

Rayonnements non ionisants

Pascal Guénel, Louise De Guire, Denis Gauvin, Marc Rhains

La référence bibliographique de ce document se lit
comme suit:

Guénel P, De Guire L, Gauvin D, Rhains M (2003)
Rayonnements non ionisants.

In : Environnement et santé publique - Fondements et
pratiques, pp. 441-462.

Gérin M, Gosselin P, Cordier S, Viau C, Quénel P,
Dewailly É, rédacteurs.

Edisem / Tec & Doc, Acton Vale / Paris

Note : Ce manuel a été publié en 2003. Les connaissances
ont pu évoluer de façon importante depuis sa publication.

Rayonnements non ionisants

Pascal Guénel, Louise De Guire, Denis Gauvin, Marc Rhains

1. Introduction

2. Rayonnements ultraviolets

2.1 Introduction

2.2 Sources d'exposition et niveaux

2.3 Effets sur la santé

2.4 Normes d'exposition, gestion du risque et prévention

2.5 Conclusion

3. Autres types de rayonnements non ionisants

3.1 Introduction

3.2 Définitions

3.3 Sources d'émission et niveaux d'exposition

3.4 Effets sur la santé

3.5 Recommandations d'exposition

3.6 Gestion du risque

3.7 Conclusion

1. INTRODUCTION*

Les radiations électromagnétiques sont caractérisées par leur longueur d'onde et leur fréquence, que l'on peut situer sur deux échelles parallèles représentées ci-contre (figure 16.1). Les rayonnements électromagnétiques ayant des longueurs d'onde inférieures à 100 nm (10^{-7} m) sont dits ionisants, car ils possèdent une énergie suffisante pour ioniser la matière, c'est-à-dire provoquer des lésions physiques au niveau des atomes, notamment au niveau de la molécule d'ADN. La conséquence principale est une augmentation du nombre de cancers, fait bien établi pour les expositions à fortes doses. À l'inverse, les effets sur la santé et les mécanismes d'action biologiques des radiations non ionisantes, situées à l'autre extrémité du spectre électromagnétique, sont souvent mal établis et sujets à discussion. Pour rendre compte de la diversité des effets biologiques des radiations, ainsi que de la variété des sources d'exposition et des risques encourus, les rayonnements ionisants et non ionisants sont traités à part dans deux chapitres séparés. Le présent chapitre est uniquement consacré aux rayonnements non ionisants.

Les rayonnements non ionisants incluent eux-mêmes un large spectre de radiations électromagnétiques et font l'objet de deux sections distinctes dans le présent chapitre.

- Nous décrivons tout d'abord les rayonnements ultraviolets (UV) qui sont à l'origine de plusieurs affections cutanées ou oculaires, le mélanome de la peau étant la condition associée la plus importante. Ils méritent une place à part en raison de l'importance de l'exposition dont l'origine est avant tout le rayonnement solaire. Même si le mécanisme d'action des UV dans le mélanome est toujours mal compris, leur rôle est clairement démontré sur le plan épidémiologique.
- Les autres types de rayonnements non ionisants sont traités dans une seconde partie. Bien que l'énergie transportée par ces rayonnements soit insuffisante pour rompre les liaisons chimiques, ils pourraient perturber certains équilibres biologiques. Toutefois, les effets évoqués sont souvent spéculatifs. Si les effets thermiques des rayonnements dans la bande des micro-ondes, par exemple, sont

bien connus, on a aussi évoqué des effets cancérogènes des radiofréquences et des champs électromagnétiques de 50 ou 60 Hz, qui sont encore largement controversés. Dans cette section seront essentiellement discutés les effets sur la santé des champs électriques et magnétiques d'extrêmement basse fréquence (EBF ou ELF, en anglais, pour «*extremely low frequency*») qui ont fait l'objet de la plus abondante littérature.

2. RAYONNEMENTS ULTRAVIOLETS**

2.1 Introduction

Le rayonnement ultraviolet (UV) est une composante du spectre électromagnétique qui regroupe les longueurs d'onde dans l'intervalle de 100 à 400 nanomètres (nm). Les rayons UV sont subdivisés en trois régions spectrales distinctes en fonction de leurs propriétés d'absorption et des mécanismes d'interaction biologique. Il s'agit des rayons ultraviolets C (UVC) (100 à 280 nm), des UVB (280 à 315 nm) et des UVA (315 à 400 nm) (IARC, 1992). Les UVA sont subdivisés en UVA courts ou UVA II (320 à 340 nm) et en UVA longs ou UVA I (340 à 400 nm) (Rapaport, 1998). Les rayons UV sont essentiels à la vie sur terre. Ils participent notamment à la photosynthèse chez les plantes ainsi qu'à la production de vitamine D chez l'humain (IARC, 1992). Cependant, les rayons UV ont aussi des effets délétères, dont le mieux documenté est sans doute le cancer de la peau.

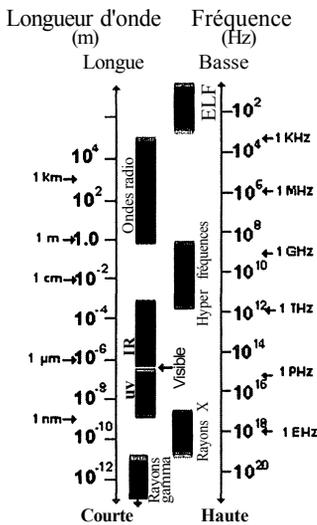
2.2 Sources d'exposition et niveaux

L'évaluation de l'exposition de la population aux rayons UV doit à la fois tenir compte des différentes sources retrouvées dans l'environnement (soleil, lampes de bronzage), de l'intensité du rayonnement et des déterminants de l'exposition, notamment les facteurs qui influencent le niveau terrestre d'UV (altitude, latitude), le travail, les comportements individuels (loisirs, vacances, pratique du bronzage, recours à des moyens de protection) et les caractéristiques personnelles (type de peau, maladies génétiques).

* Texte rédigé par Pascal Guénel

** Texte rédigé par Louise De Guire et Marc Rhainds

Figure 16.1 Spectre électromagnétique



Un rayonnement électromagnétique est caractérisé par sa longueur d'onde λ (exprimée en m), par sa fréquence ν (exprimée en seconde⁻¹ ou hertz) ou par l'énergie transportée E (en joules ou en eV, sachant que 1 eV=1,6•10⁻¹⁹ joule). Ces paramètres sont liés par les relations $\lambda = C/\nu$ (C=vitesse de la lumière) et $E=h\nu$ (h=constante de Planck = 6,62•10⁻³⁴ joule-seconde). Ainsi, plus la longueur d'onde est faible, plus la fréquence et l'énergie transportée sont élevées.

Rayons UV solaires

Le soleil est la principale source de rayonnement UV. Seuls les rayons UVA et une partie des UVB se rendent jusqu'à la terre. Ces derniers représentent respectivement 95 % et 5 % du rayonnement UV solaire. Quant à la composante UVC, elle est absorbée en totalité par la couche d'ozone (IARC, 1992).

La mesure des niveaux ambiants en UV (UVA et UVB) est une méthode utilisée pour estimer la dose de rayonnement reçue. Bien qu'imprécises, ces mesures donnent un aperçu de la limite supérieure de l'exposition, pour une population donnée, dans une région en particulier, sans tenir compte par exemple du nombre d'heures passées à l'extérieur ou encore du recours à des moyens de protection. Le niveau ambiant de rayonnement UVB mesuré à la surface de la terre est influencé par différents paramètres qui ont un impact sur la dose d'UV reçue (tableau 16.1). En général, l'éclairement énergétique au zénith varie selon les pays de 48 à 54 W/m² pour les UVA et de 0,9 à 2,6 W/m² pour les UVB (Miller et coll., 1998; McGinley et coll., 1998).

Tableau 16.1 Variation de l'intensité du rayonnement UVB terrestre en fonction de certains paramètres liés à l'environnement

Paramètres	Impact sur le niveau d'éclairement énergétique en UVB
Diminution de l'ozone stratosphérique	↑
Moment de la journée, entre 9 et 15 h	↑
En été	↑
Latitude (en direction de l'équateur)	↑
Augmentation de la couverture nuageuse	↓
Élévation en altitude	↑
Réflexion sur des surfaces (eau, sable, béton, neige)	↑
Augmentation des polluants dans l'air extérieur	↓

Adapté de Rhains, M.. et L. De Guire (1998)

L'exposition peut aussi être exprimée en unité de dose minimale pour induire un érythème sur la peau (DME). La DME correspond à la plus faible intensité de rayonnement UV (exprimée en joules par mètre carré, ou J/m²) capable de produire un érythème 24 heures après l'exposition (IARC, 1992). La dose annuelle moyenne de rayonnement UV solaire reçue en fonction de différentes catégories d'activités est présentée au tableau 16.2.

Tableau 16.2 Dose annuelle cumulée de rayonnement UV d'origine solaire et artificielle, exprimée en DME

Type d'activité	DME
Exposition liée aux loisirs (excluant les vacances)	20-100
Vacances à l'extérieur, destination «soleil» (2 semaines)	30-60
Travailleurs dans les édifices à bureaux	40-160
Travailleurs en plein air	250
Exposition à des sources artificielles d'ultraviolet en milieu de travail :	
270 nm (30 J/m ²)*	36
365 nm (2,7 x 10 ⁵ J/m ²)*	324
Lit de bronzage (2,4 x 10 ⁵ J/m ² par séance de 20 min)	30-300

* Limite acceptable pour une exposition de 8 heures selon l'IRPA.

D'après IARC (1992); Rhains (1996); Diffey (1996).

Finalement, l'exposition de la population aux UV peut être documentée en fonction d'indicateurs d'exposition intermittente, notamment le temps passé au soleil, le nombre de coups de soleil subis pendant l'enfance et à l'âge adulte ainsi que la pratique du bronzage. À titre d'exemple, en 1996, 75 % des Québécois s'étaient exposés plus de 30 minutes par jour au soleil durant l'été alors que 48 % d'entre eux avait subi un coup de soleil (De Guire, 1998).

Rayons UV artificiels

De nombreuses sources artificielles de rayonnement UV sont également présentes dans l'environnement. Le bronzage à l'aide de lampes ou de lits de bronzage est une des principales sources artificielles d'exposition aux UV dans la population. En effet, selon les études, 10 % de la population fréquente les salons de bronzage. Cette prévalence peut atteindre 20 % dans les groupes d'âge de 18 à 34 ans (IARC, 1992; Rhainds et coll., 1999). Les principaux usages thérapeutiques des UV sont la photothérapie (néonatale, eczéma), le traitement du psoriasis au moyen d'une combinaison de psoralène et d'UVA (PUVA), le diagnostic de maladies cutanées par la lampe de Wood et la polymérisation des résines dentaires. L'exposition au rayonnement UV se produit également en milieu de travail, notamment au cours des procédés de soudage à l'arc, en photographie, dans les laboratoires de recherche et dans le secteur de l'imprimerie. Les rayons UV sont aussi utilisés pour la stérilisation et la désinfection. On en retrouve enfin dans les lasers, les fluorescents et les lampes tungstène-halogène (IARC, 1992).

Les sources artificielles de rayonnement UV émettent différentes longueurs d'onde (UVA, UVB et UVC) dont l'intensité dépasse parfois celle mesurée au zénith. Par exemple, dans le cas des appareils de bronzage, les niveaux d'éclairement énergétique varient entre 80 et 700 W/m pour les UVA et 0,2 à 6,8 W/m² pour les UVB (Miller et coll., 1998; McGinley et coll., 1998). Des exemples de doses moyennes annuelles cumulées en rayonnement UV artificiel reliées au travail et aux loisirs sont proposés au tableau 16.2.

2.3 Effets sur la santé

Les principaux effets sur la santé de l'exposition aux rayons UV peuvent être subdivisés en effets

cancérogènes et non cancérogènes. Nous verrons d'abord les effets cancérogènes.

Cancers cutanés

Le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) considère qu'il existe des preuves suffisantes issues des études en génétique moléculaire, expérimentales chez l'animal et épidémiologiques pour classer les radiations solaires dans le groupe des cancérogènes chez l'homme (IARC, 1992).

Données expérimentales

Les rayons UV causent des lésions du matériel génétique (ADN) des cellules de la peau. Deux choix s'offrent alors à la cellule : réparer les lésions ou provoquer la mort cellulaire (apoptose). Des erreurs d'appariements (mutations) dans la séquence de l'ADN peuvent se produire lors de la réparation des dommages, notamment sur les gènes qui normalement suppriment le développement d'une tumeur. Il s'ensuit une perte des mécanismes de contrôle de la multiplication cellulaire favorisant ainsi le développement du cancer de la peau (IARC, 1992; Scotto et coll., 1996).

Les études animales montrent par ailleurs que l'exposition chronique aux UV (UVA et UVB) est associée au développement des épithéliomas basocellulaires et spinocellulaires (IARC, 1992). Par contre, on n'a pas démontré jusqu'à présent de lien direct entre l'exposition aux UV et le mélanome. Seules des études réalisées chez le poisson (*platyfish xiphophorus*) indiquent que les UV, notamment les UVA, seraient associés au développement des mélanomes (IARC, 1992).

Données épidémiologiques

Épidémiologie descriptive

Depuis quelques décennies, l'incidence des cancers cutanés n'a cessé d'augmenter dans les populations blanches. À l'opposé, les populations noires ou asiatiques sont beaucoup moins touchées par ce problème (Scotto et coll., 1996; Armstrong et English, 1996). On distingue essentiellement trois principaux types histologiques de cancer de la peau, soit les mélanomes cutanés, les épithéliomas basocellulaires et les épithéliomas spinocellulaires. Parmi les cancers cutanés, les épithéliomas sont nettement plus fréquents que les mélanomes; ils représentent entre 90 et 95 % des cas. Parmi les

epithéliomas, le type histologique basocellulaire est rencontré plus souvent que le type spinocellulaire (Armstrong et Kricger, 1996).

L'Australie est le pays où l'incidence du mélanome cutané est la plus élevée. Le taux d'incidence pour 100 000 habitants dans ce pays qui était en 1965 de 16,4 est passé en 1977 à 32,7 puis en 1987, à 49,3. Dans les pays européens, de 1980 à 1990, l'incidence du mélanome aurait augmenté de 60 % (Katsambas et Nicolaidou, 1996). Au Canada, entre 1970 et 1996, le nombre de nouveaux cas de mélanomes s'est accru de 206 % chez les hommes et de 115 % chez les femmes. Pour les années 1996 à 2000, on a estimé que cette augmentation sera de 12 % chez les hommes et de 8 % chez les femmes (Miller, 1999).

L'incidence des épithéliomas est plus difficile à documenter, car ces cancers sont traités en cabinet privé et, par conséquent, sont rarement enregistrés dans les fichiers nationaux ou régionaux des tumeurs (IARC, 1992). Les taux les plus élevés d'épithéliomas sont rapportés en Australie, en Afrique du Sud et en Irlande

(Scotto et coll., 1996). En Australie, en 1985, le taux d'incidence (par 100 000 de population) pour les deux types d'épithéliomas confondus était de 2398 chez les hommes et de 1908 chez les femmes (Green et Battistutta, 1990). Aux États-Unis, de 1977 à 1980, l'incidence annuelle des épithéliomas pour 100 000 de population s'élevait à 198,5 pour les basocellulaires et à 42,7 pour les spinocellulaires (Scotto et coll., 1996).

Le taux de mortalité par mélanome est en général plus élevé que celui des épithéliomas. Depuis les années 1950, on observe une augmentation de la mortalité par mélanome en Australie. Cependant, les données plus récentes en provenance de Suède et des États-Unis laissent croire que cette tendance s'atténue (Armstrong et English, 1996). Le taux moyen de survie à 5 ans du mélanome est de 81 % (Koh, 1991). Le taux de survie à 5 ans des épithéliomas est de 100 % pour les basocellulaires et de 80 % pour les spinocellulaires (Koh et coll., 1995).

Tableau 16.3 Synthèse des éléments de preuve en faveur d'une association entre l'exposition aux rayons UV et les cancers cutanés

	Mélanome	Epithélioma basocellulaire	Epithélioma spinocellulaire
Taux plus élevé dans le pays d'accueil que dans le pays de naissance lorsque l'immigration a lieu dans l'enfance, vers un pays à plus fort ensoleillement	+	+	+
Régions anatomiques les plus fréquemment touchées	Tronc chez l'homme, jambes chez la femme	Tête et cou	Tête et cou
Relation exposition-réponse			
• Type d'exposition	Intermittente	Intermittente	Chronique
• Type de relation	Le risque relatif augmente abruptement avec l'exposition pour atteindre un plateau, puis il chute dans les catégories d'expositions les plus élevées	Le risque relatif s'accroît avec l'exposition puis atteint un plateau	Le risque relatif augmente de façon exponentielle avec le nombre d'heures d'exposition
Travail	Taux plus élevé chez les travailleurs à l'intérieur. Mélanomes plus fréquents sur les parties du corps couvertes chez les travailleurs à l'intérieur. Inverse chez les travailleurs à l'extérieur. Controversé (Elwood et Jopson, 1997)	Association faible (deux bonnes études négatives)	Augmentation du risque avec l'augmentation des heures d'exposition au travail et lors des 10 années les plus récentes

D'après Armstrong et Kricger (1996); English et coll. (1997); Elwood et Jopson (1997); English et coll. (1998); Rosso et coll. (1998).

Tableau 16.4 Principaux facteurs de risque associés aux cancers cutanés

	Mélanome	Epithélioma basocellulaire	Epithélioma spinocellulaire
Kératose solaire	+	+	+
Peau peu pigmentée	+	+	+
Difficulté à bronzer	+	+	+
Tendance à brûler	+	+	+
Élastose, lentigo et tégangiectasie solaires	+	+	+
Naevus	+	+	-
Xeroderma pigmentosum	+	+	+
Coups de soleil, surtout durant l'enfance	+	+	+

D'après Armstrong et English (1996); Armstrong et Kricker (1996); English et coll. (1997).

Parmi les hypothèses avancées pour expliquer l'augmentation des cancers cutanés dans la population, mentionnons l'accroissement du temps d'exposition au soleil, les changements dans la façon de se vêtir pendant cette exposition et l'amincissement de la couche d'ozone (Armstrong et English, 1996).

Lien avec l'exposition aux rayons UV

Dans les études épidémiologiques, l'association entre les cancers cutanés et l'exposition aux rayons UV est supportée par les éléments suivants : ils sont plus fréquents 1) parmi les populations blanches, 2) dans les régions où le niveau ambiant de rayonnement UV solaire est plus élevé (sauf en Europe), 3) chez les personnes qui sont plus sensibles au soleil (peau qui brûle facilement et qui ne bronze pas ou peu au soleil), 4) parmi celles qui s'exposent le plus au soleil et 5) chez les individus qui portent des lésions bénignes de la peau associées à l'exposition chronique au soleil (kératose solaire). Les tableaux 16.3 et 16.4 complètent cette information.

Dans le tableau 16.3, le terme «exposition intermittente» réfère habituellement à toute exposition intense aux ultraviolets acquise sur une courte période comme pendant les vacances et lors d'activités de loisirs à l'extérieur. Le coup de soleil est indicateur de sévérité d'une exposition intermittente. Le terme «exposition chronique», quant à lui, reflète l'ensemble des expositions aux ultraviolets cumulées durant la vie entière, incluant celles provenant d'activités professionnelles exécutées à l'extérieur.

Le lien entre les cancers cutanés et l'exposition aux rayons UV des lampes et des lits de bronzage demeure un sujet controversé. Les études épidémiologiques actuellement disponibles suggèrent une relation dose-effet possible avec le mélanome cutané, alors que les données sont insuffisantes pour se prononcer avec les épithéliomas (IARC, 1992; Swerdlow et Weinstein, 1998). D'autres recherches sont toutefois nécessaires pour confirmer une telle association.

Effets non cancérogènes

Les principaux effets non cancérogènes des rayons UV sur la santé sont résumés au tableau 16.5. Il s'agit d'atteintes cutanées, oculaires et immunitaires (WHO, 1994; Hodge et coll., 1995; English et coll., 1997; Rhainds et De Guire, 1998).

2.4 Normes d'exposition, gestion du risque et prévention

L'Association internationale de radioprotection a émis des recommandations concernant l'exposition aux rayons UV (IRPA, 1991). La norme ne s'applique pas aux sujets photosensibles ou exposés à des agents photosensibilisants, de même qu'aux personnes dépourvues de cristallin. Les limites acceptables sont définies pour une période d'exposition de 8 heures dans l'intervalle des longueurs d'onde de 180 à 400 nm. La norme vise à protéger les travailleurs contre une surexposition aux rayons UV sur la peau (érythème) et aux yeux (photokératoconjunctivite), en se basant sur la dose minimale pour induire un érythème.

Tableau 16.5 Principaux effets sur la santé de l'exposition aux rayons UV

	Peau	Œil	Système immunitaire
Effets aigus	Érythème Coups de soleil Bronzage Photosensibilisation Photoallergie Photodermatose	Photokératite Photoconjonctivite Kératopathie climatique en gouttelette Pinguécule Ptérygion	Immunosuppression
Effets chroniques	Éphélides Naevi Lentigos solaires Télangiectasies solaires Kératose solaire Sénescence cutanée	Cataracte : relation soupçonnée pour la région corticale	

Les recommandations de l'IRPA comportent plusieurs limites. Par exemple, il est démontré que la dose minimale de rayonnement UV pouvant causer des lésions à l'ADN est inférieure à celle qui cause l'érythème. De même, pour établir les niveaux acceptables, on ne tient pas compte des expositions autres que le travail, notamment celles liées aux comportements individuels (Rhainds, 1996). Les normes actuellement en vigueur ne protègent pas adéquatement les travailleurs et encore moins la population générale des effets à long terme de l'exposition aux UV (cancer cutané, sénescence cutanée).

Le cancer de la peau est une des rares formes de cancer avec laquelle on peut espérer obtenir des résultats en prévention primaire. Premièrement, l'exposition aux UV est un facteur de risque potentiellement modifiable. Deuxièmement, plus de 90 % de ces cancers sont causés par les UV (Koh et coll., 1995). Finalement, comme nous l'avons vu, la prévalence de l'exposition aux UV est élevée dans la population. Les stratégies utilisées en prévention primaire s'articulent habituellement autour de trois axes : la réduction du nombre total d'heures d'exposition aux UV incluant les périodes critiques d'ensoleillement (été, entre 10 et 15 h), la promotion de l'usage de moyens de protection (vêtements, écrans solaires, recherche d'ombre) et le découragement de la pratique du bronzage (Rhainds et De Guire, 1998).

Les programmes actuels en promotion de la santé s'appuient beaucoup sur l'éducation du public pour accroître les connaissances et modifier les comportements face aux UV. Les résultats obtenus à ce jour montrent que les cam-

pagnes de sensibilisation ont peu d'effet sur la durée de l'exposition aux UV, mais semblent par contre améliorer les comportements liés à la protection solaire tels que l'usage des crèmes solaires et le port de vêtements (Baum et Cohen, 1998). L'efficacité réelle des programmes d'éducation sur la réduction de l'incidence des cancers de la peau n'est cependant pas démontrée.

Les écrans solaires sont reconnus pour leur efficacité à protéger la peau de l'érythème (IARC, 1992). Cependant, l'usage des écrans solaires dans la population soulève de plus en plus la controverse quant à leur capacité de prévenir ou même de causer le cancer de la peau. Quelques études épidémiologiques semblent indiquer une association possible entre l'usage des écrans solaires et le mélanome (Lim et Cooper, 1999). La validité de ces résultats est actuellement contestée en raison des biais, notamment de confusion, retrouvés dans ces études (Armstrong et Kricke, 1996; Lim et Cooper, 1999). De leur côté, les études expérimentales réalisées chez des humains montrent que les dommages à l'ADN causés par les UV sont réduits par l'application sur la peau de crème solaire ayant un FPS (facteur de protection solaire) de 15 et plus (Freeman et coll., 1988; IARC, 1992; Van Praag et coll., 1993). De plus, on a rapporté, dans deux essais cliniques randomisés indépendants, une réduction du nombre de lésions précancéreuses de la peau (kératoses solaires) chez les personnes qui appliquaient régulièrement un écran solaire de FPS 15 et plus (Thompson et coll., 1993; Naylor et coll., 1995).

Afin d'accroître les chances de modifier les comportements, il est souhaitable que, dans le futur, les interventions des différentes autorités

concernées par la lutte contre le cancer (ministères, associations de santé publique, associations de médecins) soient intégrées dans un seul programme. Ceci permettra d'uniformiser les messages de prévention auprès de la population et d'articuler, dès la naissance, la promotion de saines habitudes face au soleil dans un continuum d'activités répétées aux différentes étapes de vie de l'enfant (préscolaire, scolaire, camp de vacances). Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour cibler les jeunes enfants. En effet, la majeure partie de l'exposition aux UV (de 50 à 80 %) est reçue au cours des 18 premières années de vie (Koh et coll., 1995). De plus, dans une étude britannique, on rapporte qu'au-delà de 40 % des enfants avaient attrapé leur premier coup de soleil avant l'âge d'un an (Jarret et coll., 1993). Les coups de soleil subis durant l'enfance et l'adolescence représentent un des principaux facteurs de risque de cancer cutané (Koh et coll., 1995; Armstrong et Krickler, 1996). D'autres groupes doivent aussi être ciblés, notamment les travailleurs oeuvrant à l'extérieur, les vacanciers qui voyagent vers des pays à fort ensoleillement, les usagers des salons de bronzage, les sportifs et, finalement, la population en général.

2.5 Conclusion

En raison de la prévalence élevée de l'exposition au rayonnement UV, de son caractère modifiable et de la diversité des effets sur la santé pouvant résulter de cette exposition, nous croyons important d'encourager les interventions auprès de diverses populations cibles. Quelques questions de recherche mériteraient aussi d'être approfondies dans ce domaine dont l'amélioration des connaissances sur la prévalence de l'exposition aux UV dans la population; la relation entre l'exposition aux rayons UV solaires et le cancer, notamment au niveau du lien avec le type et le degré d'exposition (English et coll., 1997); l'exposition aux sources artificielles de rayons UV et leurs effets sur la santé incluant le contrôle du risque attribuable à l'exposition solaire et finalement les méthodes d'enregistrement et de surveillance des cancers cutanés dans la population.

3. AUTRES TYPES DE RAYONNEMENTS NON IONISANTS*

3.1 Introduction

Les champs électromagnétiques dans la gamme des rayonnements non ionisants sont partout présents dans notre environnement. Ils sont soit d'origine naturelle, comme le champ magnétique terrestre, soit artificielle, comme les champs créés par les appareils électriques. À l'exception du champ magnétique terrestre, qui est statique, leur polarité change du positif au négatif à une fréquence prédéterminée. Plus la fréquence de l'onde électromagnétique est élevée, plus l'énergie véhiculée est importante. Pour les rayonnements non ionisants de haute fréquence, comme les micro-ondes, l'énergie est absorbée par les tissus biologiques et peut produire de la chaleur. À l'inverse, les champs électromagnétiques d'extrêmement basses fréquences (EBF) ne permettent qu'un transfert minimum d'énergie aux objets conducteurs comme le corps humain (Levallois et coll., 1991). Nous traitons ici des rayonnements non ionisants à l'exception des rayonnements ultraviolets qui ont déjà été décrits dans la section précédente.

3.2 Définitions

Le spectre de fréquence des radiations non ionisantes avec les sources correspondantes est présenté au tableau 16.6. Pour les fréquences entre 300 MHz et 300 GHz (plage des micro-ondes), le niveau d'exposition aux radiations électromagnétiques est exprimé en densité de puissance, c'est-à-dire en watts par mètre carré (W/m^2). Pour les plus grandes longueurs d'onde et particulièrement pour les EBF (< 300 Hz), on distingue le champ électrique, mesuré en volt par mètre (V/m) et le champ magnétique, mesuré en ampère par mètre (A/m), en tesla (T) ou gauss (G)** (WHO, 1993).

Les champs électriques et magnétiques émis par les lignes de transport et de distribution de l'électricité font partie de la bande des EBF (tableau 16.6), et ont été particulièrement étudiés au cours des 20 dernières années. Leur fréquence est de 50 Hz en Europe et de 60 Hz en Amérique du Nord. Le champ électrique est

* Texte rédigé par Pascal Guénel et Denis Gauvin

** 1 G = 10 000 T, 1 A/m = $4 \cdot 10^{-7}$ T dans un milieu non magnétique

fonction du voltage des lignes, tandis que le champ magnétique est produit par la circulation du courant électrique. Ainsi, une lampe branchée sur la prise de courant, mais éteinte, produit un champ électrique. Le champ magnétique quant à lui n'apparaît que lorsque la lampe est allumée. Une des particularités du champ magnétique est de passer librement à travers la plupart des structures, contrairement au champ électrique qui peut être considérablement réduit par les objets conducteurs (arbres, édifices, corps-humain). Pour le champ magnétique, il existe donc une relation directe entre la proximité des lignes électriques et l'exposition à l'intérieur

d'une habitation. C'est ce dernier qui a plus particulièrement fait l'objet de la plupart des études épidémiologiques, et dont il sera surtout question ici. Les radiofréquences, les infrarouges et la lumière visible seront traités plus brièvement.

3.3 Sources d'émission et niveaux d'exposition

Champs EBF

Milieu résidentiel

L'exposition aux champs de 50/60 Hz en milieu résidentiel dépend de la proximité et du type de

Tableau 16.6 Rayonnements électromagnétiques non ionisants et leurs sources

Fréquence	Longueur d'onde	Description	Bande (terme anglais)	Sources
0 Hz	∞	Statique		Champ magnétique terrestre, ligne de transport électrique en courant direct
30 Hz	10 000 km	Sub-extrêmes basses fréquences	SEBF	
		Extrêmement basses fréquences	EBF (ELF)	Lignes et appareils électriques
300 Hz	1 000 km	Fréquences vocales	FV	Chauffage par induction
3 kHz	100 km	Très basses fréquences	TBF (VLF)	TV, terminaux à écran de visualisation
30 kHz	10 km			
		Basses fréquences	BF (LB)	Radio AM
300 kHz	1 km	Moyennes fréquences	MF	Chauffage par induction
3 MHz	100 m	Hautes fréquences	HF	Scellement par chauffage aux RF
30 MHz	10 m			
		Très hautes fréquences	THF (VHF)	Radio FM
300 MHz	1 m	Ultra-hautes fréquences	UHF	Téléphones cellulaires, télédiffusion, fours à micro-ondes
3 GHz	10 cm			
		Super-hautes fréquences	SHF	Radar, liaisons satellites, micro-ondes, communications
30 GHz	1 cm	Extrêmement hautes fréquences	EHF	Communications
300 GHz	1 mm			
385 THz	780 nm	Infrarouge	IR	Soleil, lumière incandescente
750 THz	400 nm	Radiation visible	RV	Lumière
3000 THz	100 nm	Ultraviolet*	UV	Soleil, lampe incandescente, laser

Note: 1000 Hz = 1 kHz ; 1000 kHz = 1 MHz ; 1000 MHz = 1 GHz ; 1000 GHz = 1 THz

Adapté de Levallois (1997).

* Les rayonnements UV ont été traités à la section 2.0

HYPER-FRÉQUENCES
RADIO-FRÉQUENCES

lignes électriques autour du lieu d'habitation, mais aussi de l'utilisation d'appareils électriques, de la localisation de l'entrée électrique ou de la mise à la terre ainsi que du câblage interne des résidences (Deadman, 1997). D'une façon générale, l'exposition de la population aux champs magnétiques en milieu résidentiel se situe en moyenne autour de 0,1 μT (Kaune, 1993). Les mesures pratiquées au Canada chez des enfants à l'aide d'un dosimètre pendant 48 heures ont montré que l'exposition moyenne au champ magnétique était de 0,121 μT (Deadman, 1997). Les expositions trouvées en Europe sont généralement plus faibles : ainsi, une limite supérieure à 0,1 μT est souvent utilisée dans les études épidémiologiques pour décrire l'exposition de la population de référence, une exposition à des niveaux supérieurs concernant souvent moins de 10 % des sujets (UKCCS, 1999).

Le tableau 16.7 indique les expositions liées à la présence de lignes haute-tension. Les champs provenant d'appareils électriques domestiques sont parfois élevés, mais à l'inverse des lignes électriques qui peuvent entraîner des expositions permanentes, ils sont le plus souvent utilisés de façon intermittente, sur de courtes périodes, et l'exposition qu'ils entraînent diminue très rapidement avec la distance. Ils n'interviennent donc que pour une faible partie de l'exposition globale des personnes. Il existe toutefois des exceptions, comme la couverture chauffante électrique, utilisée près du corps toute la nuit, et dont le champ magnétique peut atteindre 25 μT . Le tableau 16.7 donne des exemples d'exposition au champ magnétique de certains appareils électriques usuels.

Milieu de travail

Les expositions aux EBF en milieu de travail sont variées, parfois très élevées. Par exemple, l'utilisation de fours électriques à résistance à arc pour la fabrication de l'acier peut engendrer des champs magnétiques de près de 200 μT . On peut également retrouver des expositions importantes au champ magnétique chez les travailleurs des compagnies d'électricité dans les postes de répartition ou chez les monteurs de lignes électriques. Par ailleurs, les soudeurs à l'arc subissent généralement de fortes expositions, entre 1,5 et 2 μT .

Évaluation des expositions dans les populations

L'estimation des expositions individuelles sur

une longue période est difficile, car les sources de champs EBF sont très nombreuses, et il existe une très grande variabilité des expositions d'un instant à l'autre ou d'un lieu à l'autre. Ce problème est d'autant plus important pour les études épidémiologiques que les expositions ne peuvent être mesurées en continu, mais qu'elles doivent être évaluées de façon rétrospective. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour apprécier les expositions aux champs magnétiques à domicile ou sur le lieu de travail, notamment dans les études sur le risque de cancer. L'évaluation des expositions aux champs électriques étant beaucoup plus complexe, ces derniers ont été étudiés plus rarement. Pour les expositions résidentielles aux champs magnétiques de 50 à 60 Hz, une typologie des techniques d'évaluation des expositions est proposée au tableau 16.8. Pour les études en milieu de travail, des expositions moyennes par type d'emploi ont été déterminées (donnant lieu à des matrices emplois-expositions), mais on observe en général une grande variabilité des expositions au sein d'un emploi donné. Tous ces problèmes compliquent singulièrement l'interprétation des résultats épidémiologiques.

Autres rayonnements non ionisants

Pour les autres rayonnements non ionisants, des exemples de sources d'exposition sont indiqués dans le tableau 16.6. Les fours à micro-ondes, les systèmes d'alarme, les terminaux à écran de visualisation ou les téléphones cellulaires constituent les sources d'exposition les plus importantes pour la population générale.

Le chauffage par perte diélectrique, les tours et les antennes de télécommunication, les installations radars, sont des sources qui peuvent entraîner des expositions substantielles des personnes travaillant à proximité de ces installations. L'évaluation des expositions des populations pose le même type de problèmes que pour les champs EBF du fait de la grande variabilité des expositions et de la multiplicité des sources.

3.4 Effets sur la santé

Champs EBF

Données expérimentales

Les champs EBF provoquent des courants induits à l'intérieur des organismes qui y sont exposés, mais ces courants ne sont ressentis qu'à

Tableau 16.7 Intensité du champ magnétique EBF mesuré près de certains appareils ou infrastructures électriques

Source	Intensité du champ magnétique (μT)			
	à 15 cm		à 30 cm	
Appareils électriques				
Séchoir à cheveux	30,0		0,1	
Aspirateur	30,0		6,0	
Four à micro-ondes	20,0		0,4	
Perceuse électrique	15,0		3,0	
Photocopieur	9,0		2,0	
Tube fluorescent	4,0		0,6	
Lave-vaisselle	3,0		0,6	
Grille-pain	1,0		0,3	
Fer à repasser	0,8		0,1	
Écran d'ordinateur	à 30 cm		à 50 cm	
Face à l'écran	0,3		0,1	
Sur les côtés de l'écran	0,7		0,2	
Ligne à haute tension	Sous la ligne	à 20 m	à 40 m	à 60 m
120 kV	6,0	0,7	0,2	0,1
735 kV	15,0	9,5	2,7	1,5

des niveaux d'exposition élevés. On ne peut établir aucun lien de cause à effet entre les effets biologiques observés dans les études de laboratoire et l'apparition de maladies à plus ou moins long terme chez l'homme. On en est donc réduit à faire des hypothèses sur leurs mécanismes d'action possibles à partir de données expérimentales, qui ne concordent d'ailleurs pas toujours entre elles (IARC, 2002). Concernant l'effet cancérogène éventuel, les radiations non ionisantes ne peuvent agir en tant qu'initiateur du processus de carcinogenèse, car elles ne possèdent pas une énergie suffisante pour altérer l'ADN cellulaire de façon permanente, mais elles pourraient jouer un rôle sur la promotion ou la progression des cellules cancéreuses déjà formées. Les hypothèses élaborées jusqu'à présent pour rendre compte d'un tel effet (hypothèse faisant intervenir la mélatonine par exemple [Stevens, 1987]) sont basées sur des résultats expérimentaux pas toujours reproductibles dans des expérimentations indépendantes. À l'heure actuelle, ce sont donc essentiellement les résultats de nature épidémiologique qui permettent de juger de l'existence ou non d'effets sur la santé liés aux expositions à des champs EBF.

Résultats épidémiologiques

Effets non cancérogènes

Symptômes mal définis et hypersensibilité à l'électricité

L'apparition de symptômes mal définis tels que des céphalées, une irritabilité, des insomnies, des troubles de la mémoire, a parfois été attribuée à des expositions aux champs électriques et magnétiques chez des travailleurs de postes de transformation. Plus récemment, on a distingué un ensemble particulier de symptômes survenant en présence de divers types d'équipements électriques (écrans d'ordinateur, lumière fluorescente, appareils ménagers, télévision) connu sous le terme d'«hypersensibilité à l'électricité», il s'agit de maux de tête, de fatigue visuelle et générale, de démangeaisons, de sensations de brûlure ou d'érythèmes du visage. Des études épidémiologiques effectuées en Suède chez les travailleurs de bureau travaillant sur écran ont mis en évidence des liens avec les champs électriques mesurés sur le lieu de travail ou les champs magnétiques produits par les écrans d'ordinateur (Stenberg et coll.,

Tableau 16.8 Méthodes d'évaluation des expositions aux champs EBF en épidémiologie

Méthode	Sources des expositions prises en compte	Paramètres utilisés pour estimer l'exposition	Commentaires
Mesures ponctuelles à domicile	Toutes sources de courant électrique		Lourdes à mettre en œuvre - évaluation des expositions sur le court terme
Distance	Lignes électriques extérieures, postes de transformation, etc.	Distance entre l'habitation et les équipements électriques	Méthode non validée, très imprécise
Code de câblage (<i>wire code</i>)	Toutes lignes électriques extérieures HT et BT	Distance Type de ligne	Permet de déterminer 4 à 5 classes d'exposition croissante, mais chevauchement important entre classes - pas de participation requise du sujet
Calcul du champ magnétique	Lignes électriques haute - tension à proximité	Distance Type de ligne Charge en courant électrique dans la ligne	Modélisation du champ magnétique : ne tient compte que des lignes HT comme source d'exposition
Dosimètre individuel	Toutes les sources		Participation du sujet nécessaire Évaluation sur le court et moyen terme

HT: Haute tension; BT: Basse tension

1995; Eriksson et coll., 1997; Sandstrom et coll., 1997), mais soulignent aussi l'importance du mauvais environnement psychosocial dans l'apparition de ces symptômes. Par ailleurs, une revue récente de la littérature montre que la relation entre l'hypersensibilité et l'exposition aux champs électriques et magnétiques n'est pas consistante. Ceci en raison du fait que les études sont rares et souffrent de problèmes méthodologiques: attention particulière sur les problèmes dermatologiques, portrait clinique mal défini, définition imprécise des cas (Levallois, 2002)

Suicide et dépression

Des études ont suggéré que l'exposition aux champs EBF à domicile ou au travail pourrait être à l'origine d'une augmentation du taux de suicide (Perry et coll., 1981; Baris et coll., 1996) ou de troubles dépressifs (Poole et coll., 1993; Savitz et coll., 1994). Toutes les études ne sont pas concordantes, et leur interprétation est difficile du fait de biais de sélection ou de facteurs de confusion possibles. Rien ne permet donc d'affirmer l'existence d'un tel lien.

Maladies dégénératives du système nerveux

L'existence d'un risque accru de maladie d'Alzheimer en rapport avec des expositions professionnelles aux CEM a été mise en évi-

dence dans quelques études (Feychting et coll., 1998; Savitz et coll., 1998). Des résultats allant dans le même sens ont également été observés pour la sclérose latérale amyotrophique (Davanipour et coll., 1997; Savitz et coll., 1998). Le petit nombre d'études et les limites des méthodes d'évaluation des expositions ne permettent pas de conclure à l'existence réelle d'une association, mais ces résultats justifient des recherches plus approfondies.

Effets sur la reproduction

De nombreuses études ont porté sur les risques liés au travail sur écran au cours de la grossesse, entraînant essentiellement une exposition aux champs de très basse fréquence (15 kHz). Globalement, ces études ne montrent pas d'augmentation du risque d'avortement spontané, de malformation congénitale, d'anomalie chromosomique ou de petit poids à la naissance (Shaw et Croen, 1993; Delpizzo, 1994). Les études portant sur les expositions aux champs EBF au cours de la grossesse liées aux lignes électriques autour des habitations (Savitz et Ananth, 1994; Bracken et coll., 1995; Bélanger et coll., 1998), à l'utilisation de couvertures chauffantes ou de matelas d'eau chauffants (Li et coll., 1995; Bélanger et coll., 1998) ou à des appareils de résonance magnétique nucléaire (Evans et coll., 1993) ne permettent pas non plus

de conclure à l'existence d'un risque pour le système reproducteur.

Effets cancérogènes

Études chez l'enfant

Les cancers de l'enfant, notamment les leucémies et les tumeurs cérébrales, en rapport avec l'exposition résidentielle aux champs magnétiques, ont fait l'objet depuis plus de 20 ans d'un grand nombre d'études et de rapports d'experts. Le tableau 16.9 présente les principales études réalisées. La première d'entre elles, publiée en 1979, indiquait que le risque était multiplié par 3 pour les leucémies et par 2,4 pour les tumeurs cérébrales chez les enfants les plus

exposés, l'exposition étant déterminée en fonction du code de câblage (voir tableau 16.8) utilisé ici pour la première fois (Wertheimer et Leeper, 1979). Par la suite, les résultats d'autres études utilisant les méthodes indirectes pour évaluer les expositions (distance, code, modélisation) ont parfois montré des augmentations du risque relatif, mais pas toujours significatives, pour les leucémies ou les tumeurs cérébrales. Toutefois, la faiblesse des effectifs, couplée à une petite proportion d'enfants soumis à de fortes expositions aux champs magnétiques ($> 0,4 \mu\text{T}$), notamment en Europe, pouvaient entraîner un manque de puissance statistique pour détecter des augmentations du risque de cancer.

Tableau 16.9 Principales études sur l'exposition aux CEM et les cancers de l'enfant

Auteur	Lieu	Type d'étude	Évaluation de l'exposition	Leucémies			Tumeurs du cerveau		
				N cas	N cas exposé	RR (IC 95 %)	N cas	N cas exposé	RR (IC 95 %)
Wertheimer et Leeper, 1979	Denver, Colorado	Cas-témoins	Code ¹	155	63	3,0 (1,8-5,0)	66	30	2,4 (1,2-5,0)
Savitz et coll., 1988	Denver, Colorado	Cas-témoins	Code Mes. ² $> 0,2 \mu\text{T}$	97 36	27 5	1,5 (0,9-2,6) 1,9 (0,7-5,6)	59 25	20 2	2,0 (1,1-3,7) 1,0 (0,2-4,8)
London et coll., 1991	Los Angeles	Cas-témoins	Code Mes. $> 0,27 \mu\text{T}$	219 164	42 20	2,2 (1,1-4,3) 1,5 (0,7-3,3)			
Feychting et Ahlbom, 1993	Suède	Cas-témoins dans cohorte	Dist. $< 50 \text{ m}$ Calc. ³ $> 0,3 \mu\text{T}$	38 49	6 7	2,9 (1,0-7,3) 3,8 (1,4-9,3)	33 37	1 2	0,5 (0,0-2,8) 1,0 (0,2-3,9)
Olsen et coll., 1993	Danemark	Cas-témoins	Calc. $> 0,25 \mu\text{T}$ Calc. $> 0,4 \mu\text{T}$	833 833	3 3	1,5 (0,3-6,7) 6,0 (0,8-44)	629 629	2 2	1,0 (0,2-5,0) 6,0 (0,7-44)
Verkasalo et coll., 1993	Finlande	Cohorte	Calc. $> 0,2 \mu\text{T}$ Calc. $> 0,4 \mu\text{T}$ - année	35 35	3 3	1,6 (0,3-4,5) 1,2 (0,3-3,6)	39 39	5 7	2,3 (0,7-5,4) 2,3 (0,9-4,8)
Preston-Martin et coll., 1996	Los Angeles	Cas-témoins	Code Mes. $> 0,3 \mu\text{T}$				281 106	31 12	1,2 (0,6-2,2) 1,7 (0,6-5,0)
Linnet et coll., 1997	10 États US	Cas-témoins	Code Mes. $> 0,2 \mu\text{T}$	402 463	51 58	1,0 (0,6-1,7) 1,5 (0,9-2,6)			
Li et coll., 1998	Taiwan	Cohorte	Dist. $< 100 \text{ m}$	28	7	2,4 (1,0-5,0)			
Michaelis et coll., 1997	Allemagne	Cas-témoins	Mes. $> 0,2 \mu\text{T}$	129	4	3,2 (0,7-14,9)			
McBride et coll., 1999	Canada	Cas-témoins	Code Mes. $> 0,2 \mu\text{T}$	351 293	39 54	1,2 (0,6-2,3) 1,1 (0,7-1,8)			
UKCCS, 1999	Royaume-Uni	Cas-témoins	Mes. ⁴ $> 0,2 \mu\text{T}$	1073	21	0,9 (0,5-1,6)	387	3	0,5 (0,1-1,9)

1 Code = code de câblage ou « wire code »

2 Mes. = mesure du champ magnétique à l'intérieur de l'habitation

3 Calc. = calcul de champ magnétique dans l'habitation, basé sur la distance, le type de ligne et la charge électrique moyenne dans la ligne.

4 Mesures moyennes au domicile et ajustées sur les données historiques sur la charge en courant électrique des lignes électriques. Les nombres indiqués correspondent au nombre de cas avec mesures et diffèrent du nombre total de cas.

RR = Risque relatif; IC95 % = Interval des confiances à 95 %

Plus récemment, les études réalisées incluent un nombre important de sujets. Certaines comportent des mesures d'exposition dans les lieux d'habitation ainsi qu'à l'école (UKCSS, 1999), ou des mesures effectuées sur plusieurs jours à l'aide de dosimètres individuels portés par les enfants (McBride et coll., 1999). Ces études ne montrent aucune augmentation du risque de leucémie chez les sujets exposés en moyenne à plus de 0,2 μ T. La plus grosse étude réalisée a été effectuée au Royaume-Uni et porte sur plus de 2200 cas de cancer chez l'enfant (UKCSS, 1999). Malgré le grand nombre de cas, elle ne comporte aussi que très peu de sujets exposés à des niveaux importants de champs magnétiques ($> 0,4 \mu$ T).

Plus récemment, une analyse groupée (Ahlbom et coll., 2000) a été réalisée sur les données des neuf principales études cas-témoins de la leucémie chez l'enfant en rapport avec le champ magnétique, toutes basées sur la modélisation de l'exposition au champ magnétique, ou sur des mesures de champ magnétique durant au moins 24 heures. L'intérêt de cette analyse groupée est de disposer d'un plus grand nombre de sujets ayant des niveaux d'exposition élevés, et donc d'avoir une puissance statistique satisfaisante pour étudier le risque correspondant. Les résultats montrent une multiplication par 2 du risque de leucémie de l'enfant pour ceux qui sont exposés à des niveaux supérieurs à 0,4 μ T. Cette augmentation, significative, concerne moins de 1 % de la population exposée à de tels niveaux. En revanche, aucune augmentation du risque de leucémie de l'enfant n'est observée pour des niveaux d'exposition inférieurs. Les résultats d'une seconde analyse groupée sont parfaitement concordants (Greenland et coll., 2000).

Il faut également envisager la possibilité que d'autres facteurs de risque des leucémies de l'enfant corrélés aux mesures de champ magnétique, ou que des biais de sélection, aient pu jouer un rôle dans les associations observées dans les études épidémiologiques. Si ce rôle était avéré, il pourrait innocenter les champs magnétiques. On a ainsi évoqué la vétusté des maisons, l'importance du trafic automobile autour du lieu d'habitation ou le bas niveau social des parents. Les recherches futures devront donc déterminer, parmi les facteurs associés à l'exposition aux champs magnétiques de 50-60 Hz, celui ou ceux qui peuvent être tenus responsables.

Études chez l'adulte

Les études portant sur les cancers de l'adulte en relation avec l'exposition résidentielle ont été en générale négatives. En ce qui concerne les expositions professionnelles, les cancers les plus souvent étudiés sont aussi les leucémies et les tumeurs cérébrales. Les études les plus complètes sur ce sujet ont porté sur des cohortes de travailleurs de compagnies d'électricité (Sahl et coll., 1993; Thériault et coll., 1994; Savitz et Loomis, 1995; Johansen et Olson, 1998) ou en population générale (Floderus et coll., 1993), et ont comporté des mesures d'exposition aux champs magnétiques ou aux champs électriques selon la catégorie professionnelle. Certaines de ces études montrent, chez les sujets les plus fortement exposés, des risques élevés pour certains types de leucémies (Floderus et coll., 1993; Thériault et coll., 1994) ou pour les tumeurs cérébrales (Savitz et Loomis, 1995), après prise en compte d'autres expositions professionnelles potentiellement cancérigènes. Globalement, les résultats ne sont pas totalement concordants et ne permettent pas de formuler une conclusion définitive.

Notons enfin que le cancer du sein a fréquemment été étudié en rapport avec l'exposition aux champs EBF, avec des risques élevés parfois observés pour le cancer du sein chez l'homme (Tynes et Andersen, 1990; Demers et coll., 1991; Matanoski et coll., 1991) ou chez la femme (Loomis et coll., 1994). On ne dispose pas d'éléments suffisants pour conclure à l'existence d'un risque accru pour ces cancers.

Conclusion sur les champs EBF

Les éléments décrits ci-dessus, et notamment les analyses groupées portant sur la leucémie de l'enfant, ont récemment amené le CIRC à considérer qu'il existait une évidence limitée d'un risque accru de leucémie de l'enfant lié à l'exposition aux champs magnétiques EBF, et à classer cette exposition dans la catégorie 2B des cancérigènes possibles (IARC, 2002). Les données disponibles portant sur les autres types de cancer de l'enfant ou de l'adulte, en rapport avec les champs magnétiques et électriques EBF, ont été jugées inadéquates.

Fréquences radio et micro-ondes

Les risques thermiques liés aux niveaux d'exposition élevés aux fréquences radio et micro-ondes sont actuellement bien compris, et peu-

vent être observés dans certaines applications militaires ou industrielles, par exemple chez les travailleurs chargés de la maintenance d'antennes de transmission radio (Schilling, 1997). Ces risques sont liés à des expositions aiguës dont les effets n'apparaissent qu'au-dessus de certains seuils.

Pour les niveaux d'exposition plus faibles se pose la question des effets non thermiques, moins bien compris. Chez l'homme, des rapports font état de maux de tête, de malaises, de troubles du sommeil. Des avortements spontanés, des modifications hématologiques ou chromosomiques ont aussi été rapportées dans certaines populations exposées aux radiofréquences (Repacholi, 1998). De nombreuses études font également mention d'opacités cornéennes et de cataractes chez des travailleurs ou des militaires exposés.

Les expositions aux fréquences radio à de faibles niveaux connaissent un regain d'intérêt du fait du développement rapide des téléphones mobiles. Une partie de l'énergie des ondes radio émises par les téléphones mobiles est absorbée par la tête de l'utilisateur, principalement par les tissus superficiels. La principale inquiétude porte sur la possibilité d'effets cancérogènes. Comme les champs EBF, les fréquences radio ne sont pas mutagènes et ne peuvent pas agir comme initiateur dans le processus de cancérogenèse, mais on ne dispose pas non plus d'arguments expérimentaux en faveur d'un rôle au niveau de la promotion ou de la progression du cancer. Pour l'instant, il n'existe en tout cas aucun élément qui permettrait de conclure que l'exposition aux radiofréquences provenant des téléphones mobiles entraîne un risque accru de cancer.

Sur le plan épidémiologique, quelques études portant sur des militaires ou des travailleurs exposés indiquent un risque en excès pour les tumeurs cérébrales (Grayson, 1996) ou pour les lymphomes et les leucémies (Szmigielsky, 1996). D'autres études de type écologique ont mis en évidence un excès de cas de leucémies chez l'adulte ou l'enfant dans des zones à proximité d'émetteurs radio et télé (Hocking et coll., 1996; Dolk et coll., 1997), mais ce résultat n'est pas confirmé dans toutes les populations (Dolk et coll., 1997). Ces études souffrent de défauts méthodologiques, d'une évaluation très sommaire ou inappropriée des expositions, et ne prennent pas en compte les facteurs de confu-

sion possibles. Des programmes de recherche sont en cours pour tenter de mieux cerner les effets des fréquences radio sur la santé.

Rayonnement infrarouge et lumière visible

Les radiations dans ces bandes de fréquence ont souvent été incriminées comme étant à l'origine d'effets oculaires. Les infrarouges, absorbés par le cristallin sous forme de chaleur, pourraient à terme être à l'origine de cataractes chez les sujets exposés professionnellement comme les travailleurs du verre ou les soudeurs (Okuno, 1994). L'exposition chronique à la lumière visible dans les longueurs d'onde les plus courtes (lumière bleue) semble être un facteur prédisposant de la dégénérescence de la rétine (Taylor et coll., 1992).

3.5 Recommandations d'exposition

Plusieurs organismes à travers le monde ont fait des recommandations d'exposition aux champs électriques et magnétiques. Seuls les effets avérés sur l'organisme sont pris en compte pour l'établissement de ces recommandations.

Pour la gamme des fréquences comprises entre 1 Hz et 10 MHz, l'ensemble des recommandations d'exposition est basée sur l'absence de risque significatif pour un courant induit dans l'organisme inférieur à 10 mA/m^2 , niveau à partir duquel sont observés des effets tels que des phosphènes ou une altération de l'excitabilité des neurones. Le courant maximal induit recommandé pour les effets aigus est donc de 10 mA/m^2 auquel on applique un facteur de sécurité, variable selon l'institution à l'origine de la recommandation.

Dans la gamme des radiofréquences, les limites d'exposition sont basées sur la prise en compte des effets thermiques. C'est le débit d'absorption spécifique (DAS) qui est utilisé comme mesure de la dose d'énergie thermique transmise au corps. L'unité de mesure utilisée est le watt par kilogramme (W/kg). Les principaux organismes ont estimé que le plus bas niveau pouvant produire un effet chez l'humain ou l'animal était de 4 W/kg. Les recommandations d'exposition maximale ont été établies en considérant un transfert d'énergie équivalent à un DAS du corps entier de 0,4 W/kg. Les recommandations de la Commission internationale sur la protection des radiations non ionisantes

(ICNIRP) sont présentées aux tableaux 16.10 et 16.11. Les recommandations peuvent varier d'un organisme à l'autre. De plus, pour les porteurs de stimulateur cardiaque, des recommandations plus strictes peuvent être proposées (ACGIH, 1996).

L'ICNIRP précise que ces recommandations doivent être considérées comme des niveaux de référence où les effets néfastes indirects peuvent être exclus, et elles sont proposées comme des limites à ne pas dépasser. Dans la gamme des 50-60 Hz, l'application des nouvelles limites proposées pour la prévention des effets aigus posent certains problèmes. En effet, ces limites seraient fréquemment dépassées sous les emprises des lignes de transport, et chez les travailleurs responsables de l'entretien des lignes (Levallois et coll., 2000). Ces recommandations sont actuellement contestées par une partie de la communauté scientifique. En ce qui concerne l'exposition chronique à de faibles intensités de champ magnétique provenant des lignes de transport d'électricité, aucun organisme national ou international n'a jusqu'à présent adopté de recommandation.

3.6 Gestion du risque

Les risques liés à l'exposition aiguë à de fortes intensités de CEM sont bien connus. À ces niveaux, les mécanismes d'action ont bien été reconnus, et les recommandations proposées

assurent la protection de la population ou des travailleurs contre de tels effets. Néanmoins, de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'évaluation globale des risques sur la santé associés à l'exposition chronique aux CEM. Par exemple, diverses composantes des CEM telles que l'exposition à des fréquences multiples, l'intermittence des expositions et la variation de l'intensité des champs sont autant de paramètres qui ne sont pas pris en compte lors de l'établissement des critères d'exposition. Comme le mécanisme biologique associant l'exposition à faible dose aux effets observés n'est pas connu, l'importance des diverses composantes des champs quant à leur interaction possible avec l'humain demeure incertaine.

Face à ces incertitudes, plusieurs options de politique de gestion du risque peuvent être proposées dont celle de l'évitement prudent. Cette dernière approche, développée par Morgan (Nair et coll., 1989; Morgan, 1994), préconise la réduction de l'exposition de la population aux CEM par des mesures de mitigation simples et applicables à moindre coût. Toutefois, aucune précision n'est apportée quant au degré de prudence à adopter pour la gestion de ces expositions. Les impacts économiques et sociaux doivent nécessairement être préalablement évalués avant l'application de toute mesure.

Tableau 16.10 Recommandations d'exposition aux champs électromagnétiques proposées par l'ICNIRP en milieu de travail

Fréquences (f)	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (μ T)	Densité de puissance équivalente (W/m^2)
0 - 1 Hz	-	$2,0 \cdot 10^5$	-
1 - 8 Hz	20 000	$2,0 \cdot 10^5 / f^2$	-
8 - 25 Hz	20 000	$2,5 \cdot 10^4 / f$	-
0,025 - 0,82 kHz	500/f	25/f	-
0,82 - 65 kHz	610	30,7	-
0,065 - 1 MHz	610	2,0/f	-
1 - 10 MHz	610/f	2,0/f	-
10 - 400 MHz	61	0,2	10
400 - 2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,01 f^{1/2}$	$f/40$
2 - 300 GHz	137	0,45	50

Source: ICNIRP (1998)

Tableau 16.11 Recommandations d'exposition aux champs électromagnétiques proposées par l'ICNIRP pour la population générale

Fréquences (f)	Champ électrique (V/m)	Champ magnétique (μT)	Densité de puissance équivalente (W/m^2)
0 - 1 Hz	—	$4 \cdot 10^4$	-
1 - 8 Hz	10 000	$4 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 - 25 Hz	10 000	$5 000 / f$	-
0,025 - 0,8 kHz	$250 / f$	$5 / f$	-
0,8 - 3 kHz	$250 / f$	6,25	-
3 - 150 kHz	87	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,92 / f$	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	$0,92 / f$	-
10-400 MHz	28	0,092	2
400 - 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2 - 300 GHz	61	0,20	10

Source : ICNIRP (1998)

3.7 Conclusion

Les seuls effets avérés des champs électromagnétiques sur la santé sont liés à des expositions très élevées, qui sont peu fréquentes. À l'inverse, les niveaux d'exposition habituels des champs électromagnétiques rencontrés dans la population sont associés à des effets sur la santé incertains ou mal documentés. La prévalence très élevée des expositions à certains types de radiations, notamment les champs EBF et les radiofréquences, est cependant susceptible *a priori* d'avoir un impact important pour la santé publique.

Les champs EBF ont fait l'objet, jusqu'à présent, du plus grand nombre d'études épidémiologiques. Une analyse groupée récente de plusieurs de ces études semble montrer l'existence d'un risque accru de leucémie de l'enfant pour une faible proportion de la population exposée en milieu résidentiel à des niveaux

élevés de champ magnétique EBF ($0,4 \mu\text{T}$). Ces éléments ont amené le CIRC à classer les champs magnétiques dans la catégorie 2B des cancérigènes possibles. En considérant la lourdeur des études déjà réalisées, et en l'absence d'hypothèse confirmée sur les mécanismes d'action biologiques, il est peu vraisemblable que des éléments de réponse déterminants sur le rôle cancérigène des champs EBF puissent être apportés rapidement par de nouvelles études épidémiologiques.

Actuellement, les études en cours concernent davantage l'exposition aux radiofréquences liées à l'utilisation du téléphone mobile, dont les risques pour la santé ont été moins étudiés, et qui entraînent une exposition non négligeable dans la population. Ces études permettront à brève échéance de compléter les connaissances sur les effets des radiations non ionisantes.

Bibliographie

- Ahlbom, A., N. Day, M. Feychting, E. Roman, J. Skinner, J. Dockerty et coll. «A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia», *Br J Cancer*, 83, 2000, p. 692-8.
- American Conference of Governmental Hygienists (ACGIH). 1996 *TLVs and BEIs: Threshold limit values for chemical substances and physical agents, biological exposure indices*, ACGIH, Cincinnati, OH, 1996, 45240-1634.
- Armstrong, B. K. et D. R. English. «Cutaneous malignant melanoma», dans D. Schottenfeld et J. F. Fraumeni (rédacteurs) *Cancer epidemiology and prevention*, New York, Oxford University Press, 1996, p. 1282-1312.
- Armstrong, B. K. et A. Kricger. «Epidemiology of sun exposure and skin cancer», *Cancer Surv*, 26, 1996, p. 133-153.
- Baris, D., B. G. Armstrong, J. Deadman et G. Thériault. «A case Cohort Study of Suicide in Relation to Exposure to Electric and Magnetic fields among Electrical Utility Workers», *Occup Environ Med*, 53, 1, 1996, p. 17-24
- Baum, A. et L. Cohen. «Successful behavioral interventions to prevent cancer : The example of skin cancer», *Annu Rev Public Health*, 19, 1998, p. 319-333.
- Bélanger, K., B. Leaderer, K. Hellenbrand, T. R. Holford, J. McSharry, M. E. Power et coll. «Spontaneous abortion and exposure to electric blankets and heated water beds», *Epidemiology*, 9, 1998, p. 36-42.
- Bracken, M. B., K. Bélanger, K. Hellenbrand, L. Dlugosz, T. R. Holford, J.-E. McSharry et coll. «Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth retardation», *Epidemiology*, 6, 1995, p. 263-270.
- Davanipour, Z., E. Sobel, J. D. Bowman, Z. Qian et A. D. Will. «Amyotrophic lateral sclerosis and occupational exposure to electromagnetic fields», *Bioelectromagnetics*, 18, 1997, p. 28-35.
- Deadman, J. E., B. G. Armstrong, M. L. McBride, R. Gallagher et G. Thériault. «Exposures of children in Canada to 60-Hz magnetic and electric fields», *Scand J Work Environ Health*, 25, 1999, p. 368-375.
- Deadman, J. E. «Les expositions résidentielles et professionnelles aux champs magnétiques de fréquences extrêmement basses», dans Levallois, P. et P. Lajoie (éd.), *Pollution atmosphérique et champs électromagnétiques*. Les Presses de l'Université Laval, 1997, p. 135-149.
- De Guire, L. «L'enquête sur l'exposition au soleil. Population du Québec. Principaux résultats», Direction de la santé publique de Montréal-Centre, Montréal, Québec, juin 1998.
- Delpizzo, V. «Epidemiological Studies of Work With Video Display Terminals and Adverse Pregnancy Outcomes (1984-1992)», *Am J Ind Med*, 26, 1994, p. 465-480.
- Demers, P. A., D. B. Thomas, K. A. Rosenblatt, L. M. Jimenez, A. Mctiernan, H. Stalsberg et coll. «Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men», *Am J Epidemiol*, 134, 1991, p. 340-347.
- Diffey, B. L. «Population exposure to solar UVA radiation», *Eur J Dermatol*, 2, 1996, p. 221-2.
- Dolk, H., P. Elliott, G. Shaddick, P. Walls et B. Thakrar. «Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. II. All high power transmitters», *Am J Epidemiol*, 145, 1997, p. 10-17.
- Dolk, H., G. Shaddick, P. Walls, C. Grundy, B. Thakrar, I. Kleinschmidt et coll. «Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter», *Am J Epidemiol*, 145, 1997, p. 1-9.
- Elwood, J. M. et J. Jopson. «Melanoma and sun exposure : an overview of published studies», *Int J Cancer*, 73, 1997, p. 198-203.
- English, D. R., B. K. Armstrong, A. Kricger et C. Fleming. «Sunlight and cancer», *Cancer Causes Control*, 8, 1997, p. 271-283.
- English, D. R., B. K. Armstrong, A. Kricger, M. G. Winter, P. J. Heenan et P. L. Randell. «Case-control study of sun exposure and squamous cell carcinoma of the skin», *Int J Cancer*, 77, 1998, p. 347-353.
- Eriksson, N., J. Hoog, K. H. Mild, M. Sandstrom et B. Stenberg. «The psychosocial work environment and skin symptoms among visual display terminal workers: a case referent study», *Int J Epidemiol*, 26, 1997, p. 1250-1257.

- Evans, J. A., D. A. Savitz, E. Kanal et J. Gillen. «Infertility and pregnancy outcome among magnetic resonance imaging workers», *J Occup Med*, 35, 1993, p. 1191-1195.
- Feychting, M., N. L. Pedersen, P. Svedberg, B. Floderus et M. Gatz. «Dementia and occupational exposure to magnetic fields», *Scand J Work Environ Health*, 24, 1998, p. 46-53.
- Feychting, M. et A. Ahlbom. «Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines», *Am J Epidemiol*, 138, 1993, p. 467-481.
- Floderus, B., T. Persson, C. Stenlund, A. Wennberg, A. Ost et B. Knave. «Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden», *Cancer Cause Control*, 4, 1993, p. 465-476.
- Freeman, S. E., R. D. Ley et K. D. Ley. «Sunscreen protection against UV-induced pyrimidine dimers in DNA of human skin in situ», *Photodermatol*, 5, 1988, p. 243-247.
- Grayson, J. K. «Radiation Exposure, Socioeconomic status, and Brain Tumor Risk in the US Air Force: A Nested Case-Control Study», *Am J Epidemiol*, 143, 1996, p. 480-486.
- Green, A. et D. Battistutta. «Incidence and determinants of skin cancer in a high-risk australian population», *Int J Cancer*, 46, 1990, p. 356-361.
- Greenland, S., A. R. Sheppard, W. T. Kaune, C. Poole et M. A. Kelsh. «A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia», «Childhood Leukemia-EMF Study Group», *Epidemiology*, 11,6, 2000, p. 624-634.
- Hocking, B., I. R. Gordon, H. L. Grain et G. E. Hatfield. «Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers», (erratum *Med J Aust*, jané 20 1997, 166(2), p. 80), *Med J Aust*, 165, 1996, p. 601-605.
- Hodge, W. G., J. P. Whitcher et W. Satariano. «Risk factors for age-related cataracts», *Epidemiol Rev*, 17,2, 1995, p. 336-46.
- IARC. «Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Static and Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields», International Agency for Research on Cancer, 80, Lyon, 2002.
- IARC. «Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Solar and ultraviolet radiation», International agency for research on cancer, Lyon, vol. 55, 1992.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). «Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)», *Health Phys*, 74, 1998, p. 494-522.
- IRPA (The International Radiation Protection Association). «Guidelines on limits or exposure to UV radiation of wavelength between 180 and 400 nm (incoherent optical radiation)», dans A. S. Duchêne, J. R. A. Lakey et M. H. Repacholi (rédacteurs) *IRPA Guidelines on Protection against Non-Ionizing Radiation*, New York, Pergamon Press, 1991, p. 42-52.
- Jarret, P., C. Sharp et J. McClland. «Protection of children by their mother against sunburn», *Br Med J*, 1993, 306, p. 1448.
- Johansen, C. et J. H. Olsen. «Risk of cancer among Danish utility workers - a nationwide cohort study», *Am J Epidemiol*, 147, 1998, p. 548-555.
- Katsambas, A. et E. Nicolaidou. «Cutaneous malignant melanoma and sun exposure. Recent developments in epidemiology», *Arch Dermatol*, 132, 1996, p. 444-450.
- Kaune, W. T. «Assessing human exposure to power-frequency electric and magnetic fields», *Environ. Health Perspect*, 101, 1993, p. 121-133.
- Koh, H. K., R. A. Lew, A. C. Geller, D. R. Miller et B. E. Davis. «Skin cancer : prevention and control», dans P. Greenwald, B. S. Kramer et D. L. Weed (rédacteurs) *Cancer Prevention and Control*, New York, Marcel Dekker Inc., 1995, p. 611-640.
- Koh, H. K. «Cutaneous melanoma», *N Engl J Med*, 325, 1991, p. 171-182.
- Levallois, P. «Hypersensitivity of Human Subjects to Environmental Electric and Magnetic Field Exposure: A review of the Litterature», *Environ Health Perspect*, 1107, Suppl 4, 2002, p. 613-618.
- Levallois, P., P. Lajoie, D. Gauvin, G. Carrier, A. Daveluy, L. Drouin, C. Prévost et C. Tremblay «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 Service sociaux du Québec, mai 2000.
- Levallois, P., P. Lajoie et D. Gauvin. «Les effets des champs électromagnétiques de 50/60 Hz sur la santé : bilan et perspectives de santé publique pour le Québec», Service Santé et

- Environnement, département de Santé Communautaire, centre hospitalier universitaire de Québec, 1991.
- Levallois, P. «Champs électromagnétiques et santé publique», dans P. Levallois et P. Lajoie (rédacteurs), *Pollution atmosphérique et champs électromagnétiques*, Les Presses de l'Université Laval, 1997, p. 91-99.
- Li, C. Y., W. C. Lee et R. S. Lin. «Risk of leukemia in children living near high-voltage transmission lines», *J Occup Environ Med*, 40, p. 1998, 144-147.
- Li, D. K., H. Checkoway et B. A. Mueller. «Electric blanket use during pregnancy in relation to the risk of congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility», *Epidemiology*, 6, 1995, p. 485-489.
- Lim, H. W. et K. Cooper. «The health impact of solar radiation and prevention strategies». Report of the environment council, American Academy of Dermatology, *J Am Acad Dermatol*, 41, 1999, p. 81-99.
- Linnet, M. S., E. E. Hatch, R. A. Kleinerman, L. L. Robison, W. T. Kaune, D. R. Friedman et coll. «Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children», *N Engl J Med*, 337, 1997, p. 1-7.
- London, S. J., D. C. Thomas, J. D. Bowman, E. Sobel, T. C. Cheng et J. M. Peters. «Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields and Risk of Childhood Leukemia», *Am J Epidemiol*, 134, 1991, p. 923-937.
- Loomis, D. P., D. A. Savitz et C. V. Ananth. «Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States», *J Natl Cancer Inst*, 86, 1994, p. 921-925.
- Matanoski, G. M., P. N. Breyse et E. A. Elliott. «Electromagnetic Field Exposure and Male Breast Cancer», *Lancet*, 337, 1991, p. 737.
- McBride, M. L., R. P. Gallagher, G. Theriault, B. G. Armstrong, S. Tamaro, J. J. Spinelli et coll. «Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada», *Am J Epidemiol*, 149, 1999, p. 831-842.
- McGinley, J., C. J. Martin et R. M. Mackie. «Sunbeds in current use in Scotland : a survey of their output and patterns of use», *Br J Dermatol*, 139, 1998, p. 428-438.
- Michaelis, J., J. Schuz, R. Meinert, M. Menger, J. P. Grigat, P. Kaatsch et coll. «Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany», *Cancer Causes Control*, 8, 1997, p. 167-174.
- Miller, A. B. «The brave new world - What can we realistically expect to achieve through cancer control early in the new millennium ?», *Chronic Dis Can*, 20, 1999, p. 139-150.
- Miller, S. A., S. I. Hamilton, U. G. Wester et W. H. Cyr. «An analysis of UVA emission from sunlamps and the potential importance for melanoma», *Photochem Photobiol*, 68, 1998, p. 63-70.
- Morgan, M. G. «Power-Frequency Electric and Magnetic Fields - Issues of Risk Management and Risk Communication», dans D. O. Carpenter et T. M. Babij (rédacteurs) San Diego, Academic Press, 1994, p. 298-319.
- Nair, L., M. G. Morgan et H. K. Florig. «Biological Effects of Power Frequency Electric & Magnetic Fields - Background paper», Washington, DC Government Printing Office, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1989.
- Naylor, M. F., A. Boyd, D. W. Smith, G. S. Cameron, D. Hubbard et K. H. Neldner. «High sun protection factor sunscreens in the suppression of actinic neoplasia», *Arch Dermatol*, 131, 1995, p. 170-175.
- Okuno, T. «Thermal effect of visible light and infrared radiation (i.r.-A, i.r.-B and i.r.-C) on the eye: a study of infra-red cataract based on a model», *Ann Occup Hyg*, 38, 1994, p. 351-359.
- Olsen, J. H., A. Nielsen et G. Schulgen. «Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children», *Br Med J*, 307, 1993, p. 891-895.
- Perry, F. S., M. Reichmanis et A. A. Marino. «Environmental Power-Frequency Magnetic Fields and Suicide», *Health Phys*, 41, 1981, p. 267-277.
- Poole, C., R. Kavet, D. P. Funch, K. Donelan, J. M. Charry et N. A. Dreyer. «Depressive Symptoms and Headaches in Relation to Proximity of Residence to an Alternating-current Transmission Line Right-of-way», *Am J Epidemiol*, 137, 1993, p. 318-330.
- Preston-Martin, S., W. Navidi, D. Thomas, P. J. Lee, J. Bowman et J. Pogoda. «Los Angeles Study of Residential Magnetic Fields and Childhood Brain Tumors», *Am J Epidemiol*, 143, 1996, p. 105-119.

- Rapaport, M. J. et V. Rapaport. «Preventive and therapeutic approaches to short- and long-term sun damaged skin», *Clinics Dermatol*, 1998, 16, p. 429-439.
- Repacholi, M. H. «Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs», *Bem*, 19, 1998, p. 1-19.
- Rhahnds, M., L. De Guire et J. Claveau. «A population-based survey on the use of artificial devices in the Province of Québec, Canada», *J Am Acad Dermatol*, 40, 1999, p. 572-576.
- Rhahnds, M. et L. De Guire. «Rayonnement ultraviolet: perspective de santé publique», dans Levallois, P. et P. Lajoie (rédacteurs) *Pollution atmosphérique et champs électromagnétiques*, Sainte-Foy, Les Presses de l'université Laval, 1998, p. 237-266.
- Rhahnds, M. «Le rayonnement ultraviolet» (chapitre 5), dans Levallois, P., D. Gauvin, P. Lajoie et J. Saint-Laurent (rédacteurs) *Bilan des normes d'exposition aux champs électromagnétiques (0 à 300 GHz) et au rayonnement ultraviolet*. Institut de recherche en santé et sécurité au travail, juillet 1996(B-047), p. 5.1-5.12.
- Rosso, S., R. Zanetti, M. Pippione, H. Sancho-Garnier. «Parallel risk assessment of melanoma and basal cell carcinoma: skin characteristics and sun exposure», *Melanoma Res*, 8, 1998, p. 573-583.
- Sahl, J. D., M.A. Kelsh et S. Greenland. «Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among electric utility workers», *Epidemiology*, 4, 1993, p. 104-14.
- Sandstrom, M., E. Lyskov, A. Berglund, S. Medvedev et K. H. Mild. «Neurophysiological effects of flickering light in patients with perceived electrical hypersensitivity», *J Occup Environ Med*, 39, 1997, p. 15-22.
- Savitz, D. A., C. A. Boyle et P. Holmgreen. «Prevalence of Depression among Electrical Workers», *Am J Ind Med*, 25, 2, 1994, p. 165-176.
- Savitz, D. A., D. P. Loomis et C. K. Tse. «Electrical occupations and neurodegenerative disease: analysis of U.S. mortality data», *Arch Environ Health*, 53, 1998, p. 71-74.
- Savitz, D. A., H. Watchel, E. A. Barnes, E. M. John et J. G. Tyrdik. «Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields», *Am J Epidemiol*, 128, 1988, p. 21-38.
- Savitz, D. A. et C. V. Ananth. «Residential magnetic fields, wire codes, and pregnancy outcome», *Bioelectromagnetics*, 15, 1994, p. 271-273.
- Savitz, D. A. et D. P. Loomis. «Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers», erratum *Am J Epidemiol*, 15 juillet 1996, 144, 2, p. 205, *Am J Epidemiol*, 141, 1995, p. 123-134.
- Schilling, C. J. «Effects of acute exposure to ultrahigh radiofrequency radiation on three antenna engineers», *Occup Environ Med*, 54, 1997, p. 281-4.
- Scotto, J., T. R. Fears, K. H. Kraemer et J. E. Fraumeni. «Nonmelanoma skin cancer», dans D. Schottenfeld et J. E. Fraumeni (rédacteurs) *Cancer Epidemiology and Prevention*, New York, Oxford University Press, 1996, p. 1313-1330.
- Shaw, G. M. et L. A. Croen. «Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic field exposures: review of epidemiologic studies», *Environ Health Perspect*, 101, suppl. 4, 1993, p. 107-19.
- Stenberg, B., N. Eriksson, K. H. Mild, J. Hoog, M. Sandstrom, J. Sundell et coll. «Facial skin symptoms in visual display terminal (VDT) workers. A case-referent study of personal, psychosocial, building- and VDT-related risk indicators», *Int J Epidemiol*, 24, 1995, p. 796-803.
- Stevens, R. «Electric power use and breast cancer: a hypothesis», *Am J Epidemiol*, 125, 1987, p. 556-561.
- Swerdlow, A. J. et M. A. Weinstock. «Do tanning lamps cause melanoma? An epidemiologic assessment», *J Am Acad Dermatol*, 38, 1998, p. 89-98.
- Szmigielski, S. «Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation», *Sci Total Environ*, 180, 1996, p. 9-17.
- Taylor, H. R., S. West, B. Munoz, F. S. Rosenthal, S. B. Bressler et N. M. Bressler. «The long-term effects of visible light on the eye». *Arch Ophthalmol*, 110, 1992, p. 99-104.
- Thériault, G., M. Goldberg, A. B. Miller, B. Armstrong, P. Guénel, J. Deadman et coll. «Cancer Risks Associated with Occupational Exposure to Magnetic Fields Among Electric Utility Workers in Ontario and Quebec, Canada, and France - 1970-1989», *Am J Epidemiol*, 139, 1994, p. 550-72.

- Thompson, S. C, D. Jolley et R. Marks. «Reduction of solar keratoses by regular sunscreen use», *N Engl J Med*, 329, 1993, p. 1147-1151.
- Tynes, T. et A. Andersen. «Electromagnetic Fields and Male Breast Cancer», *Lancet*, 336, 1990, p. 1596.
- UK Childhood Cancer Study Investigators (UKCCS). Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer», *Lancet*, 354, 1999, p. 1925-1931.
- Van Praag, M. C, L. Roza, B. W. Boom et coll. «Determination of the photoprotective efficacy of a topical sunscreen against UVB-induced DNA damage in human epidermidis», *J Photochem Photobiol*, 19, 1993, p. 129-34.
- Verkasalo, P. K., E. Pukkala, M. Y. Hongisto, J. E. Valjus, P. Jarvinen, K. V. Heikkila et coll. «Risk of cancer in Finnish children living close to power lines», *Br Med J*, 307, 1993, p. 895-899.
- Wertheimer, N. et E. Leeper. «Electrical wiring configurations and childhood cancer», *Am J Epidemiol*, 109, 1979, p. 273-284.
- WHO. «Environmental Health Criteria 160: Ultra-violet radiation. An authoritative scientific review of environmental and health effects of UV, with reference to global ozone layer depletion», Genève, 1994.
- WHO. «Environmental Health Criteria 137: Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz)», World Health Organization, Genève, 1993.