluation de l'exposition conduisent à une évaluation sous-estimée.

Il convient de noter que les études épidémiologiques transversales antérieures basées sur des évaluations approximatives de l'exposition, fondées sur des mesures d'exposition auto-rapportées, ont mis en évidence des effets sur la santé alors que des mesures d'exposition objectives ne révélaient généralement pas de tels effets. Ce type de phénomène a également pu être observé dans le cadre de ce projet du PNR 57.

Les niveaux d'exposition de la population étant bien inférieurs aux valeurs limites d'exposition légales, aucune conclusion ne peut être tirée en ce qui concerne les effets sur la santé à des niveaux proches des valeurs limites ou en ce qui concerne les effets sur la santé plus d'une année après l'exposition.

### **3.3 Module 3 : Biologie cellulaire**

#### **Effets des rayonnements non ionisants chez l'organisme modèle *Caenorhabditis elegans***

*Pl: Prof. Dr Pierre Goloubinoff, Dept. of Plant Molecular Biology, Université de Lausanne*

La technologie expose de plus en plus les organismes à des conditions environnementales nouvelles comme les champs électromagnétiques (CEM) dont les effets biologiques sont encore peu compris. L'usage fréquent des téléphones mobiles et la prolifération des antennes dédiées exposent les organismes vivants à des champs électromagnétiques à radiofréquence (CEM RF), augmentant les inquiétudes de la population relatives aux effets nuisibles potentiels sur la santé humaine et l'environnement. Cependant, en dépit d'une recherche intense, on ignore toujours ce que sont les éventuels effets biologiques des CEM RF ; le caractère nuisible de l'exposition est-il significatif, comparé à celui généré par d'autres stress environnementaux naturels tels que la chaleur, le stress oxydatif, etc. ?

Les organismes ont développé des mécanismes de défense moléculaires efficaces contre les stress naturels issus de l'environnement. En particulier les plantes, les bactéries et les animaux peuvent accumuler un réseau de protéines chaperones à la suite d'un stress thermique, molécules pouvant prévenir la formation de lésions dans les protéines natives et les membranes. En biologie, les chaperones sont des protéines dont la fonction consiste à assister d'autres protéines dans l'achèvement de leur propre repliement. De nombreuses chaperones sont des protéines liées aux chocs thermiques, c'est-à-dire des protéines exprimées en réponse à des températures élevées. La raison de ce comportement réside dans le fait que le repliement des protéines est fortement affecté par la chaleur, raison pour laquelle les chaperones entrent en action pour contrecarrer les dommages potentiels. Bien que la plupart des protéines puissent se replier en l'absence de chaperones, une minorité d'entre elles les requièrent expressément.



Les organismes mutants ou vieillissants, dont l'expression des chaperones faiblit ou qui souffrent au contraire d'une surcharge chronique de chaperones se traduisant par la formation d'agrégats de protéines, sont particulièrement sensibles aux stress environnementaux légers. Les CEM RF sont soupçonnés d'accroître le risque de maladies liées à un mauvais repliement des protéines, telles que les maladies d'Alzheimer et de Parkinson, et d'accélérer le vieillissement cellulaire en général. En conséquence, les effets biologiques des CEM RF pourraient bien être détectés chez des organismes dont l'homéostasie protéique aurait été affaiblie artificiellement. Le nématode *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*, un ver rond également utilisé comme espèce modèle pour la maladie de Parkinson) est le modèle animal le plus connu s'appliquant aux invertébrés, du moins en ce qui concerne la biologie du développement, du comportement et de la génétique. L'animal a une longueur d'environ 1 mm et une longévité de 2 à 3 semaines ; la séquence complète de son génome est inventoriée et chacune des 959 cellules somatiques de son corps transparent est identifiable au microscope. Il est donc facile de détecter des protéines fluorescentes (agrégats compris) s'accumulant dans les tissus des animaux génétiquement modifiés lorsque les bons gènes rapporteurs sont exprimés. Les nématodes sont faciles à manipuler et à héberger au laboratoire, fournissant un bon compromis entre complexité et facilité de manipulation. De plus, *C. elegans* boucle son cycle de vie en quelques jours, ce qui signifie que le suivi des interventions ayant une incidence sur plusieurs générations peut être assuré en relativement peu de temps.

Le projet s'est penché sur la question de la détection des éventuels effets biologiques exercés par les CEM RF sur un *C. elegans* génétiquement modifié, exprimant des protéines marquées issues d'une expansion de polyglutamine (protéines polyQ). La toxicité cellulaire de ces dernières est associée à la formation d'agrégats protéiques dans les cellules musculaires, provoquant une paralysie progressive dépendant de la température et de l'âge. Une variété de mousse recombinée (*Physcomitrella patens*) à gène rapporteur (HSP-GUS), sensible à de légers stress thermiques, a également été utilisée comme système modèle. Généralement, lorsque les polyQ sont plus longs ou que la température de croissance est plus élevée, la paralysie chez les vers se déclenche plus tôt et est plus sévère. Les CEM RF étant suspectés d'exercer des effets thermiques et non thermiques sur les organismes, l'impact possible de l'exposition aux CEM sur les nématodes a été analysé sous un contrôle de température très strict. La distinction entre les effets thermiques et les éventuels effets non thermiques dus aux CEM a été établie par application de divers champs, soit de manière continue, soit de manière intermittente. Après exposition, les effets de la température ou des CEM RF ont été mesurés par le biais de tests de motilité chez les nématodes et de tests de -glucuronidase (GUS) chez les extraits de mousse.

Les nématodes polyQ35 présentaient une motilité phénotypique dépendant fortement de la température: entre 20°C et 24°C, ils développaient en effet différents phénotypes de manière précise et reproductible en réponse à une température de croissance détectable à 0.5°C près. Cette grande sensibilité de *C. elegans*-Q35 à de faibles variations de la température de croissance dans les conditions physiologiques était optimale pour tester les éventuels effets biologiques thermiques et non thermiques des CEM RF ou des champs magnétiques basse fréquence.

Tandis que des effets biologiques significatifs ont été détectés à la suite de variations de température ambiante aussi faible que 0.5°C associées à des incréments de température de croissance aussi faibles que 0.3°C, on a mis en évidence que l'exposition aux CEM RF en régime continu ou alterné (2h-on/ 2h-off ou 5-min on/ 10-min off), soit à 5 soit à 500 V/m, n'exerçait aucun effet détectable dans le test de motilité/paralysie sur *C. elegans*-polyQ35. Même sur un sous-type de *C. elegans* plus sensible, créé avec une homéostasie protéique encore plus affaiblie, ce qui affecte encore davantage la motilité du ver, aucune réponse à des CEM HF n'a pu être enregistrée. Des résultats négatifs ont également été obtenus chez la mousse génétiquement modifiée exprimant le gène rapporteur GUS. Alors qu'un incrément aussi faible que 0.5°C provoquait une augmentation significative de l'expression du GUS, diverses conditions d'exposition aux CEM sont demeurées sans effets.

En résumé, alors que pour les systèmes animaux et végétaux d'infimes variations de température ont provoqué des effets biologiques hautement significatifs, l'exposition à divers régimes de CEM RF a montré une absence d'effets biologiques détectables, à la fois lors des tests de motilité/paralysie et de vieillissement chez les nématodes polyQ35-YFP et lors des études sur l'expression des HSP-GUS chez la mousse. C'est pourquoi, en se basant sur les paramètres examinés au cours des présentes expériences, il n'apparaît pas que les CEM RF portent atteinte à l'homéostasie protéique cellulaire.

## Effets des champs électromagnétiques in vitro et in vivo: interactions avec des facteurs de réponse au stress

Pl: Prof. Meike Mevissen, Pharmacologie et Toxicologie vétérinaire, Faculté Vetsuisse, Université de Berne

Au cours des trois dernières décennies, des inquiétudes et des controverses sont apparues au sujet des effets de l'exposition croissante aux CEM RF sur la santé humaine. Les mécanismes précis, s'ils existent, par lesquels les CEM RF pourraient affecter les fonctions biologiques se sont révélés difficiles à établir et, dans bien des cas, les résultats de diverses études n'étaient pas reproductibles. Les imperfections de la conception de l'exposition et le manque de précision de la dosimétrie ont rendu l'interprétation des résultats difficile. Un problème supplémentaire réside dans le fait que l'exposition aux CEM RF pourrait induire une élévation de température, raison pour laquelle il est nécessaire de distinguer les effets des CEM RF d'avec les effets thermiques.

Dans le présent projet, une instrumentation de pointe a été utilisée dans des conditions contrôlées (TAS défini) limitant les effets thermiques au strict minimum (moins de 0.1°C). Deux modèles différents ont permis l'examen des effets possibles des CEM RF, l'un d'eux étant le ver rond *Caenorhabditis elegans*. En dépit de son apparente faible complexité, ce nématode présente un grand nombre de fonctions impliquant des voies de réponse au stress, qui ont été conservées durant l'évolution (p.ex. elles existent aussi chez des organismes plus complexes comme l'espèce humaine). En outre, chez un grand nombre de souches mutantes, beaucoup d'entre elles présentant un affaiblissement des fonctions biologiques importantes telles que la capacité de survivre à des stress thermiques ou oxydatifs, des gènes rapporteurs (p.ex. la protéine fluorescente verte [GFP, de l'anglais green fluorescent protein]) permettent de surveiller le changement de l'expression des gènes durant l'exposition à divers agents stressants.

Un certain nombre de facteurs de transcription de la voie insulino-mimétique de transduction du signal régulent le stress, le vieillissement et la reproduction. Dans le cadre du présent projet, les effets des CEM sur les voies de signalisation du stress dans une population de vers génétiquement homogène et synchronisée ont été étudiés avec focalisation sur un acteur clé de toute voie de transduction des signaux de stress, le facteur de transcription DAF-16 (homologue humain FKHL1). Une fois activé, le DAF-16 subit une translocation dans le noyau cellulaire et active la transcription d'un grand nombre de gènes effecteurs. C'est pourquoi, des souches de vers munis d'un transgène GFP ont été choisies ; elles peuvent en effet être utilisées directement comme rapporteuse de l'activation du DAF-16 consécutive à une exposition aux CEM RF. Le but de l'étape suivante a été d'identifier les acteurs clés de l'activation induite par les CEM.

L'examen des vers entiers par microscopie fluorescente a été réalisé après exposition d'une population synchronisée d'animaux à des CEM RF. Aucune translocation nucléaire n'a été observée dans les animaux présentant un patrimoine génétique de type naturel (sauvage ; wt, wild-type). Afin d'augmenter le signal éventuel transmis par DAF-16, provoqué par les CEM RF, d'autres souches à gène rapporteur ont été testées. En utilisant le même régime d'exposition, une augmentation de la fluorescence GFP a été constatée dans une souche (*sod3::GFP*) présentant le patrimoine génétique non mutant DAF-2; l'effet n'a pas été observé dans les souches présentant un patrimoine génétique de type sauvage. Au cours des recherches menées dans le but d'identifier une souche dans laquelle les effets des CEM RF pourraient être facilement mis en évidence, une souche transgénique (CF 1580) s'est révélée sensible aux CEM RF, présentant en effet une fluorescence accrue après exposition. Cela indique bien que les CEM RF pourraient avoir des effets biologiques. La souche répondant aux CEM RF pourrait être utilisée à des fins d'identification des acteurs clés de la voie de réponse au stress généré par les CEM RF.

Un deuxième modèle du projet de recherche consistait en des cultures de cellules de mammifères (humaines et de rat) pouvant demeurer dans leur état originel (indifférencié) ou adopter certaines caractéristiques des neurones durant leur différenciation lorsqu'elles sont exposées à des substances telles que l'acide rétinoïque ou le facteur de croissance du tissu nerveux. Les changements induits par stimulus dans l'épissage alternatif de l'acétylcholinestérase (AChE) étaient apparus auparavant comme un mécanisme de l'adaptation neuronale face à une variété de stimuli incluant les stress thermique et oxydatif. Deux formes isomères de l'AChE, catalytiquement actives, avec des fonctions distinctes en ce qui concerne le développement et la réparation, coexistent dans le cerveau. La forme rare « read-through » AChE-R est surtout induite à la suite de blessures ; elle favorise la réparation et protège contre la neurodégénérescence. Les effets des expositions aux CEM RF sur les isoformes

AChE ayant subi un épissage alternatif ont été examinés en utilisant des cellules PC 12 in vitro. Ces dernières, dérivées de pheochromocytoma de la médullosurrénale du rat, constituent un système modèle utile pour étudier la différenciation cellulaire. De plus, ces cellules ont servi à examiner les effets des CEM RF sur la réponse au stress alors que la variété de neuroblastomes humains SH-SY5Y a été utilisée pour étudier les effets sur l'apoptose, qui est le processus de la mort cellulaire programmée. Pour analyser la réponse au stress, l'évolution des changements survenant dans la régulation de la protéine du choc thermique 25/27 (HSP25/27) a été examinée. Pour surveiller l'apoptose, on a analysé la régulation de deux protéines liées à cette mort programmée (BAX et Bcl-2). Ces protéines apparaissent comme ayant des fonctions antagonistes en ce qui concerne leurs effets sur la sensibilité de la cellule à l'apoptose. Dans les conditions expérimentales utilisées, l'exposition aux CEM RF n'a pas altéré le niveau d'expression ou la localisation intracellulaire de l'isoforme AChE-R associée au stress, ni dans les cellules PC 12 différenciées ni dans celles non différenciées. Aucune altération de l'expression de l'isoforme AChE-S dite « synaptique » n'a été décelée dans des conditions similaires. Cependant, un nombre accru de taches nucléaires du facteur d'épissage SC35 a été découvert chez des cellules PC 12 non différenciées après 16 heures d'exposition aux CEM RF. Cet effet était indépendant de la température dans la mesure où la différence de température entre chambre d'exposition et chambre de contrôle n'a jamais excédé 0.03°C.

Durant l'exposition de cellules PC12 à des CEM RF, l'évolution au cours du temps de l'état d'équilibre entre HSP25 et P-HSP25 n'était pas la même chez les cellules non traitées et les cellules traitées par NGF. Après une exposition de base au GSM, une baisse du taux de HSP25 a été observée au début des mesures (1h et 4h chez les cellules différenciées ; 1h-12h chez les cellules non différenciées). En parallèle, une diminution des taux de P-HSP25 a été enregistrée à différents moments (1h-8h chez les cellules différenciées ; 4h-48h chez les cellules non différenciées). En revanche, après 12h et 24h d'exposition aux CEM, le taux de P-HSP25 augmentait à nouveau, mais seulement chez les cellules différenciées. Au vu de ces résultats, la cheffe du projet estime démontré (1) que les CEM RF constituent un authentique facteur de stress dans la mesure où ils sont capables de modifier la production de certaines protéines connues pour jouer un rôle dans les réponses au stress ; et (2) que les CEM RF apparaissent également comme activateurs de synthèses protéiniques spécifiques de l'apoptose, une voie cellulaire connue pour être impliquée dans les défenses anti-cancer.

#### **Effets génotoxiques des rayonnements non ionisants**

*Pl: Prof. Dr. Primo Schär, Institut de Biochimie et Génétique, Dept. de Recherche Clinique et Biologique, Université de Bâle*

Une question particulièrement intéressante et importante est de savoir si l'exposition aux CEM affecte l'intégrité du matériel génétique et a, par conséquent, la capacité potentielle de provoquer des effets négatifs sur la santé, associés à une instabilité génétique telle que le cancer ou le vieillissement prématuré.

L'ADN est un acide nucléique contenant les informations génétiques exploitées au cours du développement et du fonctionnement de tous les organismes vivants connus. En dépit des nombreuses recherches effectuées, aucune preuve incontestable et incontestée de l'existence d'une génotoxicité (toxicité ADN) induite par les CEM n'a été mise en évidence. La difficulté majeure en ce domaine de recherches a été la nature limite des effets sur l'ADN induits par les CEM, leur mesure exigeant une conception expérimentale de haut niveau, impliquant en l'occurrence l'utilisation de systèmes expérimentaux clairement définis permettant une lecture univoque de l'effet CEM et une discrimination indiscutable de l'effet par rapport aux bruits de fond.

Des résultats expérimentaux controversés, issus de certaines études sur la génotoxicité, certaines d'entre elles ayant été effectuées dans le contexte du programme européen REFLEX, ont suggéré que l'exposition de certaines cellules humaines à des CEM haute ou basse fréquence provoquait la cassure de brins d'ADN nucléaire. Ces faits ont conduit l'OMS à classer le problème de l'instabilité génétique comme hautement prioritaire dans son programme de recherche 2006 sur les CEM RF. Des effets positifs ont été observés principalement dans l'essai comète (cf. ci-dessous) ; toutefois de nombreuses discussions scientifiques se sont alors élevées sur la question de savoir si ces effets étaient fondés ou non, et peu d'efforts ont été entrepris pour parvenir à saisir ce qu'ils signifiaient et de quelle manière ils avaient à être interprétés. L'essai comète consiste en une technique sensible de détection des dommages à l'égard de l'ADN au niveau des cellules isolées. Lorsque l'ADN d'une



cellule est endommagée, sa structure est perturbée à l'intérieur du noyau de telle manière que ses propriétés migrantes sont modifiées dans leur possibilité de séparation par électrophorèse. L'essai comète mesure ces changements, permettant une évaluation quantitative de la quantité d'ADN endommagée dans la cellule.

Le projet avait pour but de reproduire des expériences clés antérieures qui avaient indiqué l'existence d'effets génotoxiques dus aux CEM dans l'essai comète et d'examiner les causes moléculaires sous-jacentes ainsi que les conséquences biologiques. Les objectifs spécifiques étaient les suivants : a) la caractérisation moléculaire des effets sur l'ADN dus à l'exposition aux CEM, b) la caractérisation de la réponse cellulaire à des effets induits sur l'ADN par les CEM, et c) une évaluation des conséquences biologiques des effets génotoxiques induits par les CEM.

Un important effort initial a porté sur la confirmation des impacts sur l'ADN observés antérieurement dans l'essai comète sur des cellules humaines exposées à des CM TBF et des CEM RF. Les effets ont pu être reproduits sur des fibroblastes humains primaires exposés à des CM TBF, et en partie également sur des cellules exposées à des CEM RF. Plus particulièrement, il a été détecté que l'exposition intermittente, contrairement à l'exposition continue, de fibroblastes humains primaires à des CM à 50 Hz sinus à 1 mT induit une légère mais significative augmentation des cassures de brins d'ADN identifiable dans l'essai comète. De nouvelles connaissances ont été acquises en ce qui concerne l'origine et la nature de ces interactions. Il a en effet été montré que les petits impacts observés dans l'essai comète proviennent de perturbations mineures de la synthèse d'ADN et du déclenchement occasionnel de l'apoptose cellulaire plutôt que de la production de dommages à l'ADN. Contrairement à ce que prétend une publication antérieure concernant les CEM RF, aucun effet génotoxique n'a été enregistré sur les fibroblastes humains ES-1 ; par contre, les fibroblastes HR-1d présentaient une légère mais significative augmentation du facteur de queue du test comète à la suite d'une exposition à un champ modulé pour la transmission vocale auquel correspondait une valeur TAS de 1 W/kg CEM RF (1950 MHz, 1-2 W/kg TAS).

Un autre volet important du projet a concerné l'élaboration d'outils permettant une évaluation directe des impacts éventuels des CM TBF sur l'ADN lui-même, sur les interactions entre enzymes et protéines liées à l'ADN, et sur certains aspects de la physiologie cellulaire concernant l'ADN. Cela supposait la mise au point de tests biochimiques ainsi que de modes opératoires concernant l'imagerie de cellules vivantes dans les conditions d'exposition aux CM TBF. Les deux démarches ont été couronnées de succès, fournissant une nouvelle et puissante technologie à la recherche sur les CEM. Ces méthodes ont été utilisées pour clarifier la question de savoir si les CM TBF avaient la faculté d'induire des dommages physiques à l'ADN ou d'altérer la formation de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) ou le niveau de production de ceux-ci dans les cellules. Des expériences biochimiques utilisant de l'ADN purifié en solution ont montré que l'exposition aux CM TBF n'entraîne pas de dommages à l'ADN au-dessus d'un seuil détectable dans l'essai comète, seuil validé par des contrôles utilisant le rayonnement ionisant à des doses générant, dans l'essai comète, des effets comparables à ceux observés pour les expositions intermittentes aux CEM TBF. De manière similaire, des méthodes de mesure hautement sensibles concernant les DRO ont révélé que l'exposition aux CEM TBF n'affecte pas les taux de DRO intracellulaires à un point tel qu'ils pourraient causer suffisamment de dommages à l'ADN pour que les effets puissent être mis en évidence dans l'essai comète. Dans ce cas, la sensibilité de l'essai a été validée par des traitements de contrôle à l'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Il ressort nettement de ces résultats, pris dans leur ensemble, que les effets génotoxiques apparents observés dans l'essai comète à la suite de l'exposition intermittente de fibroblastes humains à des CM TBF sont très probablement dus à une réponse cellulaire secondaire au champ plutôt qu'à des dommages causés directement, ou par le biais de DRO, à l'ADN par les CM TBF.

L'exposition aux CM TBF de cellules humaines permet de générer de manière systématique et reproductible des modifications du facteur de queue/moment de la queue du test comète dans certains types de cellules (fibroblastes humains primaires) sous des conditions de culture spécifiques (prolifération cellulaire). Ces effets sont mineurs et reflètent très probablement les réponses cellulaires à une faible accumulation de brins d'ADN scindés naturellement (cycle cellulaire, réplication de l'ADN, apoptose). Il convient de noter qu'une discussion critique des implications des résultats obtenus sur la base de publications existantes est difficile à mener en raison de l'hétérogénéité des dispositifs expérimentaux, des modèles biologiques et des concepts d'étude mis en œuvre. Cependant, l'idée selon laquelle les réponses cellulaires plutôt que l'induction directe de dommages à l'ADN

expliquent les effets de l'exposition aux CM dans le test comète est en accord avec les propriétés génotoxiques atypiques observées dans toutes les études, c'est-à-dire la dépendance de l'effet de l'intermittence de l'exposition et du type de cellules, la relation de dose à effet complexe observée et la nature latente et transitoire de l'effet.

### 3.4 Module 4: Perception du risque

#### Structures et effets de la communication sociale sur les rayonnements non ionisants

PI : Prof. Dr Peter J. Schulz, Health Care Communication Laboratory, Facoltà di Scienze della Comunicazione, Università della Svizzera Italiana, Lugano

La capacité de comprendre les informations relatives à la santé et de les exploiter efficacement pour se forger une opinion et faire des choix sur la conduite à adopter est le propre du consommateur averti en matière de santé. Concernant le RNI, la difficulté d'établir des stratégies de communication efficaces réside dans la nature même du risque : le risque lié au RNI n'est en effet pas encore connu, informer la population en général d'une manière appropriée et complète constitue un défi. Les conséquences du RNI sur la santé humaine et le bien-être renvoient à une question à laquelle les sciences médicale et biologique doivent apporter des éclaircissements. Au vu des résultats de la recherche, le RNI n'apparaît pas comme étant une source à haut risque pour la santé de la population bien que des effets néfastes sur la santé et le bien-être ne puissent être totalement exclus. Dès lors, il devient nécessaire d'informer la population au sujet des risques potentiels.

Durant les deux dernières décennies, les préoccupations croissantes qui se sont exprimées dans la société concernant les effets éventuellement néfastes du RNI se sont reflétées dans l'attention accrue et parfois alarmiste que différents médias ont accordée au sujet. Toute tentative de communication médiatique du risque lié au RNI se déroule donc dans un contexte délicat.

Le projet de recherche global avait pour objectif d'identifier les forces sous-jacentes liées à la perception et à la motivation donnant naissance à ce problème et de développer des stratégies destinées aux professionnels de la santé et à d'autres prestataires d'information, devant leur permettre de diffuser plus efficacement les informations relatives au RNI. Dans ce cadre, l'accent a été porté sur la perception des risques associés au RNI émis par les téléphones cellulaires, les antennes de la téléphonie cellulaire et des sources similaires, au sein des populations de langue alémanique et de langue italienne.

Le premier sous-projet a examiné la structure et le développement du comportement communicatif par rapport au RNI. A cet effet, deux analyses de contenu ont été menées, l'une portant sur un forum Internet géré par des activistes et l'autre sur les médias suisses, l'idée ayant été de recueillir un premier jet de données permettant de fonder des stratégies efficaces de communication visant à informer la population de différentes régions linguistiques au sujet du RNI. Une analyse de contenu est une méthode consistant à définir, puis à dénombrer, des éléments présentant un certain intérêt et figurant dans de grands corps de texte.

Le deuxième sous-projet a analysé les réactions de la population relatives à un communiqué de presse rejetant la possibilité que le rayonnement émis par les antennes de téléphonie mobile puisse exercer des effets sur la santé. Plus particulièrement, la perception du risque lié au RNI et l'évaluation du texte ont été évaluées pour quatre types de sources d'informations différentes en présentant un message identique sous la forme d'un reportage, mais en indiquant des sources différentes, affectées de différentes crédibilités, à 240 consommateurs/visiteurs de supermarchés au Tessin.

Dans le troisième sous-projet, un sondage a été réalisé simultanément à Lugano (TI) et à Winterthur (ZH) dans le but de déterminer si la région linguistique avait une incidence sur la perception du risque, le comportement et les connaissances en matière de RNI. Parallèlement au questionnaire, une expérience a été menée dans le but de tester de quelle manière la recommandation d'une mesure de précaution contre les effets du RNI, exposée dans une brochure d'informations, affecte la perception du risque, et de vérifier si l'effet est fonction de la formulation de la mesure. 640 consommateurs/visiteurs de supermarchés du Tessin et d'une région alémanique du pays ont participé à cette sous-étude. Cela a été répété avec 400 personnes dans le sous-projet 4, dans lequel était testé uniquement le message de précaution neutre en incluant cependant pleinement les attributs psychologiques liés à la perception du risque (ces attributs n'ont été pris en compte dans le sous-projet 3 que de manière rudimentaire).

La structure des forums Internet permet la participation de tout un chacun. Cependant, les niveaux d'information et l'engagement civique ne sont pas répartis uniformément dans la population et ils ne sont pas non plus répartis également dans la population inquiète des effets du rayonnement. L'analyse des données a confirmé qu'il existait sur le forum un groupe restreint de contributeurs, très prolifiques, la majorité des participants ayant contribué bien moins intensément à l'exercice. Les données sur les médias ont révélé que les articles journalistiques ont généralement été rédigés à l'occasion d'un événement marquant, comme la construction d'antennes de téléphonie mobile ou, mais à un degré de fréquence légèrement moindre, les initiatives politiques. La manière dont les journaux ont couvert le sujet revenait à focaliser l'attention sur les antennes et de la sorte à passer relativement sous silence les risques liés aux appareils tels que les téléphones eux-mêmes, largement considérés comme la source de rayonnement la plus importante. Il est intéressant de constater que la tendance à accorder plus d'attention au thème du RNI dans les journaux a touché exclusivement la Suisse alémanique alors qu'on a noté un intérêt plutôt décroissant dans trois journaux de langue italienne, mais partant d'un niveau élevé.

D'autres résultats indiquent qu'en matière de perception du risque lié au RNI, c'est l'attitude pré-existante à l'égard d'effets possibles exercés par le RNI sur la santé qui détermine l'opinion et non la source d'information ni la crédibilité de celle-ci. Curieusement, les répondants qui associaient le RNI à un grand risque avant l'expérience ont vu leur anxiété s'aggraver après la lecture du message rassurant sur le risque. Cette modification psychique était indépendante de la source d'information. Alors qu'en général les Suisses italophones étaient bien plus inquiets au sujet des risques liés au RNI, les messages de précaution n'ont pas conduit à une appréhension accrue parmi les échantillons de population étudiés en Suisse alémanique et au Tessin.

La comparaison de trois messages différents, un message neutre, un message digne de foi et un message axé sur la responsabilisation, a montré que le dernier d'entre eux a été le plus apprécié même si aucune différence n'a pu être constatée sur le plan des effets produits. Les résultats concernant le rôle des attributs psychologiques dans la perception du risque paraîtront prochainement et donneront des indications sur les visions du monde véhiculées par différentes cultures (mesurées à l'aide de 12 critères), le désir de contrôle (mesuré à l'aide de 20 critères), le locus de contrôle de la santé (mesuré à l'aide de 18 critères), et l'intolérance à l'incertitude (mesurée à l'aide de 22 critères).

Des études antérieures avaient montré que les prédispositions affectaient les résultats de la communication. Le résultat selon lequel les personnes qui perçoivent le risque lié au RNI comme élevé sont encore plus anxieuses après avoir reçu un message conçu pour dissiper leurs craintes, indépendamment de la source d'information du message, est à mettre en relation avec cela, mais ouvre aussi une nouvelle perspective. En effet, les individus inquiets pourraient ne pas avoir simplement pas reçu le message destiné à réduire leurs inquiétudes, mais pourraient en fait tourner celui-ci en son opposé. En d'autres termes, les personnes fortement inquiètes au sujet des effets du RNI sur la santé ne parviennent pas à entrer dans une conception diamétralement opposée à la leur. Cette inhibition se révèle indépendante de la source et pourrait constituer un sérieux écueil à une planification de la communication.

### **Affects et perception des rayonnements non ionisants: conséquences pour la communication des risques**

*PI :Prof. Dr Michael Siegrist, Consumer Behavior, Institute for Environmental Decisions (IED), Ecole polytechnique fédérale [EPF] Zurich*

On sait peu de choses au sujet de l'impact des expositions à long terme au rayonnement des téléphones mobiles et des stations de base de la téléphonie mobile, et si de telles expositions peuvent induire des effets néfastes sur la santé. Les préoccupations à ce sujet sont de plus en plus largement partagées par la population d'autant plus que cette technologie jouit d'une croissance rapide.

Il ressort de nombreuses recherches que les experts et les profanes ont une perception différente du risque. Alors que les estimations du risque des experts sont souvent corrélées à des données statistiques, ce sont des aspects purement qualitatifs qui déterminent les risques perçus par les profanes. Dans l'identification des facteurs exerçant une influence sur la perception de différents dangers, les chercheurs se fondent volontiers sur le paradigme psychométrique. Dans cette approche, très « populaire » dans le milieu de la recherche, les participants utilisent un certain nombre

d'échelles d'évaluation pour évaluer un ensemble de risques. Par exemple, ils évaluent chaque danger en fonction de la gravité des conséquences (avec quel degré de probabilité ces conséquences seront-elles fatales ?). La plupart de ces études présentent aux participants un ensemble de risques très hétérogène allant des boissons alcoolisées à l'énergie nucléaire. Cette approche peut servir à élucider la question de savoir pourquoi divers risques sont perçus différemment par tout un chacun. Cependant, le paradigme psychométrique néglige les différences dans la perception du risque chez les profanes, s'exposant ainsi à diverses critiques. La question de savoir pourquoi diverses personnes perçoivent différemment la même technologie est importante et elle n'a pas reçu de réponse satisfaisante à ce jour. Selon des propositions récentes, l'affect, dont le rôle a été négligé dans la plupart des études, pourrait être un important facteur de la perception du risque. Il pourrait en effet jouer un rôle de premier plan dans l'évolution des attitudes et des opinions à l'égard du RNI et il est nécessaire de mieux cerner les incidences possibles des stratégies de communication du risque sur l'affect lié au RNI.

L'affect est un facteur déterminant de la perception et du comportement. Il a été décrit comme étant « la qualité spécifique de la « bonté » ou de la « méchanceté » (1) vécue comme un état émotionnel (conscient ou non) (2) délimitant la qualité positive ou négative d'un stimulus. Les réponses dues à l'affect sont rapides et automatiques. » (Slovic et al. 2002).

Le test d'association implicite (TAI) permet de mesurer l'affect provoqué par une technologie. Il mesure les attitudes implicites par le biais des latences des réponses dans les évaluations automatiques et surmonte ainsi les problèmes associés au questionnement direct des personnes au sujet de leur attitude à l'égard d'un objet. Il faut noter que le TAI est le plus courant des tests utilisés, mais il ne constitue pas l'unique moyen de mesure des attitudes implicites. Par exemple, l'affect a été mesuré par le biais de techniques d'imagerie dans lesquelles, entre autres, les répondants sont invités à classer chacune des associations sur une échelle allant de mauvais à bien. Les moyennes de ces évaluations peuvent être considérées comme un affect provoqué par un certain danger, corrélé aux risques perçus. L'avantage de la tâche d'association, cependant, réside en ce qu'elle procure une information plus spécifique qu'une valeur numérique indiquant un affect positif ou négatif. Les associations peuvent être classées en catégories et cette procédure procure des informations au sujet des images qui sont le plus souvent associées à un danger donné.

Le projet de recherche avait pour objectif de définir les facteurs déterminant les risques et les avantages perçus en relation avec la communication mobile, et d'étudier la question de l'acceptation de cette technologie. Plus particulièrement, il a mis l'accent sur le rôle joué par l'affect dans la perception du risque dans la mesure où il est admis que l'affect peut constituer un important raccourci dans la prise de décision. Dans une première étape, un test valide et fiable intitulé SC-IAT (Single Category Implicit Association Test) a été développé. L'analyse des données a été basée sur 61 participants, qui étaient des experts en CEM, des opposants aux stations de base de téléphonie mobile et des personnes de la population en général. Les groupes ont été formés en fonction de l'âge, du sexe et de l'éducation.

Dans le deuxième sous-projet, l'affect a été mesuré en mettant en œuvre une technique d'association libre indiquant quel type d'image vient à l'esprit des personnes lorsqu'elles pensent à une station de base de téléphonie mobile. Une enquête a été effectuée sur 503 personnes de la zone urbaine zurichoise, suivie par une interview personnelle réalisée au domicile du répondant.

Dans le troisième sous-projet, ont été examinées les manières dont la peur et la colère déterminent les perceptions des avantages et des risques, ainsi que l'acceptation d'une technologie. A la suite des interviews à domicile, le même échantillon de 503 participants a été invité à remplir un questionnaire papier concernant une grande palette de critères sur le thème de la communication mobile. Vingt-huit variables ont été utilisées pour mesurer le contrôle, l'équité, la colère, la peur, l'acceptation ainsi que les perceptions des avantages et des risques.

Le quatrième sous-projet s'est concentré sur les préférences de la population envers les emplacements des stations de base, se focalisant sur les quatre caractéristiques clés qui s'étaient révélées déterminantes dans les prises de décision à propos de ces emplacements (en l'occurrence : localisation, apparence, construction et processus de décision) et sur l'impact de l'information spécifique fournie au sujet des préférences manifestées à propos des sites des stations de base.

Le cinquième sous-projet a exploré les effets des connaissances spécifiques au sujet de la communication mobile et des décisions à prendre quant aux emplacements des stations de base. L'éducation de la population ou une amélioration des connaissances spécifiques sont considérées comme des possibilités pour renforcer la capacité des profanes à choisir des solutions en connaissance de cause. En conséquence, a été émise l'hypothèse selon laquelle l'amélioration des connaissances spécifiques réduirait la perception négative relative aux stations de base et accroîtrait la perception critique à l'égard des téléphones mobiles, ce qui conduirait à de meilleurs choix des emplacements des stations de base et par là même à une réduction de l'exposition lors de l'utilisation du téléphone.

En général, les résultats d'un SC-IAT indiquent que les évaluations affectives de différents risques sont formulées très rapidement. En outre, il est apparu que l'évocation « stations de base » provoquaient des associations implicites positives dans un groupe d'experts de la communication mobile, des associations neutres dans un groupe de profanes, mais des associations négatives dans un groupe d'opposants aux stations de base. Cela indique bien que les experts, les profanes et les opposants aux stations de base présentent des réponses affectives différentes dans la perception des risques associés à la communication mobile.

Les répondants d'un grand échantillon de personnes vivant en Suisse ont associé en majorité des images négatives aux stations de base de téléphonie mobile. Il vaut la peine de noter que les répondants qui associaient des risques élevés aux stations de base décrivaient des images différentes de celles décrites par les répondants qui n'associaient que peu de risques aux stations de base. Il a été détecté en outre que la colère déterminait fortement la perception des avantages et l'acceptation des stations de base de téléphonie mobile ; la peur au contraire influençait fortement la perception du risque lié aux stations de base. En comparaison à d'autres caractéristiques, l'emplacement de la station de base est d'une importance capitale pour le citoyen. Les préférences concernant les emplacements des stations de base ont également été reliées à des croyances au sujet de la santé, à la confiance et à des variables démographiques. Finalement, le projet a démontré que les participants mis au bénéfice de connaissances techniques expriment des préférences quant aux emplacements des stations de base, qui vont davantage dans le sens d'une exposition moindre lors de l'utilisation du téléphone.

Au total, des conséquences pour la recherche et la pratique peuvent être déduites des résultats obtenus dans le cadre de cette recherche. Il a en effet été démontré que l'affect occupe une position centrale dans la perception des risques liés au RNI et qu'il est remarquablement différent selon que l'on est expert, opposant ou profane. En outre, il a été trouvé que la perception du risque dépend d'importantes variables démographiques et que les connaissances influencent les décisions concernant l'emplacement des stations de base. Par ailleurs, la preuve a été apportée que les citoyens préfèrent des stations de base couvertes et situées à distance.

L'ensemble des résultats montre que le simple affect sert à une première évaluation, rapide et simple des risques, en particulier de ceux liés à la communication mobile. Cette première évaluation nous montre si le stimulus est bon ou mauvais pour nous ou, en d'autres termes, s'il est significatif pour nous. Il avait été suggéré antérieurement que l'affect pourrait jouer un rôle important dans la perception du risque. En particulier, il a été soutenu que la population s'en référerait à « l'heuristique de l'affect » dans l'évaluation des risques parce qu'il est plus facile et plus efficace de se fier à des réactions affectives spontanées que d'analyser toute l'information disponible. Le cadre théorique de « l'heuristique de l'affect » distingue deux modes de pensée, le système expérimental et le système analytique. Alors que celui-ci repose sur les probabilités, le raisonnement logique et la preuve, celui-là s'en réfère quant à lui aux images, aux métaphores et aux récits. Il paraît probable que les profanes font appel au système expérimental plutôt qu'analytique lorsqu'ils sont invités à évaluer diverses situations de dangers.

Les résultats obtenus indiquent que l'âge et le sexe sont d'importantes variables démographiques influençant la perception de la communication mobile. Les jeunes répondants attribuent aux stations de base de la téléphonie mobile des risques plus faibles que ne l'estiment les répondants plus âgés. Vraisemblablement, la communication mobile leur est plus familière et la connaissance avait été identifiée comme un important facteur réduisant les inquiétudes que certaines personnes peuvent nourrir à l'égard du risque. En outre, les participants qui préfèrent une localisation centrée des stations de base villageoises (un site plus avantageux en ce qui concerne la protection de la santé

à titre préventif) étaient en grande majorité des personnes de sexe masculin. Ces participants attribuaient également moins de risques et des avantages plus importants à la communication mobile. Il est intéressant de noter que cela était également lié à de meilleures connaissances concernant les modes d'interactions entre téléphones mobiles et stations de base.



## 4. Conséquences scientifiques et besoins futurs

### 4.1 Module 1 : Dosimétrie et mesures d'exposition

#### Exposition du fœtus

L'objectif du présent projet était de caractériser l'exposition du fœtus en rapport avec les conditions de champ liées à différents types d'expositions électromagnétiques, en particulier en ce qui concerne le rapport des valeurs limites de base pour la femme et le fœtus. A cet effet, trois modèles informatiques anatomiques hautement détaillés de la femme enceinte au troisième, septième et neuvième mois de la grossesse ont été développés. De tels modèles anatomiques à haute résolution du fœtus n'existaient pas auparavant.

La création des modèles de fœtus constitue une importante étape dans le domaine de la dosimétrie. Pour la première fois, en effet, il est possible d'évaluer les courants induits et le TAS dans la mère et le fœtus dans des conditions d'exposition quotidiennes en environnement non contrôlé. Ces résultats sont importants pour l'évaluation du risque sanitaire et la recherche épidémiologique. Ils fournissent également une contribution précieuse à l'élaboration des directives et des valeurs limites puisqu'il est à présent possible de prédire l'exposition dans différents types de tissus. Lorsque les anciennes directives du CIPRNI ont été publiées dans les années 1990, la relation entre les champs externes (valeurs de référence) et les courants induits ainsi que les valeurs TAS (valeurs limites de base) pouvaient seulement être calculées pour des modèles géométriques homogènes simples (sphéroïdes allongés). Une prédiction de l'exposition de différents organes d'êtres humains n'était pas envisageable à l'époque.

Cela a changé lorsque la première base de données « Visible Human Male » a été publiée en novembre 1994 (U.S. National Library of Medicine). Plus tard, d'autres bases ont été développées pour différents types de corps. L'IT'IS Foundation a joué un rôle important dans l'élaboration de modèles humains (familles virtuelles et classes d'école virtuelles) et dans leur mise à disposition de la recherche. Les données à la base des modèles sont généralement obtenues à partir d'images provenant de l'imagerie par résonance magnétique (IRM). L'état de grossesse constituant une contre-indication à l'IRM, les données IRM concernant le fœtus font donc défaut. En conséquence, divers ensembles d'images médicales ont dû être combinés pour développer des modèles anatomiques cohérents des fœtus.

Les futures recherches sur l'exposition du fœtus se concentreront a) sur une approche générique permettant d'identifier les paramètres principaux déterminant l'exposition et b) sur l'augmentation de la flexibilité des modèles anatomiques développés dans le but de consolider l'interprétation des résultats en ce qui concerne leur applicabilité à la femme enceinte en général. En outre, l'élaboration de méthodes numériques améliorées sera prise en considération dans le but de perfectionner les techniques actuelles en ce qui concerne l'anisotropie et la représentation des caractéristiques électriques pertinentes des nerfs périphériques. La recherche expérimentale devrait en outre se pencher sur l'amélioration de l'évaluation des propriétés diélectriques des tissus dans la gamme des basses fréquences. De grandes incertitudes existent encore, en particulier en ce qui concerne la caractérisation complète de l'anisotropie, et peu de travaux ont été consacrés jusqu'à présent à la conductibilité des tissus aux basses fréquences en fonction de l'âge de ceux-ci.

#### Exposition cumulative du système nerveux central dans une plage de temps et de fréquence

L'objectif de ce projet a été de recueillir la somme de connaissances la plus complète possible concernant l'exposition à tous les systèmes de communication sans fil existants et de faire le rapprochement entre ces connaissances et les structures cérébrales internes. Plusieurs conditions opérationnelles, comme voyager en voiture, et les types de téléphones, portables et sans fil, ont été considérés pour une gamme de fréquences de 30 MHz à 6 GHz. Les variations dues à la main et à la façon de tenir le téléphone mobile étaient également prises en considération dans les expositions résultantes, exprimées en valeurs TAS concernant certaines régions spécifiques du cerveau de différents types de personnes (famille virtuelle). Des résultats similaires ont été en partie publiés dans la littérature scientifique, toutefois sous une forme moins complète et moins détaillée.

Certains des résultats obtenus concernent directement d'autres communautés scientifiques, comme celles des épidémiologistes, pour laquelle l'exposition dans les conditions de vie normale à l'intérieur, que ce soit dans le privé ou au travail, incluant les incidences multiples des champs, est particulièrement importante. Une autre conséquence scientifique utile se réfère aux études de provocation sur la physiologie cérébrale, telles que les études sur le sommeil humain, où elles sont susceptibles de contribuer à formuler des hypothèses concernant le mécanisme d'action.

Bien qu'un concept de doses n'existe pas à l'heure actuelle pour le RNI, il est d'usage de trouver l'effet cumulé dû à de nombreuses expositions différentes par intégration. Les outils et les résultats développés dans le cadre de ce projet permettent de calculer de telles doses intégrées en fonction du temps d'utilisation et des types d'exposition. Lorsque de nouveaux types d'exposition apparaîtront dans la vie quotidienne, il sera nécessaire de maintenir l'information à jour. Les futurs systèmes de communication mobile de quatrième génération, le LTE (Long Term Evolution), sont déjà opérationnels dans divers pays ; ils présentent une structure de signal et des accès techniques différents de ceux des générations précédentes. Il vaut également la peine de mentionner que les smartphones et autres dispositifs similaires seront utilisés dans une position différente par rapport au corps, loin du cerveau.

Les présentes études ont été limitées aux fréquences inférieures à 6 GHz. Il est à prévoir que dans le futur des fréquences nettement plus élevées, comme les fréquences d'ondes millimétriques telles que 60 GHz, seront utilisées afin de s'accommoder aux débits de données élevés.

#### **Observations microscopiques de cellules pendant l'exposition aux CM**

La littérature scientifique montre qu'un nombre considérable de conditions d'exposition ont été utilisées dans le passé pour cerner les effets biologiques des champs magnétiques TBF sur des cultures cellulaires. Le point commun à la plupart de ces expérimentations est que les cellules sont exposées à des conditions de champs particulières durant des périodes de temps définies et que l'analyse n'est effectuée qu'après l'exposition. Ces expériences se sont soldées par des conclusions allant de l'absence d'effets à des cassures accrues des brins d'ADN.

Toutefois, le mécanisme exact de l'interaction ayant lieu où les effets sont constatés reste inconnu. Ce projet a en particulier été motivé par la nécessité d'examiner plus à fond le mécanisme sous-jacent à la cassure accrue de brins d'ADN enregistrée. C'est pourquoi a été développé un système d'exposition TBF miniature, intégré à un système de microscopie, permettant ainsi l'imagerie de cellules vivantes et d'autres techniques microscopiques de pointe incluant la microscopie confocale et la microscopie fluorescente durant l'exposition TBF. Le projet a eu un important impact, le système ayant été appliqué avec succès dans le projet du PRN 57 du Prof. Primo Schär du Département de biomédecine à Bâle.

Avec la mise au point de systèmes d'exposition de plus en plus perfectionnés, permettant une imagerie de pointe en temps réel des cellules durant l'exposition, les chances de percées significatives dans la compréhension des mécanismes d'interaction entre les champs électromagnétiques et les cellules ont été considérablement augmentées. Le système d'exposition aux champs magnétiques TBF a ouvert la voie à des techniques plus sophistiquées, conçues pour l'investigation des champs électriques et de l'interaction des CEM HF modulés et à ondes continues avec des cultures cellulaires. D'une manière générale, on s'attend à ce que l'exploitation de cette technologie joue un rôle dans toute étude future portant sur le mécanisme d'exposition aux CEM.

## **4.2 Module 2 : Etudes en laboratoire et épidémiologie**

### **Effets des CEM sur le cerveau : modifications de l'EEG en phase de sommeil**

Le présent projet confirme et complète les recherches antérieures qui avaient mis en évidence le fait que les CEM HF modulés par impulsions, émis par les téléphones mobiles, avaient des incidences sur l'EEG humain. En particulier, à la suite d'une exposition modulée à 14 Hz, les auteurs avaient observé un accroissement moyen significatif de la puissance dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil, s'étant révélé surtout dans la seconde phase du second cycle du sommeil. Cependant, l'effet était nettement différent d'une personne à l'autre alors que l'architecture du sommeil demeurerait inchangée. Les observations selon lesquelles les CEM HF modulés par impulsions ont



une incidence sur l'EEG en phase éveillée et en phase de sommeil alors que les CEM HF à ondes entretenues ne les affectent pas, excluent la possibilité d'une action thermique. L'accroissement observé dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil indique que la modulation avec des composantes de fréquence se situant dans la gamme physiologique pourrait être suffisante pour produire un effet. Les enfants et les adolescents absorbant plus d'énergie par la tête que les adultes, les données préliminaires indiquant une absence de corrélation entre l'âge du groupe et les effets des CEM HF sur l'EEG en phase éveillée étaient inattendues.

En ce qui concerne les mécanismes impliqués, il est intéressant de noter que l'effet se manifestait dans les deux hémisphères même lorsqu'un seul d'entre eux était exposé ; ce résultat corrobore l'hypothèse des auteurs selon laquelle une structure cérébrale centrale telle que le thalamus peut intervenir de manière critique dans la manifestation de l'effet. D'un autre côté, l'effet ne dépendait pas de la profondeur de pénétration du rayonnement (limitation au cortex *versus* inclusion de structures subcorticales), ce qui indique que l'exposition directe des noyaux gris cérébraux/du thalamus pourrait ne pas être le facteur crucial.

L'analyse des tests cognitifs a mis en évidence le fait que la vitesse de réaction globale tendait à être plus faible durant l'exposition que durant le contrôle, les vitesses de réaction les plus faibles ayant été détectées dans les conditions de modulation pulsées à 217 Hz. Cependant, la précision de la performance des tâches cognitives semblait pour ainsi dire non modifiée. Particularité à relever, le fait que les participants aient été incapables d'identifier les phases d'exposition démontre que le champ n'a pu être perçu.

En conclusion, les résultats du présent projet sont scientifiquement significatifs et demandent que le projet soit poursuivi sur une base expérimentale plus serrée. Manifestement, les mécanismes des effets observés doivent être examinés de manière plus approfondie. Au vu de la variabilité de l'effet, la question de la reproductibilité dans le temps intrinsèquement aux sujets devrait être examinée dans une prochaine étape. De plus, la question des effets à long terme sur l'être humain devrait elle aussi être abordée. La plupart des recherches effectuées ayant porté sur des sujets jeunes et des enfants en bonne santé, il conviendrait d'envisager des études portant sur des sujets plus âgés et sur d'autres participants potentiellement sensibles, et même éventuellement sur des patients présentant des troubles neurologiques ou psychiatriques. Comme optique d'avenir, on peut concevoir de nouvelles applications des CEM HF, par exemple pour des investigations portant sur les mécanismes cérébraux ou pour des fins diagnostiques voire thérapeutiques.

#### **Effets des CEM sur le cerveau : modifications de la circulation sanguine cérébrale**

Le PIR a été utilisé pour mesurer la circulation et l'oxygénation sanguines cérébrales locales. Cette méthode optique utilisant la lumière infrarouge n'est pas directement influencée par les champs électromagnétiques. Toutefois, les mesures s'effectuent uniquement au niveau des régions corticales superficielles alors que des structures plus profondes comme les noyaux gris cérébraux et le tronc cérébral ne peuvent être atteints. En utilisant des CEM UMTS intermittents à des niveaux d'exposition typiques de ceux correspondant aux téléphones mobiles, mais présentant une modulation de type station de base, de petits effets statistiquement significatifs ont été détectés dans la circulation sanguine et l'oxygénation : premièrement, une baisse à moyen terme (de 80 s à 30 mn) de la concentration en déoxyhémoglobine a été observée en réponse à des expositions à 0.18 W/kg et à 1.8 W/kg dans le cadre des fluctuations physiologiques du cerveau ; deuxièmement, un changement à court terme (< 80 s) six fois inférieur à l'effet à moyen terme a été détecté, consistant en une augmentation des concentrations en oxyhémoglobine et en hémoglobine totale durant une exposition à 0.18 W/kg. En outre, le rythme cardiaque à moyen terme a été légèrement plus rapide à la suite de l'exposition haute dose comparé aux conditions de contrôle alors que les autres paramètres (bien-être subjectif, fatigue, performances de comptage) demeuraient inchangés.

Il est important de noter que dans les conditions de la vie courante, l'exposition à un rayonnement UMTS ayant une modulation de type station de base est nettement inférieure à celle mise en jeu dans la présente étude. D'un point de vue scientifique, il conviendra de s'assurer de la reproductibilité de ces résultats et par ailleurs des investigations devraient montrer si d'autres populations (sujets âgés, sujets jeunes, femmes et personnes se déclarant sensibles aux CEM) présentent des effets similaires. De plus, devraient être examinées non seulement l'exposition intermittente, mais également l'exposition continue à l'UMTS, ainsi que l'exposition aux CEM avec des fréquences porteuses

différentes, telles que celles utilisées par les systèmes WiFi, Bluetooth ou DECT. L'objectif commun de telles démarches devrait viser une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents.

#### **Étude de cohorte prospective sur l'influence des champs électromagnétiques haute fréquence sur la qualité de vie associée à la santé**

Des effets sanitaires à court terme, dus à l'exposition à des champs HF, ont été examinés antérieurement par des études randomisées appropriées, ou études de provocation, et elles n'ont sur le plan général pas mis en évidence de corrélation entre exposition HF et problèmes de santé. De tels types d'étude ne peuvent pas facilement être appliqués à l'investigation des effets à long terme, qui ont plutôt été appréhendés par des études transversales mesurant l'exposition et l'effet en un même moment. Toutefois, cette approche est fortement limitée en soi. La présente étude a utilisé un concept prospectif, potentiellement nettement supérieur, dans lequel l'exposition aux HF a été mesurée au niveau de référence alors que l'effet a été mesuré par comparaison de l'état de santé entre le moment de l'exposition et une année après. Cette étude a également tiré avantage du développement d'un exposimètre pouvant être porté par les sujets participant à l'étude. L'exposimètre a été utilisé pour valider un modèle d'évaluation des expositions HF dues aux stations de base, modèle dont le développement faisait partie intégrante du présent projet.

L'analyse des données de suivi n'a mis en évidence aucune corrélation entre exposition aux CEM HF et problèmes de santé, ceux-ci étant mesurés sur des échelles incluant maux de tête, insomnies et autres variables de la qualité de vie. Ainsi, les résultats sont en accord avec ceux de l'exposition à court terme, obtenus dans des études de provocation. Cependant, les résultats actuels sont en désaccord avec certains résultats d'études transversales, mais la conception transversale est sujette à des erreurs systématiques pouvant générer des associations positives. Les résultats d'une étude prospective sont donc importants du point de vue théorique, bien qu'ils puissent eux aussi comporter des erreurs systématiques, en particulier des erreurs de sélection.

Les résultats provenant des exposimètres ont également facilité la surveillance systématique, possibilité attendue depuis longtemps, de l'importance relative des différentes sources de rayonnement HF. Dans la présente étude, l'exposition à des champs lointains était dominée par trois sources, à savoir d'autres téléphones, les stations de base et les systèmes de téléphonie sans fil (DECT ; l'utilisation de son propre téléphone n'étant pas comprise). Les niveaux d'exposition moyens sont très bas comparés à ceux des normes d'exposition actuelles.

En résumé, la présente étude a utilisé une approche inédite importante dans l'étude de la relation entre exposition HF et qualité de vie associée à la santé. Aucune relation entre exposition HF estimée et symptômes de problèmes de santé n'a été détectée. Cependant, il faut garder à l'esprit que les niveaux d'exposition étaient ceux auxquels la population en général est soumise, qui sont inférieurs de plusieurs ordres de grandeur aux valeurs limites d'exposition, et que, par conséquent, les résultats ne disent que peu de choses au sujet des effets possibles à des niveaux d'exposition HF plus élevés. L'information au sujet des sources d'exposition HF auxquelles la population en général est soumise est bienvenue, mais nécessite évidemment un suivi sur d'autres catégories de population et des échantillons plus importants.

### **4.3 Module 3: Biologie cellulaire**

La raison d'être la plus importante des études en laboratoire *in vitro* est de fournir des informations sur les mécanismes biophysiques et biochimiques qui seraient susceptibles d'être responsables des effets observés au cours des études épidémiologiques et des études sur des volontaires. Les résultats des recherches *in vitro* pourraient déboucher sur un cadre expérimental « mécanistique » destiné à l'évaluation des études chez l'espèce humaine.

Lors de l'élaboration du PNR 57, il a été décidé d'examiner certains thèmes choisis concernant l'exposition aux CM TBF et aux CEM HF. Lors de la sélection des thèmes les plus pertinents, les recommandations figurant au programme de l'OMS sur la recherche en matière de CEM TBF (2007) et celles figurant à son programme sur la recherche en matière de CEM HF (2006) ont été prises en considération. Les projets se sont focalisés sur les effets dus aux CM TBF (émis par les lignes à haute tension, les installations électriques domestiques et les appareils électroménagers) et concernant l'intégrité de l'ADN cellulaire (effets génotoxiques), et des effets dus aux CM HF (rayonnement émis

par les téléphones mobiles et les stations de base de téléphonie mobile) sur les réponses au stress cellulaire, les voies de transduction du signal cellulaire et la mort cellulaire programmée.

#### **Effets des CM TBF sur l'ADN**

En se basant uniquement sur des preuves épidémiologiques, le CIRC a classé les CM TBF comme « peut être cancérigène pour l'homme » (catégorie 2B). Cependant, les études animales et les études en laboratoire in vitro n'ont apporté aucune preuve en faveur d'une telle présomption. Plus particulièrement, les mécanismes biophysiques et biochimiques qui pourraient être responsables des effets observés dans les études épidémiologiques sont inconnus. Une des questions les plus controversées est celle d'admettre que l'exposition à des CEM à basse énergie (CM TBF et CEM HF) est génotoxique (endommagement de l'ADN). Il ressort des résultats obtenus par Schär et collaborateurs que les CM TBF n'endommagent l'ADN ni directement ni indirectement, mais qu'ils exercent un effet d'inhibition sur le processus de réparation de l'ADN. Ceci pourrait alors causer une accumulation d'ADN non réparé qui pourrait apparaître comme quantité accrue d'ADN endommagé. L'ADN endommagé en apparence peut apparaître dans les cellules soit spontanément (comme produit d'un processus physiologique normal) soit comme conséquence de l'action d'agents nocifs (chimiques ou physiques). Schär et collaborateurs supposent que l'accumulation spontanée d'ADN endommagé dans les cellules pourrait ne pas présenter de risques majeurs pour les cellules dans la mesure où de tels dommages sont probablement facilement réparés même si la réparation était retardée par les expositions aux CM TBF. Cependant, un tel retard dans la réparation du dommage, induit par des CEM TBF, pourrait avoir des conséquences plus sérieuses si le dommage était causé par des agents physiques ou chimiques.

Les résultats demandent à être confirmés par d'autres groupes de recherche. Il sera également nécessaire de déterminer l'impact de l'ADN endommagé sur les processus cellulaires et sur la transformation d'une cellule normale en cellule tumorale.

#### **Effets des CEM TBF sur *C. elegans***

*C. elegans* a été introduit par le groupe de recherche de Pomerai (Daniells et al. 1998) en tant que modèle biologique pour l'étude des effets des CEM HF. Les premiers résultats indiquaient que les CEM HF exerçaient des effets non thermiques sur le processus de réponse au stress. Cependant, des études ultérieures du même groupe ont montré que ces résultats étaient probablement dus à une dosimétrie imprécise de la chambre d'exposition (Dawe et al. 2006). La publication de Pomerai et al. (2000) parue dans *Nature* a ensuite été rétractée (rétractation: *Nature* 2006, 440, 437). Finalement d'autres études encore ont mis en évidence une absence de réponse qui renforçait l'idée selon laquelle le modèle basé sur *C. elegans* ne répondait pas aux CEM HF (Dawe et al. 2008 ; 2009).

Les groupes de Goloubinoff et Mevissen ont travaillé sur deux souches mutantes différentes de *C. elegans* pour explorer la réactivité de ce modèle aux CEM HF. Aucun effet clair dû à l'exposition à des CEM HF non thermiques n'a pu être mis en évidence (l'augmentation de la fluorescence GFP observée dans une des souches transgéniques est encore trop sujette à caution pour être considérée comme un effet positif clair). Ainsi, leurs résultats sont en concordance avec les études antérieures mentionnées. Au total, *C. elegans* ne présente aucun changement induit par des CEM.

L'observation de Mevissen selon laquelle les CEM HF pourraient modifier certaines protéines dans des cultures cellulaires est intéressante, mais cette étude est encore trop peu avancée pour être définitivement interprétée. Des résultats complémentaires sont nécessaires.

## **4.4 Module 4 : Perception du risque**

### **Généralités**

Il n'est pas facile d'informer la population de manière adéquate sur les risques et les avantages de la communication mobile. Informer de manière appropriée consiste à transmettre l'état des connaissances actuelles d'une manière objective et pédagogique. Il est tout aussi important que les profanes soient informés de manière qu'ils comprennent et se fient à l'information. En général, les risques sont jugés plus élevés par les profanes que par les experts dans les cas suivants : a) les dangers sont inconnus ; b) les technologies ne sont pas familières ; c) les expositions sont peu influençables ou peu contrôlables ; d) les risques ne sont pas compensés par des avantages et ceux qui

sont exposés ne sont pas ceux qui en bénéficient (injustice sociale) ; e) des conséquences sérieuses éventuelles ne peuvent pas être exclues (effets à long terme, atteintes à la santé des générations futures). Tous ces points s'appliquent à la communication mobile et c'est pourquoi ils posent un réel défi à la communication du risque. Pour informer la population de manière exhaustive, il y a lieu de prendre en compte les inquiétudes, et les attitudes de la population doivent elles aussi être prises en considération dès lors que le comportement ne dépend pas uniquement de faits ou de la réalité objective, mais également de la réalité subjective. Dans un projet récent portant sur la mise au point de stratégies optimales destinées aux professionnels de la santé et autres prestataires d'informations, il a été conclu que « dans le meilleur des cas, la communication du risque n'est pas de type « top down » allant des experts aux profanes, mais plutôt un dialogue constructif entre tous ceux qui sont impliqués dans un débat particulier » (Löfstedt, 2010).

Il est important de saisir les raisons pour lesquelles les risques dus au RNI peuvent être différemment perçus. Les opposants aux technologies de communication mobile soutiennent que dans les cas du tabagisme ou de l'amiante, les dangers qui sont effectivement apparus et qui présentaient de sérieuses menaces pour la santé ont été trop longtemps négligés par les experts. De leur point de vue, les risques dus au RNI sont également sous-estimés et ils affirment parfois que le gouvernement et l'industrie dissimulent des informations relatives aux risques sanitaires. Les défenseurs de la communication mobile au contraire soulignent ses immenses avantages pour la société et estiment que de devoir tester les technologies avant leur mise sur le marché contrecarrerait le progrès technologique. De plus, ils affirment que jusqu'à présent il n'existe pas de preuves indiscutables concernant des risques sanitaires sérieux dans le cadre des TAS acceptés par les autorités.

Dans une étude de Siegrist et collaborateurs (2005), les inquiétudes dues aux CEM ont été associées à l'opinion selon laquelle la plupart des substances chimiques provoquent le cancer. Il apparaît que pour certaines personnes la technologie est en elle-même associée au mal. Les auteurs soutiennent que pour certaines personnes une explication scientifique n'est pas valable en soi et n'influence donc pas leur perception du risque. La croyance en des phénomènes inexplicables pose donc un défi particulier à la communication du risque.

Les médias sont des acteurs clés de la communication de l'information sur les risques. La manière de rapporter peut conduire à une amplification ou une atténuation de la perception du risque. Une manière d'évaluer la situation en Suisse consiste à procéder à une analyse du contenu des médias. Une approche similaire a été réalisée récemment en Allemagne (Elvers et al., 2009). La présente étude de Schulz a montré que, sur un forum Internet géré par des activistes et dans les journaux, la principale attention est dévolue aux stations de base et que la construction d'une nouvelle station de base est une occasion courante de faire paraître des articles dans les journaux. Les appareils mobiles ont été couverts six fois moins que les stations de base. Cela contraste avec une étude effectuée au Danemark sur la base d'un questionnaire, étude dans laquelle les inquiétudes au sujet du rayonnement des téléphones mobiles, du rayonnement des stations de base et de la pollution ont été évaluées (Kristiansen et al. 2009). Alors que le plus grand nombre de répondants était inquiet au sujet de la pollution (82%), les inquiétudes au sujet du rayonnement des téléphones mobiles (28%) étaient supérieures à celles du rayonnement des stations de base (15%). Dans d'autres études, les inquiétudes au sujet du rayonnement des stations de base sont supérieures à celles relatives aux téléphones mobiles (cf. Cousin and Siegrist, 2010). D'une manière générale, il apparaît que la couverture du sujet par les médias n'est pas un indicateur fiable du taux d'inquiétudes d'une population.

L'analyse des articles de journaux permet d'évaluer la perception des questions de santé. Un résultat majeur de l'étude de Schulz a été de montrer que les conséquences sanitaires négatives douces telles que les maux de tête ou les insomnies sont souvent décrites comme un fait établi alors que cela est moins le cas pour des affections sérieuses comme le cancer. L'évaluation négative générale des effets sur la santé n'a pas montré de différences entre les groupes sources (intérêt commercial, politique, sciences, simples citoyens). En Allemagne, les journaux ont également relié le thème « téléphones mobiles et santé » aux risques et aux dangers, mais ils n'ont pas précisé la nature de cette relation (Elvers et al., 2009).

Il existe une preuve de différences microculturelles entre Suisses alémaniques et Suisses italophones. La non cohérence des résultats entre les deux groupes nécessite le fait d'affiner les recherches à ce sujet.

### **L'affect, point central de l'évaluation du risque lié aux CEM**

Un des axes principaux du module 4 a été l'investigation du rôle de l'affect dans l'évaluation du risque étant donné que cet aspect avait été négligé dans la plupart des études antérieures. L'information fournie par les autorités est principalement basée sur les capacités cognitives des destinataires, admettant implicitement que l'attitude changera avec l'accumulation des connaissances. Cependant les attitudes comportent également des composantes affectives et les jugements affectifs pourraient être indépendants de jugements relatifs au comportement (Siegrist et al., 2005). Deux systèmes peuvent être distingués dans l'évaluation du risque : le « système expérimental » se basant sur les images, les métaphores et les récits, et le « système analytique » se basant sur les probabilités, le raisonnement logique et les preuves. Dans l'évaluation des dangers, les profanes tendent à utiliser le système expérimental. Il autorise une première évaluation permettant de décider rapidement si un stimulus est bon ou mauvais. Selon Siegrist, les images sont marquées par des affects dans l'esprit des gens ; un « pool d'affects » individuel contient les marqueurs positif et négatif associés consciemment ou inconsciemment aux images. Dans le cas de la communication mobile, le danger est considéré avec une forte suspicion en raison du fait que le rayonnement est présenté comme « électrosmog ». C'est pourquoi l'attribut négatif de la pollution de l'air est également attribué au rayonnement sans aucune preuve quant au réel danger qu'il présente pour la santé.

### **Importance de la confiance dans la communication du risque**

La présente étude de Siegrist démontre clairement que les relations affectives à la communication mobile sont fortement liées à la confiance. Dans le test des associations implicites SC-IAT (single category – implicit association test), une forte corrélation fut découverte entre la réponse aux stations de base et la confiance. Cette dernière est particulièrement importante lorsque les gens n'ont pas connaissance du danger. Il est nécessaire de poursuivre les recherches pour analyser la relation précise existant entre les notions de confiance et d'affect.

L'importance de la confiance en rapport avec une communication du risque efficace a également été démontrée de manière remarquable dans une étude danoise récente (Nielsen et al. 2010). L'étude a en effet montré que la communication du risque ne peut être efficace que si la personne recevant le message a confiance en celle qui le transmet. La confiance régnant entre informateur et informé est en effet une condition préalable à toute communication efficace. De plus, le message doit être digne de confiance lui aussi.

La présente étude de Siegrist a confirmé que la confiance était accordée en fonction des acteurs : les institutions de recherche et les autorités fédérales étaient considérées comme plus dignes de confiance et plus compétentes que les activistes et l'industrie. L'analyse a également révélé que la perception du risque avant expérience exerçait un effet profond dès lors que les personnes présentant différents niveaux d'inquiétudes n'accordaient pas la même confiance aux différents acteurs. Les institutions de recherche avaient la confiance des personnes inquiètes et non inquiètes alors que l'industrie n'obtenait la confiance d'aucune d'elles. Les personnes inquiètes accordaient une grande confiance aux activistes et un message destiné à diminuer les niveaux d'inquiétudes avait l'effet contraire dans le groupe des personnes inquiètes. Ainsi les changements autoreportés par les personnes inquiètes dépendaient fortement des inquiétudes présentes avant expérience. Ce résultat a besoin d'être confirmé par des études complémentaires puisqu'il était inattendu. Qu'une série de mesures de précaution puisse changer l'attitude des gens à l'égard des stations de base dans les deux directions a constitué un des résultats marquants d'une étude récente (Nielsen et al., 2010). D'autres auteurs ont rapporté que les conseils de prudence augmentaient les inquiétudes (Wiedemann et Schütz, 2005).

### **Attitude à l'égard des stations de base**

Les stations de base recèlent des éléments de scénarios de risque typiques : a) l'exposition au rayonnement est involontaire et le sentiment de contrôle personnel fait défaut ; b) les conséquences des expositions sur la santé sont inconnues, et les avis des experts divergent sur ce point ; c) les profanes sont peu au courant des aspects technologiques du rayonnement émis par les stations de base.

Il a été montré, en se basant sur les SC-IAT, que les réponses affectives aux risques perçus différaient d'un groupe de répondants à l'autre. Les stations de base suscitaient des associations implicites positives chez les experts de la communication mobile, des associations neutres chez les profanes

et des associations négatives chez les opposants aux stations de base. Une analyse détaillée a révélé que la peur avait d'importantes répercussions sur la perception du risque alors que la colère était une composante majeure de la perception des avantages.

Parmi les variables démographiques ayant une incidence sur la perception du risque, l'âge s'est révélé particulièrement important. Les jeunes répondants attribuaient moins de risques aux stations de base que les répondants âgés. Cela pourrait être dû au fait que les jeunes personnes sont plus informées au sujet de la communication mobile (Cousin and Siegrist, sous presse). On sait en effet que de bonnes connaissances réduisent les inquiétudes des gens au sujet des risques.

Les connaissances acquises ont montré un effet positif sur les décisions réalistes au sujet des stations de base. Se procurer des informations revenait à diminuer le taux d'inquiétudes et à augmenter l'affect explicite positif. De plus, se procurer des informations revient à reporter les inquiétudes concernant la santé sur les téléphones mobiles au lieu des stations de base, les téléphones étant une source de rayonnement plus problématique (Cousin et Siegrist, sous presse).

#### **Emplacement des stations de base**

En Suisse, un des points controversés est celui de l'emplacement des stations de base. Les experts conviennent qu'une station de base située au centre d'un village minimise l'exposition au rayonnement de la population. Les téléphones mobiles émettent davantage de rayonnement lorsque la station de base correspondante est très éloignée. Cependant, l'étude a montré que les répondants avaient une préférence pour les stations de base situées à distance. De plus, ils ont opté pour des sites de stations de base couverts, sans doute aussi pour des raisons esthétiques.

Un résultat majeur de l'étude a été que le fait de se documenter avait une incidence sur le réalisme des décisions relatives aux stations de base. Les participants ayant acquis des connaissances ont préféré les emplacements au centre du village. Ils ont également présenté un affect implicite plus positif comparé à celui du groupe de contrôle. Une analyse conjointe – une approche plutôt nouvelle en matière d'évaluation environnementale – effectuée dans un grand échantillon a montré qu'il était jugé important que les résidents puissent participer aux processus de décision concernant l'emplacement des stations de base.



## 5. Conséquences sur l'environnement et la santé

### 5.1 Module 1 : Dosimétrie et mesures d'exposition

#### Exposition du fœtus

Fait important, le projet a montré que si les champs incidents respectent les niveaux de référence définis pour la population générale au niveau du fœtus, les valeurs limites de base sont respectées dans tous les cas examinés. Cependant, en raison de la faible marge de sécurité, les résultats actuels ne permettent pas une généralisation, en d'autres termes, la recherche doit être poursuivie afin de mieux pouvoir caractériser les limites d'incertitude.

Les simulations concernant les tables de cuisson à induction ont présenté des problèmes et les chercheurs affirment : « Les dispositifs respectant les niveaux de référence mesurés selon [CENELEC, 2002] dépasseront de manière significative les valeurs limites à des distances plus faibles et, par conséquent, les valeurs limites de base qui concernent l'exposition et de la mère et du fœtus. Considérant les grands gradients du champ magnétique dans l'environnement immédiat de la source, il est probable que cela vaut également pour d'autres appareils ménagers produisant des champs magnétiques forts ». Les futures révisions des normes des produits devraient prendre en compte de manière appropriée les caractéristiques des champs magnétiques en considérant tous les scénarios d'exposition réalistes possibles ainsi que les positions de l'utilisateur, et accorder une attention suffisante aux particularités anatomiques de la femme enceinte.

En outre, de telles expositions sont particulièrement préoccupantes dans un cadre professionnel. Pour pratiquement tous les scénarios d'exposition, les valeurs limites de base définies pour la population générale peuvent être dépassées pour le fœtus si la mère est exposée à des niveaux d'exposition définis pour le cadre professionnel. En ce qui concerne les principes de précaution concernant en particulier l'enfant à naître, les autorités devraient envisager des mesures de protection supplémentaires pour empêcher l'exposition de la femme enceinte à des champs plus intenses, par exemple en fixant des valeurs limites de base pour la population en général s'appliquant à l'exposition de la femme enceinte sur les lieux de travail.

Les auteurs affirment que « En résumé, les résultats de la présente étude devraient être considérés comme une incitation adressée aux organismes de normalisation à revoir les normes actuelles relatives aux produits concernant l'évaluation des champs TBF émis par les appareils ménagers, et de les réviser si nécessaire. Les fabricants d'équipements de cuisine à induction ou d'autres appareils électroménagers peuvent chercher, dans une optique prévoyante, à améliorer leurs produits à des fins de réduction des expositions. »

#### Exposition cumulative du système nerveux central dans une plage de temps et de fréquence

Les discussions sur les effets des kits mains libres se sont poursuivies dans plusieurs pays. On a soutenu que les casques d'écoute pourraient augmenter la quantité de rayonnement parvenant à l'oreille. Les résultats du présent projet ont démontré clairement que cela n'était pas le cas.

Les résultats de l'exposition de comparaison dans un environnement réel, lors de la conduite d'une voiture, ont mis en relief les niveaux de puissance très faibles des téléphones opérant avec le système UMTS, qui sont inférieurs d'un facteur 100 à ceux du système GSM. La situation d'exposition évolue graduellement vers les systèmes sans fil WLAN (Wireless Local Area Networks), aussi bien au travail qu'à la maison, mais les situations à l'intérieur des habitations diffèrent de celles à l'extérieur où on est soumis au rayonnement des stations de base. Un des résultats de la présente étude montre que l'exposition est similaire dans ces deux cas, mis à part le fait que le rayonnement peut maintenant provenir de différents côtés simultanément. L'exposition réelle est dans les deux cas très faible.

#### Observations microscopiques de cellules pendant l'exposition aux CM

Ce projet est motivé par l'intérêt croissant porté à la question de savoir si les CEM provoquent des effets biologiques non thermiques au niveau cellulaire tout en concernant également le programme de recherche 2006 de l'OMS. Le projet a mis au point un outil unique, bien caractérisé, intégré

dans un microscope optique, adapté à l'étude des effets des CEM TBF sur des cellules vivantes. L'imagerie des cellules vivantes permettra de tester divers processus moléculaires cellulaires spécifiques, significatifs en ce qui concerne le cancer ou le système nerveux central. Les résultats de ces études devraient permettre de distinguer les mécanismes spécifiques et d'extraire les paramètres d'exposition significatifs. Il pourrait apporter une contribution au domaine de l'évaluation du risque et à de nouvelles approches concernant les traitements médicaux.

## 5.2 Module 2 : Etudes en laboratoire et épidémiologie

### Effets CEM sur le cerveau : modifications survenant sur l'EEG en phase de sommeil

Les résultats fournissent des preuves supplémentaires montrant que l'exposition à des CEM HF modulés par impulsions, comme ils sont émis par les téléphones mobiles, affecte la physiologie cérébrale humaine par un mécanisme non thermique. En particulier, les composantes à modulation de fréquence à l'intérieur d'une gamme physiologique induisent des effets à court terme sur l'EEG de jeunes volontaires en bonne santé. L'effet spécifique d'augmentation de puissance dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil durant le sommeil lent (non-MOR) n'est pas susceptible d'être une source d'inquiétudes, car les fuseaux du sommeil sont considérés comme un aspect du « bon sommeil ». Il en serait autrement si les fuseaux du sommeil avaient été supprimés. Il est également rassurant de constater que les qualités de sommeil objective et subjective ne sont pas affectées. Contrairement à ce qu'on prétend souvent, les participants n'ont pas senti s'ils étaient ou non exposés aux CEM HF. De plus, il n'existe actuellement aucune démonstration selon laquelle les enfants et les adolescents exposés aux CEM HF y sont plus sensibles. L'impact mineur constaté sur les tests de cognition pourrait être dû au fait que le signal modulé par impulsions à 217 Hz a réduit la vitesse de réaction, la précision de la performance restant inchangée. Cette observation demande confirmation. Tous les résultats correspondent à des réponses à une exposition à court terme ; ils ne peuvent pas servir à prévoir les effets potentiels à long terme. Alors que le mécanisme d'action reste peu clair, certains résultats suggèrent que le thalamus pourrait être impliqué.

En résumé, les présents résultats n'apportent pas la preuve que des expositions aux CEM intenses ont des effets négatifs sur le cerveau humain. Cependant, le fait que les CEM affectent la physiologie cérébrale est une raison suffisante pour maintenir en vigueur les réglementations concernant la limitation des expositions aux CEM. Les sujets inquiets au sujet des risques potentiels que présente le téléphone cellulaire pour la santé devraient être encouragés à utiliser des casques d'écoute, lesquels réduisent considérablement l'exposition du cerveau. Manifestement, une élucidation plus approfondie du mécanisme d'action et une spécification plus précise des paramètres CEM cruciaux responsables des effets observés nécessitent une poursuite et un approfondissement de la recherche.

### Effets CEM sur le cerveau : modifications survenant dans la circulation sanguine cérébrale

Les résultats indiquent, pour la première fois, qu'il pourrait y avoir une légère incidence sur la circulation sanguine cérébrale à la suite d'une exposition intermittente à des CEM UMTS. Du moment que les amplitudes des changements induits par les CEM dans la circulation corticale n'excèdent pas celles des variations physiologiques observées durant l'activité cérébrale normale, et du moment qu'elles sont faibles par rapport aux perturbations provoquées par l'activité physique ou le stress, les résultats ne devraient pas susciter d'inquiétudes par rapport à la santé. De même, aucun impact négatif sur le bien-être ou les performances cognitives des sujets n'a pu être détecté. Par conséquent, à ce stade de la recherche, les résultats ne fournissent aucune indication suggérant que les valeurs limites d'exposition légales devraient être réajustées. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer ces résultats et pour étendre l'étude sur une population allant au-delà des jeunes gens adultes en bonne santé. En outre, des conditions CEM autres que celles testées ici devraient pouvoir être incluses. Tout comme l'effet des CEM sur l'EEG en phase de sommeil, le fait que les CEM pourraient exercer une influence sur la circulation sanguine cérébrale est une raison suffisante pour poursuivre la recherche en la matière.

### Étude de cohorte prospective sur l'influence des champs électromagnétiques haute fréquence sur la qualité de vie associée à la santé

Les résultats sont rassurants dans la mesure où aucune relation entre l'exposition HF et des problèmes de santé n'a été mise en évidence en se basant sur un concept prospectif, supérieur au concept

transversal utilisé précédemment pour aborder ce thème. Le résultat concorde avec les résultats des études de provocation sur les effets à court terme, qui n'ont montré eux non plus aucun effet dû à une exposition HF. Il serait cependant prématuré d'exclure la possibilité que les expositions HF puissent être à la source de problèmes de santé dans certaines circonstances, par exemple lorsque les niveaux d'exposition sont nettement plus élevés que ceux auxquels est soumise la population en général ou auxquels sont soumises certaines parties sensibles de la population. D'autres études fondées sur des échantillons plus étendus seront nécessaires pour valider ces résultats.

### 5.3 Module 3 : Biologie cellulaire

Bien que les études en laboratoire *in vitro* soient importantes dans les efforts entrepris pour déterminer si les CEM affectent la santé ou non, les résultats ne pourront jamais apporter qu'une preuve complémentaire. Ces derniers ne doivent en effet être pris en considération qu'en combinaison avec les observations issues d'études épidémiologiques ainsi que celles provenant de tests sur des volontaires humains.

### 5.4 Module 4 : Perception du risque

Au regard des risques que comporte la communication mobile, il est important de ne pas perdre de vue les avantages que procure celle-ci. Les téléphones mobiles et autres communications mobiles sont très populaires et très importants ; leur utilisation à l'échelle planétaire implique environ 4 milliards de personnes (Olsen, 2010), avec une tendance croissante. A l'heure actuelle, la prise en compte de tous les indices dément le fait que les expositions au RNI seraient délétères à des niveaux inférieurs aux expositions standards. En outre, il n'a pas été démontré que l'exposition conduit à des perturbations de processus biologiques essentiels. Cependant, il serait prématuré d'exclure tout risque simplement parce que les dangers n'ont pas été détectés ou parce qu'une altération somatique n'a pas été identifiée par la recherche conduite jusqu'à présent. Les lacunes dans les connaissances à ce sujet devraient attiser une recherche de haute qualité qui pourrait conduire soit à la découverte de mécanismes d'action inédits et à l'identification de risques insoupçonnés, soit à la confirmation du fait que la technologie est fondamentalement sûre. Au vu des incertitudes, les autorités recommandent le principe de précaution. Cependant, sans preuves solides, la population ne changera probablement pas son comportement en matière de téléphone mobile.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées du résultat des projets de ce programme. Les études ont confirmé le fait qu'une information appropriée de la population est d'une importance majeure. Cela inclut des faits relatifs au rayonnement tels que la rapide décroissance de son intensité avec l'augmentation de la distance par rapport à la station de base. L'acquisition de connaissances permet une évaluation des risques plus réaliste en ce qui concerne les stations de base. En plus de l'information factuelle, des mesures de précaution quant à l'utilisation des téléphones mobiles et autres dispositifs sans fil devraient être recommandées. Dans une récente étude effectuée au Danemark, une information contenant des conseils de précaution a été considérée comme plus utile, plus compréhensible et plus digne de confiance que l'information purement technique et factuelle (Nielsen et al., 2010). La population semble préférer une information où l'estimation du risque est déjà effectuée et traduite en recommandations sur la façon de gérer le risque. Toutefois, il faudrait également noter qu'une divergence a été relevée entre inquiétudes et mesures prises.

La recommandation de mesures de précaution tendant à la responsabilisation apparaît comme étant plus convaincante et plus compréhensible que la seule publication de directives dignes de foi. Le conseil devrait être formulé précautionneusement et insister sur la capacité du public à prendre les décisions qui s'imposent pour se protéger selon ses préférences.

La responsabilisation constitue également un thème central lorsqu'il s'agit de définir l'emplacement des stations de base. Une participation accrue à la prise de décision et au contrôle de la population est attendue pour réduire l'affect négatif vis-à-vis des stations de base. Les citoyens devraient être mis en situation de pouvoir exprimer leurs vœux et être impliqués dans les décisions concernant les emplacements.

Plusieurs mesures ont été proposées pour augmenter la confiance des gens envers les autorités de la communication mobile. Elles incluaient la diffusion d'informations concernant l'emplacement et les caractéristiques de fonctionnement des stations de base. Ainsi, des exposimètres ont pu être mis

à la disposition des personnes intéressées si bien que les multiples sources de rayonnement ont pu être reconnues et que des mesures de précaution ont pu être prises.

Les affirmations de l'industrie de la téléphonie mobile ont peu de chance d'avoir un impact appréciable puisqu'elles ont été considérées comme dignes de peu de confiance dans la présente étude comme dans les études antérieures (Kristiansen et al., 2009). La manière dont les autorités informent sur l'état des connaissances, tout en reconnaissant les zones d'incertitudes, est de toute première importance. Il est essentiel d'utiliser une terminologie prudente. En conséquence, un terme comme celui d'« électrosmog » impliquant des effets négatifs du rayonnement comparables à ceux de la pollution de l'air devrait être évité.

## 6. Exécution du programme

Un des principaux objectifs du PNR 57 a été de poser les fondements d'une meilleure évaluation des risques sanitaires potentiels liés aux expositions à des CEM ; le programme était considéré comme faisant partie des efforts internationaux pour clarifier le sujet. L'objectif n'était pas de couvrir complètement tous les thèmes liés aux CEM et à la santé, mais de concentrer les efforts sur des domaines spécifiques, constituant des domaines d'excellence en Suisse, et dans lesquels les projets de recherche pouvaient être réalisés dans les trois ans avec les fonds disponibles. Par conséquent, la portée des résultats ne pouvait être que limitée. Cependant, les résultats corroborent la nécessité d'étudier plus à fond les effets potentiels des CEM ainsi que les mécanismes sous-jacents correspondants dans les modèles les plus variés. Les résultats de deux projets ont montré que l'exposition aux CEM HF affectait le cerveau. La reconnaissance de la modulation du signal en tant que condition préalable aux effets observés sur l'EEG représente un pas important dans la tentative d'élucidation du mécanisme d'action. L'apparition retardée des perturbations induites par les CEM HF indique que l'exposition déclenche probablement une cascade d'événements.

La confirmation de ce que les CEM induisent une fragmentation de l'ADN et la démonstration selon laquelle l'effet n'est pas causé par un dommage direct sur l'ADN constituent des contributions majeures à ce domaine. De plus, le fait que seule l'exposition intermittente soit effective prouve que des processus cellulaires complexes sont impliqués. L'équilibre des cassures et réparations des brins d'ADN pourrait être affecté par une perturbation de la progression du cycle cellulaire, une altération de l'activité métabolique et une induction de la mort apoptotique des cellules.

En résumé, les études portant sur la physiologie cérébrale et la biologie cellulaire n'ont pas uniquement établi l'existence d'effets dus aux CEM, mais ont également posé les premiers jalons de l'élucidation des mécanismes d'action. Il est raisonnable d'escompter que les connaissances au sujet des mécanismes constitueront la base de l'évaluation des conséquences sur la santé. A présent, de telles évaluations ne sont pas encore possibles. Toutefois, au vu des effets physiologiques et cellulaires qui ont pu être démontrés, une politique de précaution en matière d'exposition aux CEM se justifie.

L'étude épidémiologique n'a pas révélé de relation entre expositions et problèmes de santé. Cela est rassurant, notamment parce que des procédures de pointe ont été mises en œuvre pour enregistrer et modéliser les expositions, même si des incertitudes subsistent en particulier en ce qui concerne les estimations des expositions individuelles. Cependant, l'étude n'exclut pas que des résultats différents puissent être obtenus à des niveaux d'exposition plus élevés, sur des périodes d'exposition plus longues et en examinant des critères différents (p. ex. les maladies chroniques).

Le programme a été marqué par les informations inédites obtenues au sujet de l'exposition et de l'évaluation dosimétrique de la population en général pour diverses technologies de communication. L'introduction de nouvelles technologies appelle un suivi attentif de l'évolution de la situation. Les données obtenues pour les femmes enceintes et le fœtus ont révélé des risques qui mériteraient d'être examinés par les autorités sanitaires.

La communication du risque reste un thème sensible. Les études ont montré que dissiper les idées fausses constituait un défi et que les façons d'aborder le sujet fondées sur le concept de responsabilisation étaient prometteuses.

### 6.1 Physiologie et métabolisme cellulaire

Un objectif majeur de la recherche en matière de CEM est de fournir des informations au sujet des effets potentiels sur la santé. Etablir l'existence d'effets exercés par des CEM sur les processus physiologiques et biologiques est un premier pas important. Une fois que ces effets ont été clairement démontrés et maintes fois reproduits, la recherche doit se poursuivre par la mise à jour du mécanisme d'action, une démarche qui a été adoptée dans certains projets du présent programme.

La recherche portant sur les CEM est victime de l'incohérence de ses résultats. Si ces derniers obtenus par tel groupe de recherche ne peuvent être reproduits par tel autre groupe, il est permis de douter de leur validité. La reproductibilité des résultats est effectivement une composante importante d'une démonstration claire et nette de l'existence d'un effet. Dans le cadre du PNR 57, trois

effets dus aux CEM HF décrits précédemment ont été confirmés et précisés : (1) l'augmentation de puissance de l'EEG en phase de sommeil dans une gamme de fréquences spécifique ; (2) les effets sur la circulation cérébrale et (3) une augmentation de la fragmentation de l'ADN.

Un des résultats les plus réguliers a été l'effet sur l'EEG en phase de sommeil. L'exposition aux CEM HF a provoqué systématiquement une augmentation de puissance dans la gamme de fréquences des fuseaux du sommeil (12-15 Hz) durant le sommeil lent (non MOR). Ces modifications avaient été relevées par Achermann et son équipe au cours de quatre études antérieures et ont été confirmés par trois autres études réalisées dans le cadre du présent programme. Un effet similaire a également été rapporté par un autre groupe de recherche (Loughran et al. 2005). Dans l'intention d'identifier les paramètres critiques du signal, Achermann et al. ont fait varier les caractéristiques de la modulation (portables et stations de base), la force du signal (0.2 - 5 W/kg), le cycle de fonctionnement de certaines composantes, et la fréquence porteuse (900 et 2140 MHz). Il s'est avéré que la modulation par impulsions était spécifiquement en cause en ce qui concerne l'effet sur l'EEG en phase de sommeil puisque ni la porteuse non modulée ni les impulsions magnétiques de basse fréquence en l'absence d'une porteuse n'ont exercé d'effet. De plus, les études indiquent que l'effet est généré par une action sur le cortex cérébral puisque le rayonnement n'atteignant pas les structures cérébrales profondes était tout aussi perturbant.

Des études antérieures avaient mis en évidence des effets CEM HF sur la circulation cérébrale. Ces observations ont pu être confirmées par Wolf et al. en passant par la spectroscopie proche infrarouge. Bien qu'un signal semblable à ceux émis par les stations de base UMTS ait été appliqué, l'intensité correspondait à celle de l'exposition aux portables. L'absence d'une relation de dose à effet est curieuse et nécessite une investigation complémentaire.

Une publication antérieure selon laquelle la fragmentation de l'ADN dans les cellules des mammifères augmente après exposition aux CEM HF a eu un impact considérable en raison des conséquences potentielles d'une altération de l'ADN sur la santé. Vouloir vérifier la reproductibilité des résultats antérieurs et aller de l'avant dans la recherche se justifiait donc. Schär et collaborateurs ont confirmé l'effet sur l'ADN de fibroblastes humains. Ils ont ensuite focalisé leurs efforts sur l'exposition aux CM TBF, une procédure pour laquelle un dispositif d'imagerie des cellules vivantes a été conçu en tant que partie du programme de recherche. Il a été montré qu'une exposition intermittente à des CM à 50 Hz augmentait les cassures des brins d'ADN dans les noyaux de fibroblastes primaires humains. Schär et al. ont de plus montré que cet effet n'était pas dû à un dommage physique direct de l'ADN ou à une augmentation du taux de dérivés réactifs de l'oxygène susceptibles d'endommager l'ADN. L'augmentation de la fragmentation de l'ADN provenait en fait de perturbations mineures de la synthèse de l'ADN et du déclenchement occasionnel de l'apoptose cellulaire. Au contraire du rayonnement ionisant, qui peut induire des dommages irréparables à l'ADN, les CEM ne semblent pas exercer un tel effet. La spécification d'un tel mode d'action indirect des CEM sur les processus cellulaires constitue une contribution majeure à ce domaine d'étude.

Dans la recherche portant sur les effets cellulaires des CEM, la modélisation peut s'avérer très utile. De nombreuses modifications au niveau des structures protéiniques impliquées dans la réponse cellulaire au stress et dans l'apoptose ont été découvertes par Mevissen et al. Ces observations ne permettent pas, à ce stade, de conclure de manière définitive et demandent donc confirmation.

Un organisme modèle fréquemment utilisé est le ver *C. elegans*. Les équipes de Mevissen et Goloubinoff ont étudié les effets potentiels des CEM HF sur les voies de transduction du signal, l'homéostasie protéique et la motilité. En outre, une mousse transgénique, très sensible aux stress abiotiques et aux polluants, a été choisie comme sujet d'étude. Aucune des variables étudiées n'a été clairement affectée par l'exposition aux CEM. Bien que ces organismes modèles aient présenté des réponses à d'infinitésimaux changements environnementaux (notamment température), il ne semble pas qu'ils soient influencés par les CEM.

En résumé, les études des effets cellulaires et physiologiques des CEM ont permis deux avancées majeures : (1) la preuve d'un effet des CEM HF sur les fonctions cérébrales humaines comme cela se reflète sur l'EEG a été confirmée et précisée, et les paramètres du champ ont pu être spécifiés plus précisément. (2) L'action des CEM TBF sur l'ADN a été confirmée et, parallèlement, le mécanisme indirect responsable de cet effet a été identifié.



## 6.2 Exposition aux CEM et effets sur la santé

Dans l'étude de Rössli et collaborateurs, des données objectives de trafics concernant l'utilisation du téléphone mobile ont été utilisées pour la première fois pour examiner les effets potentiels sur certains symptômes, en particulier les maux de tête. Autres faits marquants, l'étude des effets de l'exposition aux CEM HF sur des cohortes pendant une période d'une année et les mesures d'exposition effectuées sur une semaine au moyen d'un dispositif portable. Ces tests ont permis une quantification du niveau d'exposition et la spécification de la contribution de diverses sources. Le résultat principal a été l'absence de relation entre problèmes de santé et exposition aux CEM HF dans l'environnement en situation quotidienne. En particulier, aucune relation n'a été observée entre le comportement au cours du sommeil et l'exposition dans la chambre à coucher.

L'étude connaît également ses limites. Par exemple, le niveau moyen d'exposition de la population a été très inférieur à la valeur limite d'exposition actuellement appliquée en Suisse. C'est la raison pour laquelle aucune conclusion ne peut être tirée en ce qui concerne des effets éventuels à des niveaux d'exposition supérieurs. D'autres limitations pourraient provenir d'une éventuelle erreur systématique de sélection, de la taille de l'échantillon et de la durée (un an) de l'évaluation. Néanmoins, il importe de souligner que les résultats n'ont pas indiqué que la situation d'exposition courante aux CEM HF provoque des problèmes de santé. Ces considérations confirment la majorité des résultats publiés dans la littérature et renforcent le sentiment de l'innocuité de ces rayonnements.

## 6.3 Dosimétrie et mesures d'exposition

Kühn et collaborateurs ont mesuré l'exposition du cerveau aux CEM HF. Et ceci, tant avec des sources à champ proche qu'avec des sources à champ lointain. Des fantômes présentant les propriétés électriques du corps humain et du cerveau, et des outils de simulation ont été développés et utilisés pour la mesure des TAS dans diverses régions cérébrales. De grandes variations ont été observées ; elles étaient dues à des différences de procédures expérimentales, de conception du dispositif et de caractéristiques du signal. Les modèles permettent de prédire les TAS induits par diverses sources dans les régions du cerveau. Ils seront précieux pour l'estimation de doses dans les études épidémiologiques et pour l'information du consommateur sur les risques de l'exposition des individus aux CEM HF.

Christ et son équipe ont caractérisé l'exposition du fœtus à différents types de sources de CEM. Des modèles informatiques anatomiques détaillés de la femme enceinte à différents stades de la grossesse englobaient les caractéristiques électriques des tissus. Les découvertes les plus remarquables ont été que les limites d'exposition dans un cadre professionnel sont trop élevées pour les femmes enceintes et que certaines normes de produits (plaques de cuisson à induction) pourraient conduire à des niveaux de TAS trop élevés pour le fœtus.

Capstick et son équipe ont conçu et développé un système d'exposition aux CM TBF miniature pouvant être intégré dans un système de microscopie. L'imagerie de cellules vivantes et l'exposition à des champs magnétiques peuvent être combinées. Un système de contrôle informatique fixe, surveille et enregistre le niveau d'exposition durant l'expérience qui doit être réalisée dans des conditions aveugles. Le système a été utilisé avec succès dans le projet de Schär discuté ci-devant.

## 6.4 Perception du risque

A l'heure actuelle, il n'existe pas de preuve que les CEM HF affectent la santé. Toutefois, les risques sanitaires potentiels ne peuvent être exclus. La population souhaite une utilisation généralisée des téléphones mobiles et en même temps craint « l'électrosmog » émanant des stations de base situées à leur proximité. De plus, 5% de la population suisse s'estime hypersensible aux champs électromagnétiques et pense souffrir de problèmes de santé dus à l'exposition aux CEM. Dans ces conditions, il est difficile de transmettre une information objective sur les CEM à la population.

Le groupe de Siegrist a étudié quels étaient les facteurs déterminant les risques et les avantages perçus en rapport avec la communication mobile. Il a été montré que les réactions affectives étaient cruciales dans la perception du risque. C'est pourquoi la confiance et d'autres éléments reliés à l'affect doivent être pris en considération dans la communication des risques. Il est intéressant de noter que l'acquisition de connaissances a permis de dissiper des idées fausses dans la mesure où elle a conduit à une évaluation plus réaliste de l'emplacement des stations de base, ce qui correspond davantage à des considérations de santé publique.

Schultz et son équipe ont rapporté que la crédibilité de la source n'était pas un facteur important dans la communication d'un message selon lequel il est peu probable que le rayonnement de la téléphonie mobile exerce des effets fâcheux sur la santé. Au contraire, les idées préconçues au sujet du risque sont apparues comme un facteur majeur dans différents groupes : les personnes qui considéraient les risques liés aux CEM comme très bas ont été rassurées encore davantage par le message alors que celles qui considéraient que les risques étaient élevés étaient encore plus inquiètes. Les mesures de précaution n'ont pas augmenté les inquiétudes. Un message de précaution visant à la responsabilisation apparaît comme le plus convaincant. Il existe une première preuve de différences dans la perception du risque entre Suisses alémaniques et Suisses italophones.

## **6.5 Perspectives**

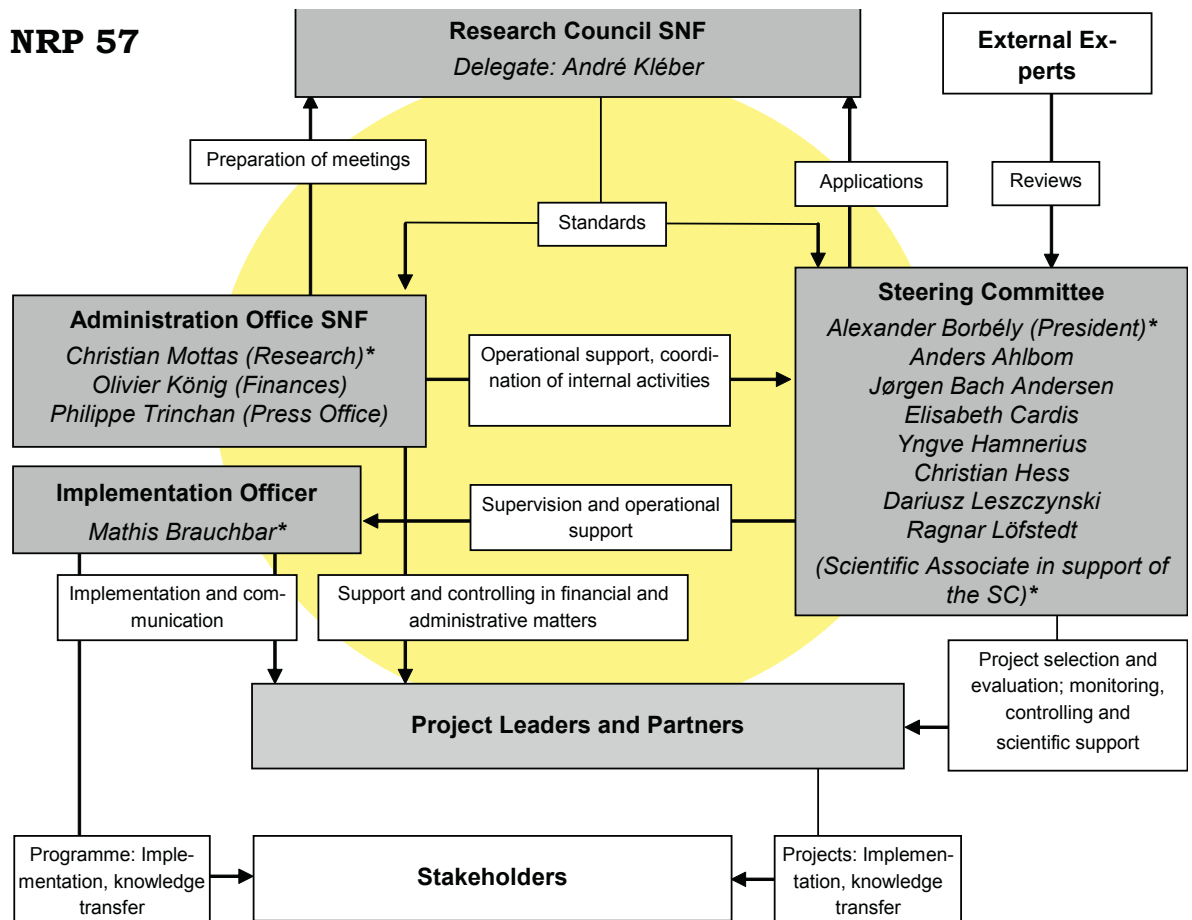
Il est évident que le PNR 57 a conforté la recherche helvétique en matière de CEM et augmenté les interactions entre les groupes de travail. Il a également augmenté la visibilité internationale de la recherche suisse. Les thèmes de recherche couverts par le programme correspondent largement aux champs de recherche de haute priorité définis par le programme 2010 de l'OMS pour les champs de haute fréquence. Au vu des résultats, des études de suivi vont être particulièrement importantes en ce qui concerne l'action des CEM sur les fonctions cérébrales et le métabolisme de l'ADN. Ces approches ont montré qu'elles étaient prometteuses en ce qui concerne la compréhension des mécanismes sous-jacents aux effets des CEM sur les systèmes biologiques. Pour préserver le savoir-faire accumulé durant cette période de trois ans, il sera important d'explorer les possibilités permettant de poursuivre la recherche dans des projets clés. La recherche sur les CEM est une entreprise à long terme qui requiert des cadres organisationnel et financier appropriés. La rapide évolution des technologies constitue un défi qui ne peut être relevé que par une étroite collaboration entre experts en dosimétrie et en sciences de la vie. Le PNR 57 en a jeté les bases.

## 7. Annexe

### 7.1 Agenda

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
PNR 57 : approbation Conseil fédéral	mars						
Lancement			janvier				
Recherche en cours						fin: juin	
Valorisation et coordination							
Suivi et contrôle							
Rapports intermédiaires et réunions				mars	juin	sep- tembre	
Workshops				3			
Symposium satellite EBEA/ BEMS 2009					juin		
Rapport de synthèse et fin du programme							mai

## 7.2 Organisation et gestion



\* Membres du bureau du PNR 57

### Division IV (Section PNR/PRN) du Conseil de la recherche

Les Programmes nationaux de recherche sont mis en œuvre sous la conduite de la Division IV du Conseil de la recherche. Celle-ci est composée de 20 membres représentant une large palette de disciplines scientifiques. Les décisions prises par la Division IV sur l'acceptation ou le rejet des projets sont soumises à la Présidence du Conseil national de la recherche. Se fondant sur les recommandations du délégué, la présidence sélectionne le CD, nomme la personne chargée de la valorisation et définit les normes de l'évaluation des projets. Elle évalue en outre les rapports intermédiaires et finaux du délégué et du CD et, si nécessaire, soutient ces derniers dans l'exécution du programme.

### Délégué du Conseil de la recherche

*Prof. André G. Kléber*

Institut de physiologie, Université de Berne, Suisse

Le délégué du Conseil de la recherche représente la Division IV du Conseil de la recherche au sein du CD et assure le transfert des informations et des expériences, veillant ainsi à ce que le CD agisse conformément aux règlements et aux normes. Il soumet au Conseil de la recherche les recommandations concernant la sélection du CD ainsi que les décisions de ce dernier concernant l'approbation ou le rejet des requêtes de recherche. En outre, il informe périodiquement la Division IV de l'évolution du PNR 57.

### Comité de direction (CD)

Le CD était formé de huit membres ayant travaillé pendant toute la durée du PNR 57 plus

spécialement dans le domaine stratégique. C'était l'organe déterminant, conférant au programme son profil spécifique et assurant la continuité et cohérence des décisions. Les membres du comité étaient responsables de l'évaluation de la qualité scientifique et de l'exécution du PNR 57. A cet égard, ils ont:

- \_ élaboré le plan d'exécution ;
- \_ évalué et sélectionné les requêtes complètes sur la base d'évaluations externes pour les soumettre à l'approbation du Conseil de la recherche ;
- \_ rejeté des esquisses de leur propre chef ;
- \_ contrôlé le plan de financement en collaboration avec la personne chargée de la coordination et les comptes annuels soumis au Conseil de la recherche ;
- \_ organisé et supervisé la coordination scientifique ;
- \_ suivi l'évolution des projets de recherche et évalué les rapports intermédiaires et finaux ;
- \_ soutenu le président du CD dans ses activités liées à la coordination internationale ;
- \_ supervisé les activités de valorisation ;
- \_ examiné les documents d'exécution quant à leur cohérence avec les normes de qualité du FNS pour approbation par le Conseil de la recherche ;
- \_ recommandé le concept de valorisation (décrivant les activités de valorisation futures, pour publication) pour approbation par le Conseil de la recherche ;
- \_ suivi et soutenu les activités de valorisation des projets et du programme dans son entier ;
- \_ soutenu la personne chargée de la valorisation en mettant à jour la base de données des parties prenantes et en écrivant des éditoriaux pour la newsletter du programme ;
- \_ rédigé une synthèse scientifique et un rapport final au terme du programme.

Pour l'évaluation des esquisses et des requêtes de recherche, le CD a consulté des experts externes qui ont examiné la qualité scientifique des esquisses et des requêtes complètes anonymisées en fonction des critères définis dans le plan d'exécution.

#### Membres du Comité de direction

*Prof. Dr. em. Alexander Borbély (Président)*

Institut de pharmacologie et de toxicologie, Université de Zurich, Suisse

*Prof. Dr. Anders Ahlbom*

Epidemiology, Karolinska Institute, Stockholm, Sweden

*Prof. Dr. Jørgen Bach Andersen*

Institute of Electronic Systems, University of Aalborg, Aalborg, Denmark

*Prof. Dr. Elisabeth Cardis*

Centre for Research in Environmental Epidemiology (CREAL), Barcelona, Spain

*Prof. Dr. Yngve Hamnerius*

Bioelectromagnetics Group, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden

*Prof. Dr. Christian Hess*

Département de neurologie, Hôpital de l'Île (Hôpital universitaire), Berne, Suisse

*Prof. Dr. Dariusz Leszczynski*

Radiation Biology Unit, Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki, Finland

*Prof. Dr. Ragnar Löfstedt*

IPI King's Centre for Risk Management, King's College London, London, United Kingdom

### **Président du Comité de direction**

*Prof. em. Alexander Borbély*

Institut de pharmacologie et de toxicologie, Université de Zurich, Suisse

Le président du CD a représenté le PNR 57 tant à l'intérieur que vers l'extérieur. Il a coordonné les contacts entre les parties intéressées et le CD, en particulier ceux avec les autorités fédérales et cantonales, ainsi qu'avec d'autres organisations sociales, environnementales ou politico-économiques. En collaboration avec la personne chargée de la coordination, il était en charge de la coordination scientifique des projets agréés et il a surveillé et soutenu, en tant qu'expert scientifique, la personne chargée de l'exécution.

### **Assistants scientifiques du président du CD**

*Dr Sonja Negovetic,*

*Dr Sabine Regel*

Institut de pharmacologie et de toxicologie, Université de Zurich, Suisse

Le président du CD a bénéficié du soutien de deux assistantes scientifiques à plein temps chargées d'une communication technique suivie avec les groupes de recherche et de la communication avec les programmes comparables exécutés en Suisse ou à l'étranger. Les assistantes étaient responsables du développement du contenu des activités de sensibilisation (site Internet du PNR 57 ; information concernant les événements, publications dans les médias) et de l'organisation des rencontres annuelles ainsi que des ateliers d'actualité destinés à l'avancement d'un dialogue ouvert et interdisciplinaire entre les chercheurs. En outre, elles ont soutenu le président du CD dans la rédaction du rapport de synthèse final.

### **Chargé du transfert TC**

*Mathis Brauchbar*

Advocacy AG, Communication and Consulting, Zurich, Suisse

En consultation avec le service d'information et de presse du FNS, le CD propose une personne chargée de la valorisation, qui est ensuite nommée par le Conseil de la recherche. Le chargé de la valorisation exerce son activité en étroite collaboration avec les secrétariats du FNS. Le chargé de la valorisation du PNR 57 avait la haute responsabilité sur tout ce qui concernait les exigences posées aux thèmes de recherche, les niveaux professionnels de la réalisation des mesures d'exécution ainsi que la qualité des relations publiques. Il a planifié, géré et coordonné les activités de valorisation et a conseillé le CD et les chefs de projet en matière de communication et de valorisation. Il a également coordonné les contacts avec les médias et était responsable des questions de gestion.

### **Secrétariat**

Coordinateur du programme

*Dr Christian Mottas*

Division IV, Fonds national suisse (FNS), Berne, Suisse

Le secrétariat de la Division IV du FNS est responsable de la gestion des opérations et de la mise en œuvre des décisions prises par le Conseil de la recherche et le CD. Le secrétariat coordonne les questions administratives et financières et est chargé, en collaboration avec le président du CD, de superviser, coordonner et contrôler le projet. Le coordinateur du programme a conseillé les chefs de projet et le CD en ces matières, en particulier en cas de déviations par rapport au calendrier et au budget, et soutenu tous les protagonistes dans leurs missions. Il a assuré la circulation de l'information entre le président du CD, le CD et le délégué du Conseil de la recherche. Il a archivé en outre tous les documents significatifs pour l'exécution et la gestion du PNR 57.

### **Service financier**

Le service financier est l'interlocuteur en matière financière pour les chercheurs/euses, les responsables de programme et les administrations centrales des hautes écoles. Il est chargé de contrôler le statut financier des programmes de recherche et de procéder, s'il y a lieu, à des modifications et des



corrections. En outre, il contrôle et approuve les comptes intermédiaires et finaux, et est responsable de l'administration financière de tout le PNR 57.

#### Service de presse et d'information (PRI)

Le service de presse et d'information fixe les normes de qualité en matière de communication et est responsable des directives concernant les relations publiques et leur mise en œuvre dans le programme. Il contrôle le concept de valorisation et soutient durant tout le programme le chargé de valorisation en matière de communication et de campagnes d'information. En collaboration avec le chargé de valorisation, il organise et finance tous les contacts avec les médias nationaux (interviews, conférences de presse et communiqués).

#### Bureau du PNR 57

Un bureau opérationnel formé du président du CD et de ses assistantes scientifiques, du chargé de la valorisation et du coordinateur du programme est régulièrement réuni pour préparer les affaires opérationnelles et stratégiques relatives au PNR 57 et mettre en œuvre les décisions du CD. Le bureau représente le PNR 57 vis-à-vis de l'extérieur.

#### Représentants de la Confédération

*Dr Mirjana Moser*

Division Protection radiologique, Office fédéral de la santé publique (OFSP), Berne, Suisse

*Dr Jürg Baumann*

Division Contrôle de la pollution de l'air et RNI, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, Suisse

Certains départements sont directement concernés par les thèmes du RNI ; ils ont donc un intérêt majeur et direct dans les travaux du PNR 57. En conséquence, le gouvernement a été un des principaux destinataires du programme. Pour favoriser les échanges d'expériences, d'informations, de connaissances et les collaborations, et pour mettre en œuvre les résultats de manière optimale, deux observateurs (sans droit de vote), venant respectivement de l'Office fédéral de la santé publique et de l'Office fédéral de l'environnement, ont été invités à faire partie du CD.

#### Chercheurs

De manière générale, les principaux investigateurs (PI) étaient responsables de l'efficacité scientifique et de l'exécution administrative de leurs projets et invités à participer directement et activement aux activités de valorisation. Ils étaient tenus de remettre tous les documents nécessaires et requis comme les rapports intermédiaires, les rapports finaux, les résumés ou les documents des ateliers selon un échéancier convenu permettant de garantir une évolution harmonieuse du PNR 57. Ils étaient également les personnes de contact pour toutes les parties concernées. Les chefs de projets ont représenté leurs projets lors d'événements officiels du PNR 57 incluant les ateliers, en se conformant ce faisant au règlement du service de presse et d'information du PNR 57 en ce qui concerne les campagnes d'information.

En règle générale, les chercheurs étaient autorisés à informer les médias au sujet de leurs propres recherches effectuées dans le cadre du programme ; toutefois, toute demande des médias concernant le programme devait être transmise au chargé de valorisation.

### **7.3 Programme des ateliers du PNR 57**

- \_ «Dosimetry meets Epidemiology» (janvier 2008)
- \_ «Towards a Mechanism-Based Framework in EMF Research» (mai 2008)
- \_ «Electromagnetic Fields and the Brain» (octobre 2008)
- \_ «PNR 57 Satellite Symposium at the EBFA 2009» (juin 2009)

Pour de plus amples renseignements concernant l'ordre du jour des réunions et les conclusions, veuillez vous rendre à l'adresse [www.pnr57.ch](http://www.pnr57.ch)

## 7.4 Bibliographie

- \_ Cousin ME, Siegrist M. *Health, Risk & Society* 2010, 12, 231–250.
- \_ Cousin ME, Siegrist M. *Risk Analysis* (in press)
- \_ Daniells C, Duce I, Thomas D, Sewell P, Tattersall J, de Pomerai D. *Mutat Res* 1998, 399, 55–64.
- \_ Dawe AS, Smith B, Thomas DW, Greedy S, Vasic N, Gregory A, Loader B, de Pomerai DI. *Bioelectromagnetics* 2006, 27, 88-97
- \_ Dawe AS, Nylund R, Leszczynski D, Kuster N, Reader T, De Pomerai DI. *Bioelectromagnetics* 29, 2008, 92–99
- \_ Dawe AS, Bodhicharla RK, Graham NS, May ST, Reader T, Loader B, Gregory A, Swicord M, Bit-Babik G, de Pomerai DI. *Bioelectromagnetics*. 2009, 30, 602–12
- \_ de Pomerai D, Daniells C, David H, Allan J, Duce I, Mutwakil M, Thomas D, Sewell P, Tattersall J, Jones D, Candido P. *Nature* 2000, 405, 417–418
- \_ Elvers HD, Jandrig B, Grummich K, Tanner C. *Health, Risk & Society* 2009, 11, 165–179.
- \_ Kristiansen IS, Elstein AS, Gyrd-Hansen D, Kildemoes HW, Nielsen JB. *Bioelectromagnetics* 2009, 30, 393–401.
- \_ Lofstedt RA. *J Risk Res* 2010, 13, 87–109.
- \_ Loughran SP, Wood AW, Barton JM, Croft RJ, Thompson B, Stough C. *Neuroreport* 2005, 16, 1973.1976.
- \_ Nielsen JB, Elstein A, Gyrd-Hansen D, Kildemoes HW, Kristiansen IS, Stovring H. *Bioelectromagnetics* 2010 31, 504–512.
- \_ Olsen J. *J Epidemiol Community Health* 2010, 64, 281–282.
- \_ Siegrist M, Earle TC, Gutscher H, Keller C. *Risk Analysis* 2005, 25, 1253–1264.
- \_ Slovic, P, Finucane ML, Peters E, MacGregor DG. The affect heuristic. In T. Gilovich, D. Griffin and D. Kahneman (Eds). *Intuitive Judgment: Heuristics and Biases*. Cambridge: Cambridge University Press (pp. 397–420), 2002.
- \_ Wiedemann PM, Schütz H. *Environ Health Perspect* 2005, 113, 402–405.

## 7.5 Acronymes

2G	Systèmes de communication mobile de 2e génération (voir aussi GSM)
3G	Systèmes de communication mobile de 3e génération (voir aussi UMTS)
4G	Systèmes de communication mobile de 4e génération (voir aussi LTE)
AChE	Acétylcholinestérase
CD	Comité de direction
CEM	Champs électromagnétiques
CIPRNI	Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants
CIRC	Centre international de recherche sur le cancer
CM	Champ magnétique
DRO	Dérivés réactifs de l'oxygène
EEG	Electroencéphalogramme
FNS	Fond national suisse de la recherche scientifique
GFP	Green fluorescent protein (protéine fluorescente verte)
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	Haute fréquence
IOD	Imagerie optique diffuse
IRM	Imagerie par résonance magnétique
LTE	Long Term Evolution
NIEHS	(U.S.) National Institute of Environmental Health Sciences
NIRI	Near infrared imaging (imagerie dans le proche infrarouge, cf. PIR)
non-MOR (sommeil)	Sommeil lent (MOR = mouvements oculaires rapides ; REM en anglais)
OFES	Office fédéral de l'éducation et à la recherche
OFEV	Office fédéral de l'environnement
OMS	Organisation mondiale de la santé
OT	Optical Topography (topographie optique)
PI	Principal investigateur
PNR	Programme national de recherche
psSAR	peak spatial specific absorption rate (pic spatial du taux d'absorption spécifique)
RNI	Rayonnement non ionisant
SER	Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche
SPIR	Spectroscopie proche infrarouge
TAS	Taux d'absorption spécifique
TBF	Très basse fréquence
TEP	Tomographie par émission de positrons
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
wbSAR	whole body specific absorption rate (TAS au corps entier)
WT	Wild type (type sauvage)