

Évaluation des effets sur la santé des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

Avril 2016

AUTEURS

Mathieu Gauthier, Ph. D.

Denis Gauvin, M. Sc.

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

AVEC LA COLLABORATION DE

Daniel Bolduc, M. Sc.

Christiane Thibault, M. Sc.

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

MISE EN PAGE

Katia Raby

Direction de la santé environnementale et de la toxicologie

REMERCIEMENTS

Nous remercions le docteur Patrick Levallois de l'Institut national de santé publique du Québec, le personnel de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques et le personnel du Département de l'information, de la communication et du dialogue avec la société de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (France) pour leur soutien et leurs suggestions au début de la présente analyse.

Nous tenons également à remercier les personnes suivantes pour leurs commentaires lors de la consultation : Monique Beausoleil de la Direction de santé publique de Montréal – Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal, Olivier Merckel de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (France), Gaétan Carrier de l'Institut national de santé publique du Québec, Albert Daveluy du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec et Irène Langis de l'Institut national de santé publique du Québec.

La réalisation de ce document a été rendue possible grâce à une contribution financière du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec.

Ce document est disponible intégralement en format électronique (PDF) sur le site Web de l'Institut national de santé publique du Québec au : <http://www.inspq.qc.ca>.

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue en formulant une demande au guichet central du Service de la gestion des droits d'auteur des Publications du Québec à l'aide d'un formulaire en ligne accessible à l'adresse suivante : <http://www.droitauteur.gouv.qc.ca/autorisation.php>, ou en écrivant un courriel à : droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

Dépôt légal – 2^e trimestre 2016

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Bibliothèque et Archives Canada

ISBN : 978-2-550-75561-6 (Imprimé)

ISBN : 978-2-550-75439-8 (PDF)

©Gouvernement du Québec (2016)

Table des matières

Liste des tableaux.....	III
Liste des sigles et des acronymes.....	V
Liste des unités de mesure.....	VII
Faits saillants.....	1
Sommaire.....	3
1 Introduction.....	7
2 Exposition aux radiofréquences	9
2.1 Caractéristiques des radiofréquences	9
2.2 Sources de radiofréquences et types d'exposition	10
2.2.1 Sources naturelles.....	10
2.2.2 Sources artificielles	11
2.3 Méthodes de mesures de l'exposition aux radiofréquences	13
2.4 Exposition aux radiofréquences provenant de la téléphonie mobile	14
2.5 Autres sources de radiofréquences	15
2.5.1 Four à micro-ondes.....	15
2.5.2 Routeur Internet sans fil (Wi-Fi).....	16
2.5.3 Compteurs électriques de nouvelle génération	16
2.5.4 Téléphones sans fil de maison.....	16
2.5.5 Antennes de radio AM, de radio FM et de télévision.....	17
2.6 Comparaison du niveau d'exposition provenant des sources environnementales	17
2.7 Évolution du niveau d'exposition en fonction du temps et de l'apparition de nouvelles technologies	18
2.8 Résumé des connaissances sur les niveaux d'exposition.....	20
3 Recommandations de limites d'exposition.....	21
3.1 Approche des organismes ayant évalué les risques des radiofréquences pour la santé	21
3.1.1 Mise à jour des recommandations de limites d'exposition	22
3.2 Mécanismes d'action	23
3.2.1 Modulation des signaux.....	24
3.3 Recommandations de limites d'exposition	25
3.3.1 Comparaison de l'exposition aux limites recommandées.....	27
3.4 Autres limites d'exposition	27
3.4.1 Russie.....	28
3.4.2 Italie	28
3.5 Mesures de gestion ne faisant pas appel à une limite d'exposition	29
3.6 Positions québécoises sur la gestion des risques liés aux radiofréquences.....	29
3.7 Résumé à propos des limites d'exposition	30
4 Risques pour la santé.....	31
4.1 Études cellulaires et animales	31
4.1.1 Génotoxicité, cancérogénicité et expression génique	31
4.1.2 Reproduction et développement	32

4.1.3	Système nerveux.....	32
4.1.4	Conclusion des organismes de santé concernant l'étude des effets des radiofréquences sur les cellules et sur les animaux	32
4.2	Études chez l'humain	33
4.2.1	Études sur le cancer.....	34
4.2.2	Études sur les symptômes non spécifiques	44
4.3	Conclusions au regard des risques pour la santé	48
5	Conclusion.....	51
5.1	Gestion du risque	52
	Références.....	55

Liste des tableaux

Tableau 1	Comparaison de l'énergie des photons RF à une fréquence de 1 GHz à l'énergie des photons des CEM d'extrême basse fréquence (EBF) de la lumière visible, des rayons UV et des rayons X	9
Tableau 2	Grandeurs physiques permettant de caractériser les radiofréquences	10
Tableau 3	Fréquence, puissance et exposition typique de certaines sources environnementales et locales d'exposition	12
Tableau 4	Effets des radiofréquences sur la santé en fonction de la fréquence.....	23
Tableau 5	Limites de DAS d'organismes reconnus dans un environnement non contrôlé pour des fréquences de 100 kHz à 6 GHz	26
Tableau 6	Valeurs de référence des organismes reconnus dans un environnement non contrôlé pour des fréquences de 100 MHz à 6 GHz.....	26

Liste des sigles et des acronymes

AFSSET	Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, a fusionné avec l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA) pour former l'Anses
AGNIR	Advisory Group on Non-Ionising Radiation
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
CEM	Champ électromagnétique
CIRC	Centre international de Recherche sur le Cancer
CS6	Code de sécurité 6
DAS	Débit d'absorption spécifique
HSPA	<i>High Speed Pocket Access</i>
IEI-CEM	Intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
FCC	Federal Communications Commission
HPA	Health Protection Agency, aujourd'hui Public Health England
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ICNIRP	Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (en anglais International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
OMS	Organisation mondiale de la santé
PHE	Public Health England, anciennement Health Protection Agency
RC avec I.C.	Rapport de cotes avec intervalle de confiance
RF	Radiofréquence
RR	Risque relatif
SRC	La Société royale du Canada
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UIT	Union Internationale des Télécommunications
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

Liste des unités de mesure

A/m	Ampère par mètre
GHz	Gigahertz
m	Mètre
mW/m ²	Milliwatt par mètre carré
MHz	Mégahertz
V/m	Volt par mètre
W	Watt
W/kg	Watt par kilogramme
W/m ²	Watt par mètre carré

Faits saillants

- Le rapport repose sur une analyse d'articles scientifiques publiés dans des revues révisées par les pairs et sur des rapports d'expertise d'organismes de santé nationaux et internationaux reconnus.
- Les sources d'exposition aux radiofréquences sont diverses et de plus en plus présentes dans l'environnement.
- L'exposition de la population aux radiofréquences est engendrée par deux types de sources :
 - Les sources locales

Ce sont des sources auxquelles les personnes s'exposent de très près, soit à moins de quelques centimètres de leur corps (exposition en champ proche). Les téléphones cellulaires et les téléphones sans fil de maison en sont des exemples. L'exposition produite par les sources locales peut se rapprocher des limites imposées dans les normes.
 - Les sources environnementales

Ce sont des sources auxquelles les personnes s'exposent d'un peu plus loin : four à micro-ondes, routeurs Internet sans fil, compteurs électriques intelligents, antennes de radio, de télévision et de téléphonie cellulaire. L'exposition produite par les sources environnementales est généralement beaucoup plus faible que les limites d'exposition.
- À un niveau d'exposition au-delà des limites établies, les effets des radiofréquences sont bien caractérisés. Les limites d'exposition établies par les organismes réglementaires sont choisies de manière à prévenir tous les effets néfastes avérés sur la santé.
- Les effets potentiels des radiofréquences ont fait l'objet de nombreuses études sur des cellules et sur des animaux de même que chez l'humain. Même si les limites de la recherche actuelle ne permettent pas d'exclure toute possibilité de risque, aucun effet néfaste sur la santé à court ou à long terme n'a été démontré pour des expositions aux radiofréquences respectant les limites établies.
- Une certaine incertitude scientifique persiste à propos des effets potentiels d'une exposition à long terme au téléphone cellulaire. Des études épidémiologiques sont en cours à ce sujet.
- Des personnes ressentent des symptômes qu'elles attribuent à l'exposition aux champs électromagnétiques, dont les radiofréquences. La réalité des symptômes rapportés n'est pas mise en doute. Ils sont nombreux, et leur gravité varie d'une personne à l'autre. Toutefois, des études de bonne qualité ont été menées et n'ont pas démontré une association entre l'exposition aux radiofréquences en dessous des limites établies et l'apparition de symptômes.
- Il est recommandé de poursuivre la veille et les études scientifiques, de tenir informée la population de ces travaux et de prévoir des mesures pour venir en aide aux personnes rapportant des symptômes qu'elles attribuent aux radiofréquences.

Sommaire

Le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) a confié à l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) le mandat d'analyser la littérature scientifique ayant trait aux effets sur la santé des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences. Cette analyse se base sur les articles scientifiques publiés dans des revues avec révision par les pairs et sur les rapports d'expertise d'organismes de santé nationaux et internationaux reconnus. Sans être une revue systématique, ce rapport propose une vue d'ensemble des effets possibles des radiofréquences sur la santé.

Exposition aux radiofréquences

Les sources d'exposition aux radiofréquences sont diverses et sont de plus en plus présentes dans l'environnement. L'augmentation du nombre de ménages qui utilisent un téléphone cellulaire ou un téléphone sans fil de maison, et qui sont munis d'un routeur Internet sans fil ou d'autres appareils sans fil, contribue à l'accroissement de l'exposition de la population aux radiofréquences. L'exposition aux radiofréquences attribuable à des sources volontaires (par exemple : téléphone cellulaire) semble demeurer la source prédominante d'exposition de la population.

Dans le cas des sources d'exposition locales (utilisation d'un téléphone cellulaire ou d'un téléphone sans fil de maison par exemple), l'exposition maximale en champ proche atteint parfois des niveaux qui avoisinent les limites d'exposition recommandées. Ainsi, le débit d'absorption spécifique (DAS), mesure employée pour estimer l'exposition, qui est engendré par un téléphone cellulaire se situe généralement entre 0,5 et 1,5 W/kg. Un tel niveau d'exposition est légèrement inférieur à la restriction de base du Code de sécurité 6 de Santé Canada, qui est de 1,6 W/kg moyenné sur 1 g de tissus. Les téléphones sans fil de maison, quant à eux, entraînent une exposition maximale qui est plus faible; le DAS se situant entre 0,008 et 0,06 W/kg.

En ce qui concerne des sources d'exposition environnementales, soit les sources situées à plusieurs centimètres du corps (les fours à micro-ondes, les routeurs Internet sans fil – Wi-Fi; les compteurs électriques de nouvelle génération – CGN et les antennes de radio AM, de radio FM, de télévision et de téléphonie cellulaire; etc.), les niveaux d'exposition moyens qu'elles génèrent sont plus faibles que ceux des sources locales. Le champ électrique total moyen auquel la population est exposée est généralement de l'ordre de 1 V/m (3 mW/m²). Un tel niveau d'exposition est donc plus faible que les niveaux de référence du Code de sécurité 6 de Santé Canada; ces niveaux se situant entre 1,3 et 6,2 W/m² pour les fréquences comprises entre 300 et 3 000 MHz.

Établissement des limites d'exposition aux radiofréquences

À un niveau d'exposition au-delà des limites établies, les effets des radiofréquences sont bien caractérisés. Selon la fréquence du rayonnement, on remarque différents effets : stimulation des tissus nerveux centraux et périphériques; chocs et brûlures lors de contacts avec des objets exposés; échauffements localisés de tissus et augmentation de la température corporelle. Les limites d'exposition recommandées par les organismes de santé reconnus (Santé Canada, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont établies de manière à empêcher les effets néfastes des radiofréquences sur la santé.

Par exemple, en ce qui a trait aux effets thermiques, les organismes de santé ont estimé l'exposition nécessaire pour produire un réchauffement notable des tissus chez l'humain, soit 4 W/kg en moyenne sur le corps entier. Pour obtenir leur limite d'exposition, appelée restriction de base, ces organismes ont ensuite réduit cette valeur d'un facteur de sécurité de 10 pour le personnel

professionnel et de 50 pour la population générale. La plupart des sources environnementales d'exposition de la population génèrent des niveaux d'exposition qui se situent largement en dessous des restrictions de base.

Les limites d'exposition recommandées d'un organisme reconnu à l'autre sont comparables. Les différences dans les limites d'exposition reflètent les méthodes d'évaluation différentes des organismes, mais ces limites offrent une protection équivalente.

Effets potentiels des radiofréquences sur la santé

Études cellulaires et animales

L'évaluation des revues de la littérature récentes concernant les effets des radiofréquences sur les cellules et les animaux en laboratoire ne révèle pas d'effets négatifs à des niveaux d'exposition en dessous de ceux produisant des effets thermiques indésirables. De plus, dans l'ensemble, les organismes de santé, qui ont évalué les études sur des cellules ou des animaux, n'ont pas trouvé de preuves convaincantes démontrant la présence d'effets néfastes sur la santé.

Études chez l'humain

■ Études sur le risque de cancer

De nombreuses études épidémiologiques ont été réalisées afin d'étudier l'association potentielle entre l'exposition aux radiofréquences et le risque de cancer du cerveau et de cancer au niveau de la tête. Les études de cohortes et les études écologiques n'ont pas montré d'association, mais certaines études cas-témoin ont fourni des résultats équivoques. Notamment, les études du groupe de Hardell montrent une augmentation du risque pour certaines de leurs analyses de sous-groupes. Toutefois, ces résultats sont contredits par les études de cohortes et l'étude INTERPHONE réalisée auprès d'utilisateurs de téléphones cellulaires de 13 pays.

Mis à part le groupe de travail du Centre international de Recherche sur le Cancer et le groupe d'experts de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (France), qui considèrent qu'il demeure des indications de cancérogénicité « limitées » en ce qui concerne les radiofréquences pour certaines combinaisons de types de cancers et de sous-populations, les organismes de santé reconnus sont d'avis que les preuves d'une relation entre le cancer et les radiofréquences sont soit négatives, soit insuffisantes ou loin d'être concluantes.

Des études épidémiologiques sont en cours afin d'approfondir les connaissances, particulièrement sur les risques potentiels pour la santé associés à l'utilisation du téléphone cellulaire à long terme ou ceux de certains sous-groupes de population (par exemple les jeunes).

■ Études sur les symptômes non spécifiques

Certaines personnes aux prises avec des problèmes de santé, qui sont parfois invalidants, attribuent leurs symptômes à une exposition à diverses sources de champs électromagnétiques, dont les radiofréquences. Selon l'Organisation mondiale de la santé, le terme à privilégier pour parler de ce phénomène est *intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques* (IEI-CEM). Une vaste quantité de symptômes non spécifiques sont attribués à cette condition, et ces symptômes varient d'un individu à l'autre. La prévalence de l'IEI-CEM varie aussi considérablement d'une étude à l'autre selon la sévérité des critères d'inclusion employés; de moins de 2 % à plus de 15 % de la population attribuerait une partie des symptômes qu'elle ressent à une source de CEM.

De nombreuses études de bonne qualité ont été réalisées afin d'évaluer l'association entre l'exposition à de faibles niveaux de radiofréquences et l'apparition de symptômes non spécifiques.

Les données scientifiques disponibles tendent à démontrer que les symptômes rapportés par les personnes, qui par ailleurs ne peuvent être mis en doute, ne sont pas associés à l'exposition aux radiofréquences.

Conclusion

Même si les limites de la recherche actuelle ne permettent pas d'exclure toute possibilité de risque, aucun effet néfaste sur la santé à court ou à long terme n'a été démontré pour des expositions aux radiofréquences respectant les limites établies. À de faibles niveaux d'exposition, certaines études semblent montrer la possibilité d'effets biologiques qui pourraient se trouver à l'intérieur des variations physiologiques normales.

Les effets potentiels des radiofréquences font encore l'objet d'une certaine incertitude scientifique pour ce qui est des expositions à long terme résultant de l'utilisation du téléphone cellulaire. Quant à l'exposition attribuable à des sources environnementales, qui est généralement beaucoup plus faible que celle attribuable à l'utilisation du téléphone cellulaire, il semble improbable qu'elle puisse être associée à des effets néfastes sur la santé.

Mesures proposées

Devant ces constats, l'INSPQ propose cinq mesures de gestion :

- Poursuivre la veille scientifique sur les effets possibles des radiofréquences, notamment sur l'utilisation du téléphone cellulaire à long terme.
- Favoriser le maintien d'une expertise dans ce domaine au Québec et le développement d'un réseau d'échange avec d'autres experts sur le sujet.
- Mettre en place des outils d'information, qui permettraient à la population d'avoir accès aux données scientifiques les plus récentes sur le lien entre l'exposition aux radiofréquences et leurs effets sur la santé des populations.
- Proposer des mesures pour venir en aide aux personnes rapportant des symptômes qu'elles attribuent aux radiofréquences.
- Collaborer à des projets de recherche, qui permettraient de faciliter la mise en œuvre des autres mesures proposées.

1 Introduction

Le recours aux appareils et aux technologies se servant des champs électromagnétiques (CEM) pour transmettre de l'information est en croissance constante. À la radio et à la télédiffusion, présentes depuis plusieurs décennies, s'ajoutent de nouvelles technologies : téléphone sans fil, routeur Wi-Fi, système Bluetooth, moniteur pour bébé, etc. En particulier, l'usage du téléphone cellulaire est de plus en plus courant. Selon l'Union Internationale des Télécommunications (UIT, 2012), à la fin de l'année 2011, il y avait déjà plus de 6 milliards d'abonnements aux services de téléphonie cellulaire dans le monde. De même, l'Association canadienne des télécommunications sans fil (ACTS, 2012) est d'avis que 75 % des ménages canadiens avaient accès en 2012 à un téléphone sans fil; ce pourcentage représentant plus de 26 millions d'abonnements.

Les effets sur la santé des champs électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences (RF), appelés *radiofréquences* dans ce rapport, sont étudiés depuis plusieurs décennies. À la suite de l'apparition de questionnements et de débats au sein de la population, les effets potentiels des radiofréquences sur la santé, en lien avec le développement des nouvelles technologies sans fil, suscitent un certain regain d'intérêt. Ainsi, l'exposition croissante aux radiofréquences et les inquiétudes du public ont conduit des organismes de santé à entreprendre des programmes de recherche d'envergure afin de répondre aux préoccupations exprimées (Organisation mondiale de la santé [OMS], 2013). Ces programmes de recherche ont contribué à augmenter de manière significative le nombre d'études sur les effets des radiofréquences.

Au Québec, le réseau de la santé, notamment le ministère de la Santé et des Services sociaux (MSSS) et l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), s'intéresse aux effets des CEM depuis plusieurs années (Levallois, Lajoie et Gauvin, 1991; Levallois, Gauvin, Lajoie et Saint-Laurent, 1996; Levallois *et al.*, 2000; Gauvin, Ngamga Djeutcha et Levallois, 2006; Diallo et Gauvin, 2010). Dans le présent rapport, les effets potentiels sur la santé des radiofréquences pour les fréquences situées entre 100 kHz et 300 GHz sont analysés. Cette plage de fréquences du spectre de rayonnement électromagnétique est celle qui est notamment utilisée pour transmettre de l'information sans fil.

Le présent rapport analyse principalement des études publiées entre 2009 et 2013, mais aborde aussi certaines publications importantes parues jusqu'en 2015. Il se divise en plusieurs chapitres qui traitent des principaux bilans des connaissances ayant trait aux effets des radiofréquences sur la santé. Le chapitre 2 présente les différentes sources possibles d'exposition de la population. Le chapitre 3 décrit de son côté le fondement des recommandations de limites d'exposition aux radiofréquences établies par des organismes reconnus tels que Santé Canada et la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP). Le chapitre 4 comprend quant à lui un résumé des principaux résultats des études sur les effets biologiques constatés au cours des études cellulaires et animales. Ce même chapitre propose également une synthèse des résultats des recherches portant sur un lien possible entre l'exposition aux radiofréquences et l'incidence des cancers du cerveau chez l'humain, de même que sur l'association entre l'exposition aux radiofréquences et l'apparition de symptômes non spécifiques rapportés par des personnes qui disent être hypersensibles aux champs électromagnétiques (CEM). Il se termine par la présentation des conclusions de l'évaluation du risque de plusieurs organismes de santé nationaux ou internationaux. Enfin, le chapitre 5 suggère des mesures de gestion prudentes qui ont pour objectifs principaux d'assurer le maintien d'une expertise québécoise dans ce domaine, d'aider la population à obtenir l'information nécessaire à une prise de décision éclairée et de réduire les incertitudes scientifiques.

2 Exposition aux radiofréquences

2.1 Caractéristiques des radiofréquences

Les champs électromagnétiques (CEM) dans le domaine des radiofréquences (RF), appelés *radiofréquences* dans ce document, désignent généralement les fréquences du spectre de rayonnement électromagnétique comprises entre 3 kHz et 300 GHz, qui sont utilisées en transmission sans fil (Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 2005). Ce type de rayonnement, tout comme le rayonnement infrarouge et la lumière visible, est qualifié de *non ionisant*, puisque l'énergie des photons dans cette gamme de fréquences est en deçà de l'énergie nécessaire à l'ionisation des atomes et des molécules. Cette caractéristique distingue ce type de rayonnement des rayonnements ionisants, par exemple les rayons X ou les rayons gamma, qui sont en mesure de briser directement des molécules telles que l'ADN. Le tableau 1 montre cette différence d'énergie et précise quelques niveaux d'énergie de référence à titre de comparaison.

Tableau 1 Comparaison de l'énergie des photons RF à une fréquence de 1 GHz à l'énergie des photons des CEM d'extrême basse fréquence (EBF) de la lumière visible, des rayons UV et des rayons X

	Fréquence	Énergie eV
Champs d'EBF	60 Hz	$\sim 2,5 \times 10^{-13}$
Radiofréquences	1 GHz	$\sim 4 \times 10^{-6}$
Lumière visible	$\sim 6 \times 10^5$ GHz	$\sim 2,5$
Énergie d'ionisation	-	$> \sim 12$
Rayons UV	$\sim 3 \times 10^6$ GHz	~ 12
Rayons X	$> \sim 3 \times 10^7$ GHz	$> \sim 120$

Note : L'énergie d'ionisation est donnée comme référence.

Les grandeurs physiques qui permettent de caractériser adéquatement les radiofréquences dépendent des conditions d'exposition. Pour une exposition en champ lointain, c'est-à-dire à une distance supérieure à environ 2 fois la longueur d'onde du champ RF émis (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 1990), l'exposition aux radiofréquences peut être caractérisée par le champ électrique (CE) **E**, le champ magnétique (CM) **H** ou la densité de puissance **S**. Ces trois grandeurs physiques sont liées entre elles par la relation donnée par l'équation 1 (Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants [ICNIRP], 1998). Les symboles et les unités de ces grandeurs physiques sont présentés dans le tableau 2. En champ lointain, la densité de puissance décroît avec le carré de la distance à la source.

$$S = EH = E^2/377 = 377 H^2$$

Équation 1

Tableau 2 **Grandeurs physiques permettant de caractériser les radiofréquences**

Grandeur physique	Symbole	Unité
Champ magnétique	H	A/m
Champ électrique	E	V/m
Densité de puissance	S	W/m ²
Débit d'absorption spécifique	DAS	W/kg

La région du champ proche se situe à une distance inférieure à environ $\lambda/2\pi$ de l'antenne, où λ est la longueur d'onde des radiofréquences émises, ce qui correspond généralement à une distance de quelques centimètres de la source dans le cas des radiofréquences (IEEE, 2005). Par exemple, pour une fréquence de 900 MHz, on obtient une région de champ proche d'environ 5 cm. Dans le champ proche, l'exposition est plus difficile à caractériser et nécessite la connaissance du CE et du CM. Par conséquent, la densité de puissance n'est plus une mesure qui permet d'exprimer l'exposition de manière appropriée (ICNIRP, 1998). L'utilisation de calculs simples ne permet alors pas d'évaluer l'exposition aux radiofréquences (ICNIRP, 2009a). Dans cette situation, la grandeur physique la plus appropriée pour caractériser l'exposition est donc le débit d'absorption spécifique (DAS).

Afin de quantifier l'énergie absorbée par le corps d'une personne, le DAS, représentant la quantité de puissance absorbée par unité de masse, est généralement utilisé (IEEE, 2005). Le DAS a l'avantage de permettre une comparaison de l'exposition des sources en champ proche ou en champ lointain. La quantité de rayonnement absorbée dépend des caractéristiques du champ incident (fréquence, intensité, polarisation, etc.), des caractéristiques du corps exposé (taille, géométrie extérieure et propriétés diélectriques des tissus), des effets de mise à la terre et des réflexions par des objets situés près du corps de la personne exposée (ICNIRP, 1998). Le DAS peut être calculé pour le corps entier, une partie du corps, un organe particulier ou pour un volume arbitraire. Un volume correspondant à 1 g ou à 10 g de tissus (ayant la forme d'un cube) est souvent employé pour caractériser une exposition locale, et l'emplacement de celui-ci dans le corps est choisi de manière à produire la plus grande exposition possible.

2.2 Sources de radiofréquences et types d'exposition

L'exposition des individus aux radiofréquences est attribuable aux sources naturelles et artificielles. Ce document s'intéresse au rayonnement provenant des sources artificielles; les sources naturelles ne sont donc discutées que brièvement à titre informatif.

2.2.1 SOURCES NATURELLES

Tout objet qui se trouve à une température donnée émettra un rayonnement électromagnétique dû au rayonnement thermique. Une partie de ce rayonnement se situe dans la gamme des radiofréquences. Ce phénomène est appelé *rayonnement de corps noir*. L'intensité et les caractéristiques de ce type d'exposition dépendent de la température et de la taille des surfaces présentes dans l'environnement. Ainsi, le sol est la principale source naturelle de radiofréquences et émet quelques milliwatts par mètre carré [mW/m²] dans cette gamme de fréquences. Par le même phénomène, le corps humain est lui aussi un émetteur de rayonnement sur une grande gamme de fréquences. Typiquement, le rayonnement de corps noir dans les radiofréquences provenant d'une personne est d'environ 3 mW/m² (ICNIRP, 2009a; Advisory Group on Non-Ionising Radiation [AGNIR], 2012). Ainsi, l'environnement général, même en l'absence de sources artificielles, expose le corps humain à une faible quantité de radiofréquences.

2.2.2 SOURCES ARTIFICIELLES

L'exposition des personnes aux sources artificielles de radiofréquences peut être divisée en deux catégories (Frei *et al.*, 2009). Le premier type d'exposition est généré par des sources dites environnementales, qui peuvent être situées à une distance plus ou moins grande de la personne comme les stations de base, les antennes de radio ou de télévision, les routeurs Internet sans fil, etc. L'exposition aux radiofréquences provenant des sources environnementales est relativement continue, mais d'intensité relativement faible (ICNIRP, 2009a). Un second type d'exposition est généré par des sources locales situées à proximité du corps de l'utilisateur, par les téléphones cellulaires et les téléphones sans fil, par exemple. L'exposition aux radiofréquences provenant de sources dites locales est généralement de courte durée, mais l'intensité du rayonnement est plus grande que celle du rayonnement provenant de sources environnementales (ICNIRP, 2009a). Les caractéristiques de ces deux types de sources sont résumées dans le tableau 3.

L'exposition aux radiofréquences en provenance de sources environnementales est omniprésente depuis plusieurs décennies, et est attribuable à diverses sources. En général, l'intensité des radiofréquences décroît avec l'augmentation de la distance entre la source et la personne exposée. Cependant, le niveau d'exposition à un endroit donné dépend de plusieurs facteurs tels que la puissance rayonnée, la direction de la transmission du signal, l'atténuation en raison d'obstacles et la diffusion attribuable aux bâtiments et aux arbres (Neubauer *et al.*, 2007). La combinaison de ces facteurs fait en sorte que l'intensité des radiofréquences ne peut pas toujours être facilement calculée à partir de la distance relative de toutes les sources environnementales autour d'un endroit donné. Par exemple, des mesures effectuées à proximité d'une station de base en Autriche ont montré que la densité de puissance du signal pouvait varier, à distance égale de l'émetteur, jusqu'à 4 ordres de grandeur, soit d'un facteur de 10 000 (Neubauer *et al.*, 2007). Une analyse de plusieurs méthodes de caractérisation de l'exposition personnelle aux radiofréquences publiée par Frei *et al.* (2010) a d'ailleurs montré que le recours à la distance entre une personne et les sources environnementales n'était pas un bon indicateur de l'exposition réelle pour de courtes durées d'exposition.

Pour ce qui est de l'exposition aux radiofréquences de sources locales, qui sont souvent des appareils électroniques personnels, elle est plus difficile à caractériser, puisque la personne exposée est généralement située dans le champ proche de l'émetteur (Inyang, Benke, McKenzie et Abramson, 2008; ICNIRP, 2009a). Dans cette situation, bien que l'intensité du rayonnement décroisse généralement avec l'augmentation de la distance entre la source et la personne exposée, l'évaluation de l'exposition réelle nécessite l'utilisation de mesures et de modèles numériques plus complexes (Cardis *et al.*, 2011).

L'exposition totale d'une personne aux radiofréquences est déterminée par l'intensité des diverses sources environnementales et la durée d'utilisation des appareils personnels émetteurs de radiofréquences. Jusqu'à récemment, peu de données étaient disponibles sur l'exposition moyenne de la population aux radiofréquences. C'est pourquoi, dans ses orientations de recherches sur les radiofréquences, l'Organisation mondiale de la santé (2010a) avait notamment ciblé la nécessité de quantifier les niveaux d'exposition individuels des différentes sources et de déterminer les facteurs qui influencent l'exposition de la population. Les sections suivantes présentent donc certains des résultats les plus pertinents qui proviennent soit des études documentant les niveaux d'exposition de la population publiées au cours des dernières années, soit des rapports sur les risques sanitaires associés aux radiofréquences publiés par des organismes nationaux de santé publique. Les articles ont été repérés à la suite de recherches par mots-clés (*electromagnetic fields AND environmental exposure*) dans *PubMed* et *Google Scholar*, à partir des références des articles trouvés et à partir des

bibliographies de rapports d'expertises d'organismes de santé publique. Il ne s'agit donc pas d'une revue systématique des études publiées à ce sujet.

Les prochaines sections décriront les méthodes de mesure des radiofréquences, les niveaux d'exposition aux radiofréquences provenant de la téléphonie mobile et des autres sources d'exposition, et l'évolution de l'exposition en fonction du temps.

Tableau 3 Fréquence, puissance et exposition typique de certaines sources environnementales et locales d'exposition

	Fréquence MHz	Puissance ^a	Type de mesure d'exposition	Exposition ^a
Téléphone cellulaire ^b (OMS, 2014)	824-849 1 710- 1 755 1 850- 1 915 2 500- 2 690	0,1-2 W	DAS maximal à l'oreille	0,5 à 1,5 W/kg
Téléphone sans fil de maison – DECT 6.0 (Repacholi <i>et al.</i> , 2012)	1 920-1 930	2-10 x 10 ⁻³ W	DAS maximal à l'oreille	0,008-0,06 W/kg
Four à micro-ondes (ICNIRP, 2009a)	2 450	500-1 500 W	Maximum	< 50 W/m ²
Routeur Internet sans fil – Wi-Fi (Joseph <i>et al.</i> , 2010)	2 400-2 500; 5 150-5 850	100 mW	Moyenne ambiante	18 x 10 ⁻⁶ W/m ²
Compteur électrique de nouvelle génération ^c (Hydro-Québec, 2012)	902-928	0,425 W	Moyenne à 1 m	< 50 x 10 ⁻⁶ W/m ²
Station de base de téléphonie mobile ^b (Rowley et Joyner, 2012)	869-894; 2 110-2 155 1 930-1 995 2 500-2 690	< 100 W	Moyenne ambiante	730 x 10 ⁻⁶ W/m ²
Antenne de radio AM ^d	0,5-1,7	50 x 10 ³ W	-	-
Antenne de radio FM ^d (Joseph <i>et al.</i> , 2010)	88-108	100 x 10 ³ W	Moyenne ambiante	96 x 10 ⁻⁶ W/m ²
Antenne de télévision ^d (Joseph <i>et al.</i> , 2010)	54-88 174-216 470-698	2 x 10 ⁶ W	Moyenne ambiante	89 x 10 ⁻⁶ W/m ²

^a Les valeurs de puissance et d'exposition sont données à titre d'exemple; elles peuvent varier en fonction des caractéristiques individuelles des sources, du protocole de mesures, des appareils utilisés et de plusieurs autres facteurs.

^b Les bandes de fréquences 698-764 et 776-794 MHz seront également mises aux enchères pour la téléphonie cellulaire. Une partie de la bande 2 500-2 690 MHz n'est pas encore utilisée pleinement.

^c La donnée pour la puissance ne tient pas compte du facteur de forme de l'émission (*duty cycle*).

^d La donnée pour la puissance est celle de la puissance apparente rayonnée (PAR).

2.3 Méthodes de mesures de l'exposition aux radiofréquences

La technique utilisée pour caractériser l'exposition aux radiofréquences dépend du type d'exposition à mesurer. Ainsi, l'exposition aux radiofréquences de sources environnementales peut être mesurée par différents appareils afin de quantifier le niveau d'exposition à un endroit donné, pour un individu donné ou pour une population donnée. L'évaluation de l'exposition aux sources locales de radiofréquences peut, quant à elle, être faite à partir d'une combinaison de mesures ponctuelles, de simulations numériques et de l'estimation des durées d'exposition.

En général, trois types d'appareils sont employés pour effectuer des mesures d'exposition en champ lointain : les appareils de mesure à large bande, les appareils de mesure à bande étroite et les exposimètres personnels. En champ proche, des simulations numériques ou des mesures en laboratoire sur des modèles physiques sont généralement utilisées pour calculer le DAS lié à une source d'exposition particulière.

Les appareils de mesure à large bande sont capables de capter simultanément les radiofréquences provenant de plusieurs sources, même si ces radiofréquences ont des longueurs d'onde différentes. L'usage de ce type d'appareil permet donc de mesurer l'intensité totale des CEM à un endroit, mais ne permet généralement pas de distinguer quelle est la contribution individuelle des différentes sources à l'intérieur de la plage de sensibilité de l'appareil.

Les appareils de mesure à bande étroite sont capables de discriminer les différentes sources de radiofréquences présentes à un endroit et sont généralement plus sensibles que les appareils à large bande (Rowley et Joyner, 2012). Il est donc possible d'utiliser ce type d'appareil afin de caractériser l'apport relatif de chaque source au CEM total par la prise d'une mesure pour chaque plage de fréquences d'intérêt.

L'exposimètre personnel est un appareil de mesure qui peut être à bande étroite ou à large bande, mais dont la conception est faite de manière à ce qu'il soit facilement transportable. Il devient alors possible de caractériser le CEM moyen auquel une personne est exposée en prenant des mesures à intervalles réguliers au cours d'une période de temps où l'exposimètre est porté. Cependant, quoique l'emploi d'un exposimètre personnel permette des estimations intéressantes de l'exposition d'un individu, la perturbation des CEM incidents, attribuable à la présence du corps de la personne portant l'exposimètre, entraîne une incertitude considérable en ce qui a trait au niveau d'exposition mesuré (ICNIRP, 2009a). Enfin, les mesures prises avec un exposimètre personnel ne permettent pas d'évaluer l'exposition en champ proche.

L'exposition en champ proche peut être caractérisée par le DAS à partir de modèles numériques du corps humain. Ces modèles numériques peuvent être simples (modèles basés sur des sphères par exemple), ou complexes (modèles anatomiques de haute résolution à partir d'images médicales par exemple). L'exposition en champ proche peut également être caractérisée par le DAS en laboratoire à partir de modèles physiques, appelés fantômes, qui simulent les propriétés diélectriques du corps humain (ICNIRP, 2009a). Ce type de mesure est réglementé, et les paramètres des tests sont ajustés de manière à donner une mesure maximale pour assurer le respect des limites d'exposition de tous les utilisateurs (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail [AFSSET], 2009; Beard *et al.*, 2006).

2.4 Exposition aux radiofréquences provenant de la téléphonie mobile

L'exposition de la population aux radiofréquences de la téléphonie mobile est attribuable à des téléphones cellulaires appartenant à des utilisateurs, à des téléphones cellulaires appartenant à d'autres personnes ou à des stations de base.

Les téléphones cellulaires émettent des radiofréquences à des fréquences de 450 à 2 700 MHz avec une puissance maximale d'émission de 0,1 à 2 W (OMS, 2014). La puissance et la fréquence de l'émission dépendent notamment de la technologie utilisée et des choix des opérateurs. Par exemple, les téléphones de quatrième génération (*Long-Term Evolution* – LTE) ont une puissance maximale moyenne de 200 mW (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012).

Puisque la distance entre l'antenne d'un téléphone cellulaire et l'utilisateur est généralement de quelques centimètres, l'utilisateur se trouve dans la région du champ proche de l'émetteur. Comme il est mentionné précédemment, dans cette situation, la quantité la plus appropriée pour caractériser l'exposition est donc le DAS. Le DAS maximal moyenné sur 1 g ou sur 10 g de tissus des téléphones cellulaires se situe généralement entre 0,5 et 1,5 W/kg (AGNIR, 2012; Centre international de Recherche sur le Cancer [CIRC], 2013). Pour ce qui est d'une utilisation du téléphone à l'oreille, la majorité de l'énergie qui est absorbée dans le cerveau est absorbée dans l'hémisphère situé du côté où le téléphone est employé – 97 à 99 % (Ahlbom *et al.*, 2009). La taille de l'utilisateur du téléphone a aussi une influence sur la quantité d'énergie absorbée par le corps. Pour une même source, le crâne et les tissus entourant le cerveau étant plus minces chez les enfants, l'exposition devrait être plus élevée lorsqu'elle est caractérisée par le DAS moyenné sur l'ensemble du cerveau (AGNIR, 2012; ICNIRP, 2009a).

En pratique, l'exposition individuelle aux radiofréquences émises par les téléphones cellulaires varie en fonction de plusieurs facteurs, entre autres, l'emplacement géographique de l'utilisateur (distance des sources, présence d'obstacles, etc.), la position du téléphone par rapport à la tête et la taille de la tête. L'exposition totale d'une personne dépendra également de la durée et de la fréquence d'utilisation du téléphone cellulaire (AGNIR, 2012). De plus, les systèmes de modulation de la puissance (*adaptive power control*) présents sur les téléphones cellulaires modernes ajustent le signal émis à la puissance minimale qui permet une bonne communication radio, et permettent aux appareils de réduire la puissance émise d'un facteur pouvant aller jusqu'à 1 000 (ICNIRP, 2009a). En pratique, des études ont montré que, dans des conditions d'utilisation variées, ces technologies ont contribué à des réductions de la puissance moyenne émise de 50 % ou plus (Vrijheid *et al.*, 2009). Les téléphones mobiles se servant d'une technologie plus récente offriraient de meilleures performances (AGNIR, 2012). Enfin, de manière générale, l'utilisation d'un dispositif mains libres (avec fil ou sans fil¹) réduit considérablement l'exposition de la tête aux radiofréquences; environ de 10 à 100 fois (Kühn, Cabot, Christ, Capstick et Kuster, 2009; CIRC, 2013). Enfin, lorsque les téléphones cellulaires ne sont pas en train de transmettre de l'information lors d'un appel, c'est-à-dire lorsqu'ils sont en mode attente, les émissions qui en proviennent sont négligeables (Mild, Andersen et Pedersen, 2012).

Dans le cas de l'exposition aux radiofréquences provenant des stations de base, une analyse récente d'une base de données comptant plus de 170 000 mesures de CEM réalisées dans 21 pays, incluant les données issues d'études canadiennes, a été publiée par Rowley et Joyner (2012). Grâce à cette analyse, il a été possible d'obtenir une moyenne de la densité de puissance provenant des stations de base de $7,3 \times 10^{-4}$ W/m². Cette densité de puissance correspond à un champ électrique d'environ

¹ Dans la plupart des cas, les appareils sans fil se servant de la technologie Bluetooth ont une puissance d'émission maximale de quelques mW (Foster, 2013).

0,5 V/m. Les auteurs de cette analyse ont noté qu'il est cependant difficile de comparer directement les mesures provenant de tous ces protocoles de recherche différents. En effet, des facteurs, qui sont difficiles à quantifier ou à comparer, ont influencé les mesures; les deux principaux étant l'utilisation d'appareils de mesure possédant des caractéristiques et des sensibilités différentes et la sélection non standardisée des lieux de mesure (Rowley et Joyner, 2012).

Afin de comparer l'exposition imputable aux stations de base à celle imputable aux téléphones cellulaires, il est nécessaire de calculer le DAS généré par les stations de base. Ces calculs ne sont pas toujours simples, puisque, comme il est mentionné, l'absorption des radiofréquences dépend des conditions environnementales. Ainsi, plusieurs études ont été réalisées afin de comparer l'exposition imputable aux sources en champ proche et à celles en champ lointain. Dans le cas d'un adulte, l'exposition à une onde plane de 1 W/m² en champ lointain correspond à un DAS moyenné sur le corps entier de moins de 0,008 W/kg à 2 000 MHz (ICNIRP, 2009a). Dans le cas d'un enfant, une exposition dans les mêmes conditions produit un DAS moyenné sur le corps entier qui est près de 40 % supérieur (ICNIRP, 2009a). Lauer *et al.* (2013) ont comparé le niveau d'exposition associé aux sources en champ proche et en champ lointain (Lauer *et al.*, 2013). Ils ont constaté que ce sont les sources en champ proche (téléphone cellulaire GSM [*Global System for Mobile Communications*] et téléphone sans fil DECT [*Digital Enhanced Cordless Telephone*] aussi appelé *Téléphone sans fil numérique amélioré*) qui induisent la majorité (73 à 80 %) de l'exposition pour le corps et la tête. Seuls les téléphones employant une technologie plus récente (*Universal Mobile Telecommunications System* [UMTS]) induisent une exposition plus faible que les sources environnementales – 44 % (Lauer *et al.*, 2013).

2.5 Autres sources de radiofréquences

Même si le téléphone cellulaire est une source d'exposition aux radiofréquences qui est de plus en plus répandue, il existe plusieurs autres sources qui émettent ce type de rayonnement, et la population est exposée à certaines de ces sources depuis plusieurs années. Les fours à micro-ondes; les routeurs Internet sans fil (Wi-Fi); les téléphones sans fil de maison, les compteurs électriques de nouvelle génération (CGN, aussi appelés compteurs électriques intelligents) et les antennes de radio AM, de radio FM et de télévision sont des sources courantes de radiofréquences pour la population. Plusieurs autres appareils électroniques, comme les interphones de surveillance pour bébé ou les jouets téléguidés, émettent aussi des radiofréquences à des puissances et à des fréquences variées. Les sous-sections suivantes décrivent brièvement ces diverses sources.

2.5.1 FOUR À MICRO-ONDES

Les fours à micro-ondes émettent généralement un rayonnement à une longueur d'onde de 2 450 MHz, à des puissances d'émission variant de 500 à 1 000 W. Les fours à micro-ondes ont donc le potentiel de causer des blessures sérieuses s'ils sont mal utilisés. Cependant, la conception de ces appareils se fait selon des normes établies qui font en sorte qu'un dispositif empêche normalement l'émission de radiofréquences lorsque la porte est ouverte. De plus, durant le fonctionnement, l'exposition due aux fuites, mesurée à 5 cm de l'appareil, se situe largement en dessous de la limite d'exposition réglementaire de 50 W/m² (ICNIRP, 2009a). À ce sujet, Santé Canada précise qu'« *Il est possible que votre four libère une certaine quantité d'énergie des micro-ondes [...] pendant qu'il est en marche, mais cela ne devrait poser aucun risque pour la santé, du moment que le four est bien entretenu.* » (Santé Canada, 2003)

2.5.2 ROUTEUR INTERNET SANS FIL (Wi-Fi)

Les routeurs employés pour les réseaux sans fil ont une *puissance apparente rayonnée*² (PAR) qui peut aller jusqu'à 4 W, mais les puissances maximales d'émission se situent généralement en dessous de 100 mW (Foster, 2013). En pratique, la puissance émise est encore plus faible, puisqu'elle varie en fonction de plusieurs facteurs, entre autres, le type d'appareil et le niveau d'utilisation du réseau (AFSSET, 2009).

2.5.3 COMPTEURS ÉLECTRIQUES DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Les compteurs électriques de nouvelle génération (CNG) transmettent l'information sur la consommation électrique en se servant des radiofréquences. Selon les données d'Hydro-Québec, les CNG employés au Québec émettent dans la bande de fréquence de 902 à 928 MHz. Les émissions durent environ 50 ms et se font de 1 500 à 2 000 fois par jour. Lorsque le compteur transmet des données, la puissance maximale d'émission est de 0,425 W. Selon l'analyse et les mesures d'Hydro-Québec, sur une durée de 6 min, soit la durée d'analyse à considérer conformément au *Code de sécurité 6* (CS6) de Santé Canada, la densité de puissance moyenne à 1 m du CNG est inférieure à $5,0 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$.

L'exposition de la population aux radiofréquences émises par ce type d'appareil est donc relativement faible par rapport au niveau de rayonnement ambiant déjà présent dans l'environnement. Par exemple, l'exposition moyenne aux radiofréquences générées par les CNG – $5,0 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ – à 1 m de ceux-ci est près de 15 fois plus faible que l'exposition moyenne aux radiofréquences produites par les stations de base – $7,3 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ (Rowley et Joyner, 2012), et l'exposition directe, à 3 m, représenterait de 3 à 7 % de l'exposition attribuable à des sources environnementales³.

Dans la littérature grise, on retrouve une analyse théorique qui avance l'hypothèse selon laquelle, dans des circonstances normales, les émissions de radiofréquences provenant des CNG pourraient dépasser la norme américaine (Sage Associates, 2011). Malheureusement, aucune mesure expérimentale n'est présentée pour appuyer ces conclusions. De plus, cette évaluation est basée sur des hypothèses d'exposition qui ne semblent pas respecter les méthodes de calculs fixées par la norme américaine, ne tient pas compte de la non-homogénéité des CEM à de faibles distances des CNG, formule des hypothèses de réflexions à propos des CEM qui ne sont pas soutenues par des preuves scientifiques et fait référence à des recommandations de limites d'exposition désuètes. Ces critiques sont d'ailleurs détaillées dans un autre document issu de la littérature grise produit par l'Electric Power Research Institute (EPRI, 2011).

2.5.4 TÉLÉPHONES SANS FIL DE MAISON

Historiquement, plusieurs technologies ont été employées pour les téléphones sans fil de maison. De nos jours, la plupart des téléphones sans fil de maison offerts sur le marché sont de type DECT (ConsumerReports, 2013). La puissance de transmission moyenne de ce type d'appareil est d'environ 10 mW (European Telecommunications Standards Institute [ETSI], 2015). La faible puissance des combinés entraîne donc un DAS local, soit de 0,008 à 0,06 W/kg, qui est significativement plus faible que celui d'un téléphone cellulaire, soit de 0,5 à 1,5 W/kg

² La *puissance apparente rayonnée*, qui tient compte du facteur de gain de l'antenne, est nécessaire, puisque l'émission de l'antenne est parfois concentrée dans des directions particulières plutôt que d'être omnidirectionnelle.

³ Selon Lauer *et al.*, (2013), le DAS moyenné pour le corps entier sur une période de 24 h se situe entre 34,2 et 73,5 mJ/kg. Une exposition de $5,6 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ (à 3 m d'un CNG) correspond à $4,5 \times 10^{-3} \times 24 \times 3 600 \times 5,6 \times 10^{-6} = 2,2 \times 10^{-3} \text{ J/kg}$ sur une période de 24 h (voir l'équation 1 et la figure 2).

(Repacholi *et al.*, 2012). Contrairement aux combinés, qui n'émettent que durant leur utilisation, les stations de base de ce type d'appareil émettent en tout temps (AFSSET, 2009).

2.5.5 ANTENNES DE RADIO AM, DE RADIO FM ET DE TÉLÉVISION

Les antennes de radio et de télévision sont une source d'exposition aux radiofréquences, et elles sont présentes dans l'environnement depuis de nombreuses années. La puissance apparente rayonnée (PAR) de ce type d'antenne de télécommunication, qui dépend, entre autres choses, du type de licence accordé, peut atteindre des niveaux très élevés. Les antennes de radio AM, de radio FM et de télévision peuvent respectivement avoir une PAR maximale de 50 kW, de 100 kW et de 1 MW (Industrie Canada, 2009, 2011, 2010). Ces très fortes puissances d'émission peuvent entraîner une exposition plus importante près des antennes, même si la majorité de la puissance est dirigée vers l'horizon et non vers le sol (Office of Engineering and Technology [OET], 2012).

2.6 Comparaison du niveau d'exposition provenant des sources environnementales

Plusieurs études ont tenté de caractériser l'exposition aux radiofréquences en champ lointain provenant de toutes les sources présentes dans l'environnement. Bien que ce type d'étude ne permette pas d'évaluer l'exposition locale au niveau de la tête d'un utilisateur de téléphone cellulaire, qui demande des calculs complexes similaires à ceux effectués par Lauer *et al.* (2013), il permet néanmoins d'obtenir une vue d'ensemble des sources d'exposition se trouvant dans l'environnement d'une population (Frei *et al.*, 2011a).

En 2005 et en 2006, Viel, Cardis, Moissonnier, de Sèze et Hours (2009) ont utilisé un exposimètre personnel afin de mesurer l'exposition aux radiofréquences de 377 personnes dans deux villes françaises; les chercheurs souhaitaient mesurer l'exposition de ces personnes à des sources environnementales pendant 24 heures. L'appareil employé avait un seuil de détection de 0,05 V/m ($6,6 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$) et a été configuré pour prendre des mesures dans 12 plages de fréquences toutes les 13 secondes (Viel, Cardis, Moissonnier, de Sèze et Hours, 2009). Le champ électrique total a dépassé le seuil de détection de l'appareil dans 46,6 % des mesures effectuées. Les sources de rayonnement individuelles qui ont dépassé le seuil de détection dans plus de 10 % des mesures sont : le téléphone sans fil – 17,2 %, le Wi-Fi et le four à micro-ondes⁴ – 14,1 % et la radio FM – 11,0 % (Viel, Cardis, Moissonnier, de Sèze et Hours, 2009). Les auteurs de cette étude ont également déterminé les sources d'exposition produisant de fortes intensités de champ électrique à partir de la proportion des mesures situées au-dessus de 1 V/m. Les seules sources d'exposition produisant un tel niveau de champ électrique étaient les téléphones cellulaires des sujets de l'étude – 0,1 à 0,3 %, les téléphones sans fil de maison – 0,2 % et les fours à micro-ondes – 0,1 % (Viel, Cardis, Moissonnier, de Sèze et Hours, 2009). Pour toutes les sources de radiofréquences, le champ électrique total moyen était de 0,2 V/m ($1,06 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$). L'exposition moyenne aux sources individuelles était plus importante dans le cas de la radio FM (0,044 V/m); du Wi-Fi et du four à micro-ondes – 0,038 V/m; du téléphone sans fil – 0,037 V/m ainsi que des téléphones cellulaires et des stations de base – 0,012 à 0,037 V/m (Viel, Cardis, Moissonnier, de Sèze et Hours, 2009).

⁴ Puisque la plage de fréquences des fours à micro-ondes et des routeurs Wi-Fi est très proche, il n'est pas possible de distinguer ces deux sources d'exposition. Toutefois, il est possible de recourir à un registre d'activités, qui est tenu par la personne portant l'exposimètre afin de distinguer les périodes d'utilisation du four à micro-ondes, mais même cette méthode amène malheureusement son lot d'incertitudes.

Une étude de Joseph *et al.* (2010) a comparé l'exposition de la population de la Belgique, de la Suisse, de la Slovénie, de la Hongrie et des Pays-Bas. Ces pays ont été sélectionnés, puisqu'ils ont fait l'objet d'études de mesures d'exposition au moyen d'un exposimètre personnel de 2007 à 2009. Les auteurs ont observé que, dans tous les microenvironnements qui ont été étudiés, l'exposition aux radiofréquences en provenance des téléphones cellulaires et des antennes relais était importante. De plus, dans la plupart des cas, ces sources étaient les sources d'exposition dominantes (Joseph *et al.*, 2010). Le niveau d'exposition de chaque pays était du même ordre de grandeur avec une densité de puissance moyenne, provenant de toutes les sources, située entre 10^{-4} et 10^{-3} W/m² (0,2 à 0,6 V/m) dans la plupart des microenvironnements étudiés (Joseph *et al.*, 2010). Même si l'exposition à l'intérieur des maisons était généralement similaire dans tous les pays à l'étude, la contribution individuelle des sources à l'origine de l'exposition aux radiofréquences totales différait d'un pays à l'autre (Joseph *et al.*, 2010).

En 2009, Bolte et Eikelboom (2012) ont recruté des volontaires aux Pays-Bas en vue de caractériser l'exposition aux radiofréquences mesurées à l'aide d'un exposimètre personnel porté pendant 24 h. L'exposition totale moyenne, sans tenir compte de l'utilisation d'un téléphone cellulaire personnel, était de $1,8 \times 10^{-4}$ W/m² (0,26 V/m). Les auteurs ont trouvé, toujours en excluant l'emploi du téléphone cellulaire personnel par le participant, que les principales sources environnementales de radiofréquences étaient les appels effectués avec un téléphone cellulaire dont l'utilisateur n'est pas le participant (37,5 %), les téléphones sans fil et leurs stations de base (31,7 %) ainsi que les stations de base du réseau de téléphonie cellulaire (12,7 %). Les auteurs ont conclu que l'exposition moyenne totale dépend principalement des appels téléphoniques effectués alors que l'exposition est élevée pendant une courte durée, ce qui rend difficiles la classification et la prédiction de l'exposition moyenne aux radiofréquences en fonction des activités d'une personne.

Lauer *et al.* (2013) ont comparé le niveau d'exposition des sources en champ proche et en champ lointain. Pour ce qui est du scénario d'exposition élaboré à partir des données d'expositions environnementales de personnes volontaires, l'utilisation combinée du téléphone cellulaire muni de la technologie GSM et du téléphone sans fil de maison (DECT) contribuait de 73 à 80 % de l'exposition pour le corps entier. Les auteurs ont noté que l'emploi d'un téléphone cellulaire muni de la technologie UMTS, plus récente que le GSM, réduisait l'exposition étant donné que ce type de téléphone émet à une puissance moyenne plus faible. En effet, pour le même scénario d'exposition, l'utilisation d'un téléphone cellulaire UMTS ne représenterait que 1 % de l'exposition du corps entier, alors que l'utilisation du téléphone sans fil DECT représenterait alors 43 % de l'exposition totale.

2.7 Évolution du niveau d'exposition en fonction du temps et de l'apparition de nouvelles technologies

L'étude de Rowley et Joyner (2012)⁵ visait à comparer les niveaux d'exposition aux radiofréquences provenant des stations de base en fonction du temps. Pour ce faire, ils ont accédé aux mesures d'exposition contenues dans plusieurs bases de données nationales constituées à partir de mesures des niveaux d'exposition aux radiofréquences effectuées pendant plusieurs années, soit entre 2001 et 2009. La comparaison inclut des mesures à bande étroite effectuées au Royaume-Uni, en Espagne, en Grèce et en Irlande ainsi que des mesures à large bande effectuées aux États-Unis. Au cours de la période analysée, selon le cas, le nombre d'abonnés aux services de téléphonie mobile a augmenté de 81 % au Royaume-Uni, de 456 % aux États-Unis, et les technologies de troisième génération ont été déployées, sans pour autant modifier le niveau moyen d'exposition aux

⁵ Un des auteurs de cette étude est membre de la GSM Association, un regroupement d'opérateurs de téléphonie mobile, ce qui représente un conflit d'intérêts potentiel.

radiofréquences mesurées qui ont été enregistrées dans les bases de données consultées par Rowley et Joyner. Les auteurs ont conclu qu'il est raisonnable de penser que le rayonnement radiofréquence provenant des stations de base est devenu présent à de plus en plus d'endroits au cours de la période étudiée, étant donné l'augmentation de la couverture des services de téléphonie mobile. Ils notent cependant que l'exposition est demeurée relativement stable, malgré l'augmentation du nombre d'émetteurs, comme cela était anticipé. Rowley et Joyner expliquent ce phénomène en rappelant que le signal à un endroit donné est généralement déterminé de manière à ce que l'intensité de ce signal soit suffisante pour fournir un service téléphonique de qualité. Ainsi, selon ces auteurs, les données recueillies à ce jour suggèrent qu'il n'y pas eu de hausse significative des niveaux d'exposition de la population aux radiofréquences émises par les stations de base à la suite de l'introduction et du déploiement de la technologie GSM. Ils sont d'avis que le déploiement de nouvelles technologies de téléphonie mobile ne devrait pas influencer sur le niveau moyen d'exposition.

En 2006 et en 2009, Tomitsch et Dechant (2012) ont effectué deux séries de mesures des radiofréquences issues de toutes les sources environnementales dans des chambres à coucher en Autriche. Au cours de cette période, la médiane de la densité de puissance totale a augmenté de 44 %. De 2006 à 2009, l'exposition médiane aux signaux GSM à 900 MHz a crû de manière statistiquement significative (54,6 %), mais l'exposition médiane aux GSM à 1 800 MHz et aux téléphones sans fil DECT a diminué de manière non statistiquement significative (de respectivement 22 % et 22,4 %). L'exposition médiane aux UMTS, dont le déploiement s'est poursuivi de 2006 à 2009, a augmenté de même que l'exposition aux radiofréquences provenant des réseaux Wi-Fi présents dans 55 maisons additionnelles. Toutefois, de grandes variations ont été observées dans les niveaux d'exposition des différents sites de mesures.

À l'aide de mesures prises en 2009 et en 2010, Joseph, Verloock, Goeminne, Vermeeren et Martens (2012a) ont analysé l'effet de l'introduction de nouvelles technologies sur les niveaux d'exposition aux radiofréquences en Belgique, aux Pays-Bas et en Suède. Des mesures ponctuelles de champ électrique ont été effectuées à l'aide d'un appareil à bande étroite. L'étude de Joseph et de ses collaborateurs (2012a) a indiqué que le CE maximal variait de 0,023 à 3,9 V/m, avec une moyenne de 0,7 V/m. Pour tous les microenvironnements, la source principale d'exposition était des stations de base GSM à 900 MHz et à 1 800 MHz. Les antennes GSM contribuaient en moyenne à 60 % du CE total, tandis que les antennes des technologies LTE et WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) représentaient moins de 1 % du signal. Les auteurs de l'étude ont expliqué que leurs résultats étaient sans doute imputables au fait que la technologie GSM était la plus employée au moment de la prise de leurs mesures, que les technologies plus récentes émettaient généralement avec une puissance plus faible et que le déploiement de ces nouvelles technologies n'était pas encore complété.

En 2011, Joseph, Verloock, Goeminne, Vermeeren et Martens (2012b) ont mesuré les radiofréquences provenant de sources environnementales en vue de caractériser l'effet de l'ajout d'un nouveau réseau LTE mis à l'essai sur l'exposition. Le CE total provenant de toutes les stations de base variait de 0,06 à 4,2 V/m. En moyenne, les signaux LTE contribuaient à 0,4 % de l'exposition totale, comparativement à 56,3 % pour les signaux de radio FM, 17,4 % pour les signaux GSM à 1 800 MHz, 11,9 % pour les signaux GSM à 900 MHz et 6,8 % pour les signaux UMTS-HSPA (*Universal Mobile Telecommunications System – High Speed Pocket Access*). Les auteurs ont extrapolé ces mesures, réalisées sur un réseau téléphonique sans utilisateurs actifs, afin d'évaluer les radiofréquences générées par ce type de réseau dans le cas d'une utilisation maximale. Le champ électrique maximal attendu était évalué à 1,9 V/m.

2.8 Résumé des connaissances sur les niveaux d'exposition

Les sources d'exposition aux radiofréquences sont diverses et sont de plus en plus présentes. Comme l'ont noté Rowley et Joyner (2012), il est raisonnable de penser que le déploiement des réseaux de télécommunications a probablement contribué à la diminution du nombre d'endroits où l'exposition environnementale au rayonnement provenant des stations de base était faible. De même, la hausse du nombre de ménages qui sont munis d'un routeur Internet sans fil, de téléphones cellulaires, de téléphones sans fil de maison et d'autres appareils sans fil a sans doute influé sur l'augmentation de l'exposition de la population aux radiofréquences. Cependant, selon les quelques données disponibles, les niveaux d'exposition associés à ces sources relativement nouvelles semblent comparables à ceux déjà générés par les antennes de télécommunication pour la radio et la télévision.

Malgré la contribution importante des sources environnementales à l'exposition aux radiofréquences, les sources d'exposition volontaire (téléphone, appareils sans fil, etc.) semblent demeurer la source prédominante d'exposition, particulièrement dans le cas de la tête. Le champ électrique total moyen auquel la population est exposée est généralement de moins de 1 V/m (3 mW/m²).

L'apparition des nouveaux appareils sans fil peut accroître légèrement le niveau d'exposition. Cependant, dans le cas des sources telles que les CNG, les niveaux d'exposition sont très faibles, notamment en raison du petit facteur de forme de l'émission (*duty cycle*) employé par ces appareils de même que de la distance entre ces appareils et les personnes exposées, qui est beaucoup plus grande que la distance entre un téléphone cellulaire ou un téléphone sans fil de maison et les personnes qui les emploient. L'exposition attribuable à cette nouvelle source est donc très faible par rapport au niveau des expositions historiques imputables aux téléphones cellulaires et aux autres sources environnementales présentes depuis l'implantation des systèmes de radiodiffusion et de télédiffusion.

Globalement, les données récentes sur l'exposition de la population aux radiofréquences montrent que l'exposition a vraisemblablement peu augmenté depuis l'évaluation de l'OMS, publiée dans son aide-mémoire n°304 de 2006, dans laquelle elle concluait que « [...] *l'exposition aux RF des stations de base va de 0,002 % à 2 % des niveaux fixés par les directives internationales sur l'exposition, en fonction de divers facteurs comme la proximité de l'antenne et l'environnement immédiat. Ces niveaux sont plus faibles ou comparables à ceux que l'on observe avec la transmission de la radio ou de la télévision* » (OMS, 2006a).

3 Recommandations de limites d'exposition

3.1 Approche des organismes ayant évalué les risques des radiofréquences pour la santé

Toutes les recommandations de limites d'exposition aux radiofréquences qui ont été produites par des organismes reconnus comme Santé Canada, l'ICNIRP et l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sont basées sur une revue d'ensemble de la littérature scientifique publiée dans ce domaine. Ces organismes ont déterminé tous les impacts possibles sur la santé d'une exposition aux radiofréquences et ont formulé leurs recommandations. L'objectif principal de ces recommandations est d'éviter les effets néfastes sur la santé engendrés par une surexposition aux radiofréquences (ICNIRP, 1998; IEEE, 2005; Santé Canada, 2009a, 2015).

Afin d'établir des limites d'exposition aux radiofréquences, les organismes procèdent à une revue de la littérature scientifique et ont comme principal objectif de déterminer : les mécanismes d'action décrivant l'interaction entre l'exposition et les processus physiques, chimiques et biologiques dans les tissus vivants; les effets biologiques sur les tissus isolés (*in vitro*) et sur les autres organismes que l'humain (*in vivo*); et les effets biologiques et les effets sur la santé chez les humains. Pour réaliser l'évaluation de la littérature scientifique en ce qui a trait à chacune de ces questions et lors de la synthèse de l'ensemble de ces données, les organismes reconnus emploient une approche de prépondérance de la preuve (Santé Canada, 2009a, 2015; ICNIRP, 2002; IEEE, 2005). Cette approche permet de tenir compte, entre autres choses, de la qualité des études analysées de même que de la fiabilité et de la reproductibilité de leurs résultats. Par exemple, la quantité et la qualité des données recueillies ne permettent parfois pas d'établir des niveaux d'énergie, qui produiraient des effets clairs de manière reproductible; les expériences de répétition des premiers résultats étant souvent inexistantes ou négatives (IEEE, 2005). De telles études se voient accorder moins de poids lors de l'évaluation de la littérature scientifique.

La détermination des mécanismes d'action entre les radiofréquences et les tissus biologiques n'est pas nécessaire à l'établissement d'un risque pour la santé chez l'humain. En effet, des preuves convaincantes en matière d'expériences biologiques ou l'observation directe d'effets néfastes sur la santé chez l'humain pourraient être suffisantes à la démonstration d'un risque. Cependant, la détermination de mécanismes d'action facilite l'établissement de liens de causalité entre les expositions et les effets observés et rend également plus aisé l'établissement du niveau d'exposition permettant d'éviter les effets néfastes sur la santé qui ont été observés.

De manière similaire, la détermination des effets biologiques ou des effets sur la santé, au niveau de la cellule ou de l'animal, n'est pas nécessaire à la détermination d'un risque pour la santé chez l'humain. Cependant, la détermination de tels effets peut soutenir l'établissement d'un lien de causalité entre l'exposition à un agent et des effets sur la santé chez l'humain, qui seraient observés. Par exemple, tous les agents connus comme étant cancérigènes chez l'humain, qui ont fait l'objet d'études de cancérigénicité chez des modèles animaux, ont produit des résultats positifs (CIRC, 2006).

Il est cependant important de noter que la démonstration d'un effet biologique n'entraîne pas nécessairement la présence d'un effet néfaste sur la santé. Par exemple, l'observation d'une réponse cellulaire à la suite d'une légère hausse de la température corporelle est attendue. Ce type de réponse cellulaire, causé par exemple par une augmentation de la température ambiante, est normal et n'est pas reconnu pour avoir des conséquences néfastes sur la santé. Une telle réponse cellulaire, par l'intermédiaire de protéines de choc thermique par exemple, est attendue et fait partie de

l'ensemble des réponses complexes et souvent encore inconnues par lesquelles les cellules réagissent à des perturbations de leur environnement auquel elles sont finement adaptées (AGNIR, 2012). Ainsi, en l'absence de connaissances sur l'impact potentiel des changements biologiques notés, il est nécessaire de se référer aux données recueillies chez les animaux et les humains afin d'établir que ces effets biologiques ont un impact perceptible sur la santé, ou qu'ils sont considérés comme étant du domaine des réponses normales du corps humain aux stimuli extérieurs. C'est ainsi que les organismes de santé en viennent à séparer les effets biologiques, présents en laboratoire mais qui n'ont pas d'impacts démontrés sur la santé, des effets néfastes pour la santé, qui produisent des effets néfastes prévisibles et mesurables.

Finalement, la détermination d'effets directs sur la santé humaine occupe généralement une place très importante dans l'évaluation des risques liés à l'exposition à un agent particulier. La détermination de ces effets peut être faite au moyen d'expériences en laboratoire et d'études épidémiologiques ou encore par l'extrapolation de données chez les animaux lorsqu'il y a raison de croire que l'humain pourrait avoir une réponse similaire aux réponses animales. Il faut noter que la détermination d'effets chez l'humain est parfois difficile à cause de la présence potentielle de facteurs confondants et de considérations en matière de coûts (des études de grande envergure sont nécessaires afin de détecter de petits effets) et d'éthique (en l'absence de garanties de sécurité, il peut s'avérer problématique d'exposer volontairement des personnes vulnérables), devant être pris en compte.

En tout, plusieurs centaines d'articles ont été analysés notamment par Santé Canada, l'ICNIRP et l'IEEE afin d'en arriver à une évaluation scientifiquement rigoureuse. Par exemple, dans son évaluation publiée en 2005, l'IEEE indiquait avoir évalué plus de 1 300 articles publiés dans des journaux avec révision par les pairs sur une période de plus de 50 ans (IEEE, 2005).

3.1.1 MISE À JOUR DES RECOMMANDATIONS DE LIMITES D'EXPOSITION

Les limites d'exposition recommandées par l'ICNIRP, l'IEEE et la Federal Communications Commission (FCC) sont parfois qualifiées d'obsoletes par certains groupes de pression du fait que leur dernière mise à jour a été respectivement réalisée en 1998, en 2005 et en 1997 (AFSSET, 2009). Des critiques similaires ont été formulées à l'endroit de Santé Canada dont les recommandations de limites d'exposition n'ont pas été mises à jour de 1999 à 2009.

En réalité, tous ces organismes effectuent un suivi continu de la littérature scientifique publiée dans le domaine des radiofréquences (Santé Canada, 2009a, 2015; ICNIRP, 2002; IEEE, 2005). Toutefois, l'approche de ces organismes diffère quant à la mise à jour de leurs recommandations. Santé Canada, par exemple, met à jour ses recommandations de manière périodique afin de tenir compte des progrès scientifiques et modifie les limites d'exposition lorsque cela est justifié (Santé Canada, 2009a, 2015). L'ICNIRP, quant à lui, précise qu'il publie de nouvelles recommandations seulement lorsque de nouvelles données scientifiques justifient une modification des normes établies (ICNIRP, 2002). Cet organisme n'a d'ailleurs pas publié de nouvelles recommandations relatives aux radiofréquences depuis 1998, jugeant que les données publiées au cours des dernières années n'ont pas apporté d'autres preuves concernant l'existence d'effets néfastes sur la santé à des niveaux d'exposition sous les limites déjà établies (ICNIRP, 2009b). Des processus de révision des recommandations sont en cours à Santé Canada, l'ICNIRP et l'IEEE (Industrie Canada, 2013; ICNIRP, 2013; International Committee on Electromagnetic Safety [ICES], 2012). Santé Canada a d'ailleurs sollicité la Société royale du Canada (SRC) afin d'obtenir une opinion indépendante. L'organisme souhaitait que la SRC donne son avis à propos de la dernière mise à jour du CS6. Le rapport de cette évaluation a été publié récemment (Royal Society of Canada Expert Panel, 2014). Ce rapport propose certains ajustements mineurs aux limites d'exposition du CS6. Il souligne également l'importance de

poursuivre le suivi de la littérature scientifique quant aux effets des radiofréquences sur la santé, particulièrement pour ce qui est du cancer et de l'intolérance environnementale idiopathique attribuée aux CEM.

3.2 Mécanismes d'action

Comme il est précisé au tableau 2, la quantité d'énergie de chaque photon radiofréquence est très faible; de l'ordre de $\sim 4 \times 10^{-6}$ eV à 1 GHz. Par conséquent, le rayonnement électromagnétique dans cette gamme de fréquences est considéré comme non ionisant, c'est-à-dire qu'un photon radiofréquence est incapable d'ioniser la matière de manière directe au même titre que les rayons X et les rayons gamma. Bien que l'ionisation par l'absorption simultanée de plusieurs centaines de milliers de photons radiofréquences de basse énergie soit théoriquement possible, la probabilité d'observer ce phénomène est faible. Les photons provenant des radiofréquences n'ont donc pas suffisamment d'énergie pour ioniser directement des atomes ou encore pour endommager des molécules biologiques telles que l'ADN, dont les capacités de réparation sont notables (ICNIRP, 2009a).

Au regard des effets aigus résultant d'une exposition à des intensités élevées de radiofréquences, les mécanismes d'action agissant sur les systèmes physiologiques du corps humain sont bien connus (Santé Canada, 2009a, 2015; ICNIRP, 1998; IEEE, 2005). De 3 kHz à 10 MHz, les radiofréquences sont capables de stimuler les tissus nerveux centraux et périphériques. De 100 kHz à 110 MHz, les radiofréquences sont capables de produire des chocs et des brûlures électriques par des effets de charge de surface lors de contacts avec des objets qui sont dans un champ radiofréquence ou qui sont mis à la terre (ICNIRP, 1998). De 100 kHz à 10 GHz, l'absorption de chaleur peut mener à un échauffement localisé des tissus ou à une augmentation de la température corporelle. Enfin, de 10 à 300 GHz, l'échauffement des tissus est toujours l'effet prédominant, mais il se produit près de la surface du corps. Ces effets et les quantités dosimétriques qui leur sont associées sont résumés au tableau 4.

Tableau 4 Effets des radiofréquences sur la santé en fonction de la fréquence

Fréquences	Effet à prévenir	Unité de mesure
3 kHz à 10 MHz	Stimulation des tissus nerveux due à l'induction de courant	Champ électrique induit [$V m^{-1}$] ou densité de courant [$A m^{-2}$]
100 kHz à 10 GHz	Élévation de la température moyenne du corps et élévation localisée de la température	Débit d'absorption spécifique – DAS [$W kg^{-1}$]
10 GHz à 300 GHz	Élévation de la température des tissus près de la surface du corps	Densité de puissance [$W m^{-2}$]

Sources : ICNIRP, 1998; IEEE, 2005 et ICNIRP, 2010.

L'observation d'effets biologiques potentiels à de faibles niveaux d'exposition par certains laboratoires a conduit des chercheurs à tenter de déterminer des mécanismes d'action des radiofréquences qui pourraient expliquer certains effets constatés.

Sheppard, Swicord et Balzano (2008) ont analysé tous les mécanismes proposés pour expliquer les effets possibles des radiofréquences. Les auteurs ont conclu que le seul mécanisme d'action établi entre les radiofréquences et les milieux biologiques était l'échauffement des tissus par pertes diélectriques et résistives. Ils ajoutaient que, parmi tous les autres mécanismes proposés, un seul (*spin-coupled radical pairs*) pourrait mériter plus de considérations expérimentales et théoriques.

Dans sa dernière évaluation de la littérature scientifique, l'ICNIRP (2009a) a d'ailleurs noté que même s'il est en principe impossible de prouver l'absence d'effets non thermiques, la plausibilité des divers mécanismes suggérés à ce jour pour expliquer des effets biologiques potentiels à de bas niveaux d'exposition est très faible. L'IEEE (2005) a conclu que les seuls mécanismes reconnus d'interaction entre les radiofréquences et les systèmes biologiques mènent à une augmentation de la température des tissus.

L'évaluation des mécanismes d'action par des organismes de santé reconnus a conduit à des constats similaires. L'AFSSET (2009) jugeait qu'« [...] *aucun mécanisme biologique analysé ne plaide actuellement en faveur* [...] » d'effets sur la santé à la suite d'expositions à long terme à de faibles niveaux d'exposition. Des comités en Norvège (Norwegian Institute of Public Health [NIPH], 2012), en Suède (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012) et en Angleterre (AGNIR, 2012) sont également parvenus au même constat. Enfin, Santé Canada, dans sa mise à jour de 2009 du Code de sécurité n° 6, notait que les milliers d'études publiées au cours des dernières années ne faisaient que confirmer les mécanismes d'échauffement et de stimulation des tissus qui étaient déjà établis (Santé Canada, 2009a, 2015). L'organisme jugeait également qu'à ce moment, il « [...] *n'existe pas de base scientifique permettant de poser en principe l'existence de risques chroniques et/ou cumulatifs pour la santé attribuables à une énergie RF d'intensité inférieure aux limites définies dans le Code de sécurité 6* » (Santé Canada, 2009a).

3.2.1 MODULATION DES SIGNAUX

Les signaux radiofréquences modulés en amplitude, c'est-à-dire dont l'intensité varie en fonction du temps, peuvent provoquer des effets différents de ceux engendrés par les signaux continus. Généralement, à puissance égale, les signaux modulés sont plus efficaces pour produire une réponse biologique que les signaux continus, particulièrement lorsqu'un seuil d'intensité doit être atteint (ICNIRP, 1998). Par exemple, le phénomène d'audition des micro-ondes (*microwave hearing*) causé par l'expansion thermo-élastique des tissus, expansion qui stimule le système auditif, est connu depuis plus de 50 ans (ICNIRP, 1998).

Juutilainen, Höytö, Kumlin et Naarala (2011) ont révisé la littérature scientifique publiée portant sur les effets de la modulation des radiofréquences. Les auteurs ont analysé les articles publiés depuis 1998, qui comparaient les effets d'une exposition à des radiofréquences modulées à ceux d'une exposition à des radiofréquences non modulées. Les auteurs rapportent certains effets observés sur le système nerveux central de l'humain pouvant s'avérer réels, 6 des 18 études publiées sur ce sujet montrant des résultats positifs en ce qui concerne un signal modulé produisant des DAS d'environ 0,3 à 1 W/kg. Les auteurs notent que les effets observés sont mineurs et qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions sur les impacts potentiels que ces effets pourraient avoir sur la santé. Aucun effet reproductible dépendant de la modulation n'est indiqué pour les autres sujets analysés, dont les expériences *in vitro* et *in vivo* sur la génotoxicité et la cancérogénicité. Enfin, les auteurs constatent que, quoique la méthode de recherche employée lors de certaines études permette une comparaison, aucune des études qui ont généré des résultats positifs n'a fait l'objet d'une étude de réplication directe. De plus, d'autres études seront nécessaires avant de conclure à la présence d'effets. Cependant, aucun mécanisme d'action plausible ne permet d'expliquer des effets qui dépendraient de la modulation des signaux à de faibles niveaux d'intensité, et la démodulation des signaux radiofréquences dans les tissus biologiques n'est d'ailleurs pas possible (Juutilainen, Höytö, Kumlin et Naarala, 2011; Kowalczyk *et al.*, 2010). De manière générale, les organismes de santé ont conclu que, malgré l'introduction de différentes techniques de modulation de signaux, il est

extrêmement peu probable que la démodulation⁶ de la fréquence porteuse puisse entraîner une réponse biologique indépendante (AGNIR, 2012).

3.3 Recommandations de limites d'exposition

Toutes les évaluations de la littérature scientifique réalisées par des organismes reconnus concluent que l'exposition à une source de radiofréquences de 100 kHz à 10 GHz peut augmenter la température corporelle des animaux en laboratoire (Santé Canada, 2009a, 2015; ICNIRP, 1998; IEEE, 2005; Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012). De plus, ces organismes ont conclu qu'une hausse de la température corporelle d'environ 1 °C, causée par une telle exposition aux radiofréquences, entraîne une modification significative, mais réversible, du comportement chez les animaux. Une fois les données animales extrapolées chez l'humain, l'exposition requise pour produire une hausse de température similaire correspond à un DAS moyenné sur le corps entier d'environ 4 W/kg. Toutefois, chez l'humain, une hausse de la température corporelle comparable pour un niveau d'exposition aux radiofréquences équivalent est difficile à produire étant donné la plus grande performance du système de thermorégulation humain (IEEE, 2005).

L'observation de ces effets thermiques fait l'objet d'un consensus au sein de la communauté scientifique et est à la base des recommandations de tous les organismes de santé reconnus. Afin de déterminer la limite d'exposition du personnel professionnel, un facteur de sécurité de 10 a été appliqué au DAS capable de produire un réchauffement notable des tissus (4 W/kg). Dans le cas du grand public, un facteur de sécurité additionnel de 5 est appliqué pour prendre en compte un temps d'exposition potentiellement plus long et la présence possible de personnes vulnérables au sein de la population (par exemple personnes aux prises avec des problèmes de santé affectant la thermorégulation, enfants, etc.) afin d'en arriver à une restriction de base de 0,08 W/kg (tableau 6).

Les limites d'exposition des organismes en ce qui concerne des expositions locales, comme la tête ou les membres, de même que le volume approprié sur lequel le DAS doit être moyenné dans ces situations sont comparables. Les faibles différences entre ces valeurs reflètent les méthodes d'évaluations dissemblables des organismes, mais toutes les limites d'exposition établies par ces organismes offrent une protection équivalente.

À partir des restrictions de base, des valeurs de niveaux de référence, exprimées en termes de densité de puissance, de CE ou de CM, sont calculées selon divers modèles afin de faciliter l'évaluation du respect des recommandations (tableau 7). Les hypothèses prudentes utilisées lors de ces calculs font en sorte que le respect des niveaux de référence assure le respect des restrictions de base. À une distance de quelques dizaines de centimètres des sources de radiofréquences, il n'est généralement pas nécessaire de calculer le DAS pour comparer l'exposition à la restriction de base, et il devient préférable de caractériser l'exposition en termes de densité de puissance, de CE ou de CM de manière à la comparer aux valeurs de référence. Par exemple, le CS6 demande de calculer le DAS seulement lorsque l'exposition prévue au moment de l'emploi de l'appareil se fera à moins de 20 cm de cet appareil (Santé Canada, 2009a).

⁶ La *démodulation* d'un signal numérique modulé, si elle était possible, pourrait entraîner l'apparition d'un CEM de faible fréquence, ce qui pourrait avoir un effet direct sur les tissus (AGNIR, 2012).

Tableau 5 Limites de DAS d'organismes reconnus dans un environnement non contrôlé pour des fréquences de 100 kHz à 6 GHz

DAS	Unité	CS6 ^c	FCC	IEEE ^d	ICNIRP ^c
Corps entier	W/kg	0,08	0,08	0.08	0,08
Tête, cou et tronc	W/kg	1,6 ^a	1,6 ^a	2 ^b	2 ^b
Membres	W/kg	4 ^b	4 ^b	4 ^b	4 ^b

^a DAS moyenné pour un volume de 1 g de tissus, qui maximise la valeur obtenue.

^b DAS moyenné pour un volume de 10 g de tissus, qui maximise la valeur obtenue.

^c DAS moyenné sur une période de 6 minutes.

^d DAS moyenné sur une période de 30 minutes de 100 kHz à 5 GHz, mais sur une période plus courte au-delà de cette fréquence.

Tableau 6 Valeurs de référence des organismes reconnus dans un environnement non contrôlé pour des fréquences de 100 MHz à 6 GHz

Fréquences	Unité	CS6 ^a	FCC ^b	Fréquences	IEEE ^b	ICNIRP ^a
100 à 300 MHz	W/m ²	1,291	2	100 à 400 MHz	2	2
	V/m	22,06	27,5		27,5	28
	A/m	0,05852	0,073		0,0729	0,073
300 à 1 500 MHz ^c	W/m ²	0,02619 $f^{0.6834}$	$f/150$	400 à 2 000 MHz	$f/200$	$f/200$
	V/m	3,142 $f^{0.3417}$	-		-	1,375 $f^{1/2}$
	A/m	0,008335 $f^{0.3417}$	-		-	0,0037 $f^{1/2}$
1 500 à 6 000 MHz	W/m ²	10	10	2 000 à 6 000 MHz	10 ^d	10
	V/m	61,4	-		-	61
	A/m	0,163	-		-	0,16

^a Moyenne temporelle de 6 minutes.

^b Moyenne temporelle de 30 minutes jusqu'à 5 GHz. La durée de la moyenne temporelle varie en fonction de la fréquence qui est comprise entre 5 et 6 GHz.

^c La fréquence, f , est exprimée en MHz.

^d Lorsque les fréquences sont supérieures à 5 000 MHz, la durée de la moyenne temporelle passe de 30 min à $150/f$ min où la fréquence, f , est exprimée en GHz.

Comme le mentionne l'OMS (2006b), l'approche généralement adoptée par les organismes de santé, c'est-à-dire la détermination d'effets néfastes sur la santé associés à l'exposition aux radiofréquences et la sélection d'un niveau d'exposition approprié afin de protéger la population contre ces effets, contraste avec l'approche de certains pays et de certaines parties prenantes. Particulièrement, certains pays de l'Europe de l'Est privilégient une approche où les recommandations de limites d'exposition sont basées sur la protection contre des *effets biologiques potentiels* plutôt que sur celle contre des effets sur la santé. L'OMS note que cette approche génère des limites d'exposition qui sont plus beaucoup plus restrictives, mais n'offre pas nécessairement de bénéfices additionnels en matière de protection de la santé de la population, puisqu'avec cette approche, les effets biologiques constatés ne font pas l'objet d'une analyse de risque rigoureuse. Ainsi, cette méthode repose sur l'hypothèse de l'existence d'incertitudes et sur une compréhension incomplète des phénomènes en cause, et, par conséquent, suppose que tout effet biologique représente un risque pour la santé, malgré l'absence d'une évaluation formelle du risque. Selon l'OMS (2006b), il est difficile de justifier cette façon de faire au regard des analyses des risques qu'elle pourrait entraîner et des bénéfices qu'elle pourrait apporter.

3.3.1 COMPARAISON DE L'EXPOSITION AUX LIMITES RECOMMANDÉES

L'exposition courante de la population aux radiofréquences peut être comparée aux limites d'exposition recommandées par l'ICNIRP, l'IEEE et Santé Canada.

Dans le cas du téléphone cellulaire, l'exposition maximale en champ proche atteint des niveaux qui avoisinent les limites d'exposition recommandées; le DAS moyenné sur 1 ou sur 10 g de tissus se situe généralement entre 0,5 et 1,5 W/kg (AGNIR, 2012; CIRC, 2013). En pratique, l'utilisation d'un dispositif mains libres ou les systèmes de modulation de la puissance présents sur les téléphones modernes peuvent réduire considérablement l'exposition (ICNIRP, 2009a). Les téléphones sans fil de maison, quant à eux, entraînent une exposition maximale qui est beaucoup plus faible; le DAS moyenné sur 1 ou sur 10 g de tissus se situe entre 0,008 et 0,06 W/kg (Repacholi *et al.*, 2012). L'exposition provenant des téléphones sans fil de maison est donc, au maximum, de 25 à 200 fois plus faible que la limite d'exposition recommandée, alors que l'exposition provenant des téléphones cellulaires est de 1 à 2 fois plus faible que cette limite.

Quant à l'exposition moyenne aux sources d'exposition environnementales, elle est beaucoup plus faible. Par exemple, Joseph, Verloock, Goeminne, Vermeeren et Martens (2012b), lors de la prise de leur série de mesures en Angleterre au cours de l'année 2011, ont observé une densité de puissance moyenne provenant de toutes les sources se situant entre 80 et 3 000 MHz, d'environ $5,0 \times 10^{-3}$ W/m². Cette densité de puissance est environ 400 fois inférieure au niveau de référence recommandé par Santé Canada à la fréquence la plus restrictive (1,291 W/m² à 100 MHz). Même pour les endroits les plus exposés, où la densité de puissance maximale a atteint environ $5,3 \times 10^{-2}$ W/m², cette valeur est environ 24 fois plus petite que le niveau de référence de Santé Canada. De manière similaire, l'étude de Rowley et Joyner (2012), réalisée à partir d'une base de données comptant plus de 170 000 mesures de CEM, indique une densité de puissance moyenne provenant des stations de base de $7,3 \times 10^{-4}$ W/m². Cette valeur est au moins 3 000 fois plus petite que la limite d'exposition du grand public recommandée dans le CS6⁷.

Les compteurs électriques émettant des radiofréquences, eux aussi source d'exposition environnementale, entraînent une très faible exposition. La densité de puissance moyenne à 1 m du CNG est inférieure à $5,0 \times 10^{-5}$ W/m², ce qui est environ 55 000 fois inférieur au niveau de référence recommandé par Santé Canada. Si un CNG devait émettre à sa puissance crête de manière continue, en cas de bris par exemple, la densité de puissance moyenne à 1 m serait alors d'environ $5,0 \times 10^{-2}$ W/m². Cette densité de puissance, qui correspond également à la densité de puissance maximale durant l'émission, serait toujours à moins de 2 % du niveau de référence recommandé par le CS6.

3.4 Autres limites d'exposition

Certaines municipalités, certaines régions ou certains pays ont adopté ou recommandé des limites d'exposition aux radiofréquences qui sont différentes de celles préconisées par les organismes de santé reconnus (Stam, 2011; British Columbia Centre for Disease Control et National Collaborating Centre for Environmental Health, 2013). En effet, même si la plupart des pays occidentaux ont adopté formellement ou non les recommandations de l'ICNIRP ou de l'IEEE, d'autres pays ont fixé des limites d'exposition aux radiofréquences à des niveaux plus faibles. Dans les sous-sections suivantes, les recommandations de la Russie et de l'Italie sont discutées brièvement afin d'illustrer les principales raisons pouvant expliquer les différences entre les limites adoptées par ces pays et les recommandations de l'ICNIRP.

⁷ 2,52 W/m² à 800 MHz, la fréquence où la limite d'exposition est la plus restrictive dans cette analyse.

3.4.1 RUSSIE

L'approche de santé publique de la Russie en ce qui concerne l'établissement des limites d'exposition est basée sur le principe que les personnes ne devraient pas avoir à compenser un effet biologique de l'exposition aux radiofréquences, même si cet effet n'est pas néfaste pour la santé (Repacholi, Grigoriev, Buschmann et Pioli, 2012). Cette approche, unique à la Russie, contraste avec celle adoptée par l'ICNIRP et l'IEEE. Elle consiste à déterminer le niveau d'exposition le plus faible qui mène à un effet néfaste sur la santé et à appliquer un facteur de sécurité (50) à ce niveau afin de proposer une limite d'exposition. Comme autre élément divergent quant à l'interprétation des limites proposées, les comités soviétiques et russes qui ont établi les normes d'exposition n'ont pas tenu compte des différences entre l'absorption des radiofréquences par les rats et les souris de laboratoire et l'absorption de ces dernières par les humains. La Russie impose donc des limites d'exposition qui sont plus basses que les limites d'exposition canadiennes et celles de plusieurs autres pays.

Les limites d'exposition russes se fondent sur les résultats de leurs recherches dans plusieurs domaines, mais s'appuient principalement sur des études qui portent sur le système immunitaire (Repacholi, Grigoriev, Buschmann et Pioli, 2012). Selon l'avis de plusieurs experts qui ont analysé les fondements des normes russes, il faut considérer que ces études ont été réalisées il y a de 20 à 40 ans, alors que plusieurs éléments sur le fonctionnement du système immunitaire étaient encore inconnus. De plus, ces études précèdent le développement des techniques de laboratoire modernes et l'établissement des standards de qualité en recherche expérimentale (Repacholi, Grigoriev, Buschmann et Pioli, 2012). Les auteurs de cette analyse ont conclu que des études d'une telle qualité ne seraient pas utiles dans l'établissement des normes d'exposition actuelles.

À la suite d'une recommandation de l'OMS, des chercheurs ont tenté de reproduire les résultats des principales études immunologiques russes (Repacholi, Grigoriev, Buschmann et Pioli, 2012). Le comité de supervision de ces recherches, après avoir analysé les données brutes des nouvelles études réalisées, a conclu que les résultats précédents ne pouvaient pas être confirmés de manière convaincante (Repacholi, Grigoriev, Buschmann et Pioli, 2012).

3.4.2 ITALIE

Les normes italiennes définissent trois niveaux d'exposition aux radiofréquences. Premièrement, les *limites d'exposition* sont des valeurs qui ne doivent jamais être dépassées. Ces limites sont basées sur des niveaux de référence de l'ICNIRP (AFSSET, 2009). Ensuite, les *valeurs d'attention* (6 V/m ou 0,1 W/m²) sont définies comme étant des valeurs de précaution à ne pas dépasser dans un environnement résidentiel. Elles n'auraient pas pour but de protéger le public contre des effets spécifiques sur la santé, mais chercheraient à éviter des effets potentiels à long terme sur la santé, qui auraient pu être sous-estimés, d'après le gouvernement italien, dans les recommandations définies par l'ICNIRP (AFSSET, 2009). Enfin, les *objectifs de qualité*, dont les niveaux d'exposition sont les mêmes que ceux des valeurs d'attention, font aussi référence à des valeurs de précaution. Les valeurs d'attention et les objectifs de qualité ne visent donc pas à protéger la population contre un risque connu, mais plutôt à la protéger contre des effets sur la santé qui sont jusqu'à maintenant inconnus en réduisant les limites d'exposition d'un facteur arbitraire (Vecchia et Foster, 2003).

L'AFSSET (2009), dans sa mise à jour de la littérature, note que les valeurs d'attention adoptées ne sont pas justifiées dans la loi italienne et n'ont pas de base scientifique. L'organisme fait d'ailleurs ressortir l'absence de dépendance avec la fréquence des valeurs d'attention adoptées. Il conclut que l'approche italienne, avec sa « [...] *prise en compte de critères non fondés sur des éléments scientifiques* [...] », est difficile à concilier avec la tendance scientifique internationale.

L'adoption de ces limites d'exposition arbitraires semble d'ailleurs avoir exacerbé l'anxiété du public et les controverses entourant les effets possibles de l'exposition aux radiofréquences sur la santé. Le public aurait interprété ces nouvelles limites d'exposition comme étant la preuve de l'existence d'effets néfastes à long terme sur la santé et aurait contribué à la perception qu'une exposition au-delà de la limite de précaution de 6 V/m entraînait un risque inacceptable (Vecchia et Foster, 2003). Ces observations font écho aux avertissements de l'OMS (2008), qui mettaient en garde les autorités de santé publique contre l'adoption de mesures d'exposition aux radiofréquences arbitraires, de crainte de miner la confiance du public envers les normes établies scientifiquement.

3.5 Mesures de gestion ne faisant pas appel à une limite d'exposition

Certains organismes de santé ont émis des recommandations visant à réduire l'exposition de la population aux radiofréquences sans pour autant adopter une approche législative. Par exemple, le comité scientifique d'experts de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses, 2013), dans sa mise à jour la plus récente de la littérature, recommandait, par exemple, « [...] de mettre à disposition des utilisateurs une information sur le niveau d'exposition maximal (DAS par exemple) engendré par les équipements personnels utilisant des radiofréquences (téléphones DECT, tablettes tactiles, veille bébé, etc.), sur le modèle des obligations réglementaires liées aux téléphones mobiles [...] » et « [...] de proposer des mesures simples pour permettre aux utilisateurs d'objets communicants de réduire leur exposition, s'ils le souhaitent [...] ». L'Anses elle-même est allée plus loin et a recommandé « [...] de réduire l'exposition des enfants en incitant à un usage modéré du téléphone mobile et en privilégiant de plus le recours au kit main-libre et aux terminaux mobiles de DAS les plus faibles [...] » et « [...] pour les adultes utilisateurs intensifs de téléphonie mobile (en mode conversation) : de recourir au kit main-libre et aux terminaux mobiles de DAS les plus faibles [...] ». De manière similaire, Santé Canada (2011a) a émis des recommandations portant sur la réduction de l'exposition aux radiofréquences. L'organisme « [...] rappelle aux usagers du cellulaire qu'ils peuvent prendre des mesures pratiques pour réduire leur exposition aux RF, des façons suivantes : en limitant la durée des appels sur le cellulaire; en optant pour un appareil « mains libres »; et en remplaçant les appels sur le cellulaire par des textos. » L'organisme dit également encourager « [...] les parents [à] prendre ces mesures afin de réduire l'exposition de leurs enfants aux RF émises par les cellulaires, puisque les enfants sont généralement plus sensibles à divers agents environnementaux. » Enfin, dans le même avis, Santé Canada a rappelé que « Les précautions prises pour limiter l'exposition à l'énergie RF émise par les stations de base sont inutiles, car les niveaux d'exposition sont normalement bien inférieurs à ceux précisés dans des normes d'exposition axées sur la santé. »

3.6 Positions québécoises sur la gestion des risques liés aux radiofréquences

Au cours des dernières années, le réseau de la santé publique québécois a été appelé à prendre position à propos des risques liés à l'exposition aux CEM (Levallois, Lajoie et Gauvin, 1991; Levallois, Gauvin, Lajoie et Saint-Laurent, 1996; Levallois *et al.*, 2000; Gauvin, Ngamga Djeutcha, et Levallois, 2006; Diallo et Gauvin, 2010; Beausoleil et Brodeur, 2010; Beausoleil, 2011). Notamment, dans un état des connaissances sur l'exposition aux radiofréquences provenant des stations de base, Diallo et Gauvin (2010) avaient conclu que « Bien qu'ils soient encore mal connus, la plupart des experts croient qu'il y a peu de chance que les effets biologiques engendrés par une exposition aux RF sous les valeurs recommandées aient des conséquences néfastes sur la santé ». Dans ce document, les auteurs avaient également formulé des recommandations relatives à la communication avec la population et à la vigilance scientifique.

Plus récemment, le ministère de la Santé et des Services sociaux a émis un avis de santé publique dans le cadre d'un projet de remplacement des compteurs électriques par des compteurs électroniques de nouvelle génération (Beausoleil, 2012). Cet avis concluait qu'à « [...] *la lumière des connaissances scientifiques actuelles concernant les RF et la santé, et en tenant compte des niveaux d'exposition extrêmement faibles de RF provenant des compteurs de nouvelle génération d'Hydro-Québec, le ministère de la Santé et des Services sociaux, en collaboration avec les directeurs de santé publique des Agences de la santé et des services sociaux, tient à informer la population que les RF émises par ces appareils ne posent pas de risques pour la santé [...]* ». Cette évaluation a été réaffirmée par la position adoptée par les directeurs de santé publique du Québec dans le dossier des radiofréquences (RF) émises par les compteurs intelligents (Massé, 2013).

3.7 Résumé à propos des limites d'exposition

Les recommandations de limites d'exposition faites par deux des plus grands organismes scientifiques spécialisés dans les effets sur la santé des radiofréquences, soit l'ICNIRP et l'IEEE, sont basées sur la nécessité de prévenir les effets néfastes sur la santé humaine, qui sont établis et reconnus par la communauté scientifique. Ces organismes ont considéré qu'à ce jour, pour les fréquences les plus utilisées en télécommunication sans fil, seuls les effets d'échauffement des tissus découlant d'une exposition à court terme, méritaient d'être pris en compte, et que les mécanismes d'action définis ne prédisent pas d'autres effets sur la santé.

Bien que les recommandations de limites d'exposition de l'ICNIRP et de l'IEEE comportent quelques différences, elles demeurent largement similaires. Cette similitude est attendue, étant donné ces deux organismes fondent leurs recommandations sur le consensus scientifique établi à partir de l'ensemble des articles publiés dans ce domaine.

L'exposition de la population générale aux radiofréquences se situe largement en dessous des limites d'exposition recommandées, qui incluent elles-mêmes un facteur de sécurité de 50 par rapport au niveau d'exposition entraînant un effet néfaste sur la santé. Quoique certains pays aient adopté des limites d'exposition plus contraignantes, il n'apparaît pas évident que ces limites confèrent une sécurité additionnelle à la population.

4 Risques pour la santé

L'évaluation d'un risque pour la santé doit tenir compte des études sur des cellules en laboratoire de même que sur celles portant sur les animaux et les humains, qui ont été publiées dans des revues à comité de lecture. À ces études s'ajoutent celles qui portent sur la plausibilité biologique et physique des effets examinés, discutés brièvement dans la section 3.2, qui sont également essentielles à l'évaluation des preuves.

4.1 Études cellulaires et animales

La littérature scientifique publiée ayant trait aux effets des radiofréquences sur les cellules en laboratoire et sur les animaux est très vaste, et de nouvelles études à ce propos sont publiées chaque année. À titre d'exemple, la partie de la base de données de l'International Committee on Electromagnetic Safety (ICES) de l'IEEE, qui porte sur les effets des radiofréquences, contient plus de 500 études cellulaires et plus de 1 000 études animales (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015).

Dans cette section, les revues de la littérature récentes ayant porté sur la génotoxicité, la cancérogénicité, la reproduction et le développement ainsi que sur le système nerveux seront examinées. Plusieurs autres effets potentiels ont été étudiés et ceux-ci seront abordés succinctement.

4.1.1 GÉNOTOXICITÉ, CANCÉROGÉNITÉ ET EXPRESSION GÉNIQUE

La génotoxicité⁸ et la cancérogénicité⁹ des radiofréquences ont fait l'objet d'efforts de recherche importants. Ces travaux sont résumés dans les articles de revue de Verschaeve *et al.* (2010) et de Juutilainen *et al.* (2011) qui ont fait le point sur les études cellulaires et animales portant sur ces questions. La plupart des auteurs de ces articles sont également membres de l'ICNIRP, et ces articles découlent en partie du travail de synthèse réalisé lors de la mise à jour des connaissances de cet organisme (ICNIRP, 2009a).

Verschaeve *et al.* (2010) ont regardé l'ensemble des études cellulaires, animales ou humaines traitant de la génotoxicité, qui ont été publiées depuis l'évaluation de l'OMS réalisée en 1993. Les auteurs ont conclu que la plupart des études réalisées n'ont pas fourni de preuves démontrant que les radiofréquences pourraient être génotoxiques, mais que certaines études ont cependant observé quelques résultats positifs. Les auteurs notent cependant que plusieurs de ces résultats positifs ont été produits à des niveaux d'exposition élevés et que les effets pourraient être attribués à une augmentation de la température. Verschaeve *et al.* (2010) rapportent qu'il existe malgré tout une certaine controverse quant à la génotoxicité des radiofréquences, puisque des études qui avaient recours à de faibles niveaux d'exposition ont fait état de résultats positifs. Les auteurs émettent plusieurs hypothèses qui pourraient toutefois expliquer ces résultats et concluent que, dans l'ensemble, les éléments de preuve suggérant l'effet génotoxique des radiofréquences sont très faibles.

Juutilainen *et al.* (2011) ont regardé l'ensemble des études animales portant sur la cancérogénicité potentielle des radiofréquences. Les études analysées avaient trait au potentiel cancérogène direct des radiofréquences, à la capacité des radiofréquences à accroître la cancérogénicité d'un agent

⁸ La *génotoxicité* est la capacité d'un agent à endommager le matériel génétique d'une cellule (Larousse, s.d.-a).

⁹ La *cancérogénicité* décrit la capacité d'un agent à entraîner le développement d'un cancer - peu importe le mécanisme (Larousse, s.d.-b).

cancérogène connu (cocancérogénicité) et à la capacité des radiofréquences à augmenter la croissance d'une tumeur déjà présente (promotion). Les auteurs ont observé que, dans l'ensemble, les études n'ont pas apporté de preuves quant à la présence d'effets cancérogènes par l'action des radiofréquences. Ils parlent cependant d'une étude positive importante publiée par Repacholi *et al.* (1997, citée dans Juutilainen *et al.*, 2011), mais notent que deux études subséquentes n'ont pas réussi à reproduire ces résultats. Ces mêmes auteurs mentionnent également que plusieurs études, particulièrement celles qui ont été publiées il y a un certain temps, possédaient des faiblesses méthodologiques et que leurs méthodes n'étaient pas suffisamment décrites. Juutilainen *et al.* (2011) notent cependant que plusieurs études récentes sont de bonne qualité et ont suivi les principes de bonne pratique en laboratoire. Ces études ont unanimement rapporté une absence d'effets cancérogènes des radiofréquences dans plusieurs modèles animaux. Les auteurs ont conclu que les résultats des études sur la cancérogénicité des radiofréquences ne montrent pas d'effets dans le cas de niveaux d'exposition allant jusqu'à 4 W/kg, soit un niveau étant supérieur à l'exposition attribuable à un téléphone cellulaire et au-dessus des limites d'exposition établies par l'ICNIRP, l'IEEE et Santé Canada.

4.1.2 REPRODUCTION ET DÉVELOPPEMENT

L'Advisory Group on Non-Ionising Radiation (AGNIR), le groupe d'experts de la Health Protection Agency (HPA) – aujourd'hui Public Health England (PHE), rapporte que les études d'exposition prénatale indiquent une absence d'effets tératogènes lorsque le niveau d'exposition ne produit pas d'hyperthermie (AGNIR, 2012). L'AGNIR (2012) considère que les quelques effets notés n'étaient pas cohérents par rapport aux autres paramètres mesurés pour une même étude, ou par rapport aux résultats concernant les mêmes paramètres dans les autres études. L'AFSSET (2009), quant à elle, considérait que peu d'études étaient disponibles, et que ces études ne montraient pas d'effets sur le développement. Elle notait d'ailleurs que les études récentes, incluant une étude portant sur quatre générations de souris, n'établissaient pas d'effets néfastes sur le développement ou la reproduction (AFSSET, 2009). De plus, selon le groupe d'experts indépendants de l'AGNIR (2012), il n'est pas possible d'interpréter les résultats des études ayant fait état d'effets significatifs sur le fonctionnement des testicules chez le rat. Selon cet organisme, ces études possèdent des lacunes, notamment en ce qui concerne la caractérisation de l'exposition, qui les rendent inappropriées à être employées dans une évaluation du risque (AGNIR, 2012).

4.1.3 SYSTÈME NERVEUX

Plusieurs études ont analysé les effets potentiels des radiofréquences sur le cerveau et le système nerveux chez l'animal de laboratoire (AGNIR, 2012). Selon l'AGNIR, des études ont fourni des éléments de preuve indiquant la possibilité d'effets biologiques mesurables. Cependant, l'organisme considère qu'il n'est pas possible d'exclure l'éventualité que les effets observés puissent être la conséquence d'un réchauffement des tissus (AGNIR, 2012). L'AGNIR et l'AFSSET n'ont pas noté d'effets sur l'activité électrique du cerveau ou sur la barrière hématoencéphalique (AGNIR, 2012; AFSSET, 2009).

4.1.4 CONCLUSION DES ORGANISMES DE SANTÉ CONCERNANT L'ÉTUDE DES EFFETS DES RADIOFRÉQUENCES SUR LES CELLULES ET SUR LES ANIMAUX

Plusieurs autres effets potentiels des radiofréquences ont fait l'objet d'études cellulaires et animales, spécialement des effets sur le système nerveux, le système endocrinien, le système auditif, le système cardiovasculaire et le système oculaire; des effets immunologiques et hématologiques; des effets sur la barrière hématoencéphalique; etc. Dans l'ensemble, les organismes de santé qui ont évalué les études portant sur ces effets potentiels de même que ceux mentionnés aux sections 4.1.1

à 4.1.3 n'ont pas trouvé de preuves convaincantes concernant la présence d'effets néfastes pour la santé.

Pour sa part, le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC, 2013) a évalué le potentiel cancérigène des radiofréquences et a conclu qu'il existe des preuves limitées de cancérigénicité chez l'animal. Cette classification du CIRC est notamment employée lorsque les preuves proviennent de peu d'études ou que la validité des expériences n'est pas acquise (CIRC, 2013). Malgré des effets rapportés dans certaines études, le European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure (EFHRAN, 2010) a conclu qu'il n'existe pas d'effets associés à l'exposition aux radiofréquences, qui sont démontrés à des niveaux en dessous de ceux produisant des effets thermiques. L'AGNIR (2012) conclut que, quoique certaines études aient parfois montré des effets biologiques subtils, dans l'ensemble, les études réalisées sur des cellules isolées et sur des animaux ne fournissent pas de preuves solides de l'existence d'effets néfastes sur la santé à de faibles niveaux d'exposition. L'AFSSET, dans son analyse de la littérature de 2009, avait évalué 182 études *in vitro* et *in vivo*, et seules 78 études avaient une dosimétrie validée et une méthodologie très satisfaisante pour la partie biologique. Sur les 182 études évaluées, 69 ne rapportaient aucun effet (AFSSET, 2009). L'agence note : « *Au vu de l'analyse détaillée et critique des travaux effectuée par le groupe de travail, et compte tenu par ailleurs de l'état antérieur des connaissances, aucune preuve convaincante d'un effet biologique particulier des radiofréquences n'est apportée pour des niveaux d'exposition non thermiques, dans les conditions expérimentales testées.* ». Le Norwegian Institute of Public Health (NIPH, 2012), quant à lui, a conclu que la grande quantité de publications ayant étudié les effets potentiels des radiofréquences à des niveaux d'exposition situés en dessous des limites d'exposition ne fournit pas de preuves d'effets néfastes pour la santé.

La Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) considère que les études animales et cellulaires récentes ont montré que des effets génotoxiques ou cancérigènes à des niveaux d'exposition en dessous des limites recommandées sont improbables et que les mécanismes proposés pour les expliquer sont peu plausibles (ICNIRP, 2009a). Cette commission note toutefois que certains sujets d'études ont produit des résultats plus équivoques, mais que ces résultats semblent faibles et auraient des conséquences fonctionnelles limitées (ICNIRP, 2009a).

4.2 Études chez l'humain

Comme pour les études cellulaires et animales, l'étude des effets potentiels des radiofréquences sur l'humain a porté sur une multitude de sujets et de critères. L'Anses, lors de sa dernière expertise, a analysé les études qui traitaient des effets cancérigènes (tumeurs du cerveau, tumeurs des glandes salivaires, leucémies, mélanomes ainsi que les taux d'incidence et de mortalité par cancer [tous types confondus]) de même que celles qui avaient trait à de nombreux autres effets (fonctions cognitives, sommeil, rythmes circadiens, fonctions auditives, maladies neurologiques, reproduction et développement, système immunitaire, système cardiovasculaire, bien-être et santé déclarée ainsi que santé globale [mortalité toutes causes]). De tous les effets potentiels étudiés, le cancer et l'apparition de symptômes non spécifiques, souvent appelée *électrosensibilité*, sont ceux qui sont les plus souvent évoqués lors des discussions entourant les risques reliés aux radiofréquences (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012).

4.2.2 ÉTUDES SUR LE CANCER

La possibilité d'une association entre l'exposition aux radiofréquences et le développement de cancers chez l'humain fait encore l'objet de débats au sein de la population et de la communauté scientifique. Plusieurs types de cancers ont été étudiés, entre autres, les lymphomes non hodgkiniens, les leucémies chez l'adulte et chez l'enfant de même que le cancer du testicule (AGNIR, 2012). Cependant, la majorité des recherches a porté sur des cancers qui se développent au niveau de la tête, plus spécifiquement les gliomes, les méningiomes, les neurinomes acoustiques et les cancers des glandes salivaires (Ahlbom *et al.*, 2009). Ce choix s'explique par le fait que, lors de l'utilisation d'un téléphone cellulaire, l'exposition de certaines parties de la tête est beaucoup plus importante que l'exposition des autres parties du corps. Les études sur l'association entre le cancer et l'utilisation du téléphone cellulaire ont fait l'objet de deux revues systématiques de la littérature scientifique qui, ensemble, ont répertorié les articles publiés jusqu'au 13 novembre 2010 (Ahlbom *et al.*, 2009; Repacholi *et al.*, 2012).

La revue systématique la plus récemment publiée (Repacholi *et al.*, 2012) avait trait au lien possible entre l'exposition aux radiofréquences provenant des téléphones cellulaires et la présence d'un risque de cancer du cerveau et d'autres cancers se développant au niveau de la tête. Tous les articles pertinents publiés avant le 13 novembre 2010 ont été considérés, et les auteurs de l'étude ont suivi un protocole d'évaluation bien défini et rigoureux en vue d'estimer la qualité des études analysées. Dans l'ensemble, en ce qui concerne l'utilisation du téléphone cellulaire, aucune augmentation statistiquement significative du risque n'était détectable dans le cas des gliomes (rapport de cotes [RC] avec intervalle de confiance [I.C.] à 95 % de 1,07 [0,89 – 1,29]); des méningiomes (0,93 [0,77 – 1,12]); des neurinomes acoustiques (1,05 [0,77 – 1,42]) et des cancers de la glande parotide (0,87 [0,73 – 1,04]). Les auteurs, qui ont également analysé les études *in vitro* sur le cancer, ont d'ailleurs conclu qu'aucun des critères de causalité de Hill (1965) ne soutient une relation causale entre l'utilisation du téléphone cellulaire et le cancer du cerveau ou les autres cancers se développant au niveau de la tête, partie du corps qui absorbe le plus les radiofréquences émises par les téléphones cellulaires.

Au moins 20 études additionnelles ont été publiées depuis cette date, dont les résultats de l'étude de type cas-témoin INTERPHONE sur le neurinome acoustique et des études écologiques sur les taux d'incidence de cancer dans plusieurs pays. Certaines études se sont également penchées sur une association entre le cancer et l'exposition de certains groupes de travailleurs situés à proximité d'une source de radiofréquences, par exemple les stations de base. L'association entre plusieurs effets sur la santé, dont le cancer, et la proximité d'une station de base a d'ailleurs fait l'objet d'une revue systématique de la littérature récemment publiée (Röösli, Frei, Mohler et Hug, 2010). Enfin, l'ensemble des études sur le cancer, incluant les études portant sur des expositions industrielles, a été analysé dans la monographie du CIRC publiée en avril 2013 (CIRC, 2013).

Dans les prochaines sous-sections, les principales études cas-témoin et de cohorte traitant de l'association entre le cancer et l'utilisation du téléphone cellulaire seront discutées de même que les données qui proviennent des nouvelles études écologiques ayant trait aux taux d'incidence du cancer du cerveau¹⁰. Enfin, les conclusions de la revue de la littérature portant sur le risque de cancer en lien avec la proximité d'une station de base seront brièvement présentées.

¹⁰ Il faut rappeler qu'en général les études de cohorte sont jugées plus fiables que les études cas-témoin qui sont elles-mêmes considérées comme plus fiables que les études écologiques.

4.2.2.1. Études cas-témoin sur l'utilisation du téléphone cellulaire et du téléphone sans fil de maison

Cette section présente les études considérées comme étant à la base de l'évaluation du CIRC, soit l'étude cas-témoin INTERPHONE de même que celles d'un groupe de recherche suédois. Les résultats des autres études cas-témoin, qui sont également pris en compte dans l'évaluation des auteurs du présent rapport, ne sont pas présentés ici, mais sont analysés et discutés dans les revues de la littérature de Ahlbom *et al.* (2009) et de Repacholi *et al.* (2012) ainsi que dans la monographie du CIRC (2013).

À ce jour, la plus grande étude réalisée sur un lien entre l'utilisation du téléphone cellulaire et le cancer est l'étude cas-témoin INTERPHONE. Fruit d'une collaboration entre 16 centres de recherche de 13 pays, cette étude s'est déroulée entre 2000 et 2004 auprès de 13 953 participants âgés de 30 à 59 ans. Les résultats principaux, qui concernaient les gliomes et les méningiomes, ont été publiés en 2010, tandis que les résultats concernant les neurinomes acoustiques ont été publiés en 2011 (INTERPHONE Study Group, 2010, 2011).

La caractérisation de l'exposition aux radiofréquences dans l'étude INTERPHONE s'est faite au moyen d'un questionnaire détaillé qui portait sur l'usage du téléphone cellulaire dans le passé. Les questions étaient posées en personne au cours d'une entrevue avec les participants ou leur répondant. Lorsqu'une personne était décédée ou que son état de santé ne lui permettait pas de répondre, un répondant, proche de la personne décédée ou gravement malade, remplissait le questionnaire. Quatre mesures d'exposition différentes ont été analysées : l'utilisation régulière du téléphone cellulaire, le nombre d'années écoulées depuis le début de l'utilisation du téléphone cellulaire, la durée totale des appels effectués avec un téléphone cellulaire et le nombre total d'appels effectués avec un téléphone cellulaire. Pour le calcul des rapports de cotes (RC), les participants exposés ont été comparés à un groupe de référence qui était composé de personnes n'ayant jamais utilisé un téléphone cellulaire ou n'ayant jamais été un utilisateur régulier. Les utilisateurs réguliers ont été définis comme étant les personnes qui effectuaient, en moyenne, plus d'un appel par semaine pendant au moins 6 mois. Au total, 2 409 personnes atteintes de méningiomes, 2 708 personnes atteintes de gliomes et 1 105 personnes atteintes de neurinomes acoustiques ont participé à l'étude, et les taux de participation de ces différents groupes étaient respectivement de 78 %, de 64 % et de 82 %. Le taux de participation des témoins était de 53 % (pour un total de 7 658 participants appariés aux cas).

Globalement, dans l'étude INTERPHONE, l'utilisation d'un téléphone cellulaire n'était pas associée à une augmentation du risque de développer un méningiome, un gliome ou un neurinome acoustique. Pour ces trois types de cancers, les RC avec un intervalle de confiance à 95 % (I.C. à 95 %) pour les utilisateurs réguliers du téléphone cellulaire par rapport aux personnes n'ayant jamais été des utilisateurs réguliers étaient respectivement de 0,79 (0,68 – 0,91), de 0,81 (0,70 – 0,94) et de 0,85 (0,69 – 1,04). De plus, les auteurs de cette étude n'ont pas observé d'augmentation du risque pour les participants en fonction du nombre d'années écoulées depuis qu'ils avaient commencé à utiliser un téléphone cellulaire. Les RC avec I.C. à 95 % pour une utilisation de plus de 10 ans étaient respectivement de 0,83 (0,61 – 1,14), de 0,98 (0,76 – 1,26) et de 0,76 (0,52 – 1,11) pour le méningiome, le gliome et le neurinome acoustique. Les RC avec I.C. à 95 % pour le décile des utilisateurs ayant effectué le plus grand nombre d'appels téléphoniques (plus de 27 000 appels) sont similaires, soit respectivement de 0,80 (0,55 – 1,17), de 0,96 (0,71 – 1,31) et de 0,93 (0,61 – 1,41) pour le méningiome, le gliome et le neurinome acoustique. Les résultats du décile des utilisateurs du téléphone ayant accumulé le plus grand nombre d'heures d'utilisation (plus de 1 640 heures) ont cependant montré une légère augmentation du risque, les RC avec I.C. à 95 % mesurés étaient

respectivement de 1,15 (0,81 – 1,62), de 1,40 (1,03 – 1,89) et de 2,33 (1,23 – 4,40) pour le méningiome, le gliome et le neurinome acoustique.

Dans leur analyse, les auteurs de l'étude INTERPHONE concluent qu'il n'y a pas une augmentation du risque de développer un méningiome, associé à l'emploi d'un téléphone cellulaire. Dans le cas des gliomes, les auteurs expliquent que les résultats obtenus en ce qui concerne les plus grands utilisateurs, en fonction de la durée cumulative des appels (RC avec I.C. à 95 % de 1,40 [1,03 – 1,89]), ne sont pas concluants et qu'ils pourraient être expliqués par la présence d'un ou de plusieurs biais, qui sont discutés brièvement ici. Les auteurs rapportent que, parmi les grands utilisateurs, 38 cas et 22 témoins ont mentionné avoir utilisé leur téléphone cellulaire plus de 5 heures par jour, et 10 cas ont rapporté une utilisation de plus de 12 heures par jour, alors qu'aucun témoin n'a rapporté ce temps d'utilisation. Les auteurs mettent en doute la crédibilité de ces données déraisonnablement élevées et soulignent qu'une étude de validation semblait indiquer que les personnes atteintes d'un cancer avaient tendance à surestimer leur emploi du téléphone cellulaire par rapport à celui des témoins. De plus, ils remarquent que l'augmentation du risque de gliome n'est observée que pour la durée totale des appels, et non pour le nombre total d'appels effectués, alors que des études de validation ont montré que les participants à ce type d'étude se souvenaient avec plus d'exactitude du nombre d'appels effectués que de la durée de ceux-ci. Ces mêmes auteurs ont également regardé le ratio du RC des tumeurs qui étaient situées du côté de la tête où le cas utilisait principalement son téléphone cellulaire par rapport au RC des tumeurs situées du côté opposé. Le plus grand ratio a été obtenu pour les cas ayant utilisé leur téléphone cellulaire moins de 5 heures, ce qui indiquait que les cas avaient peut-être tendance à mentionner qu'ils utilisaient davantage leur téléphone cellulaire du côté de la tête où se trouvait leur tumeur. En fin de compte, les auteurs d'INTERPHONE ont conclu que leur étude n'a pas permis d'observer d'augmentation du risque de gliome ou de méningiome associé à l'utilisation du téléphone cellulaire. Ils ont ajouté que les biais et les erreurs possiblement présents dans leur étude empêchent une interprétation causale des risques notés pour certaines des analyses de sous-groupes.

Pour ce qui est des neurinomes acoustiques, les auteurs de l'étude INTERPHONE concluent qu'ils n'ont pas observé d'augmentation du risque de développer ce type de tumeur lors d'une utilisation régulière du téléphone cellulaire. Ils notent que leurs données n'indiquent pas la présence d'une relation dose-réponse qui suivrait l'augmentation de l'utilisation et que le RC le plus faible se trouve dans le 9^e décile du temps total d'utilisation du téléphone cellulaire. Ils ajoutent que l'augmentation du risque auquel s'exposent les plus grands utilisateurs (10^e décile, plus de 1 640 heures) pourrait être attribuable à la chance, à un biais d'information dans la collecte des données ou à une relation causale. Enfin, les auteurs constatent que le neurinome acoustique est une tumeur à croissance lente et qu'il est possible que le laps de temps entre l'exposition et le développement de la maladie évalué dans le cadre de leur étude soit trop court pour permettre l'observation d'un effet.

Le groupe de recherche de Hardell, basé en Suède, a également publié plusieurs études cas-témoin sur l'association entre les radiofréquences émises par les téléphones cellulaires et les téléphones sans fil de maison d'une part, et les cancers du cerveau et ceux au niveau de la tête d'autre part. En tout, ce groupe de recherche a réalisé quatre études dont les résultats principaux ont été publiés dans cinq articles (Hardell, Näsman, Pålsson, Hallquist et Mild, 1999; Hardell *et al.*, 2002; Hardell, Carlberg et Mild, 2005, 2006, 2010). Il a également publié de nombreuses réanalyses à partir des données recueillies au cours de ces études. Notamment, une analyse combinée de leurs résultats obtenus à partir des cas diagnostiqués de 1997 à 2003 a été publiée en 2011 (Hardell, Carlberg et Mild, 2011).

Dans la première étude de Hardell, de Näsman, de Pålsson, d'Hallquist et de Mild (1999), 209 cas âgés de 20 à 80 ans, atteints d'un cancer entre 1994 et 1996, ont été considérés (tous les cancers du cerveau et les neurinomes acoustiques combinés) de même que 425 témoins. Le taux de participation mentionné dans l'étude n'est pas calculé de manière traditionnelle, mais il semblerait que ce taux – une fois que les patients décédés, ceux pour lesquels le médecin a refusé l'inclusion dans l'étude et ceux ayant refusé de participer pour des raisons de santé sont inclus dans le dénominateur – se situerait entre 25 et 36 % (AGNIR, 2003). Le groupe de référence auquel les utilisateurs de téléphones cellulaires étaient comparés était constitué de personnes ayant eu recours à un téléphone cellulaire pour une durée cumulative de moins de 8 heures. Les auteurs de l'étude n'ont pas noté d'association entre l'utilisation d'un téléphone cellulaire et la survenue d'un cancer. Le RC avec I.C. à 95 % global pour les utilisateurs du téléphone cellulaire par rapport aux non-utilisateurs était de 0,98 (0,69 – 1,41). Ces mêmes auteurs font ressortir une augmentation non statistiquement significative du risque de tumeur du côté de la tête où le téléphone était principalement utilisé (RC avec I.C. à 95 % de 2,45 [0,78 – 7,76] pour le côté droit et de 2,40 [0,52 – 10,9] pour le côté gauche). Cependant, sans augmentation globale du risque de cancer chez les utilisateurs de téléphones cellulaires participant à cette étude, ces résultats indiqueraient que l'emploi du téléphone cellulaire serait associé à une diminution du risque de cancer du côté opposé à celui où le téléphone est généralement utilisé (AGNIR, 2003). Devant ce constat improbable, l'hypothèse de la présence d'un biais d'information ou de sélection dans l'étude serait à privilégier.

Lors d'une deuxième étude de Hardell *et al.* (2002), au devis similaire à la première, des patients atteints d'un cancer du cerveau et des témoins âgés de 20 à 80 ans ont été recrutés de 1997 à 2000. En tout, 1 429 cas (soit environ 56 % des patients admissibles) et 1 470 témoins (taux de participation de 91 %) ont répondu au questionnaire. Contrairement à la première étude (Hardell, Näsman, Pålsson, Hallquist et Mild, 1999), le groupe de référence auquel les utilisateurs étaient comparés était constitué de personnes n'ayant jamais employé un téléphone cellulaire ou un téléphone sans fil de maison. Ce critère de non-exposition, très strict, est différent de celui utilisé lors de la première étude du groupe de Hardell, et la possibilité que ce critère entraîne un biais de confusion aurait mérité d'être étudiée. Pour un temps de latence¹¹ de 1 an ou plus, le RC des utilisateurs de téléphones cellulaires par rapport aux non-utilisateurs n'a pas montré d'augmentation du risque (RC avec I.C. à 95 % de 1,0 [0,8 – 1,2]). Les résultats relatifs à l'utilisation d'un téléphone sans fil de maison sont identiques (RC avec I.C. à 95 % de 1,0 [0,8 – 1,2]). L'usage d'un téléphone cellulaire analogique montrait une légère augmentation du risque (RC avec I.C. à 95 % de 1,3 [1,02 – 1,6]), mais cette augmentation n'était pas associée à la durée d'utilisation qui demeurait similaire peu importe la durée d'utilisation : RC avec I.C. à 95 % de 1,3 (0,99 – 1,8) pour moins de 85 heures d'utilisation et RC avec I.C. à 95 % de 1,2 (0,9 – 1,6) pour plus de 85 heures d'utilisation. Plusieurs autres mesures d'association ont également été calculées de sorte qu'en tout plus de 200 mesures d'association pour différents sous-groupes sont présentées dans l'article de Hardell *et al.* (2002, cité dans Boice et McLaughlin, 2002). Entre autres choses, les auteurs rapportent, pour un temps de latence de plus de 5 ans, une hausse presque identique du risque de tumeurs dans le lobe temporal lors de l'utilisation d'un téléphone cellulaire analogique, soit RC avec I.C. à 95 % de 1,9 (1,1 – 3,3), et lors de l'utilisation d'un téléphone sans fil de maison, soit RC avec I.C. à 95 % de 1,9 (1,1 – 3,5). Selon Boice et McLaughlin (2002), cette association semble toutefois peu plausible, puisque les téléphones cellulaires analogiques en Suède émettaient de 25 à 100 fois plus de radiofréquences que les téléphones sans fil de maison. Enfin, comme pour l'étude précédente (Hardell, Näsman, Pålsson, Hallquist et Mild, 1999), une analyse portant sur la localisation des tumeurs a montré un léger accroissement du risque du côté de la tête où le téléphone cellulaire était le plus utilisé et une diminution du risque du côté opposé.

¹¹ Dans ces études, le temps de latence semble être le laps de temps entre le début de l'exposition et le diagnostic de la maladie. L'exposition qui s'est produite l'année précédant le diagnostic n'est pas considérée.

Une troisième étude a été réalisée auprès de patients atteints de tumeurs malignes du cerveau ou de tumeurs bénignes (principalement les méningiomes et les neurinomes acoustiques) de 2000 à 2003 (Hardell, Carlberg et Mild, 2005, 2006). Les patients et les témoins recrutés étaient âgés de 20 à 80 ans. En tout, 317 personnes atteintes de tumeurs malignes et 413 personnes atteintes de tumeurs bénignes ont participé, tandis que, pour l'ensemble de l'étude, 692 témoins ont été recrutés (taux de participation de 84 %). Le groupe de référence auquel les utilisateurs de téléphones cellulaires étaient comparés était défini de la même manière que pour l'étude précédente. Les données présentées dans ces deux articles (Hardell, Carlberg et Mild, 2005, 2006) ne permettent pas de calculer de manière courante le taux de participation en fonction du type de tumeur. Le taux de participation global des personnes atteintes de tumeurs, lorsqu'il est calculé, sans égard au type de tumeur est d'environ 67 %. Le devis de cette étude est différent de celui des études précédentes, et les mesures d'association présentées ne permettent pas toujours une comparaison directe avec les anciens résultats. Par exemple, contrairement aux deux premières études du groupe de Hardell (Hardell, Näsman, Pålsson, Hallquist et Mild, 1999; Hardell *et al.*, 2002), les analyses effectuées n'ont pas nécessairement combiné tous les types de cancers au niveau de la tête. Pour un temps de latence de 1 an ou plus, l'utilisation d'un téléphone cellulaire digital (RC avec I.C. à 95 % de 1,5 [1,1 – 2,1]), d'un téléphone sans fil de maison (RC avec I.C. à 95 % de 1,5 [1,1 – 2,0]) et d'un téléphone cellulaire analogique (RC avec I.C. à 95 % de 2,4 [1,5 – 3,9]), montrait une augmentation du risque de développer un cancer bénin. Dans le cas des tumeurs malignes, la hausse du risque est similaire : RC avec I.C. à 95 % de 1,9 (1,3 – 2,7), de 2,1 (1,4 – 3,0) et de 2,6 (1,5 – 4,3) respectivement pour le téléphone cellulaire digital, le téléphone sans fil de maison et le téléphone cellulaire analogique. Ces risques sont plus élevés que ceux notés dans l'étude précédente, malgré des durées médianes d'utilisation similaires.

Enfin, une quatrième étude a analysé l'association entre les radiofréquences émises par les téléphones cellulaires et sans fil de maison et les cancers du cerveau et ceux au niveau de la tête des personnes atteintes d'un cancer qui étaient décédées et avaient donc été exclues des études réalisées de 1997 à 2003 (Hardell, Carlberg et Mild, 2010). Au total, 346 des 464 personnes atteintes d'un cancer qui étaient décédées, pour lesquelles un répondant a pu être déterminé, ont participé à l'étude (87 %). Le taux de participation des répondants des témoins, formés d'un groupe de personnes décédées d'un cancer autre qu'un cancer du cerveau ou d'un cancer au niveau de la tête et d'un groupe de personnes décédées d'une maladie chronique, était de 67 %. De novembre 2006 à août 2008, les répondants des cas et des témoins ont été interrogés au sujet de l'utilisation, par leur proche disparu, du téléphone cellulaire et du téléphone sans fil de maison. L'utilisation du téléphone cellulaire analogique a été associée à une augmentation statistiquement significative du risque de cancer du cerveau avec un RC avec I.C. à 95 % de 1,7 (1,1 – 2,7). En revanche, l'utilisation du téléphone cellulaire digital a été associée à une augmentation non statistiquement significative du risque de cancer du cerveau de 1,4 (0,97 – 2,1). L'utilisation combinée d'un téléphone cellulaire analogique ou digital, l'utilisation du téléphone sans fil de maison ou encore l'utilisation combinée du téléphone cellulaire et du téléphone sans fil de maison n'étaient pas associées à une augmentation du risque de cancer du cerveau avec des RC avec I.C. à 95 % de respectivement 1,3 (0,9 – 1,9), de 1,1 (0,7 – 1,5) et de 1,1 (0,8 – 1,5). Les résultats de cette étude sont cependant difficiles à interpréter. En effet, il est ardu d'évaluer la validité de l'information fournie par les répondants qui étaient appelés à évaluer l'utilisation du téléphone par un de leurs proches de 10 à 20 ans auparavant. La comparaison du temps d'utilisation médian du téléphone dans cette étude révèle d'ailleurs que les proches des personnes décédées semblent surestimer grandement l'utilisation du téléphone par rapport à l'évaluation personnelle des cas, notée dans les deux études précédentes qui couvrent la même période (Hardell *et al.*, 2002; Hardell, Carlberg et Mild, 2006; AGNIR, 2012). Enfin, malgré les efforts déployés dans cette étude pour tenter de limiter la présence d'un biais de rappel différentiel entre les répondants des cas et ceux des témoins, il semble peu probable que, dans le cadre d'une

étude sur le cancer du cerveau, le répondant d'une personne décédée d'un cancer du poumon ou d'une maladie cardiovasculaire, par exemple, soit sujet aux mêmes biais que le répondant d'une personne décédée d'un cancer du cerveau ou d'un cancer au niveau de la tête. L'influence potentielle de ce biais n'a pas fait l'objet d'une étude de validation.

4.2.2.2. Études de cohorte sur l'utilisation du téléphone cellulaire

Deux études de cohorte en lien avec l'utilisation du téléphone cellulaire ont été réalisées; une étude américaine, dont la durée de suivi est malheureusement très courte¹², et une étude danoise, dont la dernière mise à jour a été faite en 2011 (Ahlbom *et al.*, 2009; Frei *et al.*, 2011a). Une autre étude de cohorte, appelée COSMOS (*Cohort Study of Mobile Phone Use and Health*), a également débuté récemment (<http://www.ukcosmos.org/index.html>).

L'étude danoise porte sur une cohorte de personnes âgées de 30 ans et plus qui sont nées au Danemark après 1925. Les personnes ont été séparées en deux groupes, soit exposées ou non exposées, selon qu'elles possédaient ou non un abonnement à un téléphone cellulaire en leur nom avant 1995. Cette méthode d'évaluation de l'exposition a l'avantage d'être basée sur des données objectives fournies par les opérateurs de réseaux cellulaires. Cependant, cette manière de caractériser l'exposition peut mener à une erreur dans la classification de l'exposition pour certaines personnes, puisque tous les abonnés ne sont pas nécessairement les utilisateurs du téléphone cellulaire, et vice versa. De plus, les abonnements qui n'étaient pas au nom d'une personne physique ont dû être exclus de l'analyse, et les utilisateurs de ces téléphones, s'ils ne possédaient pas aussi un téléphone cellulaire personnel, ont quand même été considérés comme non exposés. Ce groupe de personnes représente environ 28 % des abonnements déterminés, mais moins de 5 % de la population danoise du groupe de référence (non exposé).

Dans la dernière mise à jour de la cohorte, les données recueillies ont été combinées à celles d'une autre cohorte afin de permettre d'ajuster les données en fonction de facteurs socioéconomiques, ce qui a réduit le nombre de participants à la cohorte. Dans le cadre de cette mise à jour, la survenue de cancers du système nerveux central pour la période de 1990 à 2007 a été évaluée. Les auteurs n'ont pas trouvé d'association entre le fait d'être abonné à un service de téléphonie cellulaire et la survenue d'un cancer. Les RC avec I.C. à 95 % pour le cancer du système nerveux central des abonnés par rapport à celui des non-abonnés étaient de 1,02 (0,94 – 1,18) pour les hommes et de 1,02 (0,86 – 1,22) pour les femmes. L'étude ne démontre pas de hausse du risque en fonction de la durée de l'abonnement. Les auteurs ont conclu que leur étude n'apportait pas de preuves de l'existence d'une association entre les cancers du système nerveux central et l'utilisation d'un téléphone cellulaire (Frei *et al.*, 2011b).

4.2.2.3. Études écologiques

Les études écologiques qui observent l'incidence du cancer au niveau de la population permettent d'obtenir un aperçu général des tendances dans l'évolution d'une maladie à moyen ou à long terme. Devant les difficultés rencontrées dans les études cas-témoin, notamment sur la caractérisation de l'exposition, et le coût élevé des études de cohorte, plusieurs études de type écologique, qui ont analysé les tendances temporelles des taux d'incidence de cancer dans plusieurs pays ou régions, ont été publiées au cours des dernières années. En particulier, les auteurs de deux de ces études ont aussi effectué des simulations numériques des taux d'incidence de cancer attendus en considérant l'hypothèse d'une relation causale entre l'exposition aux radiofréquences et le cancer du cerveau. Ces auteurs ont donc évalué la plausibilité des différents risques relatifs (RR) calculés dans les études cas-témoin en calculant l'effet attendu d'une telle augmentation du risque de développer un

¹² L'étude a été interrompue par des procédures judiciaires après un an de suivi, voir CIRC (2013).

cancer du cerveau sur le taux d'incidence, tout en considérant que les autres facteurs de risque demeurent constants.

Une première étude, publiée par Deltour *et al.* (2012), a analysé le taux d'incidence des gliomes dans la population des pays nordiques (Danemark, Finlande, Norvège et Suède). Les auteurs ont réalisé des simulations numériques du taux d'incidence attendu en supposant que l'utilisation du téléphone cellulaire occasionnait un risque relatif (RR) situé entre 0,8 et 2,0 avec un temps de latence de 1 à 15 ans, comme il est rapporté dans certaines des études épidémiologiques publiées jusqu'à maintenant. Les auteurs ont conclu que l'absence de tendance claire dans l'incidence de cancers du cerveau dans les pays nordiques semble être incompatible avec les résultats de plusieurs études épidémiologiques cas-témoin. Par exemple, les auteurs ont calculé que si le RR réel associé à l'utilisation d'un téléphone cellulaire était de 1,5, ce risque aurait dû être détecté si le temps d'induction était de moins de 10 ans (100 % de probabilité de détection) et aurait probablement été détecté si le temps d'induction était de 15 ans (84 %). De plus, avec un temps de latence de 1 an, même avec un RR de 1,5 qui ne serait associé à l'utilisation d'un téléphone cellulaire que pour les plus grands utilisateurs, soit des hypothèses similaires aux observations de l'étude INTERPHONE, une augmentation du taux d'incidence aurait été détectée dans une probabilité de 98 %. Selon les auteurs de l'étude, l'absence de tendance temporelle dans les taux d'incidence suggère que le temps de latence pourrait être plus long que les temps étudiés jusqu'à maintenant, que le risque relié à l'utilisation du téléphone mobile pourrait être plus faible que celui indiqué dans les études cas-témoin ou qu'il n'y a pas d'association entre l'utilisation du téléphone portable et le cancer (Deltour *et al.*, 2012).

Une autre étude écologique, publiée par le groupe de Little *et al.* (2012), porte sur l'incidence de gliomes au sein d'une partie de la population américaine. À l'aide de simulations, les auteurs ont calculé la variation attendue du taux d'incidence de gliomes en utilisant les RR des études du groupe de Hardell et de l'étude INTERPHONE. Des temps de latence de 1 à 10 ans ont été considérés, soit les temps de latence employés dans les analyses de ces mêmes études. Les auteurs ont conclu que les RR publiés dans l'étude d'analyse groupée des résultats de Hardell, de Carlberg et de Mild (2011) ne sont pas en accord avec la tendance d'incidence de cancer du cerveau observée dans la population américaine. Ils notent cependant que la tendance observée ne permet pas encore d'exclure la possibilité d'une faible hausse du risque, qui serait limitée aux grands utilisateurs du téléphone cellulaire, comme le rapporte l'étude INTERPHONE (Little *et al.*, 2012).

En général, malgré certaines variations dans les taux d'incidence, dont les causes ne sont pas nécessairement connues, les autres études publiées depuis l'étude de Repacholi *et al.* (2012) ne montrent pas de tendance attribuable à l'utilisation du téléphone cellulaire dans les taux d'incidence de cancers du cerveau, ou de cancers au niveau de la tête ou du cou (Shu, Ahlbom, et Feychting, 2012; Aydin, Feychting, Schüz, Rööslé et CEFALO Study Team, 2012; Ding et Wang, 2011; de Vocht, Burstyn et Cherrie, 2011; de Vocht, 2011; Duan, Zhang et Bu, 2011).

L'observation des tendances dans les taux d'incidence ne permet cependant pas de déceler l'impact d'un cancérogène possible pour toutes les situations. Par exemple, une faible augmentation du risque qui ne s'appliquerait qu'à une petite partie de la population serait difficile à détecter. Il est également possible qu'une variation du taux d'incidence soit amplifiée ou masquée par d'autres facteurs qui sont difficiles à contrôler. Cependant, si l'utilisation du téléphone portable entraîne un cancer du cerveau, l'augmentation rapide de l'usage de la téléphonie mobile, de 0 à près de 100 % en une vingtaine d'années, devrait changer l'incidence de ce type de cancer (Deltour *et al.*, 2012). L'absence d'une telle tendance jusqu'à ce jour dans les taux d'incidence est somme toute rassurante.

4.2.2.4. Études sur la proximité d'une station de base

Röösl, Frei, Mohler et Hug (2010), dans leur revue de la littérature qui portait sur l'ensemble des effets sur la santé des stations de base de téléphonie cellulaire, n'ont pu trouver qu'un seul article évaluant l'association avec l'incidence de cancer, qui répondait à leurs critères d'inclusion. Cet article ne montrait pas d'association entre l'incidence de cancer et l'appartenance à une municipalité classée comme étant plus exposée à partir, notamment, de l'évaluation de la proportion des personnes situées à moins de 400 m d'une station de base.

Parmi les études publiées depuis la revue de Röösl, Frei, Mohler et Hug (2010), une étude réalisée au Royaume-Uni ne rapporte pas d'association entre l'estimation de l'exposition de la mère durant la grossesse aux radiofréquences provenant des stations de base et le risque de cancer chez les jeunes enfants (Elliott *et al.*, 2010). Les auteurs d'une étude réalisée à Taiwan ont observé une légère hausse statistiquement significative du risque de cancer des enfants habitant dans un canton où l'estimation de l'exposition était plus élevée que la médiane (Li, Liu, Chang, Chou et Ko, 2012). La hausse n'était cependant pas statistiquement significative pour les cancers du cerveau ou la leucémie. Les auteurs de cette étude ont conclu que l'interprétation de leurs résultats était difficile sans études additionnelles et que la légère hausse du risque constatée pourrait être attribuable à une des nombreuses limitations de leur méthodologie. Enfin, une troisième étude rapporte une hausse de certains types de cancers associée à la proximité d'une station de base. Cependant, les faiblesses méthodologiques de cette étude limitent les conclusions pouvant être émises (Dode *et al.*, 2011; Foster et Trottier, 2013).

4.2.2.5. Évaluation des organismes de santé concernant le risque de cancer

Plusieurs organismes de santé reconnus ont évalué de façon approfondie la possibilité d'un lien entre l'exposition aux radiofréquences et le cancer. Dans l'ensemble, à l'exception du CIRC, les groupes d'experts précisent que les preuves disponibles à ce jour sont insuffisantes et ne permettent pas de soutenir l'hypothèse d'une relation causale.

En 2011, le groupe de travail sur les radiofréquences du CIRC a conclu qu'il y avait des indications de cancérogénicité « limitées » en ce qui concerne l'exposition aux radiofréquences chez l'homme, en lien avec les gliomes et les neurinomes acoustiques, de même que des indications de cancérogénicité « limitées » chez l'animal (Baan *et al.*, 2011). Quoique certains des membres du groupe de travail du CIRC aient cependant émis l'opinion minoritaire qu'ils considéraient que les preuves chez l'homme étaient « insuffisantes »¹³, une large majorité des membres du groupe de travail ont classé ce type de rayonnement dans la catégorie des expositions « peut-être cancérogènes » pour l'homme (Groupe 2B). Ce classement est employé lorsqu'une relation de cause à effet est jugée crédible, mais qu'il n'est pas possible d'éliminer avec une certitude raisonnable que le hasard, un biais ou des facteurs de confusion pourraient expliquer l'association (CIRC, 2006).

Bien que le groupe de travail du CIRC ait basé son évaluation principalement sur les résultats de l'étude INTERPHONE et de ceux du groupe de Hardell, qui portaient sur l'utilisation d'un téléphone cellulaire, il l'a appliqué à toutes les radiofréquences situées entre 30 kHz et 300 GHz. Cette évaluation ne quantifie cependant pas le risque en fonction de la source de rayonnement. Par exemple, pour le grand public, presque toutes les autres sources de radiofréquences produisent un niveau d'exposition à la tête qui est plus faible que celui produit lors de l'utilisation d'un téléphone

¹³ L'opinion de ces membres du comité était motivée par : les contradictions entre les résultats des principales études cas-témoin, l'absence de relation dose-réponse dans l'étude INTERPHONE, l'absence d'observations d'une hausse du taux d'incidence de gliomes et de neurinomes acoustiques dans la cohorte d'utilisateurs danois et l'absence de tendances temporelles dans les taux d'incidence de gliomes, qui refléteraient les taux d'utilisation du téléphone cellulaire dans la population.

cellulaire. Ainsi, selon Robert A. Baan, responsable de la monographie sur les radiofréquences au CIRC, même si l'hypothèse d'une relation causale était vraie, le risque de développer un des cancers identifiés par le CIRC à la suite d'une exposition au rayonnement issu d'une source environnementale de faible intensité serait considérablement plus faible qu'à la suite d'une exposition à une source locale comme un téléphone cellulaire (PRIARTEM, 2012).

En juin 2011, l'OMS a publié un aide-mémoire intitulé *Champs électromagnétiques et santé publique : téléphones portables*. Cet aide-mémoire a commenté à la fois les résultats de l'étude INTERPHONE et la classification des radiofréquences faite par le CIRC. L'organisation précisait qu'« [à] ce jour, il n'a jamais été établi que le téléphone [cellulaire] puisse être à l'origine d'un effet nocif pour la santé » (OMS, 2014). L'OMS a noté cependant qu'« *Il existe quelques signes d'un risque accru de gliome pour les 10 % d'utilisateurs dont le nombre d'heures cumulées d'utilisation était le plus élevé [...]* », mais rapportait les conclusions de l'étude INTERPHONE qui mentionnait « [...] *que les biais et les erreurs limitent la validité de ces conclusions et ne permettent pas une interprétation de causalité.* »

En 2011, l'ICNIRP, qui maintient une veille scientifique sur la littérature publiée dans le domaine du rayonnement non ionisant, a émis une opinion à la suite de la publication des résultats de l'étude INTERPHONE. L'organisme a conclu que les résultats de cette étude – combinés aux résultats des autres études épidémiologiques, biologiques et animales – suggèrent qu'il est peu probable qu'une augmentation du risque du cancer du cerveau chez l'adulte dans les 10 à 15 premières années suivant le début de l'utilisation du téléphone cellulaire existe (Swerdlow *et al.*, 2011). Enfin, l'ICNIRP a ajouté que, bien qu'il soit impossible d'en être certain, la tendance actuelle des résultats est contre l'hypothèse selon laquelle l'utilisation du téléphone cellulaire pourrait causer le cancer du cerveau.

En 2005, l'IEEE, dans sa revue de la littérature réalisée dans le cadre de la mise à jour de sa norme C95.1, avait noté qu'à ce jour les études épidémiologiques ne montraient pas de preuves claires ou convaincantes indiquant une relation causale entre l'exposition aux radiofréquences et le cancer ou d'autres maladies chez l'humain (IEEE, 2005). L'IEEE ajoutait que même si les résultats actuels ne soutenaient pas une forte association, ils ne permettaient pas d'établir l'absence de risques. Cependant, selon l'IEEE, les résultats montraient que, pour les niveaux d'exposition typiquement mesurés, les effets néfastes pour la santé, s'ils existaient, devaient être faibles.

En 2009, l'AFSSET, a publié une mise à jour de son expertise relative aux radiofréquences. L'agence a conclu qu'« [...] *il n'y a pas à ce jour de preuve de l'augmentation du risque de tumeur intracrânienne lié à l'utilisation régulière de téléphone mobile par un phénomène de promotion* » (AFSSET, 2009). L'organisme avait toutefois noté que, en ce qui concerne plusieurs autres cancers, les données étaient insuffisantes pour permettre de tirer une conclusion. Dans sa mise à jour de la littérature scientifique, l'Anses (2013) a jugé les éléments de preuve laissant croire à l'existence d'une association entre l'utilisation du téléphone cellulaire et le gliome comme étant insuffisants pour la population générale, mais limités pour les utilisateurs « intensifs ». L'Anses considère également les éléments de preuve laissant croire à l'existence d'une association avec le neurinome du nerf vestibuloacoustique comme étant limités.

Dans son rapport de 2012 sur les effets sanitaires associés à l'exposition aux radiofréquences, l'AGNIR a rapporté que, malgré les faiblesses méthodologiques présentes dans les études publiées à ce jour, l'évaluation des preuves scientifiques ne démontrait pas de risque accru en ce qui a trait aux cancers du cerveau ou aux neurinomes acoustiques pour les 15 premières années d'utilisation du téléphone cellulaire (AGNIR, 2012). Le groupe note cependant que les données tenant compte du plus long temps de latence ou des plus grandes durées d'utilisation sont encore limitées, spécialement dans le cas de l'emploi du téléphone mobile par les enfants et les adolescents. Pour

terminer, l'AGNIR a conclu que les études effectuées à ce jour ne donnent pas d'indications que les cancers des glandes salivaires, les tumeurs de l'hypophyse, la leucémie, les lymphomes non hodgkiniens, le cancer du testicule et les mélanomes de l'uvée pourraient être liés à l'utilisation du téléphone cellulaire.

En 2012, le Norwegian Institute of Public Health, à la suite de son évaluation de la littérature scientifique, a noté que, dans l'ensemble, les données disponibles ne montraient pas d'association entre l'exposition aux radiofréquences provenant des téléphones cellulaires et les tumeurs ayant un temps de croissance rapide, incluant les gliomes ayant une courte période d'induction (NIPH, 2012). En ce qui a trait aux tumeurs à croissance lente, incluant les méningiomes et les neurinomes acoustiques, cet institut a considéré que les données disponibles à ce jour ne donnaient pas d'indications d'une augmentation du risque. Les données disponibles sur les autres types de cancers (les leucémies, les lymphomes, les tumeurs de la glande salivaire, etc.) ont été considérées comme insuffisantes, mais ne suggèrent pas une augmentation du risque.

En 2012, le Swedish Council for Working Life and Social Research a publié une évaluation des recherches menées sur l'exposition aux radiofréquences au cours des dix années précédentes (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012). Le conseil a conclu que, dans la majorité des études épidémiologiques, on n'a pas trouvé de preuves que l'utilisation du téléphone cellulaire était associée à une augmentation du risque de développer des gliomes, des méningiomes, des neurinomes acoustiques ou d'autres tumeurs. De plus, il a attribué les augmentations de risque observées dans certaines études à la présence de biais et a noté que les augmentations de risque constatées dans ces études, si elles s'avéraient réelles, auraient dû mener à une hausse mesurable des taux d'incidence du cancer du cerveau.

En 2011, Santé Canada a mis à jour son bulletin *Votre santé et vous* qui portait sur les téléphones cellulaires et les stations de base (Santé Canada, 2011b). Dans cette publication, Santé Canada résume la controverse scientifique qui entoure l'association entre l'utilisation d'un téléphone cellulaire et le développement de certains types de cancers : « *Il y a quelques études épidémiologiques qui ont démontré des taux de cancer du cerveau pouvant être élevés chez les usagers très fréquents et à long terme du cellulaire. D'autres études épidémiologiques sur les usagers du cellulaire, études en laboratoire et études sur le cancer chez les animaux n'appuient pas cette hypothèse.* » (Santé Canada, 2011b) L'organisme note que la preuve d'une association est loin d'être concluante et qu'il est nécessaire de poursuivre les études dans ce domaine afin de clarifier la possibilité d'une association causale.

4.2.2.6. Conclusion relative aux études épidémiologiques sur le cancer

L'interprétation des études épidémiologiques est souvent complexe, puisque les résultats de ces études peuvent être influencés par des variations dues au hasard, à des biais et à des facteurs de confusion (AGNIR, 2012).

Par conséquent, afin de bien interpréter les résultats des études, il est important de tenter de déceler la présence de ces biais et d'en caractériser la direction¹⁴ et l'amplitude. À ce jour, l'étude INTERPHONE est celle où a été entreprise la plus grande évaluation des biais pouvant influencer ses résultats (Repacholi *et al.*, 2012). Les analyses et les études de validation du groupe de recherche responsable de l'étude INTERPHONE ont permis d'évaluer, entre autres choses, l'ampleur du biais de sélection et du biais de rappel ainsi que l'influence du taux de participation et des délais entre les entrevues des cas et celles des témoins (INTERPHONE, 2010). Ces études de validation ont permis,

¹⁴ Augmentation ou diminution de la mesure d'association.

par exemple, de montrer que, pour au moins une partie des participants de l'étude INTERPHONE, les cas les plus exposés surestimaient davantage leur exposition que les témoins et que le taux de participation des témoins qui n'employaient pas de téléphone cellulaire était plus faible (Repacholi *et al.*, 2012). Cependant, certains groupes de recherche tels que le groupe de Hardell n'ont malheureusement pas publié d'étude de validation, rendant très difficile l'évaluation de l'amplitude et de la direction des biais pouvant interférer avec leurs résultats (Repacholi *et al.*, 2012).

Dans l'ensemble, mis à part le groupe de travail du CIRC et le groupe d'experts de l'Anses qui considèrent qu'il existe des indications « limitées » sur la cancérogénicité des radiofréquences pour certaines combinaisons de types de cancers et de sous-populations, les organismes de santé sont d'avis que les preuves d'une relation entre le cancer et les radiofréquences sont négatives, insuffisantes ou loin d'être concluantes. Plusieurs organismes de santé reconnus encouragent la poursuite de la recherche sur un lien entre le cancer et l'utilisation des téléphones cellulaires, particulièrement pour ce qui est des cas où les données sont encore peu nombreuses, soit sur des durées d'utilisation dépassant 15 ans et chez les jeunes utilisateurs (OMS, 2010).

4.2.3 ÉTUDES SUR LES SYMPTÔMES NON SPÉCIFIQUES

Certaines personnes aux prises avec des problèmes de santé parfois invalidants attribuent leurs symptômes à une exposition à diverses sources de CEM. Selon l'OMS (2005), le terme à privilégier pour parler de ce phénomène est *intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques* – IEI-CEM. Plusieurs autres termes sont encore employés dans la littérature pour décrire cette condition : hypersensibilité aux champs électromagnétiques, électrosensibilité, électrohypersensibilité, etc. (Baliatsas, van Kamp, Lebreit et Rubin, 2012). Une vaste quantité de symptômes sont attribués à cette condition, et ces symptômes varient d'un individu à l'autre. Il n'existe aucun critère clinique permettant d'identifier les personnes se disant atteintes d'une IEI-CEM. L'OMS, dans un aide-mémoire produit en 2005, notait d'ailleurs que l'IEI-CEM ne constituait pas un diagnostic médical et qu'il n'était pas évident que l'IEI-CEM représentait un problème médical unique (OMS, 2005).

Dans une revue systématique de la littérature, Baliatsas, van Kamp, Lebreit et Rubin (2012) ont recensé les études publiées avant juin 2011 qui ont cherché à dresser un portrait des personnes disant souffrir d'IEI-CEM. En tout, 63 études originales ont été répertoriées. Les auteurs ont noté que la méthode d'identification des cas dans les études observationnelles ou expérimentales se basait principalement sur l'autodiagnostic des participants ou sur l'attribution des symptômes ressentis par ces participants à une source de CEM (Baliatsas, van Kamp, Lebreit et Rubin, 2012). La prévalence de cette condition varie considérablement d'une étude à l'autre selon la sévérité des critères d'inclusion employés; de moins de 2 % à plus de 15 % de la population attribuerait une partie des symptômes qu'elle ressent à une source de CEM (Baliatsas, van Kamp, Lebreit et Rubin, 2012).

Plusieurs types d'études ont été réalisés auprès de personnes disant souffrir d'IEI-CEM. Notamment, des études sur la capacité de ces personnes à détecter les CEM par rapport à celle de la population générale, sur l'association entre les symptômes ressentis et l'exposition à différentes sources de CEM en laboratoire ainsi que sur l'association entre les symptômes ressentis et l'exposition à des sources environnementales.

Deux revues systématiques de la littérature, une première publiée en 2005 et une mise à jour publiée en 2010, ont répertorié les articles portant sur l'association entre l'exposition à une source de CEM en laboratoire et l'apparition de symptômes subjectifs chez les personnes disant souffrir d'IEI-CEM (Rubin, Das Munshi et Wessely, 2005; Rubin, Nieto-Hernandez et Wessely, 2010). Ces revues de la littérature avaient pour objectif de dresser une liste des études visant à mesurer si les personnes

souffrant d'IEI-CEM sont capables de détecter la présence de radiofréquences et si elles ressentent davantage de symptômes lors d'une exposition contrôlée en laboratoire. En tout, 46 études à double ou à simple insu ont été répertoriées, ce qui représente 1 175 participants volontaires se disant atteints d'IEI-CEM. Les auteurs de ces revues ont conclu qu'il n'y avait pas de preuve permettant de démontrer l'existence d'une hypersensibilité aux CEM d'origine biophysique. L'hypothèse d'un lien entre l'exposition aux radiofréquences et les symptômes rapportés n'a donc pas été soutenue par les résultats des études répertoriées, mais les auteurs ont trouvé des preuves additionnelles permettant d'appuyer l'hypothèse selon laquelle des facteurs psychologiques pourraient jouer un rôle important dans le déclenchement, le maintien ou l'exacerbation des symptômes. En effet, les auteurs font remarquer que le fait que les expositions factices en laboratoire semblent être suffisantes pour déclencher des symptômes chez les participants disant souffrir d'IEI-CEM, il leur semble probable que plusieurs des symptômes ressentis par ces personnes dans la vie de tous les jours puissent être déclenchés par des effets nocebo similaires. Rubin, Das Munshi et Wessely (2005) notent que même si la plupart des personnes disant souffrir d'IEI-CEM indiquent que l'apparition de leurs symptômes survient dans les minutes ou les heures suivant l'exposition, une minorité de personnes disent ressentir des effets à plus long terme, un phénomène demeurant moins étudié. Les auteurs mentionnent seulement trois études ayant évalué ces effets à long terme (3 jours à 3 mois) et notent que ces études n'ont pas produit de résultats convaincants qui montrent des effets positifs après une réduction de l'exposition des participants aux radiofréquences (Rubin, Nieto-Hernandez et Wessely, 2010). Les auteurs concluent que les preuves actuelles les plus convaincantes indiquent que l'IEI-CEM ne devrait pas être considérée comme étant un phénomène bioélectromagnétique (Rubin, Nieto-Hernandez et Wessely, 2010).

Une revue de la littérature a également analysé les publications portant sur l'association entre l'exposition à une source de CEM en laboratoire et l'apparition de symptômes objectifs chez les personnes disant souffrir d'IEI-CEM (Rubin, Hillert, Nieto-Hernandez., van Rongen et Oftedal, 2011). En tout, 29 études publiées avant mai 2010 ont été répertoriées par les auteurs, des études mesurant une variété de paramètres ayant trait au système nerveux autonome, à la formule sanguine, aux fonctions cognitives et sensorielles, au système immunitaire, au sommeil, etc. Une minorité d'études (5 sur 29) ont montré la présence des effets chez les participants disant souffrir d'IEI-CEM. Les auteurs notent toutefois que les effets mesurés dans ces études n'ont souvent pas été reproduits et sont parfois contradictoires. Ils n'ont donc pas été en mesure de définir un patron de changements objectifs et mesurables, qui permettrait de caractériser ou de diagnostiquer l'IEI-CEM.

De nombreuses études ont analysé l'association entre les symptômes ressentis par des individus et l'exposition aux radiofréquences à des niveaux présents dans l'environnement. Une revue systématique de la littérature portant sur cette question a été réalisée par Rösli (2008) et a par la suite été étendue afin d'inclure les articles publiés jusqu'en novembre 2010 (Rösli et Hug, 2011). Ces publications s'intéressaient particulièrement à la capacité des personnes à détecter une exposition aux radiofréquences présentes dans l'environnement et à la capacité de ce type d'exposition à provoquer des symptômes. De plus, ces publications ont tenté de déterminer si les personnes disant souffrir d'IEI-CEM sont plus susceptibles de ressentir des symptômes à la suite d'une exposition aux radiofréquences que les personnes de la population générale. Rösli (2008) a conclu que, dans l'ensemble, les études publiées à ce jour montrent que la forte majorité des personnes souffrant d'IEI-CEM qui dit être en mesure de percevoir les radiofréquences n'est pas en mesure de le faire dans des conditions contrôlées (Rösli, 2008). De plus, il note qu'il n'existe aucune preuve que l'exposition aux radiofréquences entraîne des symptômes non spécifiques chez certaines personnes, qu'elles disent souffrir d'IEI-CEM ou non. Dans leur mise à jour de la littérature, Rösli et Hug (2011) concluent que les articles plus récents confirment les conclusions précédentes, c'est-à-dire qu'il est peu probable que l'exposition à court terme aux radiofréquences puisse avoir une

influence sur la santé des individus. Baliatsas *et al.* (2012) ont aussi analysé les publications portant sur l'association entre les symptômes non spécifiques et l'exposition aux radiofréquences. Ils ont réalisé une méta-analyse sur les 22 études satisfaisant à leurs critères d'inclusion. Les auteurs ont conclu que les associations observées entre l'exposition aux radiofréquences et les symptômes ressentis par la population générale se contredisaient d'une étude à l'autre. Ainsi, Baliatsas *et al.* ont constaté que les études ne montraient souvent pas d'association ou, lorsqu'une association statistiquement significative était présente dans certaines études individuelles (par exemple céphalées aiguës, problèmes de concentration, troubles du sommeil), elle n'était pas présente dans les autres études comparables. Ils ont également remarqué que les études qui possédaient un devis d'étude plus rigoureux faisaient moins souvent état d'une association statistiquement significative (Baliatsas *et al.*, 2012). Enfin, ces mêmes auteurs constatent que, même si une association entre l'exposition aux radiofréquences et les symptômes ressentis ne semble pas exister, une association entre ces symptômes et l'impression subjective d'être exposé semble présente. Les auteurs notent toutefois que les preuves à cet effet ne permettent pas encore de conclure de manière définitive sur la nature du phénomène de l'IEI-CEM (Baliatsas *et al.*, 2012).

Röösli, Frei, Mohler et Hug (2010) ont réalisé une revue de la littérature ayant trait à l'ensemble des effets des stations de base de téléphonie cellulaire sur la santé. La plupart des articles trouvés (14 sur 17) portaient sur l'association entre l'exposition aux radiofréquences et la présence de symptômes non spécifiques rapportés par des personnes. Même si certaines des études recensées avaient un devis ne permettant que des mesures transversales, plusieurs comportaient des essais randomisés où l'exposition était contrôlée. En tout, une multitude de symptômes ont été analysés, dont le mal de tête, les problèmes de concentration et de sommeil, les étourdissements, etc. Les auteurs indiquent que, dans l'ensemble, aucun symptôme ou groupe de symptômes n'a pu être associé à l'exposition de manière cohérente. Ils notent que les études basées sur une dosimétrie de faible qualité montraient des effets reliés à l'exposition, tandis que les études où l'exposition était caractérisée de manière plus rigoureuse montraient rarement des associations. Les auteurs ont conclu que les éléments de preuve laissant croire à une absence d'association entre les symptômes ressentis et l'exposition aux radiofréquences des stations de base étaient forts, puisque cette absence repose sur des essais contrôlés effectués sur des humains. Ces mêmes auteurs notent toutefois que les données analysées ne permettent pas de conclure en ce qui concerne des expositions à long terme aux niveaux d'exposition auxquels la population est exposée.

L'association possible entre les symptômes non spécifiques ressentis par un échantillon de la population et la distance entre la maison des participants et la station de base de la téléphonie cellulaire la plus près a aussi été étudiée par Baliatsas *et al.* (2011). En tout, 3 611 personnes ont répondu au questionnaire lors de cette recherche. Les auteurs ont constaté qu'il n'y avait pas d'association entre la distance entre les maisons et les stations de base et les symptômes ressentis par les participants, mais que différents facteurs psychologiques et sociodémographiques pouvaient avoir une influence sur les symptômes rapportés (Baliatsas *et al.*, 2011). Notamment, ils ont observé que les symptômes décrits par les participants étaient associés à leur perception de la distance entre les stations de base et leur demeure, plutôt qu'associés à la distance réelle entre les stations de base et leur demeure.

4.2.3.1. Traitements

Les possibilités de traitement des symptômes ressentis par les personnes souffrant d'IEI-CEM ont été examinées dans un nombre limité d'études. Rubin, Munshi et Wessely (2006) ont réalisé une revue de la littérature, publiée avant janvier 2004, portant sur l'efficacité de traitements pour l'IEI-CEM. En tout, 9 études cliniques, proposant différents traitements, ont été retenues. Les auteurs ont conclu que la thérapie cognitivo-comportementale (*cognitive behavioural therapy*) semblait être

efficace pour traiter l'IEI-CEM (Rubin, Munshi et Wessely, 2006). Les auteurs ont toutefois noté que, puisque les preuves démontrant l'efficacité ce traitement étaient encore limitées, d'autres études seraient nécessaires avant de formuler des recommandations définitives.

L'OMS, dans son aide-mémoire no 296, formule plusieurs recommandations sur le traitement de l'IEI-CEM (OMS, 2005). En particulier, l'organisation recommande aux médecins d'établir une relation thérapeutique efficace avec le patient afin d'être en mesure de bien traiter les symptômes ressentis par ces derniers. À son avis, la prise en charge des patients disant souffrir d'IEI-CEM devrait inclure un examen physique et psychologique, de manière à identifier toute pathologie susceptible d'expliquer les symptômes observés, de même qu'une évaluation des facteurs environnementaux qui pourraient contribuer à l'apparition des symptômes (pollution de l'air, bruit, éclairage inadéquat, stress, etc.).

4.2.3.2. Évaluation des organismes de santé portant sur les symptômes non spécifiques

Les organismes de santé ayant analysé la littérature sur l'association entre l'exposition aux radiofréquences et les symptômes non spécifiques sont parvenus à des conclusions similaires. Santé Canada considère qu'il « [...] *n'existe pas de données scientifiques permettant d'affirmer que les symptômes attribués à l'hypersensibilité électromagnétique sont réellement causés par une exposition aux CEM.* » (Santé Canada, 2009b). L'OMS, dans son aide-mémoire n° 296, intitulé *Champs électromagnétiques et santé publique : hypersensibilité électromagnétique*, indique que les symptômes des personnes souffrant d'IEI-CEM « [...] *ont une réalité certaine et peuvent être de gravité très variable.* » L'OMS note cependant qu'il n'existe pas de « [...] *base scientifique permettant de relier les symptômes de [l'hypersensibilité électromagnétique] à une exposition aux CEM.* » et que « [...] *[hypersensibilité électromagnétique] ne constitue pas un diagnostic médical.* » (OMS, 2005) L'AGNIR estime que les études réalisées à ce jour constituent un ensemble solide et suggèrent que l'exposition à court terme aux radiofréquences à des niveaux en dessous des limites d'exposition n'entraîne pas de symptômes chez les personnes du grand public ou chez les personnes disant souffrir d'IEI-CEM (AGNIR, 2012). Le Swedish Council for Working Life and Social Research note que, malgré les efforts considérables qui ont été déployés, aucune association entre les symptômes ressentis par les personnes souffrant d'IEI-CEM et l'exposition n'a pu être établie (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012). Selon cet organisme, l'absence d'une telle relation, en combinaison avec le fait que les symptômes sont corrélés avec la croyance de ces personnes à être en situation d'exposition même sans la présence de radiofréquences, laisse croire qu'une partie des symptômes pourrait être attribuée à l'effet nocebo (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012). Le Norwegian Institute of Public Health (NIPH, 2012) considère qu'une grande quantité d'études scientifiques fournissent des preuves que les symptômes ressentis par les personnes souffrant d'IEI-CEM ne sont pas causés par les radiofréquences. Selon cet institut, des facteurs sociaux et divers facteurs psychologiques pourraient expliquer pourquoi les radiofréquences sont perçues comme étant la cause des problèmes de santé ressentis par ces personnes (NIPH, 2012). Dans sa revue de la littérature, l'AFSSET (2009) a conclu qu'aucun auteur « [...] *n'a apporté la preuve d'une relation de causalité entre cette exposition et l'EHS.* » et qu'« [...] *un faisceau d'indices concordants a été recueilli, suggérant fortement que des facteurs neuro-psychiques individuels interviendraient, au moins en partie, dans la genèse de [l'hypersensibilité électromagnétique].* ». Enfin, la revue de la littérature effectuée par le Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR, 2015), un groupe d'experts mandaté par la Commission européenne, conclut également en l'absence d'une relation causale entre les symptômes rapportés par certaines personnes et l'exposition aux radiofréquences.

4.2.3.3. Conclusion à propos des symptômes non spécifiques

De nombreuses études de bonne qualité ont été réalisées afin d'évaluer l'association entre l'exposition à de faibles niveaux de radiofréquences et l'apparition de symptômes non spécifiques. Les preuves scientifiques, qui sont de plus en plus solides, montrent que l'IEI-CEM n'est pas associée à l'exposition aux CEM. Il est toutefois important de rappeler que les symptômes décrits par les personnes souffrant d'IEI-CEM demeurent néanmoins bien réels. Certaines études indiquent qu'une partie de ces symptômes pourrait être expliquée par des facteurs psychologiques ou sociaux, mais d'autres études seront nécessaires avant de conclure à ce propos de manière définitive. Quoi qu'il en soit, plusieurs autres causes physiques ou psychologiques pourraient aussi expliquer les symptômes rapportés, de sorte que les personnes disant souffrir d'IEI-CEM devraient, suivant les recommandations de l'OMS, obtenir de l'aide médicale et être prises en charge de façon personnalisée.

4.3 Conclusions au regard des risques pour la santé

L'étude des effets potentiels des radiofréquences sur la santé a fait et fait encore l'objet de nombreuses publications scientifiques. À titre d'illustration, l'Anses, durant la rédaction du présent rapport, a publié la mise à jour de son expertise portant sur les radiofréquences (Anses, 2013). Dans cet écrit, le groupe de travail de l'Anses a répertorié 308 documents publiés entre avril 2009 et décembre 2012. En 2009, lors de sa mise à jour de son expertise précédente, l'AFSSET avait répertorié 226 documents publiés entre le début de l'année 2005 et le 1^{er} avril 2009 (AFSSET, 2009). Ces nombreux documents, de même que ceux publiés avant 2005 et ceux portant sur des sujets connexes, représentent une source d'information vaste et importante.

En se fondant sur cette littérature, de nombreux organismes de santé ont évalué les risques potentiels pour la santé associés à l'exposition aux radiofréquences. Santé Canada considère que l'exposition aux radiofréquences provenant des téléphones cellulaires « [...] *ne présente aucun danger confirmé pour la santé* [...] » et que lorsque les émissions provenant des stations de base de téléphonie cellulaire respectent les limites établies, « [...] *il n'y a aucune raison scientifique de les considérer comme étant dangereuses pour le public* » (Santé Canada, 2011b). De même, Santé Canada (2011a) considère que « [...] *les données scientifiques actuelles corroborent l'affirmation que les émissions d'énergie RF des appareils Wi-Fi ne sont pas dangereuses.* »

L'OMS, dans son aide-mémoire n° 304, considère que les réseaux sans fil, incluant les stations de base, produisent des niveaux d'exposition très faibles et qu'à ce jour « [...] *il n'existe aucun élément scientifique probant confirmant d'éventuels effets nocifs des stations de base et des réseaux sans fil pour la santé.* » (OMS, 2006a).

L'AFSSET, dans sa mise à jour d'expertise réalisée en 2009, affirmait que les données expérimentales disponibles « *n'indiquent pas d'effets sanitaires à court terme ni à long terme de l'exposition aux radiofréquences* » (AFSSET, 2009). Quant aux données épidémiologiques chez l'humain, selon l'AFSSET, elles « [...] *n'indiquent pas non plus d'effets à court terme de l'exposition aux radiofréquences* » (AFSSET, 2009). Enfin, l'agence mentionne que même si des interrogations persistent à propos d'effets potentiels à long terme, « [...] *aucun mécanisme biologique analysé ne plaide actuellement en faveur de cette hypothèse.* » (AFSSET, 2009). Aussi, l'Anses, dans sa mise à jour d'expertise réalisée en 2013, arrive à des conclusions similaires (Anses, 2013). L'organisme mentionne que les quelques effets biologiques relevés dans certaines études doivent être validés et que ces effets « [...] *semblent transitoires ou correspondre à une simple variation biologique* » (Anses, 2013). Il argue que, pour le moment, il est « [...] *impossible de conclure que les effets biologiques observés sont générateurs d'effets sanitaires* » (Anses, 2013).

De son côté, dans son rapport publié en 2012, l'AGNIR, notait qu'aucune des centaines d'études menées sur des cellules en laboratoire, qui ont été publiées à ce jour, n'avait apporté de preuves solides d'un effet observable (AGNIR, 2012). L'organisme considère qu'en général les effets rapportés étaient de faible ampleur et que les tentatives de réplification des résultats étaient infructueuses (AGNIR, 2012). Aussi, l'AGNIR remarque que parmi les études effectuées chez les animaux en laboratoire celles démontrant une hausse de la température corporelle sont les plus solides et qu'il n'existe pas de preuves claires montrant des effets à de plus bas niveaux d'exposition (AGNIR, 2012). Dans le cas des études chez l'humain, l'AGNIR n'a pas relevé de preuves convaincantes montrant la présence d'effets, tant en ce qui a trait aux effets potentiellement cancérigènes qu'en ce qui concerne les effets non cancérigènes (AGNIR, 2012).

Le Norwegian Institute of Public Health note également la grande quantité d'études publiées portant sur des effets potentiels des radiofréquences (NIPH, 2012). L'organisme conclut que même si certains effets biologiques ou physiologiques ne peuvent être exclus, l'ensemble des études disponibles ne fournit pas de preuves que l'exposition aux radiofréquences pourrait engendrer des effets néfastes sur la santé (NIPH, 2012).

Le Swedish Council for Working Life and Social Research (SCWLSR), souligne que deux sujets sont plus particulièrement discutés en lien avec les effets potentiels des radiofréquences, soit l'IEI-CEM (électrosensibilité) et les cancers du cerveau (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012). Cet organisme considère que, dans les deux cas, aucune hypothèse ou étude initiale n'est à l'origine de ces préoccupations, ces dernières étant plutôt basées sur une inquiétude générale que quelque chose aurait pu être négligé à propos de cette technologie en développement rapide. Il estime que les preuves accumulées à ce jour ne laissent pas croire à la présence d'un risque accru et qu'il semble de plus en plus improbable que ces deux effets puissent avoir un lien avec l'exposition aux radiofréquences. Le SCWLSR juge, de plus, qu'à l'exception de certaines observations méritant d'autres études, particulièrement celles concernant des effets potentiels sur l'électroencéphalogramme, la multitude d'autres effets qui pourraient être étudiés ne dispose pas d'hypothèses crédibles qui nécessiteraient d'être testées. Enfin, l'organisme conclut que les études réalisées à ce jour ne fournissent pas de preuves indiquant que les limites d'exposition basées sur la limitation de l'échauffement des tissus pourraient être insuffisantes pour protéger de la santé de la population.

En somme, quoique l'exposition aux radiofréquences fasse encore l'objet d'une certaine incertitude scientifique, notamment en ce qui a trait à l'exposition attribuable à des sources locales et aux expositions de longue durée, aucun effet néfaste sur la santé n'a été démontré à ce jour. Pour ce qui est de l'exposition attribuable à des sources environnementales, qui est généralement beaucoup plus faible, il semble improbable qu'elle puisse être associée à des effets néfastes sur la santé.

5 Conclusion

L'exposition aux radiofréquences est attribuable à une multitude de sources. Elle est influencée, d'une part, par des choix personnels liés à l'utilisation de certains appareils émetteurs, et, d'autre part, par plusieurs sources et facteurs environnementaux. Selon les données de la littérature scientifique, les niveaux d'exposition actuels de la population sont bien en dessous des limites d'exposition recommandées par les organismes de santé (ICNIRP, IEEE et Santé Canada). Quoique les niveaux d'exposition varient de manière complexe en fonction de l'évolution des technologies, il est raisonnable de penser que l'exposition moyenne de la population est appelée à augmenter au cours des prochaines années. Cependant, l'exposition moyenne de la population devrait demeurer largement en dessous des limites d'exposition.

Les risques potentiels pour la santé associés à l'exposition aux radiofréquences ont fait l'objet de plusieurs centaines d'études sur des cellules isolées et sur des animaux de laboratoire ainsi que chez l'humain. L'exposition à des niveaux élevés de radiofréquences produit des effets thermiques, soit un réchauffement des tissus, qui sont établis de manière solide et qui constituent la base des recommandations des limites d'exposition de la plupart des organismes de santé. Des approches de gestion spécifiques quant aux méthodes de protection de la santé humaine semblent expliquer les différences dans les limites d'exposition adoptées à travers le monde. Spécialement, certains pays, comme la Russie, élaborent leurs recommandations de manière à empêcher tous les effets biologiques, même en l'absence de preuves que ces effets biologiques peuvent entraîner des effets néfastes sur la santé. D'autres pays, comme l'Italie, ont adopté des limites d'exposition arbitrairement basses sans justification scientifique. Ces approches contrastent avec l'approche préconisée par la plupart des pays occidentaux qui considèrent que les effets biologiques qui sont dans la gamme des variations physiologiques normales n'entraînent pas nécessairement d'effets néfastes sur la santé. Ces pays formulent donc leurs recommandations de manière à empêcher tous les effets néfastes qui sont établis, soit les effets thermiques.

À de faibles niveaux d'exposition, certaines études semblent montrer la possibilité d'effets biologiques qui pourraient se trouver à l'intérieur des variations physiologiques normales. Même si les limites de la recherche actuelle ne permettent pas d'exclure toute possibilité de risque, aucun effet néfaste sur la santé à court ou à long terme n'a été démontré.

Parallèlement à ce consensus scientifique, un écart notable est constaté entre la perception du risque d'une certaine partie de la population et l'évaluation du risque établie par des organismes de santé reconnus. Peu d'études permettent d'interpréter cet écart de perception, mais il est possible que cet écart soit en partie nourri par les résultats de certaines études dont la validité n'est pas démontrée. En effet, historiquement, une partie importante de la littérature scientifique portant sur l'étude des effets de l'exposition aux radiofréquences était de faible qualité (AFSSET, 2009). Cette faible qualité était souvent imputable aux difficultés liées à la nécessité d'employer des méthodes adéquates, tant pour la partie physique des expériences (contrôle et caractérisation de l'exposition) que pour la partie biologique (choix de mesures pertinentes, réplication, interprétation, etc.); l'adéquation de ces méthodes étant nécessaire afin d'assurer la validité et la portée des résultats. Bien que la littérature scientifique publiée à ce jour contienne également une grande quantité d'études de qualité, il demeure possible de trouver des études isolées ou contradictoires qui permettent de soutenir une position préétablie. Cette variabilité dans la qualité des études renforce la nécessité de tenir compte de l'ensemble des données disponibles afin de réaliser une évaluation exhaustive fondée sur les données probantes.

Mesures de précaution

Certaines parties prenantes au débat entourant l'exposition aux radiofréquences demandent de faire appel à la précaution. Selon le *Cadre de référence en gestion des risques pour la santé dans le réseau québécois de la santé publique* de l'INSPQ, la précaution « [...] vise à éviter des **risques potentiels**, c.-à-d. des risques mal connus, entachés d'incertitude et associés à un danger hypothétique, mais jugé plausible. » (INSPQ 2003). Or, à la lumière des études et des analyses présentées dans ce rapport, force est de constater que, pour la plupart des risques étudiés, le critère de plausibilité n'est pas établi.

Une certaine incertitude subsiste en ce qui a trait à la possibilité d'une augmentation du risque de développer certains types de cancers du cerveau (gliomes). En effet, étant donné l'existence de certains éléments de preuve « limités » concernant une augmentation du risque chez les plus grands utilisateurs du téléphone cellulaire dans l'étude INTERPHONE, la possibilité d'une augmentation du risque de développer un gliome ne peut pas être exclue, même si cette possibilité demeure peu plausible et qu'elle n'est pas étayée par des études sur des cellules isolées ou sur des animaux. De plus, les preuves présentées à ce jour semblent indiquer que si ce risque s'avérait réel, il serait faible (augmentation du risque de moins de 20 %), limité à une partie de la population (par exemple, les plus grands utilisateurs du téléphone cellulaire) et associé à seulement certains types de gliomes; et tiendrait compte de durées d'induction à long terme – plus de 15 ans (Anses, 2013). Toutefois, certains organismes, même s'ils reconnaissent les limites des preuves actuelles, considèrent que les nouveaux éléments de preuve tendent de plus en plus à montrer une absence d'effets (AGNIR, 2012; Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012).

Devant ces incertitudes, certains organismes de santé ont estimé qu'une recommandation visant à encourager une réduction de l'emploi du téléphone cellulaire par les enfants était justifiée (Santé Canada, 2011b; Anses, 2013). En ce qui concerne la population adulte, Santé Canada (2011a) pense que de fournir de l'information à propos des moyens auxquels peuvent avoir recours cette portion de la population pour réduire son exposition aux radiofréquences provenant des téléphones cellulaires, sans pour autant lui recommander de réduire son exposition, était suffisant. Enfin, Santé Canada considère que des mesures visant à limiter l'exposition aux radiofréquences provenant des stations de base étaient inutiles (Santé Canada, 2011b). De l'avis de plusieurs organismes, les données disponibles ne justifient pas le recours à la précaution lors de l'utilisation du téléphone cellulaire ou de l'exposition à d'autres sources (Ahlbom, Feychting, Hamnerius et Hillert, 2012; NIPH, 2012).

5.1 Gestion du risque

La gestion des risques potentiels reliés à l'exposition aux radiofréquences doit tenir compte des preuves disponibles et des incertitudes qui s'y rattachent. Pour des niveaux d'exposition élevés, les limites du CS6 de Santé Canada sont établies de manière à empêcher l'augmentation de la température corporelle et les effets néfastes sur la santé qui pourraient en résulter. Pour ce qui est des faibles niveaux d'exposition, l'absence de preuves montrant des effets néfastes sur la santé, malgré un effort de recherche considérable, est rassurante. Néanmoins, les limites de la recherche actuelle et les résultats équivoques de certaines études ne permettent pas d'exclure toute possibilité de risque, même si aucun effet néfaste sur la santé à court ou à long terme n'a pas été démontré. Toutefois, comme le mentionne le cadre de référence en gestion des risques de l'INSPQ, « [...] l'absence de risque est souvent difficile à prouver hors de tout doute. » (Ricard, 2003).

Dans ce contexte, les mesures de gestion qui pourraient être mises en place doivent demeurer raisonnables. Les mesures proposées dans ce rapport relèvent d'une approche dite de gestion prudente, applicable lors d'une problématique où l'existence même d'un risque est peu probable.

Ces mesures ont pour objectifs principaux d'assurer le maintien et le développement des connaissances dans ce domaine, de réduire les incertitudes scientifiques et d'aider les décideurs et la population à obtenir l'information nécessaire à une prise de décision éclairée.

Suivant l'analyse de la littérature scientifique sur les risques potentiels pour la santé associés aux radiofréquences, les mesures de gestion du risque suivantes sont suggérées :

Veille scientifique

- Mesure 1 : Poursuivre la veille scientifique sur les effets possibles des radiofréquences.

Cette veille scientifique devrait porter une attention particulière aux études sur les variations des taux d'incidence des cancers du cerveau chez l'humain, aux études portant sur les enfants et aux résultats des expertises collectives réalisées par des organismes de santé nationaux et internationaux reconnus.

- Mesure 2 : Favoriser le maintien d'une expertise dans ce domaine au Québec et la mise sur pied d'un réseau d'échange avec d'autres experts de cette spécialité.

Plusieurs comités d'experts (par exemple l'Anses) procèdent à un suivi de la littérature scientifique en lien avec l'exposition aux radiofréquences. Les échanges avec de tels comités d'experts favoriseraient le maintien et l'actualisation de l'expertise québécoise dans ce domaine.

Communication de l'état des connaissances

- Mesure 3 : Mettre en place des outils d'information, qui permettent à la population d'avoir accès aux données scientifiques les plus récentes sur le lien entre l'exposition aux radiofréquences et leurs effets sur la santé des populations.

Ces outils (documents électroniques, publications, etc.) devraient permettre, notamment, de réduire l'écart entre les risques perçus par la population et le consensus auquel se rallient les scientifiques quant à l'état des connaissances et ainsi favoriser une prise de décision éclairée par les gestionnaires du risque et la population.

- Mesure 4 : Proposer des mesures permettant de venir en aide aux personnes rapportant des symptômes qu'elles attribuent à l'exposition aux radiofréquences.

Malgré l'absence de lien établi entre l'exposition aux radiofréquences et les symptômes ressentis par les personnes atteintes d'IEI-CEM, la réalité de leurs symptômes ne peut être mise en doute. Les symptômes rapportés par ces personnes peuvent être révélateurs de pathologies sous-jacentes pouvant avoir des conséquences sérieuses si les traitements appropriés ne leur sont pas offerts. Des outils de communication pourraient, d'une part, être conçus pour informer ces personnes de l'état des connaissances scientifiques à propos de l'IEI-CEM, et, d'autre part, en s'appuyant sur les recommandations de l'OMS, les personnes rapportant des symptômes causés par l'IEI-CEM devraient être orientées vers les ressources appropriées en vue d'une prise en charge adéquate et d'une amélioration de leur état de santé.

Recherche

- Mesure 5 Collaborer à des projets de recherche en lien avec l'étude des effets potentiels de l'exposition aux radiofréquences sur la santé.

Ces travaux devraient s'appuyer sur les recommandations de recherche de l'OMS (van Deventer, van Rongen et Saunders, 2011). Certains des besoins en recherche dans le domaine des sciences sociales, en particulier ceux qui portent sur l'évaluation de la représentation du risque pour la

population et sur le développement et l'évaluation d'outils de communication, pourraient faciliter la mise en œuvre des mesures de gestion, qui concernent la communication de l'état des connaissances scientifiques sur les radiofréquences (mesures 3 et 4).

Références

Advisory Group on Non-Ionising Radiation. (2012). Health effects from radiofrequency electromagnetic fields. Royaume-Uni : Health Protection Agency.

Advisory Group on Non-Ionising Radiation. (2003). Health effects from radiofrequency electromagnetic fields (Document of the NRPB, volume 14, numéro 2). Chilton, Didcot – Oxfordshire, Angleterre : National Radiological Protection Board.

Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. (2009). *Les radiofréquences : mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences – Rapport d'expertise collective* (saisine no 2007/007). France : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail.

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2013). *Radiofréquences et santé : mise à jour de l'expertise – Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective* (saisine n°2011-SA-0150). Maisons-Alfort, France : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Ahlbom, A., Feychting, M., Green, A., Kheifets, L., Savitz, D., Swerdlow, A. J., ... International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection Standing Committee on Epidemiology. (2009). Epidemiologic evidence on mobile phones and tumor risk: a review. *Epidemiology*, 20(5), 639–652.

Ahlbom, A., Feychting, M., Hamnerius, Y., Hillert, L. (2012). *Radiofrequency electromagnetic fields and risk of disease and ill health. Research during the last ten years*. Stockholm : Swedish Council for Working Life and Social Research.

Association canadienne des télécommunications sans fil (2012). *Statistiques*. Page récupérée le 31 août 2012 sur le site de l'Association : <http://cwta.ca/fr/facts-figures/>

Aydin, D., Feychting, M., Schüz, J., Rössli, M. et CEFALO Study Team. (2012). Childhood brain tumours and use of mobile phones: comparison of a case-control study with incidence data. *Environmental Health*, 11, 35.

Baan, R., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., ... WHO International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. (2011). Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *The Lancet. Oncology*, 12(7), 624-626.

Baliatsas, C., Van Kamp, I., Bolte, J., Schipper, M., Yzermans, J. et Lebret, E. (2012). Non-specific physical symptoms and electromagnetic field exposure in the general population: can we get more specific? A systematic review. *Environment International*, 41, 15-28.

Baliatsas, C., van Kamp, I., Kelfkens, G., Schipper, M., Bolte, J., Yzermans, J., ... Lebret, E. (2011). Non-specific physical symptoms in relation to actual and perceived proximity to mobile phone base stations and powerlines. *BMC Public Health*, 11, 421.

Baliatsas, C., Van Kamp, I., Lebret, E. et Rubin, G. J. (2012). Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF): a systematic review of identifying criteria. *BMC Public Health*, 12, 643.

Beard, B. B., Kainz, W., Onishi, T., Iyama, T., Watanabe, S., Fujiwara, O., ... Nikoloski, N. (2006). Comparisons of computed mobile phone induced SAR in the SAM phantom to that in anatomically correct models of the human head. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(2), 397-407.

Beausoleil, M. (2012). *Avis de santé publique - Les compteurs d'électricité de nouvelle génération présentent-ils un risque pour la santé?* Québec : Ministère de la Santé et des Services sociaux. Document récupéré sur le site du Ministère : http://publicsde.regie-energie.qc.ca/projets/34/DocPrj/R-3770-2011-D-0062-OBSERV-AUTRE-2012_03_16.pdf

Beausoleil, M. (2011). *Consultation publique – Réglementation des antennes de télécommunication (avis de santé publique adressé sous forme de lettre à l'Office de consultation publique de Montréal dans le cadre de la consultation publique sur la réglementation des antennes de télécommunication)*. Direction de santé publique – Agence de la santé et des services sociaux de Montréal.

Beausoleil, M. et Brodeur, J. (2010). *Radiofréquences émises par certaines antennes cellulaires dans l'arrondissement d'Outremont : évaluation de l'exposition et effets sur la santé*. Montréal : Direction de santé publique – Agence de la santé et des services sociaux de Montréal.

Boice, J. D. et McLaughlin, J. K. (2002). *Epidemiologic studies of cellular telephones and cancer risk – a review* (rapport 2002:16). Stockholm : Swedish Radiation Protection Authority.

Bolte, J. et Eikelboom, T. (2012). Personal radiofrequency electromagnetic field measurements in The Netherlands: exposure level and variability for everyday activities, times of day and types of area. *Environment International*, 48, 133-142.

British Columbia Centre for Disease Control et National Collaborating Centre for Environmental Health. (2013). *Radiofrequency toolkit for environmental health practitioners*. Vancouver : British Columbia Centre for Disease Control et National Collaborating Centre for Environmental Health.

Cardis, E., Varsier, N., Bowman, J. D., Deltour, I., Figuerola, J., Mann, S., ... Wiart, J. (2011). Estimation of RF energy absorbed in the brain from mobile phones in the Interphone Study. *Occupational and Environmental Medicine*, 68(9), 686-693.

Centre international de Recherche sur le Cancer. (2013). *Non-ionizing radiation. Part II: Radiofrequency electromagnetic fields* (volume 102). *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*. Lyon, France : Centre international de Recherche sur le Cancer.

Centre international de Recherche sur le Cancer. (2006). *Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: preamble*. Lyon, France : Centre international de Recherche sur le Cancer.

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2013). *Workplan*. Page récupérée le 7 mars 2013 du site de la Commission : <http://www.icnirp.org/en/activities/work-plan/index.html>

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 Hz). *Health Physics*, 99(6), 818-836.

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2009a). *Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz)*. Vecchia, P., Matthes, R., Ziegelberger, G., Lin, J., Saunders, R. et Swerdlow, A., éd. Munich : Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2009b). *Statement on the guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. *Health Physics*, 97(3), 257-8

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2002). General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Physics* 82(4), 540-548.

Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants/International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494-522.

ConsumerReports. (2013, mis à jour en janvier 2015). *Top cordless phone buying guide*. Récupéré le 20 mars 2013 du site de Consumer Reports : <http://www.consumerreports.org/cro/cordless-phones/buying-guide.htm>

de Vocht, F., Burstyn, I. et Cherrie, J. W. (2011). Time trends (1998-2007) in brain cancer incidence rates in relation to mobile phone use in England. *Bioelectromagnetics*, 32(5), 334-339.

de Vocht, F. (2011). Cell phones and parotid cancer trends in England. *Epidemiology*, 22(4), 608-609.

Deltour, I., Auvinen, A., Feychting, M., Johansen, C., Klæboe, L., Sankila, R., ... Schüz, J. (2012). Mobile phone use and incidence of glioma in the nordic countries 1979-2008: consistency check. *Epidemiology*, 23, 301-307.

Diallo, A. et Gauvin, D. (2010). *Antennes de téléphonie mobile et santé publique – état des connaissances*. Institut national de santé publique du Québec.

Ding, L. X. et Wang, Y. X. (2011). Increasing incidence of brain and nervous tumours in urban Shanghai, China, 1983-2007. *Asian Pacific Journal for Cancer Prevention* 12(12), 3319-3322.

Dode, A. C., Leão, M. M. C., Tejo, F. A. F., Gomes, A. C. R., Dode, D. C., Dode, M. C., ... Caiaffa, W. T. (2011). Mortality by neoplasia and cellular telephone base stations in the Belo Horizonte municipality, Minas Gerais state, Brazil. *Science of the Total Environment*, 409(19), 3649-3665.

Duan, Y., Zhang, H. Z. et Bu, R. F. (2011). Correlation between cellular phone use and epithelial parotid gland malignancies. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 40(9), 966-972.

Elliott, P., Toledano, M. B., Bennett, J., Beale, L., de Hoogh, K., Best, N., ... Briggs, D. J. (2010). Mobile phone base stations and early childhood cancers: case-control study. *British Medical Journal*, 340, c3077.

European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure. (2010). *D3 - Report on the analysis of risks associated to exposure to EMF: in vitro and in vivo (animals) studies (work package 5)*. European Health Risk Assessment Network on Electromagnetic Fields Exposure.

European Telecommunications Standards Institute. (2015). *DECT*. Page récupérée le 19 mai 2015 sur le site de l'institut : <http://www.etsi.org/index.php/technologies-clusters/technologies/dect>

Foster, K. (2013). A world awash with wireless devices: radio-frequency exposure issues, *Microwave Magazine, IEEE*, 14(2), 73-84.

Foster, K. R. et Trottier, L. (2013). Comments on "Mortality by neoplasia and cellular telephone base stations in the Belo Horizonte municipality, Minas Gerais state Brazil" by A. C., Dode *et al.* 2011) 3649-3665. *Science of the Total Environment*, 450-451, 366-368.

Frei, P., Poulsen, A. H., Johansen, C., Olsen, J. H., Steding-Jessen, M. et Schüz, J. (2011a). Authors' reply to Khurana and to Philips and Lamburn. *British Medical Journal*, 343, d7912. Repéré à <http://www.bmj.com/content/343/bmj.d7912>

Frei, P., Poulsen, A. H., Johansen, C., Olsen, J. H., Steding-Jessen, M. et Schüz, J. (2011b). Use of mobile phones and risk of brain tumours: update of Danish cohort study. *British Medical Journal*, 343, d6387.

Frei, P., Mohler, E., Bürgi, A., Fröhlich, J., Neubauer, G., Braun-Fahrländer, C., ... QUALIFEX Team. (2010). Classification of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) for epidemiological research: evaluation of different exposure assessment methods. *Environment International*, 36(7), 714-720.

Frei, P., Mohler, E., Neubauer, G., Theis, G., Bürgie, A., Fröhlich, J., ... Rössli, M. (2009). Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Environmental Research*, 109(6), 779-785.

Gauvin, D., Ngamga Djetcha, E. et Levallois, P. (2006). *Exposition aux champs électromagnétiques : mise à jour des risques pour la santé et pertinence de la mise en œuvre du principe de précaution*. Institut national de santé publique du Québec.

Hardell, L., Carlberg, M. et Mild, K. H. (2011). Pooled analysis of case-control studies on malignant brain tumours and the use of mobile and cordless phones including living and deceased subjects. *International Journal of Oncology*, 38(5), 1465-1474.

Hardell, L., Carlberg, M. et Mild, K. H. (2010). Mobile phone use and the risk for malignant brain tumors: a case-control study on deceased cases and controls. *Neuroepidemiology* 35(2), 109-114.

Hardell, L., Carlberg, M. et Mild, K. H. (2006). Case-control study of the association between the use of cellular and cordless telephones and malignant brain tumors diagnosed during 2000-2003. *Environmental Research*, 100(2), 232-241.

Hardell, L., Carlberg, M. et Mild, K. H. (2005). Case-control study on cellular and cordless telephones and the risk for acoustic neuroma or meningioma in patients diagnosed 2000-2003. *Neuroepidemiology*, 25(3), 120-128.

Hardell, L., Hallquist, A., Mild, K. H., Carlberg, M., Pålsson, A. et Lilja, A. (2002). Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumours. *European Journal of Cancer Prevention* 11(4), 377-386.

Hardell, L., Näsman, A., Pålsson, A., Hallquist, A. et Mild, K. H. (1999). Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: a case-control study. *International Journal of Oncology* 15(1), 113-116.

Industrie Canada. (2013). *Questions souvent posées en ce qui concerne l'énergie radioélectrique et la santé*. Page récupérée le 5 mars 2013 sur le site d'Industrie Canada : <http://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/fra/sf08792.html>

Industrie Canada. (2011). *Gestion du spectre des télécommunications – Règles et procédures sur la radiodiffusion. Partie 3 : règles et procédures de demande relatives aux entreprises de radiodiffusion FM* (5^e édition, RPR-3). Industrie Canada.

- Industrie Canada. (2010). *Gestion du spectre des télécommunications – Règles et procédures sur la radiodiffusion. Partie 10 : règles et procédures de demande relatives aux entreprises de télévision numérique (TVN)*. Industrie Canada.
- Industrie Canada. (2009, mis à jour en 2011). *Gestion du spectre des télécommunications – Règles et procédures sur la radiodiffusion. Partie 2 : règles et procédures de demande relatives aux entreprises de radiodiffusion AM (2^e édition, RPR-2)*. Industrie Canada.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2015). *IEEE ICES Database ElectroMagnetic Field Literature Search Engine*. Base de données consultée sur le site de l'IEEE International Committee on Electromagnetic Safety : <http://www.ieee-emf.com/index.cfm>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2005). *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz (IEEE Std C95.1-2005)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- International Committee on Electromagnetic Safety. (2012). *Minutes TC95 meeting*. Page récupérée le 7 mars 2013 sur le site du comité : http://www.ices-emfsafety.org/meetings_archive.php
- INTERPHONE Study Group. (2011). Acoustic neuroma risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Cancer Epidemiology*, 35(5), 453-464.
- INTERPHONE Study Group. (2010). Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *International Journal of Epidemiology*, 39(3), 675-694.
- Inyang, I., Benke, G., Mckenzie, R. et Abramson, M. (2008). Comparison of measuring instruments for radiofrequency radiation from mobile telephones in epidemiological studies: implications for exposure assessment. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 18(2), 134-141.
- Joseph, W., Frei, P., Rössli, M., Thurcózy, G., Gajsek, P., Trcek, T., ..., Martens, L. (2010). Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe. *Environmental Research*, 110(7), 658-663.
- Joseph, W., Verloock, L., Goeminne, F., Vermeeren, G. et Martens, L. (2012a). Assessment of RF exposures from emerging wireless communication technologies in different environments. *Health Physics*, 102(2), 161-172.
- Joseph, W., Verloock, L., Goeminne, F., Vermeeren, G. et Martens, L. (2012b). In situ LTE exposure of the general public: characterization and extrapolation. *Bioelectromagnetics*, 33(6), 466-75
- Juutilainen, J., Heikkinen, P., Lagroye, I., Miyakoshi, J., van Rongen, E., Saunders, R., ..., Xu, Z. (2011). Experimental studies on carcinogenicity of radiofrequency radiation in animals. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(18), 1664-1695.
- Juutilainen, J., Höytö, A., Kumlin, T. et Naarala, J. (2011). Review of possible modulation-dependent biological effects of radiofrequency fields. *Bioelectromagnetics* 32(7), 511-534.
- Kowalczyk, C., Yarwood, G., Blackwell, R., Priestner, M., Sienkiewicz, Z., Bouffler, A., ... Balzano, Q. (2010). Absence of nonlinear responses in cells and tissues exposed to RF energy at mobile phone frequencies using a doubly resonant cavity. *Bioelectromagnetics*, 31(7), 556-565.
- Kühn, A., Cabot, E., Christ, A., Capstick, M. et Kuster, N. (2009). Assessment of the radio-frequency electromagnetic fields induced in the human body from mobile phones used with hands-free kits. *Physics in Medicine and Biology*, 54(18), 5493-5508.

Larousse (s.d.-a). *Définition de génotoxicité*. Page récupérée le 20 mai 2015 sur le site du dictionnaire Larousse : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/g%C3%A9notoxicit%C3%A9/186411>

Larousse. (s.d.-b). *Définition de cancérigène, cancérogène*. Page récupérée le 20 mai 2015 sur le site du dictionnaire Larousse : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/canc%C3%A9rog%C3%A8ne/12640>

Lauer, O., Frei, P., Gosselin, M. C., Joseph, W., Rössli, M. et Fröhlich, J. (2013). Combining near- and far-field exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: a reference case. *Bioelectromagnetics*, 34(5), 366-374.

Levallois, P., Gauvin, D., Lajoie, P. et Saint-Laurent, J. (1996). *Bilan des normes et recommandations d'exposition aux champs électromagnétiques (0 à 300 GHz) et au rayonnement ultraviolet (B-047)*. Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec.

Levallois, P., Lajoie, P. et Gauvin, D. (1991). *Les effets des champs électromagnétiques de 50/60 Hz sur la santé : bilan et perspectives de santé publique pour le Québec*. Québec : Département de santé communautaire du Centre hospitalier de l'Université Laval.

Levallois, P., Lajoie, P., Gauvin, D., Carrier, G., Daveluy, A., Drouin, L., ...Tremblay, C. (2000). *Consensus sur l'évaluation et la gestion des risques associés à l'exposition aux champs électrique et magnétique provenant des lignes électriques. Rapport du groupe de travail au ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec*. Direction de la santé publique de Québec.

Li, C. Y., Liu, C. C., Chang, Y. H., Chou, L. P. et Ko, M. C. (2012). A population-based case-control study of radiofrequency exposure in relation to childhood neoplasm. *The Science of the Total Environment*, 435-436, 472-478.

Little, M. P., Rajaraman, P., Curtis, R. E., Devesa, S. S., Inskip, P. D., Check, D. P., ... Linet, M. S. (2012). Mobile phone use and glioma risk: comparison of epidemiological study results with incidence trends in the United States. *British Medical Journal*, 344, e1147.

Massé, R. (2013). *Radiofréquences émises par les compteurs intelligents : position des directeurs régionaux de santé publique du Québec*. Montréal : Agence de la santé et des services sociaux de Montréal. Document récupéré sur le site de l'agence : http://www.dsp.santemontreal.qc.ca/fileadmin/documents/dossiers_thematiques/Environnement/Champs_electro/13_Avis_des_DSP_compt_intel_05122013.pdf

Mild, K. H., Andersen, J. B. et Pedersen, G. F. (2012). Is there any exposure from a mobile phone in stand-by mode? *Electromagnetic Biology and Medicine*, 31(1), 52-56.

Neubauer, G., Feychting, M., Hamnerius, Y., Kheifets, L., Kuster, N., Ruiz, I., ...Rössli, M. (2007). Feasibility of future epidemiological studies on possible health effects of mobile phone base stations. *Bioelectromagnetics*, 28(3), 224-230.

Norwegian Institute of Public Health. (2012). *Low-level radiofrequency electromagnetic fields – an assessment of health risks and evaluation of regulatory practice. Report from the Expert Committee appointed by the Norwegian Institute of Public Health (English summary)*. Norwegian Institute of Public Health.

Occupational Safety and Health Administration. (1990). *Field service memo: electromagnetic radiation and how it affects your instruments*. Page récupérée le 29 octobre 2012 sur le site de l'organisme : http://www.osha.gov/SLTC/radiofrequencyradiation/electromagnetic_fieldmemo/electromagnetic.html

Office of Engineering and Technology. (2012). *Radio frequency safety*. Page récupérée le 20 mai 2015 du site de la Federal Communications Commission : <https://transition.fcc.gov/oet/rfsafety/rf-fags.html>

Organisation mondiale de la Santé. (2014). *Aide-mémoire N°193 – Champs électromagnétiques et santé publique: téléphones portables*. Page récupérée le 7 janvier 2016 sur le site de l'organisation : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/fr/>

Organisation mondiale de la Santé. (2013). *The International EMF Project - Progress report 2012-2013*. Genève : Organisation mondiale de la Santé. Document récupéré le 5 mars 2014 sur le site de l'organisation : http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/IAC_2013_Progress_Report.pdf

Organisation mondiale de la Santé. (2010). *WHO research agenda for radiofrequency fields*. Genève, Suisse : Organisation mondiale de la Santé. Document récupérée du site de l'organisation : http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44396/1/9789241599948_eng.pdf

Organisation mondiale de la Santé. (2008). *Instauration d'un dialogue sur les risques dus aux champs électromagnétiques*. Genève : Organisation mondiale de la Santé. Document récupéré le 2 mai 2014 sur le site de l'organisation : http://www.who.int/peh-emf/publications/2008_french_risk_handbook.pdf?ua=1

Organisation mondiale de la Santé. (2006a). *Aide-mémoire N°304 – Champs électromagnétiques et santé publique : stations de base et technologies sans fil*. Page récupérée le 9 août 2012 sur le site de l'organisation : <http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs304/fr/>

Organisation mondiale de la Santé. (2006b). *Framework for developing health-based EMF standards*. Genève, Suisse : Organisation mondiale de la santé.

Organisation mondiale de la Santé. (2005). *Aide-mémoire N°296 - Champs électromagnétiques et santé publique: hypersensibilité électromagnétique*. Page récupérée le 4 décembre 2013 sur le site de l'organisation : <http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs296/fr/>

PRIARTEM (2012). Nouvelles précisions de l'OMS concernant la classification en « possiblement cancérigène » des radiofréquences (réponse du Dr. Robert A. Baan, responsable section des monographies du CIRC Volume 102 sur les champs électromagnétiques des radiofréquences). Page récupérée le 12 mars 2013 sur le site de PRIARTEM : <http://www.priartem.fr/Nouvelles-precisions-de-l-OMS.html>

Repacholi, M., Grigoriev, Y., Buschmann, J. et Pioli, C. (2012). Scientific basis for the Soviet and Russian radiofrequency standards for the general public. *Bioelectromagnetics*, 33(8), 623-633.

Repacholi, M. H., Lerchl, A., Rössli, M., Sienkiewicz, Z., Auvinen, A., Breckenkamp, J., ...Vecchia, P. (2012). Systematic review of wireless phone use and brain cancer and other head tumors. *Bioelectromagnetics* 33 (3), 187-206.

Ricard, S. (2003). *Cadre de référence en gestion des risques pour la santé dans le réseau québécois de la santé publique*. Institut national de santé publique du Québec.

Rössli, M., Frei, P., Mohler, E. et Hug, K. (2010). Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Bulletin of the World Health Organization*, 88 (12), 887-896G.

Rössli, M. et Hug, K. (2011). Wireless communication fields and non-specific symptoms of ill health: a literature review. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, 161(9-10), 240-250.

Röösli, M. (2008). Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: a systematic review. *Environmental Research*, 107, 277-287.

Rowley, J. T. et Joyner, K. H. (2012). Comparative international analysis of radiofrequency exposure surveys of mobile communication radio base stations. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 22(3), 304-315.

Royal Society of Canada Expert Panel. (2014). *A review of safety code 6 (2013): Health Canada's safety limits for exposure to radiofrequency fields*. Ottawa, ON : Royal Society of Canada.

Rubin, G. J., Das Munshi, J. et Wessely, S. (2005). Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosomatic Medicine*, 67(2), 224-232.

Rubin, G. J., Hillert, L., Nieto-Hernandez, R., van Rongen, E. et Oftedal, G. (2011). Do people with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields display physiological effects when exposed to electromagnetic fields? A systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics* 32(8), 593-609.

Rubin, G. J., Munshi, J. D. et Wessely, S. (2006). A systematic review of treatments for electromagnetic hypersensitivity. *Psychotherapy Psychosomatics*, 75(1), 12-18.

Rubin, G. J., Nieto-Hernandez, R. et Wessely, S. (2010). Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (formerly 'electromagnetic hypersensitivity'): an updated systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics*, 31(1), 1-11.

Sage Associates. (2011). *Assessment of radiofrequency microwave radiation emissions from smart meters*. Santa Barbara, CA : Sage Associates.

Santé Canada (2015). *Code de sécurité 6 - Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz*.

Santé Canada. *Sécurité de la technologie Wi-Fi*. (2011a). Page récupérée du site de Santé Canada : <http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/iyh-vsv/prod/wifi-fra.php>

Santé Canada. (2011b). Sécurité des cellulaires et des stations de base. Votre santé et vous. Document récupéré du site de Santé Canada : http://publications.gc.ca/collections/collection_2011/sc-hc/H13-7-5-2011-fra.pdf

Santé Canada (2009a). *Code de sécurité 6 - Limites d'exposition humaine à l'énergie électromagnétique radioélectrique dans la gamme de fréquences de 3 kHz à 300 GHz*.

Santé Canada (2009b). *Hypersensibilité électromagnétique*. Page récupérée le 26 novembre 2013 du site de Santé Canada : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/radiation/cons/electri-magnet/electromagnet-fra.php>

Santé Canada. (2003). Questions de sécurité concernant le rayonnement des fours à micro-ondes. *Votre santé et vous*, février.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. (2015). *Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)*. European Commission.

Sheppard, A. R., Swicord, M. L. et Balzano, Q. (2008). Quantitative evaluation of mechanisms of radiofrequency interactions with biological molecules and processes. *Health Physics*, 95(4), 365-396.

- Shu, X, Ahlbom, A. et Feychting, M. (2012). Incidence trends of malignant parotid gland tumors in Swedish and Nordic adults 1970 to 2009. *Epidemiology*, 23(5), 766-767.
- Stam, R. (2011). *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*. The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment.
- Swerdlow, A. J., Feychting, M., Green, A. C., Kheifets, L., Savitz, D. A., ... International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2011). Mobile phones, brain tumours and the INTERPHONE study: where are we now? *Environmental Health Perspectives*, 119(11), 1534-1538.
- Tomitsch, J. et Dechant, E. (2012). Trends in residential exposure to electromagnetic fields from 2006 to 2009. *Radiation Protection Dosimetry*, 149(4):384-91.
- Union Internationale des Télécommunications. (2012). *Key statical highlights*.
- van Deventer, E., van Rongen, E. et Saunders, R. (2011). WHO research agenda for RF. *Bioelectromagnetics* 32(5), 417-421.
- Vecchia, P. et Foster, K. (2003). Regulating radio-frequency fields in Italy. *Technology and Society Magazine, IEEE*, 21(4), 23-27.
- Verschaeve, L., Juutilainen, J., Lagroye, I., Miyakoshi, J., Saunders, R., de Seze, R., ...Xu, Z. (2010). In vitro and in vivo genotoxicity of radiofrequency fields. *Mutation Research*, 705(3), 252-268.
- Viel, J. F., Cardis, E., Moissonnier, M., de Sèze, R. et Hours, M. (2009). Radiofrequency exposure in the French general population: band, time, location and activity variability. *Environment International*, 35(8), 1150-1154.
- Vrijheid, M., Mann, S., Vecchia, P, Wiart, J., Taki, M., Ardoino, L., ...Cardis, E. (2009). Determinants of mobile phone output power in a multinational study: implications for exposure assessment. *Occupational & Environmental Medicine*, 66(10), 664-671.

services maladies infectieuses santé services
et innovation microbiologie toxicologie prévention des maladies chroniques
santé au travail innovation santé au travail impact des politiques publiques
impact des politiques publiques développement des personnes et des communautés
promotion de saines habitudes de vie recherche services
santé au travail promotion, prévention et protection de la santé impact des politiques
sur les déterminants de la santé recherche et innovation services de laboratoire et diagnostic
recherche surveillance de l'état de santé de la population

www.inspq.qc.ca