
Exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et effets sanitaires associés

Saisine n° 2019-SA-0006

RAPPORT préliminaire

Comité d'experts spécialisé :
« Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements »

Octobre 2019

Mots clés

Technologie de communication 5G, cinquième génération, ondes millimétriques, exposition, évaluation des risques.

5G communication technology, fifth generation, millimeter waves, exposure, risk assessment.

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Ce rapport préliminaire a été élaboré avec la collaboration de l'Agence nationale des fréquences (ANFR) dans le cadre d'un programme scientifique commun. Ce document présente un état d'avancement des travaux de l'Anses en réponse à la saisine concernant l'exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et les effets sanitaires associés.

COMITE D'EXPERTS SPECIALISE

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le Comité d'experts spécialisé (CES) « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements ».

Présidente

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Chargée de recherche, Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), Laboratoire de neurosciences cognitives et adaptatives - UMR 7364, CNRS – Université de Strasbourg.

Membres

Thomas CLAUDEPIERRE – Enseignant chercheur à l'université de Lorraine.

Brigitte DEBUIRE – Professeur des universités émérite.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm).

Thierry DOUKI – Chef de laboratoire / Ingénieur docteur en chimie, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Jack FALCÓN – Chercheur émérite du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), spécialisé en chronobiologie animale, Biologie des Organismes et Ecosystèmes Aquatiques (BOREA), CNRS 7208, Muséum National d'Histoire Naturelle.

Emmanuel FLAHAUT – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

François GAUDAIRE – Ingénieur au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Irina GUSEVA-CANU – Epidémiologiste, Professeur des universités, Université de Lausanne.

Martine HOURS – Médecin épidémiologiste, Directeur de recherche à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Chaker LARABI – Enseignant chercheur à l'université de Poitiers.

Joël LELONG – Directeur adjoint de laboratoire / Docteur en physique à l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar).

Frédérique MOATI – Maître de conférences en biophysique et médecine nucléaire à l'Université Paris Sud XI / Praticien hospitalier / Radiopharmacienne / Biologiste, AP-HP Hôpital Bicêtre.

Catherine MOUNEYRAC – Directrice de l'Institut de biologie et d'écologie appliquée et Professeur en écotoxicologie aquatique à l'Université catholique de l'ouest (UCO).

Fabien NDAGIJIMANA – Professeur des universités, Université Joseph Fourier, Grenoble.

Anne-Lise PARADIS – Chargée de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Marie-Pierre ROLS – Directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Valérie SIMONNEAUX – Chercheuse en neurobiologie des rythmes au Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Alain SOYEZ – Responsable de laboratoires, Ingénieur conseil, Caisse d'assurance retraite et de santé au travail Nord Picardie.

Esko TOPPILA – Professeur, Directeur de recherche à l'Institut finlandais de santé au travail.

Alicia TORRIGLIA – Médecin, Directeur de recherche en ophtalmologie, Centre de Recherches des Cordeliers, Institut National de la Santé et de la recherche médicale (Inserm).

Françoise VIÉNOT – Professeur émérite - Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France.

Catherine YARDIN – Professeur, chef de service, médecin généticien à l'Hôpital Dupuytren, CHU de Limoges.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Lucile MIGAULT – Coordinatrice d'expertises scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Contribution scientifique

Marion BOYER – Coordinatrice d'expertises scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Olivier MERCKEL- Chef de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Lucile MIGAULT – Coordinatrice d'expertises scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Rémi POIRIER – Chef de projets - Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

Secrétariat administratif

Sophia SADDOKI – Assistante de l'unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations	7
Liste des tableaux.....	7
Liste des figures	7
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	9
1.1 Contexte et objet de la demande d'expertise	9
1.2 Modalités d'expertise.....	10
2 Contexte national et international du déploiement de la technologie 5G	12
2.1 Les objectifs annoncés de la 5G	12
2.2 Les principaux acteurs industriels	13
2.3 Le déploiement en France	13
2.4 Le déploiement international.....	15
3 Travaux antérieurs sur les effets des expositions aux fréquences proches de celles de la 5G	18
3.1 Introduction	18
3.2 Travaux antérieurs de l'Anses sur les effets sanitaires des radiofréquences de 8,3 kHz à 6 GHz.....	18
3.3 Travaux antérieurs de l'Anses sur les effets sanitaires des radiofréquences au-delà de 20 GHz.....	20
3.4 Considérations biophysiques sur la pénétration des champs électromagnétiques dans les tissus	20
3.5 Spécificité des bandes de fréquences utilisées par la technologie 5G pour l'évaluation des risques sanitaires	22
4 Recherche bibliographique relative aux effets biologiques et sanitaires éventuels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par la technologie 5G.....	24
4.1 Matériel et Méthodes.....	24
4.1.1 Analyse de la bibliographie des précédentes expertises de l'Anses.....	24
4.1.2 Recherche de la bibliographie publiée plus récemment.....	24
4.1.2.1 Algorithme de recherche.....	24
4.1.2.2 Mode de sélection des articles.....	25
4.1.3 Analyse des revues de la littérature publiées	25
4.2 Résultats de la recherche bibliographique.....	26
4.2.1 Bande de fréquences [3 – 4] GHz	26
4.2.1.1 Sélection des études.....	26
4.2.1.1.1 Analyse des précédents rapports de l'Anses	26
4.2.1.1.2 Recherche de la bibliographie publiée plus récemment.....	26

4.2.1.1.3	Analyse des revues de la littérature publiées.....	26
4.2.1.1.4	Résumé du nombre d'études incluses.....	26
4.2.1.2	Caractéristiques des études sélectionnées.....	28
4.2.2	Bande de fréquences [24 -60] GHz.....	28
4.2.2.1	Sélection des études.....	28
4.2.2.1.1	Analyse des précédents rapports de l'Anses.....	28
4.2.2.1.2	Recherche de la bibliographie publiée plus récemment.....	28
4.2.2.1.3	Analyse des revues de la littérature publiées.....	28
4.2.2.1.4	Résumé du nombre d'études incluses.....	29
4.2.2.2	Caractéristiques des études sélectionnées.....	31
5	Synthèse et perspectives	46
5.1	Bande [3 – 4] GHz.....	46
5.1.1	Rappel des travaux d'expertise antérieurs de l'Anses jusqu'à 6 GHz.....	46
5.1.2	Recherche de publications spécifiques dans la bande [3 – 4] GHz.....	47
5.1.3	Analyse et recommandations du CES quant à l'extrapolation des résultats obtenus jusqu'à présent à la bande [3 - 4] GHz.	47
5.1.4	Analyse et recommandations du CES quant à l'évolution des expositions environnementales	48
5.2	Bande [24 – 60] GHz.....	48
5.2.1	Rappel des travaux d'expertise antérieurs de l'Anses au-dessus de 20 GHz.....	48
5.2.2	Recherche de publications spécifiques dans la bande [24 – 60] GHz.....	49
5.2.3	Analyse et recommandations du CES quant aux données disponibles dans la bande [24 – 60] GHz.....	49
5.3	En résumé.....	49
6	Bibliographie	51
6.1	Presse écrite, audio-visuelle et communication institutionnelle	51
6.2	Ouvrages, rapports et articles scientifiques	51
ANNEXES.....		62
Annexe 1	: Lettre de saisine.....	63
Annexe 2	: Modèle de courrier envoyé aux constructeurs	66
Annexe 3	: Modèle de courrier envoyé aux opérateurs.....	69
Annexe 4	: Effet thermique des radiofréquences	72

Sigles et abréviations

ANFR : Agence nationale des fréquences

Afsset : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail

Arcep : Autorité de régulation des communications électroniques et des postes

CES : Comité d'experts spécialisé

FFTe : Fédération française des télécoms

Incirp : *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants

IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Institut américain des ingénieurs de l'électricité et de l'électronique

IoT : *Internet of things*

kHz : kiloHertz

GHZ : GigaHertz

TDD : *Time Division Duplex*

URLLC : *Ultra Low Reliable Low Latency Communications*

WiMAX : *Worldwide interoperability for Microwave Access*

5G-PPP : *5G Public Private Partnership*

Liste des tableaux

Tableau 1 : Conductivité des tissus du corps humain (en Sm^{-1}) en fonction de la fréquence	21
Tableau 2 : Caractéristiques des études portant sur les effets génotoxiques, co-génotoxiques et sur la croissance tumorale liés à l'exposition aux ondes millimétriques dans la bande [24 – 60] GHz	33
Tableau 3 : Caractéristiques des études portant sur les effets éventuels non cancérogènes sur le système nerveux liés à l'exposition aux ondes millimétriques dans la bande [24 – 60] GHz	35
Tableau 4 : Caractéristiques des études portant sur les autres effets éventuels liés à l'exposition aux ondes millimétriques dans la bande [24 – 60] GHz	38

Liste des figures

Figure 1 : programme de déploiement de la 5G en France selon l'Arcep	14
Figure 2 : Modèle prédictif de la variation de la permittivité (en haut) et de la conductivité (en bas) de la peau (sèche) en fonction de la fréquence du champ électromagnétique	21
Figure 3 : Évolution de la profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques dans la peau sèche, la graisse et les muscles, en fonction de la fréquence (100 MHz à 40 GHz), suivant le modèle Cole-Cole.....	22
Figure 4 : Diagramme de la sélection des études - bande [3 – 4] GHz	27

Figure 5 : Diagramme de la sélection des études - bande [24 – 60] GHz.30

Figure 6 : Profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un muscle72



1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte et objet de la demande d'expertise

Le déploiement d'infrastructures de communication de technologie « 5G » a pour objectif de favoriser le développement de services innovants, à l'attention à la fois des particuliers et des entreprises utilisatrices, dans des domaines variés comme la santé, les médias, les transports ou encore les industries du futur. En effet, deux tendances importantes poussent les industries des technologies mobiles à développer un réseau de communication de nouvelle génération : l'augmentation très importante de l'offre en services sans-fil, qui nécessite des réseaux plus rapides et de plus grandes capacités pour fournir des services riches en contenu, comme les vidéos, et les perspectives de croissance de l'internet des objets (IoT, pour *Internet of Things* en anglais) qui alimentent le besoin d'une connectivité massive d'appareils très fiable et à très faible latence pour des applications telles que les voitures connectées, les automatisations industrielles ou encore certaines applications dans la santé.

Ces évolutions nécessitent, non seulement l'exploitation des fréquences d'ores et déjà utilisées par les précédentes générations de téléphonie mobile, mais également celle de nouvelles bandes de fréquences. Parmi elles, deux bandes de fréquences ont déjà été identifiées pour les futurs déploiements en France : la bande 3,5 GHz (3,4 - 3,8 GHz) qui permettra d'assurer l'objectif de couverture en téléphonie mobile 5G et la bande 26 GHz (24,25 - 27,5 GHz) qui couvrira des besoins de communication pour un grand nombre d'objets et avec une faible latence sur une zone géographique très localisée.

Dans plusieurs villes de France, des opérateurs mobiles ont déjà réalisé ou commencé à préparer des expérimentations pilotes visant à tester le fonctionnement des nouvelles infrastructures encore aujourd'hui en cours de développement, en vue d'un déploiement commercial à l'horizon 2020. Chaque expérimentation a ses objectifs propres : tests techniques (*Massive MIMO*, *Beamforming*, Duplexage temporel (mode TDD), *Network slicing* etc. (cf. Rapports ANFR¹)), de performance (débit, latence, forme des faisceaux...), des contraintes de déploiement mais aussi de cas d'usages (réalité virtuelle, ville intelligente, télémédecine...).

Ces évolutions technologiques vont non seulement modifier les modalités d'exposition de la population, mais nécessiteront également d'adapter les méthodologies de mesure et d'estimation de ces expositions.

Afin d'accompagner le déploiement et le développement de la 5G, le Gouvernement a présenté le 16 juillet 2018 sa feuille de route nationale 5G². Un des quatre chantiers lancés par le Gouvernement vise à « assurer la transparence et le dialogue sur le déploiement et l'exposition du public ».

Dans ce cadre, l'Anses a été saisie le 9 février 2019 (cf. Annexe 1) par les ministères en charge de la santé, de l'environnement et de l'économie afin de conduire une expertise relative à

¹ <https://www.anfr.fr/toutes-les-actualites/actualites/la-5g-a-lordre-du-jour-du-comite-national-de-dialogue-sur-l'exposition-du-public-aux-ondes-electromagnetiques/>

² https://www.economie.gouv.fr/files/files/Actus2018/Feuille_de_route_5G-DEF.pdf

l'exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et aux effets sanitaires associés.

Cette expertise devra permettre :

1. *Une description des caractéristiques et de la nature des signaux émis :*

- par les dispositifs rayonnants déployés dans le cadre des expérimentations, notamment dans la bande 3,5 GHz ;
- par les dispositifs rayonnants lors du déploiement commercial de la 5G, pour toutes gammes de fréquences ;
- par les objets communicants utilisés dans les projets de déploiement de la 5G, dans les bandes de fréquences 3,5 GHz et 26 GHz.

2. *Une évaluation du niveau d'exposition des personnes lié aux communications mobiles de technologie 5G :*

- en particulier dans le cas de l'utilisation de nouvelles antennes actives i) dans le cadre des expérimentations menées par les opérateurs de téléphonie mobile et ii) dans le cadre du déploiement commercial de cette technologie ;
- dans les contextes d'usage des objets connectés dans les bandes 3,5 GHz et 26 GHz.

3. *Une revue des connaissances existantes sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans les bandes 3,5 GHz et 26 GHz.*

1.2 Modalités d'expertise

Dans le cadre du chantier lancé par le Gouvernement, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) a pour mission de caractériser les réseaux 5G, de mettre au point des outils relatifs aux contrôles, de permettre la concertation sur l'exposition du public aux ondes et d'accompagner les collectivités qui le souhaitent dans l'information relative à l'impact de la 5G sur l'exposition. C'est ainsi que, conformément à ses missions, l'ANFR effectue depuis fin 2018 des essais exploratoires de mesure de l'exposition sur les zones d'expérimentation pilotes des opérateurs de téléphonie mobile.

Constatant la convergence de leurs préoccupations, l'Anses et l'ANFR ont souhaité construire un programme scientifique commun afin, d'une part, de décrire les caractéristiques techniques de la technologie 5G, notamment les dispositifs rayonnants spécifiquement développés pour la 5G dans le cadre des déploiements pilotes et, d'autre part, d'évaluer les niveaux d'exposition des populations à partir des mesures effectuées sur les zones pilotes sans utilisateurs, dont les essais sont exploratoires.

La réponse à la saisine des ministères en charge de la santé, de l'environnement et de l'économie sera donc fournie sous la forme de rapports de l'Anses et de l'ANFR complémentaires.

Le présent rapport préliminaire décrit l'avancement des travaux de l'Anses et comprend cinq parties. La première introduit le contexte et les modalités de réalisation de l'expertise ; la deuxième concerne le contexte national et international du déploiement de la 5G ; la troisième expose les spécificités des bandes de fréquences prévues pour être déployées en France pour la technologie 5G (3,5 GHz et 26 GHz), en matière d'exposition aux champs électromagnétiques ; la quatrième décrit la méthodologie et les résultats de la recherche bibliographique menée afin d'identifier les études disponibles portant sur les effets sanitaires

éventuels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans les bandes de fréquences de la technologie 5G ; et enfin la cinquième partie est consacrée aux questionnements posés, en matière de méthodologie d'évaluation des risques sanitaires liés au déploiement de la technologie 5G.

La méthodologie et les résultats de ces travaux ont été présentés au comité d'experts spécialisé (CES) « agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » les 12 septembre et 17 octobre 2019. Les experts présents ont émis des questionnements et des recommandations sur les modalités de réalisation de l'expertise en évaluation de risques sanitaires en tenant compte des données scientifiques disponibles. Ces réflexions permettront d'orienter les travaux du groupe de travail « Déploiement de la technologie de communication 5G et effets sanitaires associés » qui sera créé par l'Anses, sous l'égide du CES.

Les travaux réalisés par l'ANFR ont fait l'objet de deux rapports d'étude. Le premier comprend une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition des personnes et le second comprend les premiers résultats de mesures d'exposition effectuées pendant les expérimentations pilotes 5G. Ils sont publiés sur le site de l'ANFR (<https://www.anfr.fr/toutes-les-actualites/actualites/la-5g-a-lordre-du-jour-du-comite-national-de-dialogue-sur-lexposition-du-public-aux-ondes-electromagnetiques/>).

En parallèle de l'élaboration de ces rapports, l'Anses et l'ANFR ont sollicité de la part des industriels concernés la communication de données techniques détaillées concernant les dispositifs rayonnants déployés dans le cadre de la 5G, *via* l'établissement de courriers à l'entête de l'Anses et de l'ANFR (*cf.* Annexe 2 et Annexe 3). Les réponses ont été obtenues dans le courant de l'été 2019 et seront exploitées par l'ANFR dans le cadre de leurs travaux d'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G.

2 Contexte national et international du déploiement de la technologie 5G

Le déploiement de la technologie 5G est lié à des enjeux notamment sociaux, politiques et économiques. Les nombreux facteurs susceptibles d'influencer son déploiement et les choix techniques en cours ou à venir devront être pris en compte dans le cadre de l'évaluation des risques associés. Les documents utilisés ici pour décrire le contexte du déploiement de la technologie 5G sont principalement issus de l'Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes (Arcep), mais également de matériaux de presse écrite et audiovisuelle : Agence France Presse, extraits radiodiffusés et autres ressources en ligne. Les supports d'information exploités sont parus entre le 1^{er} janvier 2019 et le 11 octobre 2019. Les expressions rapportées entre guillemets sont des citations. Les paragraphes suivants ont une valeur informative et ne reflètent aucunement la position de l'Anses.

2.1 Les objectifs annoncés de la 5G

Les réseaux mobiles sont en évolution continue depuis l'apparition du premier, déployé en France à la fin des années 80. À ce réseau de téléphonie mobile vocale ont ensuite succédé des réseaux mobiles d'échanges de données audio-visuelles, fournissant un accès internet mobile. L'augmentation du volume de données échangées est ainsi en accélération depuis le début des années 2000. Le développement des applications disponibles et l'amélioration de la couverture et des débits offerts par les réseaux mobiles ont conduit à une croissance de l'offre et de la demande et à l'apparition de nouveaux usages comme les objets connectés (Arcep 2017). La 5G est aujourd'hui présentée comme une technologie « globale », qui rassemblera les applications de téléphonie mobile très haut débit, l'industrie connectée et « l'internet des objets » dans lequel des équipements connectés à internet pourront « dialoguer » entre eux, sans intervention humaine (AFP 2019b).

La 5G a pour ambition de répondre mieux et simultanément à cette grande variété de besoins, en prenant en compte leur diversité. Le déploiement des infrastructures de communication 5G devrait permettre de favoriser la numérisation de la société en autorisant le développement de nouveaux usages tels que la réalité virtuelle, les transports intelligents (véhicule autonome et connecté, gares et ports connectés...), les villes intelligentes (contrôle du trafic routier, optimisation énergétique...), l'industrie du futur (pilotage à distance des outils industriels, connectivité des machines...), la télémédecine ou encore l'éducation en ligne par exemple (Arcep 2019a).

La différence majeure, annoncée par ses promoteurs, entre la 5G et les réseaux mobiles de générations précédentes est la quantité beaucoup plus importante de données qui devrait pouvoir être échangée sans engorgement des réseaux (AFP 2019b). Par ailleurs, comme décrit précédemment, la 5G ne devrait pas se limiter seulement à la téléphonie mobile et aux communications grand public mais devrait également permettre la cohabitation d'applications et d'usages extrêmement diversifiés, unifiés au sein d'une même technologie. Son objectif est d'élargir le spectre des usages et la diversité des utilisateurs. « La 5G ne serait donc pas tant une technologie universelle qu'une technologie polymorphe, voire protéiforme, capable de s'adapter à tous les usages jusqu'aux plus exigeants. » (Arcep 2017).

Ainsi, le déploiement de la 5G va impliquer tous les acteurs classiques des réseaux de télécommunication (opérateurs de télécommunication, équipementiers), mais également les « verticaux » de l'économie. Ces derniers sont définis comme des opérateurs qui développent

et mettent sur le marché des technologies dont le bon fonctionnement nécessitera les niveaux de performance promis par la 5G, notamment en matière de débit d'échange de données, de latence de communication ou de couverture : véhicules connectés, villes intelligentes, santé numérique, divertissement, industries connectées, distribution énergétique, etc. (Arcep 2017, 2019a). Le groupe français Orange estime par exemple que la 5G va offrir un débit jusqu'à 10 fois supérieur à celui de la 4G (AFP 2019b). Certains observateurs remarquent cependant que « la plupart des acteurs peinent à expliquer quel sera l'intérêt majeur de la 5G sur mobile » (Les Numériques 2019b).

2.2 Les principaux acteurs industriels

Les opérateurs de télécommunication qui seront chargés de déployer l'essentiel des infrastructures pour les réseaux mobiles nécessaires au bon fonctionnement de la 5G se fournissent auprès d'un nombre restreint d'équipementiers : deux européens - le suédois Ericsson (13,3 % du marché mondial des équipements réseaux en 2018) et le finlandais Nokia (17 % du marché mondial en 2018), qui a racheté en 2016 le franco-américain Alcatel-Lucent -, un chinois - Huawei (30 % du marché mondial en 2018) - et d'autres fournisseurs présents à moins grande échelle - en particulier le sud-coréen Samsung - ainsi que le chinois ZTE (AFP 2019b, Le Monde 2019).

2.3 Le déploiement en France

En France, afin d'accompagner le déploiement et le développement de la 5G, le Gouvernement a présenté sa feuille de route nationale le 16 juillet 2018. Le déploiement commercial est prévu à l'horizon 2020. Depuis fin 2018, des opérateurs mobiles effectuent des expérimentations dans plusieurs villes³ afin de tester le fonctionnement des nouvelles infrastructures ; certains de ces essais sont déjà terminés⁴. La Figure 1 présente le programme de déploiement tel que prévu par l'Arcep.

Les nouvelles bandes de fréquences sur lesquelles devra s'appuyer la 5G (bande 3,5 GHz (3,4 - 3,8 GHz) et bande 26 GHz (24,25 - 27,5 GHz)) ont déjà été identifiées en France et sont en cours d'attribution par l'Arcep (Arcep 2019c).

L'Arcep a mis en consultation publique, le 15 juillet 2019, un projet de modalités et conditions d'attribution d'autorisations d'utilisation de fréquences dans la bande 3,4 - 3,8 GHz en France métropolitaine⁵. Les contributions à la consultation publique, qui étaient attendues jusqu'au 4 septembre 2019, permettront à l'Arcep d'arrêter ces modalités et conditions d'attributions définitivement. Il est prévu que l'Arcep transmette une proposition au Gouvernement d'ici fin octobre 2019 (Arcep 2019c).

Par ailleurs, en janvier 2019, le Gouvernement et l'Arcep ont lancé conjointement un appel à la création de plateformes d'expérimentation 5G dans la bande de fréquences 26 GHz, ouvertes également à des acteurs autres que les acteurs traditionnels des télécommunications. L'objectif

³ Grenoble, Nozay, Lyon, Bordeaux, Cesson-Sévigné, Lannion, Douai, Velizy-Villacoublay, Sophia Antipolis, Belfort, Châtillon, Nantes, Linas, Pau, Clamart, Issy-les-Moulineaux, Vanves, Toulouse, Saint Ouen, Ouistreham, Francazal, Saint-Maurice-de-Rémens, Saint-Denis, Boulogne-Billancourt, Montpellier, Lille, Marseille, Digosville, Rouen, La Défense, Toulouse, Le Vaudreuil, Mérignac.

⁴ Mérignac (Bouygues Telecom), Lille (Orange), Marseille (Orange), Paris (SFR, Altice médias ; Ericsson, Université de Stockholm KTH et Orange), Nozay (Nokia), Lyon (SFR), Ouistreham (Leti Cea tech).

⁵ https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1562769055/user_upload/34-19-version-francaise.pdf.

de cet appel était de favoriser l'appropriation des possibilités offertes par cette bande de fréquences, et d'identifier les nouveaux usages de la 5G. Parmi les projets déposés, 11 ont été retenus à ce jour afin que l'Arcep leur délivre une autorisation d'utilisation expérimentale des fréquences 5G pour une durée allant jusqu'à 3 ans. Certains projets ciblent des thématiques en particulier : la logistique (port connecté, gestion des intermodalités des transports, traçabilité), la ville intelligente (immeubles connectés), la mobilité (services en gare à destination des trains ou du grand public) ou encore la couverture d'évènements sportifs. D'autres projets prévoient d'accueillir plus largement tous types d'entreprises innovantes. Ces tests de cas d'usages doivent permettre de faire mûrir l'écosystème français avec un temps d'avance sur cette bande de fréquences. Ils apporteront un premier retour d'expérience pour identifier les types d'usages innovants (Arcep 2019d).



Figure 1 : programme de déploiement de la 5G en France selon l'Arcep (Dernière mise à jour : 30 janvier 2019)

2.4 Le déploiement international

En Europe, le déploiement de la 5G fait l'objet d'une forte volonté des institutions européennes et du secteur privé. Le 5G-PPP (*5G Public Private Partnership*), un partenariat public-privé dédié à la recherche et au développement autour de la 5G, a été créé à l'initiative de la Commission européenne en 2013 (budget de 700 millions d'euros de fonds publics). Il a pour objectifs principaux de :

- « réunir le tissu économique et académique du secteur des télécommunications autour de grands projets de R&D, sur toute la chaîne de valeur ;
- réduire la dépendance technologique aux États-Unis et à l'Asie tout en maintenant une forte part de marché mondial ;
- reprendre du *leadership* technologique, notamment dans les technologies de rupture, par la promotion de standards au sein des instances internationales ;
- permettre la définition de *business models* innovants ;
- faciliter l'expérimentation à grande échelle. »

Les résultats de ces travaux doivent nourrir les travaux de normalisation en cours (Arcep 2017).

Présenté en septembre 2016, le plan d'action de la Commission européenne pour la 5G prévoit un calendrier européen commun pour un lancement commercial coordonné des services 5G en 2020, notamment la couverture 5G d'une grande ville par État membre en 2020 et de toutes les zones urbaines et principaux axes de transport en 2025. Le plan d'action prévoit également une collaboration avec les États membres et les acteurs du secteur pour identifier et allouer les fréquences du spectre radioélectrique pour la 5G, l'organisation d'essais 5G paneuropéens à partir de 2018, la promotion de normes mondiales 5G communes et une incitation à l'adoption de feuilles de route nationales pour le déploiement de la 5G dans tous les pays de l'Union.

Un observatoire européen de la 5G a également été créé par la Commission européenne, en octobre 2018, pour suivre l'évolution du marché et, notamment, les pilotes lancés par les acteurs du secteur. Il collecte les données concernant :

- l'utilisation du spectre prévue dans chaque pays européen ;
- l'état des expérimentations en Europe ;
- les feuilles de route nationales pour déployer la 5G ;
- les actions menées par les industriels et les États membres en lien avec la 5G.

La Commission et les investisseurs du secteur télécom envisagent également d'investir sous forme de capital-risque dans les *start-ups* qui développent des solutions 5G pour des applications et des services innovants, quel que soit le secteur d'activité concerné (Commission Européenne 2016, Arcep 2019b).

Au Royaume-Uni, l'opérateur britannique EE a confirmé le lancement de services commerciaux 5G le 30 mai 2019. Les services 5G sont annoncés comme étant disponibles à Londres, Cardiff, Édimbourg, Belfast, Birmingham et Manchester. Selon EE, cette phase 1 du déploiement de la 5G est axée sur l'utilisation combinée des technologies 4G et 5G. L'opérateur prévoit qu'en 2020, la couverture 5G atteindra 10 autres villes de taille moyenne⁶. Il prévoit également qu'à partir de 2022, la phase 2 permettra l'introduction d'un réseau central 5G complet, de capacités de gestion des flux de données numériques de périphériques (objets connectés) améliorées et d'une disponibilité accrue du spectre compatible 5G. Il annonce enfin qu'à partir de 2023, une troisième phase sera marquée par les technologies de très faible latence (*Ultra Low Reliable Low Latency Communications*, URLLC), le découpage en tranches de réseau (cf. Rapports

⁶ Aberdeen, Cambridge, Derby, Gloucester, Peterborough, Plymouth, Portsmouth, Southampton, Worcester et Wolverhampton.

ANFR) et des débits plus élevés (PCR Wireless News 2019). En juillet 2019, c'est le géant britannique des télécoms Vodafone qui a lancé son réseau mobile 5G dans sept villes du Royaume-Uni (Birmingham, Cardiff, Glasgow, Liverpool, Manchester, Bristol et Londres) devenant, après EE, le deuxième acteur à proposer cette technologie dans le pays. Dix-neuf autres villes britanniques seront couvertes par le réseau Vodafone avant la fin de l'année 2019 (AFP 2019c).

En Suisse, certains opérateurs ont également confirmé le lancement de la 5G. Un communiqué d'avril 2019 évoque la couverture de 54 localités par Swisscom, qui compterait augmenter la couverture jusqu'à 90 % de la population d'ici à fin 2019. Sunrise avance un chiffre similaire, alors que l'opérateur Salt parle d'une introduction de cette technologie au deuxième semestre 2019. Ces annonces interviennent alors même que des résolutions de moratoire sont votées dans le pays pour demander l'arrêt du déploiement (Le Temps 2019). Les opposants à la 5G en Suisse craignent les effets des rayonnements électromagnétiques de cette technologie. Le samedi 21 septembre 2019, des milliers de personnes ont manifesté à Berne pour demander l'arrêt du déploiement et plusieurs cantons, mis sous pression par des pétitions en ligne, ont gelé les procédures pour la construction d'antennes, au nom du principe de précaution, comme à Genève, Vaud, Fribourg et Neuchâtel. La très puissante Fédération suisse des médecins (FMH) plaide aussi pour la prudence, expliquant que « tant qu'il ne sera pas prouvé scientifiquement qu'une augmentation des valeurs limites de rayonnement actuelles n'a aucun impact sur la santé, il faudrait renoncer à les augmenter ». Les opposants cherchent désormais à lancer une initiative en vue d'un référendum sur le sujet. Pour cela, il leur faut réunir 100 000 signatures en 18 mois (Ouest-France 2019).

En Italie, Telecom Italia (TIM) a lancé des services commerciaux 5G après l'activation de son réseau dans certaines parties de Rome et de Turin le 24 juin 2019. L'opérateur britannique Vodafone a activé son réseau 5G dans ces deux mêmes villes, ainsi que dans les zones métropolitaines de Milan, Bologne et Naples. Le 26 juillet 2019, TIM et Vodafone ont conclu un accord pour fusionner leurs 22 000 tours télécom en Italie et déployer ensemble la technologie 5G dans le pays (Le Figaro 2019).

La Finlande, l'Irlande, l'Espagne ou encore l'Estonie disposeraient également de réseaux 5G dans certaines villes (European 5G Observatory 2019b).

La Pologne a attribué les bandes de fréquences nécessaires à la 5G et Ericsson et Orange ont lancé des tests 5G dans la région de Varsovie (RCRWirelessNews 2019). Des tests sont également en cours aux Pays-Bas (European 5G Observatory 2019b).

En Allemagne, l'agence fédérale allemande des réseaux a annoncé que la vente aux enchères des bandes de fréquences de la 5G, commencée en mars 2019, avait abouti au total à 6,55 milliards d'euros répartis entre quatre opérateurs : Deutsche Telekom, Vodafone Allemagne, Telefonica et 1&1 Drillisch. Dans le cadre de l'accord avec les autorités allemandes, les opérateurs nationaux de téléphonie mobile se sont engagés à i) fournir des services voix et données fiables dans 99 % des foyers à l'échelle nationale d'ici la fin 2020 et dans 99 % des foyers de chaque région d'ici 2021, notamment dans les zones rurales, ii) accroître la coopération interne et construire au moins 1 400 mâts accessibles à tout opérateur, iii) atteindre un débit minimum de 100 Mbit/s sur les principaux axes de transport et iv) installer des stations de base dans des « zones blanches » qui sont des zones rurales mal desservies (European 5G Observatory 2019a).

En Asie, la Corée du Sud est devenue, le 3 avril 2019, le premier pays au monde à lancer un réseau 5G mobile. D'abord destiné à un nombre très restreint de personnes, l'abonnement a été rendu disponible auprès du reste de la population dès le 5 avril 2019, parallèlement à la sortie du téléphone Samsung S10 5G (France Info 2019), premier téléphone mobile compatible avec les bandes de fréquences de la 5G (AFP 2019a, France Info 2019). Les premiers lieux dans lesquels ce réseau a été et continuera à être déployé sont les zones à forte densité de population (centres commerciaux, universités, trains, etc.) (Ericsson 2019). Le Japon vise un

déploiement en 2020 (Nature international journal of science 2019). En Chine, les premières licences 5G ont été attribuées en juin 2019, ouvrant la voie à un lancement commercial complet. Plus de 50 villes devraient ainsi être couvertes en 5G d'ici fin 2019 (Les Echos 2019).

Aux États-Unis, la répartition de l'utilisation des bandes de fréquences radio n'est pas la même qu'en Europe. La bande 3,5 GHz est notamment utilisée par l'armée, ce qui interdit *a priori* dans l'immédiat d'en faire usage pour le déploiement de la 5G. Ainsi, les États-Unis ont choisi pour la 5G d'utiliser la bande 24 - 28 GHz, qui permet de meilleurs débits, mais avec des portées plus faibles. Avec le lancement des offres des opérateurs AT&T puis Verizon et enfin Sprint, les américains ont la possibilité d'accéder au réseau 5G dans plus de 20 villes (Siècle digital 2019) et le gouvernement américain prévoit l'investissement de 20 milliards de dollars pour déployer cette technologie dans les zones moins peuplées. Le gouvernement a également commencé à mettre aux enchères des blocs de fréquences radio à utiliser pour le futur réseau de communication mobile 5G (AFP 2019b). Compte tenu de l'ampleur du marché des communications aux États-Unis, les décisions sur la manière de déployer la 5G sont susceptibles d'influencer les discussions mondiales sur la réglementation internationale de cette technologie, évoquées dans le paragraphe suivant (Nature international journal of science 2019).

Les régulateurs du monde entier se sont réunis à Charm el-Cheikh (Égypte) en octobre 2019 pour conclure des accords internationaux concernant les fréquences qui pourront être utilisées par les opérateurs privés dans le cadre des transmissions 5G. Les discussions devaient également permettre de déterminer le niveau acceptable d'interférences avec d'autres technologies, en particulier avec les satellites météorologiques. La Commission fédérale des communications (FCC) américaine et la Commission européenne sont en discussion avec l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur la question de la régulation des interférences entre les réseaux 5G et les technologies spatiales qui concernent la météorologie (Nature international journal of science 2019).

Le déploiement de la 5G fait par ailleurs l'objet de tensions internationales, notamment entre les États-Unis et la Chine, sur fond de questions de souveraineté nationale et de guerre commerciale. Dans ce contexte, il est notamment question de pressions des États-Unis sur d'autres pays pour limiter l'installation d'équipements réseaux produits par l'équipementier chinois Huawei. L'association regroupant les principales entreprises de l'industrie des télécoms à l'échelle mondiale (GSMA) estime que repenser aujourd'hui le déploiement de la 5G en Europe, sans avoir recours aux équipements provenant de Huawei, pourrait allonger le temps nécessaire à la construction des infrastructures et entraîner un retard pouvant aller jusqu'à 18 mois par rapport au calendrier fixé par les grands opérateurs. La GSMA évoque également un surcoût de l'ordre de 55 milliards d'euros à l'échelle de l'Union européenne (UE). Ce surcoût serait lié, d'une part au fait que les matériels 5G de Huawei sont meilleur marché et, d'autre part au fait de passer de trois à seulement deux fournisseurs principaux d'équipements 5G (Ericsson et Nokia), réduisant ainsi la concurrence. Certains opérateurs se verraient par ailleurs contraints de revoir une partie de leurs infrastructures, d'ores et déjà prêtes pour accueillir les équipements Huawei. Par exemple, en France, Bouygues Telecom et SFR seraient concernés. Le retard que prendraient de ce fait les pays de l'UE pourrait engendrer des surcoûts que la GSMA estime à 15 milliards d'euros en cinq ans (2020-2025) (Les Numériques 2019a).

Les spécifications techniques de la technologie 5G sont décrites dans les rapports de l'ANFR. Les particularités des faisceaux 5G seront à prendre en compte dans l'évaluation des expositions. Leurs implications sur les effets sanitaires potentiels seront développées dans le futur rapport d'expertise dédié (*cf.* paragraphe 1.2).

3 Travaux antérieurs sur les effets des expositions aux fréquences proches de celles de la 5G

3.1 Introduction

Depuis les premiers développements des technologies de communication sans fil, les conséquences sanitaires potentielles liées à l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences qu'elles émettent sont documentées par de nombreux travaux scientifiques. L'augmentation prévue, avec le déploiement de la 5G, du nombre de sources émettant des champs électromagnétiques dans de nouvelles bandes de fréquences, nécessite à présent d'évaluer les effets biologiques ou sanitaires éventuels qui leur seraient spécifiquement associés.

Les champs électromagnétiques radiofréquences (ou radiofréquences, ou encore fréquences radio) appartiennent - au même titre que les champs statiques, les champs basses fréquences, les rayonnements infrarouges ou la lumière visible, notamment - aux champs électromagnétiques non ionisants dont les fréquences se situent entre 0 et 300 GHz. L'Union internationale des télécommunications définit les champs électromagnétiques radiofréquences comme ceux dont la fréquence est comprise entre 3 kHz et 3 000 GHz (limite de l'infrarouge) correspondant à des longueurs d'onde de l'ordre du kilomètre à une centaine de micromètres (ITU 2012)⁷. En matière de fréquences attribuées à des services, la limite basse des radiofréquences est de 8,3 kHz et la limite haute de 275 GHz. Les fréquences situées au-delà de 275 GHz et jusqu'à 3 000 GHz, sont sans attribution de service, et ceci internationalement.

Lors des travaux d'expertise de l'Anses portant sur les effets sanitaires des radiofréquences publiés en 2009 (Afsset 2009), en 2013 (Anses 2013) et 2016 (Anses 2016), les groupes de travail nommés par l'Anses ont choisi de s'intéresser aux effets sanitaires potentiellement liés aux gammes de fréquences comprises entre 8,3 kHz et 6 GHz utilisées par les technologies nouvelles ou en développement. Le domaine des fréquences plus élevées, au-dessus de 20 GHz, a également été exploré par l'Anses à l'occasion de travaux concernant des dispositifs de contrôle non invasif utilisés par exemple dans les aéroports - les « scanners corporels » à ondes millimétriques - fonctionnant autour de 24 GHz.

Les principaux résultats de ces différents travaux sont présentés ci-dessous. Les considérations biophysiques sur la pénétration des ondes dans les tissus en fonction de leurs fréquences et les spécificités des bandes 5G sont également présentées dans ce chapitre.

3.2 Travaux antérieurs de l'Anses sur les effets sanitaires des radiofréquences de 8,3 kHz à 6 GHz

Les technologies du domaine des télécommunications, qui se sont largement développées depuis les dernières décennies, constituent la principale source d'exposition aux radiofréquences de la population générale ou en milieu de travail *via* des émetteurs fixes (antennes radio, télé, stations de base de téléphonie mobile, bornes Wi-Fi...) ou *via* des

⁷ ITU (2012). Règlement des radiocommunications.

équipements mobiles (téléphones mobiles, tablettes...) associés à des évolutions des comportements des utilisateurs. Les travaux d'expertise de l'Anses publiés en 2009 (Afsset, 2009), 2013 (Anses, 2013) et 2016 (Anses, 2016) se sont donc intéressés aux effets sanitaires potentiellement liés aux gammes de fréquences mises en œuvre par ces technologies, c'est-à-dire comprises entre 8,3 kHz et 6 GHz.

Les technologies les plus étudiées dans la littérature scientifique reflètent les matériels et usages les plus développés. Les expertises se sont donc appuyées essentiellement sur des données liées à l'exposition à la téléphonie mobile, entre 0,8 et 2,3 GHz environ, et aux signaux Wi-Fi à 2,45 GHz, fréquence proche de la bande de fréquence autour de 3,5 GHz dans laquelle la 5G sera premièrement déployée. Cependant, peu de publications ont étudié les effets d'exposition à des fréquences comprises entre 3 et 6 GHz.

En effet, parmi les études analysées dans l'expertise de l'Agence de 2009 (Afsset 2009), trois études ont été identifiées comme pouvant porter sur de telles fréquences. Il s'agissait, pour l'une d'entre elles, d'une étude expérimentale qui a exposé des volontaires à des ondes allant de 5,8 à 100 GHz afin d'étudier les effets sur les fonctions cardiovasculaires (Kantz *et al.* 2005). Les deux autres études portaient sur des travailleurs exposés à des radars émettant à des fréquences comprises entre 1 et 10 GHz (Degrave *et al.* 2009) ou en charge de la maintenance et de la réparation d'antennes-relais de téléphonie mobile émettant à des fréquences de 150 MHz, 450 MHz, 900 MHz, 6 GHz et 40 GHz (Maes, Van Gorp, et Verschaeve 2006).

Dans l'expertise de 2013 (Anses 2013), deux études parmi celles analysées portaient sur des expositions à des fréquences comprises entre 3 et 6 GHz. L'une était une étude expérimentale sur les effets de l'exposition de rats à une large bande de 100 MHz à 3 GHz (Gathiram, Kistnasamy, et Laloo 2009). La seconde était une étude observationnelle du suivi de santé des personnels employés à l'ambassade américaine à Moscou, qui ont été exposés à des rayonnements micro-ondes de 2,5 à 4 GHz entre 1953 et 1976 (Elwood 2012).

Dans l'expertise de 2016 (Anses 2016) aucune étude analysée ne portait sur des expositions à des fréquences comprises entre 3 et 6 GHz.

Toutefois, concernant l'exposition des personnes à des signaux dans la bande de fréquence 3,4 - 3,8 GHz, l'Anses soulignait, dans son rapport d'expertise publié en 2013, qu'en mai 2011, 19 acteurs bénéficiaient encore d'autorisations d'émission de boucle locale radio (BLR) en France métropolitaine dans cette bande de fréquences. La majorité des déploiements correspond à des projets réalisés dans le cadre de réseaux d'initiative publique visant à apporter le haut débit fixe dans des zones non desservies à ce jour. La technologie de réseau sans fil pour la BLR la plus courante est celle de la norme WiMAX⁸ (*Worldwide interoperability for Microwave Access*).

⁸ La norme WiMAX est basée sur la norme IEEE 802.16. Elle permet de transmettre des débits de plusieurs dizaines de Mbits/s sur des rayons de couverture de quelques dizaines de kilomètres. L'exposition des personnes à cette technologie est comparable, pour les stations de base WiMAX en sens descendant (*Downlink*)⁸, à celle générée par les antennes relais de téléphonie mobile. Pour le sens montant (*Uplink*), deux cas peuvent apparaître :

- cas de la box à la maison : l'antenne WiMAX est déportée sur le toit par exemple et les communications se font en Wi-Fi entre les appareils et la box. L'exposition provient essentiellement du Wi-Fi, et est donc faible ;
- cas d'un appareil avec WiMAX intégré (ou sur clé) ; l'exposition est plus importante que celle provenant d'un système Wi-Fi équivalent, car la puissance de l'émetteur, proche, est plus élevée.

WiMAX désigne un standard de communication sans fil. Le WiMAX, qui couvre un ensemble de normes différentes pour les systèmes fixes ou mobiles est une technologie aujourd'hui principalement utilisée pour les MAN (*Metropolitan Area Network*). Il permet notamment aux zones rurales de se doter d'une connexion internet haut débit.

3.3 Travaux antérieurs de l'Anses sur les effets sanitaires des radiofréquences au-delà de 20 GHz

Au-delà de 20 GHz et jusqu'à 300 GHz, les rayonnements radiofréquences appartiennent à la bande des ondes dites « millimétriques », par référence à l'ordre de grandeur des longueurs d'onde associées. Les dispositifs utilisant ces fréquences les plus élevées des radiofréquences et qui peuvent occasionner aujourd'hui une exposition des personnes sont, pour l'essentiel, les portiques à ondes millimétriques (détecteurs de sûreté utilisés dans les aéroports notamment), qui utilisent des fréquences variant de 24 à 30 GHz (proches de la bande de fréquence autour de 26 GHz dans laquelle la 5G sera déployée) et certains faisceaux hertziens et radars dont les fréquences se situent aux alentours de 50 GHz.

L'Anses a mené des travaux sur les effets des expositions à des fréquences supérieures à 20 GHz dans le cadre de deux expertises. La première portait sur l'exposition au scanner corporel à ondes millimétriques ProVision 100 utilisé dans les aéroports et émettant dans la bande de fréquence 24 - 30 GHz (Afsset 2010). La seconde portait sur l'exposition au scanner corporel à ondes millimétriques Eqo utilisé également dans les aéroports et qui repose sur l'utilisation de fréquences autour de 24 GHz (Anses 2012).

Dans ces deux expertises, aucune étude portant sur des fréquences comprises entre 24 et 30 GHz n'a été identifiée. Les effets des ondes millimétriques ont été largement étudiés dans la littérature, mais pour les fréquences comprises entre 40 et 60 GHz. Les expertises de l'Anses sur les scanners corporels se sont donc appuyées sur ces études disponibles suivant les recommandations du groupe de travail de l'expertise de 2010 qui avait établi qu'il est « concevable de supposer que les effets biologiques potentiels des champs électromagnétiques dans cette gamme de fréquences [autour de 30 GHz] sont similaires à ceux des champs électromagnétiques à des fréquences légèrement plus élevées (comprises entre 40 et 60 GHz) ».

3.4 Considérations biophysiques sur la pénétration des champs électromagnétiques dans les tissus

La profondeur de pénétration des ondes dans les tissus humains dépend des propriétés diélectriques de ces derniers, à savoir leur conductivité⁹ et leur permittivité relative¹⁰, qui toutes deux varient en fonction de la fréquence des rayonnements impliqués. La profondeur de pénétration est plus importante dans les tissus ayant une faible teneur en eau tels que la graisse et l'os que dans ceux ayant une forte teneur en eau tels que le muscle ou la peau (Health Protection Agency 2012). Par ailleurs, les propriétés diélectriques varient en fonction de la fréquence des champs électromagnétiques auxquels les tissus sont exposés : la permittivité relative diminue lorsque la fréquence augmente, tandis que la conductivité augmente (Wu, Rappaport, et Collins 2015a). À titre d'exemples, le Tableau 1 montre la variation de la conductivité des tissus humains en fonction de leur nature et de la fréquence d'exposition, et la

⁹ La conductivité d'un tissu biologique correspond à son aptitude à laisser les charges électriques se déplacer sous l'action d'un champ électrique. Elle est variable en fonction de la fréquence du champ. Dans le système international des unités, elle s'exprime en Siemens par mètre (S/m ou Sm⁻¹).

¹⁰ La permittivité d'un tissu biologique est une propriété physique qui décrit sa réponse à un champ électrique appliqué. D'une manière générale, la permittivité n'est pas une constante : elle varie suivant la fréquence du champ appliqué, la teneur en eau du tissu, sa température, et d'autres paramètres. Elle peut être calculée en mesurant le comportement des ondes lorsqu'elles entrent en contact avec le milieu biologique ou le traversent. Pour représenter la permittivité d'un milieu autre que le vide, on utilise la grandeur appelée « permittivité relative » qui est définie comme le rapport de la permittivité du tissu biologique à celle du vide.

Figure 2 présente la variation des propriétés diélectriques de la peau humaine (non humide) en fonction de la fréquence d'exposition.

Tableau 1 : Conductivité des tissus du corps humain (en Sm⁻¹) en fonction de la fréquence

Fréquence	Graisse	Os	Muscle	Peau
150 MHz	0,04	0,07	0,70	0,50
450 MHz	0,04	0,10	0,80	0,70
835 MHz	0,05	0,14	0,90	0,80
1,8 GHz	0,08	0,28	1,30	1,20
2,45 GHz	0,10	0,39	1,70	1,50
3 GHz	0,13	0,51	2,10	1,70
5 GHz	0,24	0,96	4,00	3,10
10 GHz	0,58	2,13	10,60	8,01

Source : Rapport de la « Health Protection Agency » (avril 2012)

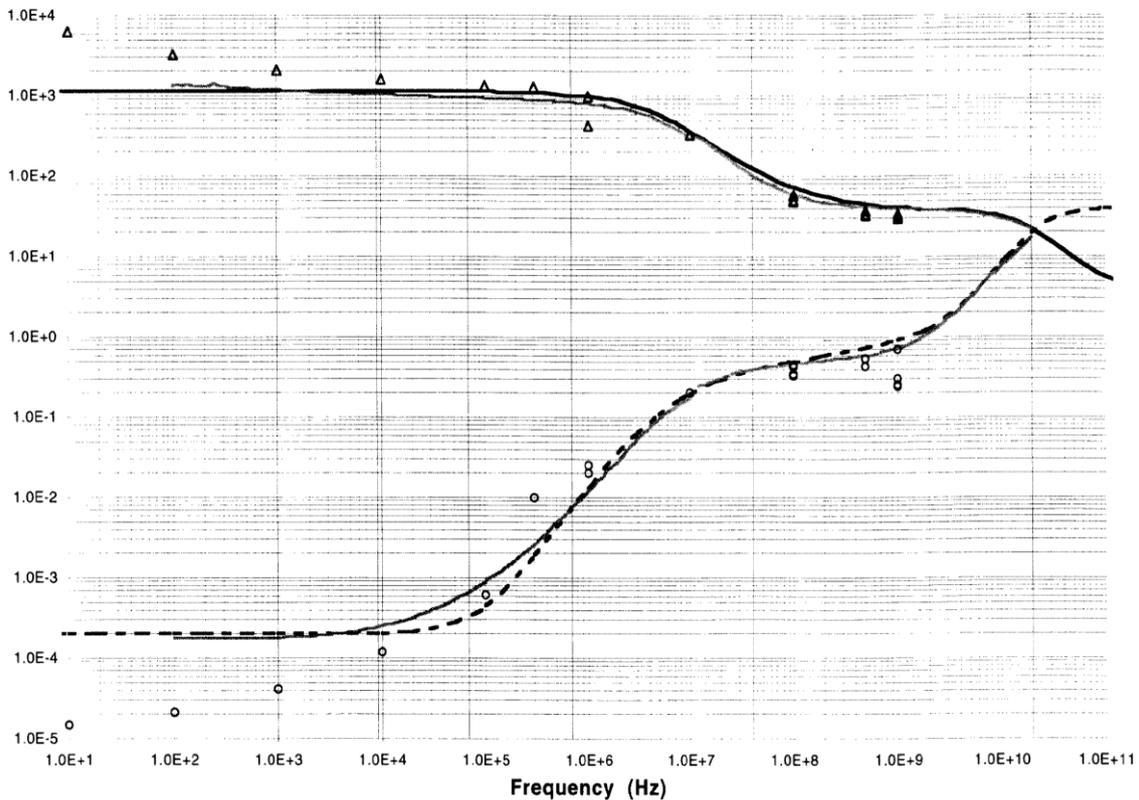


Figure 2 : Modèle prédictif de la variation de la permittivité (en haut) et de la conductivité (en bas) de la peau (sèche) en fonction de la fréquence du champ électromagnétique

Source : (Gabriel, Lau, et Gabriel 1996)

La physique des interactions entre les rayonnements électromagnétiques et les propriétés diélectriques des tissus biologiques implique que plus la fréquence des ondes électromagnétiques augmente, plus les ondes sont absorbées par les couches superficielles de la peau et plus la profondeur de pénétration de ces ondes dans l'organisme diminue, comme cela est illustré dans la Figure 3.

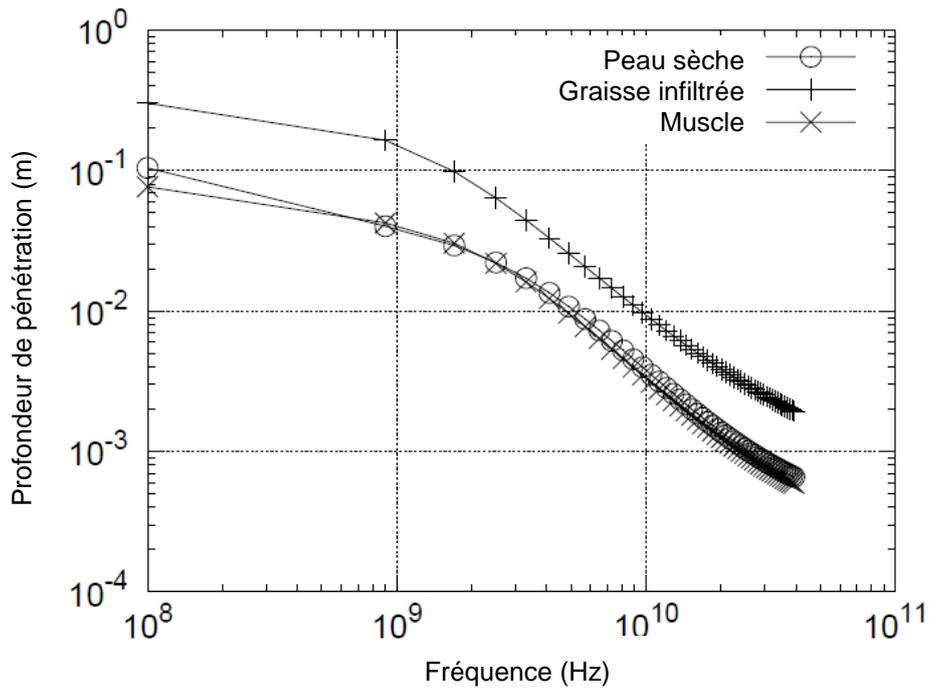


Figure 3 : Évolution de la profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques dans la peau sèche, la graisse et les muscles, en fonction de la fréquence (100 MHz à 40 GHz), suivant le modèle Cole-Cole

Source : (Gabriel, Lau, et Gabriel 1996)

Considérant l'épaisseur de la peau humaine (entre 0,5 mm (paupières) et 4 à 5 mm (haut du dos notamment) (Dubertret)), la diminution de la profondeur de pénétration du champ électromagnétique induit, pour des fréquences élevées (plusieurs GHz), un dépôt d'énergie qui se limite à ses couches superficielles (profondeur de pénétration de quelques mm autour de 10 GHz ; cf. Figure 3). C'est pour cette raison qu'à de telles fréquences, les restrictions de base qui protègent contre les risques sanitaires avérés des radiofréquences, à savoir l'échauffement des tissus (cf. Annexe 4), ne sont plus exprimées en débit d'absorption spécifique (DAS en W/kg, grandeur volumique) mais en densité surfacique de puissance (en W/m²). Selon les organismes qui ont produit des lignes directrices pour l'établissement de valeurs limites d'exposition, la fréquence de transition entre ces deux grandeurs n'est pas la même. Pour l'IEEE (IEEE 2005), elle est de 3 GHz, pour la FCC (FCC 2010) elle est de 6 GHz. Pour l'Icnirp, elle était de 10 GHz d'après les recommandations de 1998 (ICNIRP 1998), mais est passée à 6 GHz dans la proposition de mise à jour de ces recommandations en 2018 (ICNIRP 2018), en considérant qu'au-delà de environ 6 GHz, l'échauffement survient principalement au niveau de la peau. Cependant, aucune autre justification n'est fournie concernant cette modification.

3.5 Spécificité des bandes de fréquences utilisées par la technologie 5G pour l'évaluation des risques sanitaires

Depuis les dernières décennies, de nombreux efforts de recherche ont été effectués pour caractériser l'exposition des populations aux technologies sans fil et étudier les éventuels effets associés. Comme nous l'avons vu précédemment, la recherche s'est principalement concentrée sur les champs électromagnétiques de fréquences inférieures à 3 GHz, correspondant aux sources de radiocommunication auxquelles le grand public est le plus exposé. En ce qui concerne les fréquences plus élevées, les données de la recherche sont encore peu nombreuses, ce qui est préjudiciable pour l'étude de leurs conséquences éventuelles sur la santé des populations et compte tenu de leurs utilisations à venir.

Étant donné les considérations biophysiques sur la pénétration des rayonnements électromagnétiques dans les tissus humains, et les travaux déjà réalisés par l'Anses dans le domaine de l'évaluation des risques liés à l'exposition aux radiofréquences exposés ci-dessus, il paraît pertinent de considérer deux domaines d'études séparément : les risques liés aux fréquences utilisées dans le cadre des premiers déploiements de la technologie 5G en France, autour de 3,5 GHz d'une part, et les fréquences qui seront utilisées ultérieurement, autour de 26 GHz d'autre part. Les modalités d'exposition des tissus et les effets sanitaires potentiellement associés seraient *a priori* différents.

Dans ce contexte, et afin de compléter les données déjà disponibles rappelées ci-dessus, une recherche bibliographique a été menée afin d'identifier les publications scientifiques portant sur l'étude d'effets biologiques ou sanitaires potentiels en lien avec une exposition aux champs électromagnétiques, spécifiquement dans les bandes de fréquences [3 - 4] GHz pour la bande autour de 3,5 GHz et [24 - 60] GHz pour la bande autour de 26 GHz. En effet, pour cette seconde bande de fréquences, étant donné le premier rapport sur les scanners corporels (Anses 2010) établissant qu'il est « concevable de supposer que les effets biologiques potentiels des champs électromagnétiques dans cette gamme de fréquences [autour de 30 GHz] sont similaires à ceux des champs électromagnétiques à des fréquences légèrement plus élevées (comprises entre 40 et 60 GHz) » (*cf.* section 3.4), il a semblé opportun d'étendre la borne supérieure d'intérêt à 60 GHz pour la recherche bibliographique.

4 Recherche bibliographique relative aux effets biologiques et sanitaires éventuels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par la technologie 5G

4.1 Matériel et Méthodes

4.1.1 Analyse de la bibliographie des précédentes expertises de l'Anses

Dans un premier temps, une analyse des publications recensées dans le cadre des expertises de l'Anses sur les effets sanitaires des radiofréquences de 2009 (Anses2009), 2013 (Anses 2013) et de 2016 (Anses 2016) d'une part, et des expertises sur les scanners corporels (Afsset 2010, Anses 2012) d'autre part, a été effectuée. L'objectif était d'identifier, parmi elles, celles qui concernaient spécifiquement les bandes de fréquences [3 – 4] GHz et/ou [24 – 60] GHz.

4.1.2 Recherche de la bibliographie publiée plus récemment

4.1.2.1 Algorithme de recherche

Dans un deuxième temps, une recherche bibliographique a été effectuée en interrogeant les moteurs de recherche *Scopus*, *PubMed* et *EMF-Portal* avec les deux algorithmes de recherche suivants, l'un pour la bande 3,5 GHz et l'autre pour la bande 26 GHz :

- Bande de fréquences 3,5 GHz

(Wimax OR Wifimax OR "S-band" OR "S band" OR "fifth generation" OR "5G network" OR "5G cellular network" OR "5G mobile system") AND expos*.

- Bande de fréquences 26 GHz

("millimeter wave" OR "millimeter-wave" OR "mm wave" OR "mm-wave" OR mmw OR "k band" OR "k-band" OR "ka band" OR "ka-band" OR "radio-relay" OR "fifth generation" OR "5G network" OR "5G cellular network" OR "5G mobile system") AND expos*.

Le terme « expos* » a été intégré dans les requêtes afin de restreindre la recherche aux études traitant d'une situation d'exposition à des ondes électromagnétiques, incluant celles s'intéressant aux effets biologiques et sanitaires potentiels. Considérant le fait qu'aucun effet biologique ou sanitaire particulier n'était ciblé dans cette recherche, aucun terme associé à des effets potentiels n'a été introduit, afin d'éviter un ciblage involontaire.

Les termes ont été recherchés dans les titres, abstracts et mots-clés dans le cas de l'utilisation de *Scopus*, base de données couvrant une très large variété de domaines de recherche, et dans l'intégralité des documents dans le cas de l'utilisation de *PubMed* et *EMF-Portal*, bases de données spécialisées.

La recherche a été limitée aux articles publiés en français ou en anglais entre le 1^{er} janvier 2012, date de fin de la recherche bibliographique des précédents rapports de l'Anses, et avril 2019 (les dernières recherches pour l'inclusion de publications dans le corpus ont été effectuées le 18 mars 2019 sous *Scopus* et *PubMed* et le 5 avril 2019 sous *EMF Portal*).



En complément de cette recherche *via* les algorithmes, ont été ajoutées au corpus d'études des publications qui ont été transmises à l'Agence par des membres du Comité de dialogue « radiofréquences et santé » de l'Anses : la Fédération française des Télécoms (FFTe) et l'Association Priartem.

4.1.2.2 Mode de sélection des articles

Après suppression des doublons, les publications intégrées au corpus d'études ont été triées en deux étapes, d'abord sur la base de la lecture du titre et du résumé, puis sur la base de la lecture du texte intégral.

Les critères d'inclusion des articles étaient les suivants :

- (1) articles originaux publiés dans des revues à comité de lecture ;
- (2) articles rédigés en anglais ou en français ;
- (3) fréquences étudiées comprises dans l'intervalle [3 - 4] GHz pour la bande autour de 3,5 GHz et [24 - 60] GHz pour la bande autour de 26 GHz (*cf.* section 3.4) ;
- (4) études traitant d'effets biologiques ou sanitaires, qu'ils soient délétères ou bénéfiques ;
- (5) études sur le vivant (*in vitro*, *in vivo*, chez l'humain, sur les plantes) ou études de modélisation.

4.1.3 **Analyse des revues de la littérature publiées**

Dans un troisième temps, une analyse des références bibliographiques des revues de la littérature publiées sur le sujet et identifiées *via* les recherches précédentes a été effectuée. Pour des contraintes temporelles ce travail n'a aujourd'hui été réalisé qu'à partir des revues et non pas pour les bibliographies de tous les articles originaux précédemment identifiés. Le but était d'identifier d'éventuelles études supplémentaires pertinentes, sans restriction de date de publication. La sélection des articles a été faite sur la base de la lecture du titre puis de la lecture du résumé ou du texte intégral lorsque cela s'avérait nécessaire. Les critères d'inclusion et d'exclusion étaient les mêmes que ceux décrits ci-dessus.

4.2 Résultats de la recherche bibliographique

4.2.1 Bande de fréquences [3 – 4] GHz

4.2.1.1 Sélection des études

4.2.1.1.1 *Analyse des précédents rapports de l'Anses*

Une étude portant sur les effets des expositions à des fréquences comprises entre 3 et 4 GHz a été identifiée dans le rapport « radiofréquences et santé » de 2009 (Afseet 2009) et une dans le rapport de 2013 (Anses 2013). Aucune étude supplémentaire n'a été retrouvée dans le rapport « exposition aux radiofréquences et santé des enfants » de 2016 (Anses 2016).

4.2.1.1.2 *Recherche de la bibliographie publiée plus récemment*

Après suppression des doublons, sur les 497 publications identifiées à partir des trois bases de données et des corpus d'études fournis par la FFTE et Priartem, quatre références ont été identifiées comme répondant potentiellement à la question de la recherche d'effets biologiques ou sanitaires associés à l'exposition à la bande de fréquences [3 - 4] GHz, suite à la lecture des titres et résumés (*cf.* Figure 4). Parmi les 494 articles exclus à ce stade de sélection, 290 étaient hors sujet (traitant des nanoparticules par exemple¹¹), 89 concernaient les champs électromagnétiques hors des bandes de fréquences d'intérêt, 73 s'intéressaient à la 5G mais concernaient les performances de la technologie, 29 portaient uniquement sur l'exposition sans s'intéresser à un effet biologique ou sanitaire associé et 13 portaient sur les questions de sécurité informatique des réseaux 5G. Après lecture du texte intégral des quatre articles, une seule publication a été sélectionnée ; les trois autres ne portaient pas sur un effet biologique ou sanitaire.

4.2.1.1.3 *Analyse des revues de la littérature publiées*

Aucune revue de la littérature concernant la bande de fréquence [3 – 4] GHz n'a été identifiée via les précédents rapports et la recherche bibliographique mais une étude portant sur cette bande de fréquences a été extraite de l'analyse des revues de la littérature portant sur la bande de fréquence [24 – 60] GHz (*cf.* ci-dessous).

4.2.1.1.4 *Résumé du nombre d'études incluses*

Suite aux trois étapes de sélection des études décrites ci-dessus, quatre études concernant la bande [3 – 4] GHz ont été identifiées. La Figure 4 illustre les différentes étapes de sélection et les résultats obtenus.

¹¹ Les radiofréquences peuvent être utilisées dans la fabrication de nanomatériaux par exemple.

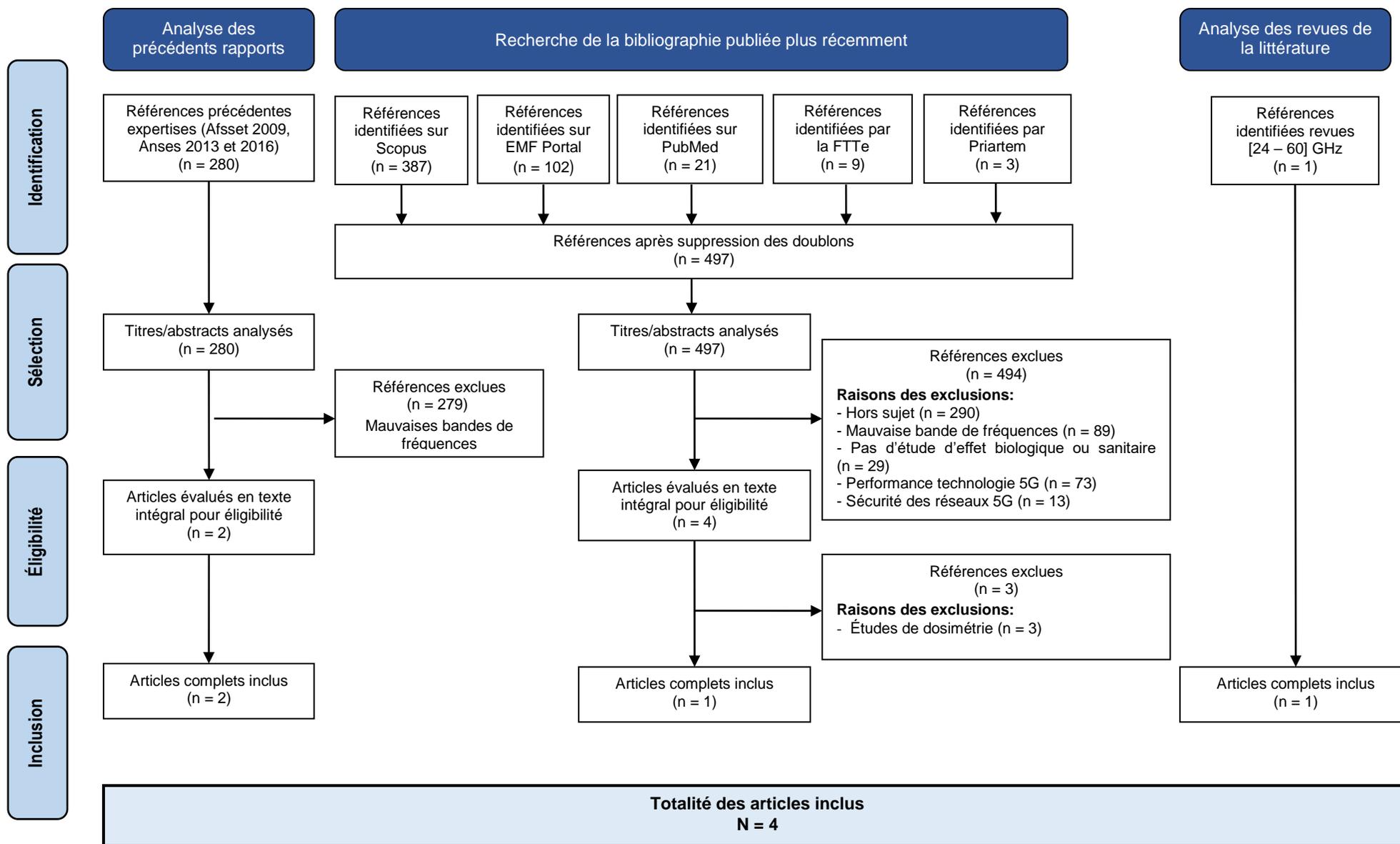


Figure 4 : Diagramme de la sélection des études - bande [3 – 4] GHz

4.2.1.2 Caractéristiques des études sélectionnées

Quatre études ont été identifiées dans le cadre de la recherche sur les effets biologiques et sanitaires éventuels liés à l'exposition dans la bande de fréquences 3,4-3,8 GHz. Dans la première, qui est une étude expérimentale réalisée *in vitro* (Hamnerius, Rasmuson, et Rasmuson 1985), des souches de bactéries Salmonelle et des embryons de drosophiles ont été exposés, entre autres, à la fréquence de 3,1 GHz. Les impacts sur les mutations ainsi que sur la survie des embryons de drosophiles ont été évalués. La deuxième étude (Degrave *et al.* 2009) porte sur des militaires ayant été exposés à des radars émettant à des fréquences comprises entre 1 et 10 GHz. La troisième (Wu *et al.* 2012) est une étude réalisée *in vivo* chez le rat mâle et porte sur des expositions à la « bande S », qui inclut des fréquences de 2 à 4 GHz. Les effets étudiés dans cette étude concernent le système reproducteur mâle. Enfin, la quatrième est une étude observationnelle du suivi de santé des personnels employés à l'ambassade américaine à Moscou, qui ont été exposés à des rayonnements micro-ondes de 2,5 à 4 GHz entre 1953 et 1976 (Elwood 2012).

4.2.2 Bande de fréquences [24 -60] GHz

4.2.2.1 Sélection des études

4.2.2.1.1 *Analyse des précédents rapports de l'Anses*

Aucune étude portant sur les effets des expositions à des ondes millimétriques dans les fréquences comprises entre 24 et 28 GHz n'a été identifiée dans les rapports des précédentes expertises portant sur les scanners corporels (Afsset 2010, Anses 2012). Toutefois, en considérant les fréquences jusqu'à 60 GHz, 27 études ont pu être extraites de ces rapports.

4.2.2.1.2 *Recherche de la bibliographie publiée plus récemment*

Sur les 1 041 études identifiées à partir des trois bases de données scientifiques ou fournies par la FfTe et Priartem, et après exclusion des doublons, 97 références potentiellement en lien avec la question des effets biologiques ou sanitaires associés à l'exposition à la bande de fréquences [24 – 60] GHz ont été retenues pour l'analyse du texte intégral (*cf.* Figure 5). Parmi les 944 références exclues à ce stade, 667 étaient hors sujet (traitant de recherches spatiales par exemple), 172 portaient sur les performances de la technologie 5G, 71 portaient sur les fréquences recherchées mais sans lien avec des effets biologiques ou sanitaires et 34 ne concernaient pas les bonnes bandes de fréquences (soit plus basses, soit plus élevées). Après lecture du texte intégral des 97 articles éligibles, lorsque celui-ci était disponible (il n'a pas pu être récupéré pour 6 références), 53 articles ont finalement été inclus dans le corpus d'études. Les raisons des 38 exclusions étaient les suivantes : pas d'étude d'un effet biologique ou sanitaire (n = 11) ; bande de fréquences plus élevées hors champ de recherche (n = 7) ou fréquences non indiquées (n = 1) ; absence d'exposition (n = 1) ; revue (n = 9) ; rédaction en langue étrangère non anglaise (n = 1) ; présence de doublons résiduels (n = 5) ; retrait des articles du journal (n = 2) et acte de congrès ne correspondant pas à un article scientifique (n = 1).

4.2.2.1.3 *Analyse des revues de la littérature publiées*

Au total, les références de 17 revues de la littérature ont été analysées : neuf issues de la recherche bibliographique (Zhadobov *et al.* 2011, Foster, Ziskin, et Balzano 2016, Le Dréan *et al.* 2013, Romanenko *et al.* 2017, Soghomonyan, Trchounian, et Trchounian 2016, Wu, Rappaport, et Collins 2015b, Di Ciaula 2018, Russell 2018, Ziskin 2013), sept identifiées parmi les références des huit précédentes revues (Debouzy *et al.* 2007, Pakhomov *et al.* 1998, Usichenko *et al.* 2006, Belyaev 2005, Pakhomov et Murphy 2000, Ryan *et al.* 2000, Vignal *et al.* 2009) et une ajoutée par les experts (Simko et Mattsson 2019).

Sur l'ensemble des références des 17 revues de la littérature, suite à la lecture des titres et à l'exclusion des doublons, 169 références ont été sélectionnées pour la lecture des abstracts et textes intégraux lorsque cela était nécessaire. Au final, 94 études répondant aux critères d'inclusion ont été ajoutées au corpus d'études. Les raisons des 75 exclusions étaient les suivantes : bande de fréquences trop élevée ou trop basse (n = 27) ; rédaction en langue étrangère non anglaise (n = 24) ; pas d'étude d'effet biologique ou sanitaire (n = 14) ; article rétracté (n = 2) ; fréquence non indiquée dans le corps de l'article (n = 2) ; pas d'étude de l'exposition aux ondes (n = 4) ; acte de congrès (n = 1) et article traitant de la performance de la technologie 5G (n = 1). La grande majorité de ces articles inclus (n = 89) a été publiée avant 2012 (n = 89). L'ensemble de ces articles portaient sur des fréquences de la bande [24 – 60] GHz.

4.2.2.1.4 *Résumé du nombre d'études incluses*

Suite aux trois étapes de sélection des études décrites ci-dessus, un total de 174 études concernant la bande [24– 60] GHz a été identifié. La Figure 5 illustre les différentes étapes de sélection et les résultats obtenus.

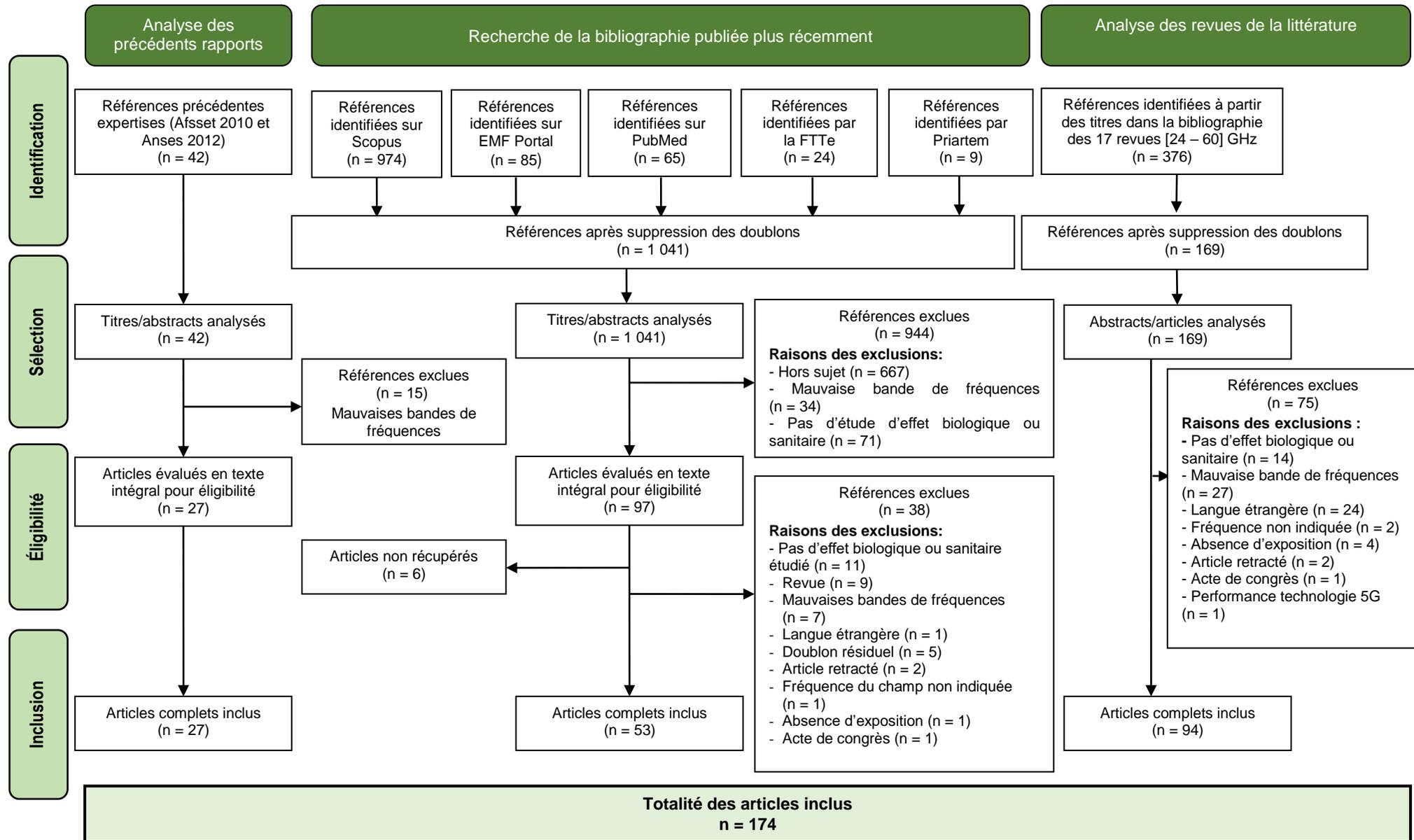


Figure 5 : Diagramme de la sélection des études - bande [24 – 60] GHz.

4.2.2.2 Caractéristiques des études sélectionnées

Les études retenues à l'issue de la procédure de sélection pour la bande de fréquences [24 – 60] GHz sont présentées dans ce rapport selon trois grands types d'effets : les effets génotoxiques, co-génotoxiques et sur la croissance tumorale (n = 18), les effets non cancérogènes sur le système nerveux (n = 37) et les autres effets (n = 119).

Les caractéristiques des 18 études concernant les éventuels effets génotoxiques ou co-génotoxiques et sur la croissance tumorale sont résumées dans le Tableau 2. Parmi ces études, la majorité sont des études réalisées *in vitro* (12 études sur 18) sur divers types de cellules humaines (kératinocytes, fibroblastes) ou lignées cellulaires humaines (leucémie, cancer du sein, mélanome, cellules épithéliales cornéennes ou de cristallin) ou sur des cellules de souris (kératinocytes, leucocytes) ou des lignées cellulaires de souris (mélanome). Ces études portent sur des expositions à des fréquences de 25 GHz (n = 3) ou dans la bande [40 – 60] GHz voire au-delà (n = 9) et s'intéressent aux effets génotoxiques (lésions de l'ADN, anomalies chromosomiques, micronoyaux, etc.) (n = 5), co-génotoxiques en lien avec l'exposition à d'autres agents cancérogènes (rayons X et produits chimiques) (n = 1) ou aux effets thermiques cytotoxiques sur les cellules cancéreuses (n = 6). Les six études réalisées *in vivo* portent sur les effets génotoxiques des ondes millimétriques aux fréquences autour de 40 et 50 GHz chez le rat ou la souris (n = 3) ou sur les effets sur les tumeurs de l'exposition à des fréquences de 40 ou 60 GHz chez des souris (n = 3).

Les études portant sur les effets non cancérogènes sur le système nerveux sont au nombre de 37 (cf. Tableau 3). Parmi elles, 15 sont des études réalisées *in vitro* sur divers types de cellules ou tissus animaux (neurones de mollusques, tissu cortical de rat, nerf sciatique de grenouille, lignée cellulaire de phéochromocytome de rat) ou sur des lignées cellulaires neuronales ou gliales humaines. Ces études portent sur les effets des ondes millimétriques dans la bande [40 – 60] GHz (en majorité 60 GHz) sur l'activité neuronale (n = 8), l'expression génique et l'abondance de protéines (n = 3), la physiologie cellulaire (n = 1) et le fonctionnement du nerf sciatique (n = 3). Les études réalisées *in vivo* sont au nombre de 17. Elles portent sur diverses espèces animales (rats, souris, lapins, écrevisses et sangsues) et s'intéressent aux effets des ondes millimétriques de fréquences comprises entre 35 et 60 GHz sur l'activité cérébrale (n = 6), la douleur (induction ou réduction, n = 8), la mémoire (n = 1) ou le fonctionnement des nerfs (n = 2). Enfin, cinq sont des études expérimentales réalisées chez l'humain et portent sur l'effet de l'exposition à des fréquences de 40 à 60 GHz voire au-delà sur la douleur.

Les autres effets concernent 119 des études sélectionnées (cf. Tableau 4). Il s'agit, pour la majorité, d'études réalisées *in vitro* (n = 71) sur divers types de cellules ou lignées cellulaires humaines (cellules souches mésenchymateuses, cellules d'épithélium buccal, kératinocytes, spermatozoïdes, cellules sanguines, lignée cellulaire de chondrosarcome ou de kératinocytes) ou animales (cellules souches mésenchymateuses de rat, chondrocytes de rat, cellules immunitaires de souris et de rat, cellules de moelle osseuse de rat, cellules rénales de singe et de hamster et ovocytes de batraciens), mais également sur des bactéries (n = 26), des levures en culture (n = 7) et des vésicules lipidiques (n = 11). Les études *in vivo* sont au nombre de 36 et portent sur différentes espèces animales (lapins, drosophiles, primates, rats et souris) et sur des végétaux (semences et graines germées). Dix des 119 études ont été réalisées à partir de la modélisation de tissus biologiques (peau principalement), et enfin, trois études concernent des expérimentations faites sur des volontaires humains. Les effets étudiés sont divers, ils concernent :

- les tissus cartilagineux et osseux (abondance de protéines (n = 4), calcium intracellulaire (n = 1), apoptose (n = 2), cycle et différenciation cellulaire (n = 3)) ;

- les tissus épithéliaux (expression génique, abondance de protéines et effets sur les noyaux et sur les jonctions intercellulaires (n = 7), chaleur ressentie et élévation de température de la peau (n = 11), cicatrisation et effet antiprurigineux (n = 5), lésions oculaires et élévation de la température oculaire (n = 10)) ;
- les levures (croissance, division et survie cellulaire (n = 7)) ;
- les bactéries (croissance cellulaire, mutations et survie (n = 9), configuration tridimensionnelle du génome (n = 7), communication intercellulaire et activité de la membrane cellulaire (n = 4)) ;
- les vésicules lipidiques artificielles (effets sur les membranes (n = 5), mobilité et forme (n = 3), hydratation des vésicules (n = 3)) ;
- le système rénal (n = 2) ;
- la polyténie des chromosomes chez la drosophile (n = 1) ;
- l'expression génique non ciblée (n = 2) ;
- le système reproducteur (n = 3) ;
- le système immunitaire (n = 16) ;
- le système cardio-vasculaire (n = 3) ;
- le système digestif (n = 2) ;
- les végétaux (n = 2).

Dans une seule étude, les fréquences d'exposition intègrent la bande [24,25 – 26,5] GHz (exposition aux fréquences des bandes radar K (18-26,5 GHz) et Ka (26,5-40 GHz)). Pour les autres études, les fréquences d'exposition les plus retrouvées sont celles supérieures à 40 GHz et allant jusqu'à 60 GHz voire au-delà (n = 83), suivies par les fréquences comprises entre 30 et 40 GHz (n = 30). Dans deux études, la fréquence est de 28 GHz. Dans quatre études, la bande de fréquences mentionnée est très large (supérieure à 3 GHz, de 2 à 60 GHz, 20 à 100 GHz et de 6 GHz à 1 THz). Enfin, dans deux études, les fréquences précises des ondes millimétriques ne sont pas fournies, mais les sources d'exposition étant des appareils thérapeutiques dont les fréquences d'émission sont généralement comprises dans la bande de fréquences recherchée, il est raisonnable de les considérer ici comme des publications d'intérêt.

À ce stade de l'expertise, les articles sélectionnés n'ont pas été analysés pour leur qualité. Celle-ci sera évaluée ultérieurement par les experts du groupe de travail mis en place par l'Anses.

Tableau 2 : Caractéristiques des études portant sur les effets génotoxiques, co-génotoxiques et sur la croissance tumorale liés à l'exposition aux ondes millimétriques dans la bande [24 – 60] GHz

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Bellossi <i>et al.</i> 2000)	France	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris saines Souris greffées avec des cellules de leucémie ou avec des cellules de tumeur de Lewis	60 GHz	Survie des souris greffées Croissance des tumeurs de Lewis Activité des souris saines
(Chidichimo <i>et al.</i> 2002)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire de cancer du sein Lignée cellulaire de leucémie Cellules saines	53,37-78,33 GHz	Effet thermique cytotoxique
(Radzievsky <i>et al.</i> 2004)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Suppression de la croissance des mélanomes
(Szabo <i>et al.</i> 2004)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Kératinocytes et cellules de mélanomes de souris et humaines	Fréquences millimétriques	Effet thermique cytotoxique
(Vijayalaxmi <i>et al.</i> 2004)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Potentiel génotoxique avec ou sans génotoxicité induite par traitement anti cancéreux
(Beneduci, Chidichimo, Tripepi, <i>et al.</i> 2005)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaine de cancer du sein	52-78 GHz	Effet thermique cytotoxique
(Beneduci, Chidichimo, De Rose, <i>et al.</i> 2005)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaine de mélanome	53,57-78,33; 51,05 et 65,0 GHz	Effet thermique cytotoxique
(Shanin <i>et al.</i> 2005)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats	37-53 GHz	Activité cytotoxique des cellules NK et synthèse de la protéine c-fos
(Logani <i>et al.</i> 2006)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Inhibition des métastases tumorales renforcées par le cyclophosphamide (CPA), un médicament anticancéreux
(Beneduci <i>et al.</i> 2007)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaine de leucémie érythromyéloïde	53-78 GHz	Effet thermique cytotoxique
(Beneduci 2009)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaine de mélanomes	42,20 et 53,57 GHz	Effet thermique cytotoxique
(Kesari et Behari 2009)	Inde	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Wistar males	50 GHz	Effets génotoxiques
(Koyama <i>et al.</i> 2014)	Japon	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée de cellules épithéliales humaines cornéennes et du cristallin	60 GHz	Effets génotoxiques
(Gapeyev et Lukyanova 2015)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Leucocytes de sang périphérique de souris	42,2 GHz	Effets co-génotoxiques (RX et agents chimiques)
(Gallerano <i>et al.</i> 2015)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Fibroblastes cutanés humains	25,28 GHz	Effets génotoxiques
(Koyama <i>et al.</i> 2016)	Japon	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée de cellules épithéliales	60 GHz	Effets génotoxiques

(Franchini, Ceccuzzi, <i>et al.</i> 2018)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	humaines cornéennes et du cristallin Fibroblastes cutanés fœtaux et adultes humains	25 GHz	Effets génotoxiques
(Franchini, Regalbutto, <i>et al.</i> 2018)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Fibroblastes cutanés fœtaux et adultes humains	25 GHz	Effets génotoxiques

Tableau 3 : Caractéristiques des études portant sur les effets éventuels non cancérogènes sur le système nerveux liés à l'exposition aux ondes millimétriques dans la bande [24 – 60] GHz

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
Expression génique, croissance des neurites et activité neuronale					
(Khramov <i>et al.</i> 1991)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Écrevisses	34-78 GHz	Activité électrique neuronale
(Alekseev et Ziskin 1999)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Neurones de mollusques	60,22-62,22 GHz ; 61,22 GHz et 75 GHz	Effets sur les courants de type-A K+ et Ca2+
(Vorobyov et Khramov 2002)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins	55-75 GHz	Activité électrique cérébrale
(Minasyan <i>et al.</i> 2007)	Arménie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats	37,50-53,57 GHz	Activité électrique neuronale
(Zhadobov <i>et al.</i> 2007)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire cérébrale humaine	60 GHz	Expression génique
(Nicolas Nicolaz, Zhadobov, Desmots, Ansart, <i>et al.</i> 2009)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Réticulum endoplasmique de cellules humaines gliales	59,16 ; 60,43 et 61,15 GHz	Expression de protéines de stress
(Nicolas Nicolaz, Zhadobov, Desmots, Sauleau, <i>et al.</i> 2009)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaine de cellules gliales	60,4 GHz	Physiologie cellulaire
(Siegel et Pikov 2010)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire neuronale humaine	60 GHz	Activité neuronale
(Pikov <i>et al.</i> 2010)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Tranches de tissu cortical de rats Sprague Dawley juvéniles	60,125 GHz	Activité neuronale et propriétés de la membrane plasmique
(Xie <i>et al.</i> 2011)	Chine	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Sprague-Dawley	35 GHz	Activité électrique cérébrale
(Romanenko <i>et al.</i> 2013)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Ganglions neuronaux de sangsues	60 GHz	Activité neuronale
(Shiina <i>et al.</i> 2014)	Japon	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire PC12 issue de phéochromocytome de rat	60 GHz	Croissance des neurites
(Romanenko <i>et al.</i> 2014)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Sangsues	60 GHz	Activité neuronale
(Sivachenko <i>et al.</i> 2016)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Wistar mâles	40 GHz	Activité neuronale
(Haas, Le Page, Zhadobov, Boriskin, <i>et al.</i> 2016)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules humaines NS-1 de phénotype neuronal	60,4 GHz	Abondance de protéines
(Haas, Le Page, Zhadobov, Sauleau, <i>et al.</i> 2016)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules humaines NS-1 de phénotype neuronal	60,4 GHz	Croissance des neurites

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Haas <i>et al.</i> 2017)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules humaines NS-1 de phénotype neuronal	60,4 GHz	Métabolisme de la dopamine dans les cellules neuronales
(D'Agostino <i>et al.</i> 2018)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Modèle artificiel d'axone	53,37 GHz	Transmission de l'information nerveuse
Mémoire et comportement					
(Samoilov <i>et al.</i> 2015)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Wistar mâles	54 GHz	Mémoire
Douleur					
(Rojavin et Ziskin 1997)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Augmentation de la durée d'anesthésie induite par kétamine et hydrate de chloral
(Logani, Liu, et Ziskin 1999)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	53,6 et 42,2 GHz	Effet sur l'hypersensibilité cutanée
(Radzievsky <i>et al.</i> 1999)	USA	Expérimentale – chez l'humain	Hommes volontaires en bonne santé	42,25 GHz	Effets hypoalgésiques
(Rojavin <i>et al.</i> 2000)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris mâles albinos	61,22 GHz	Nociception
(Radzievsky <i>et al.</i> 2000)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Effets hypoalgésiques
(Radzievsky <i>et al.</i> 2001)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Effets hypoalgésiques
(Novikova <i>et al.</i> 2002)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Sprague Dawley	42,19 GHz	Shéma d'expression des gènes c-fos après stimulation mécanique nocive et après stimulation mécanique nocive + ondes millimétriques
(Usichenko et Herget 2003)	Allemagne	Expérimentale - chez l'humain	Patients atteints de maladies diffuses du tissu conjonctif	54-78 GHz	Effets analgésiques
(Usichenko, Ivashkivsky, et Gizhko 2003)	Allemagne	Expérimentale - chez l'humain	Patients avec arthrite rhumatoïde	54-64 GHz	Douleur induite par le traitement par ondes millimétriques
(Radzievsky <i>et al.</i> 2004)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Effets hypoalgésiques
(Radzievsky <i>et al.</i> 2008)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,25 ; 53,57 et 61,22 GHz	Effets hypoalgésiques
(Chuyan et Tribat 2016)	Russie	Expérimentale - chez l'humain	Femmes volontaires	42,4 GHz	Fonction des fibres sensorielles peptidergiques
(Partyla <i>et al.</i> 2017)	Canada	Expérimentale - chez l'humain	Hommes volontaires	42,25 GHz	Effets hypoalgésiques

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
Système nerveux périphérique					
(Kolossova <i>et al.</i> 1996)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats	54 GHz	Régénération du nerf sciatique
(Pakhomov <i>et al.</i> 1997b)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Nerf sciatique de grenouille isolé	40-52 GHz	Statut fonctionnel du nerf Amplitude et latence du pic du potentiel d'action
(Pakhomov <i>et al.</i> 1997a)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Nerf sciatique de grenouille isolé	41,14 ; 41,54 ; 45,89-45,93 et 50,8-51,0 GHz	Potentiels d'action
(Pakhomov <i>et al.</i> 1997c)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Nerf sciatique de grenouille isolé	41,34 GHz	Fonction du nerf
(Alekseev <i>et al.</i> 2010)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,25 GHz	Activité électrique du nerf sural

Tableau 4 : Caractéristiques des études portant sur les autres effets éventuels liés à l'exposition aux ondes millimétriques dans la bande [24 – 60] GHz

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
Tissus osseux et cartilagineux					
(Wu <i>et al.</i> 2009)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules souches mésenchymateuses de rats	30-40 GHz	Différenciation cellulaire en chondrocytes
(Li, Du, Liu, Chen, <i>et al.</i> 2010)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Chondrocytes de rats Sprague-Dawley	30-40 GHz	Abondance de protéines
(Li, Du, Liu, Wu, <i>et al.</i> 2010)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Chondrocytes de rats Sprague-Dawley	30-40 GHz	Abondance de protéines
(Xia <i>et al.</i> 2012)	Chine	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins blancs néozélandais	30-40 GHz	Abondance de protéines
(Wu <i>et al.</i> 2011)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Chondrocytes de rats Sprague-Dawley	30-40 GHz	Apoptose
(Li <i>et al.</i> 2011)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Chondrocytes de rats Sprague Dawley	30-40 GHz	Morphologie cellulaire Abondance de protéines
(Li, Ye, Cai, <i>et al.</i> 2012)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaines de chondrosarcome	Ondes millimétriques	Apoptose des chondrocytes
(Li, Ye, Yu, <i>et al.</i> 2012)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Chondrocytes de rats Sprague-Dawley	30-40 GHz	Cycle cellulaire
(Yoon <i>et al.</i> 2014)	Corée	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules souches mésenchymateuses humaines	30 GHz	Différenciation cellulaire
(Ye <i>et al.</i> 2015)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Chondrocytes de rats Sprague-Dawley	Ondes millimétriques	Calcium intracellulaire
Tissus épithéliaux					
(Korpan, Resch, et Kokoschinegg 1994)	Ukraine	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins	37 GHz	Cicatrisation
(Korpan et Saradeth 1995)	Ukraine	Expérimentale – chez l'humain	Patients ayant subi une chirurgie abdominale	37 GHz	Cicatrisation
(Detlavs <i>et al.</i> 1996)	Lettonie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Wistar	53,53 et 42,19 GHz	Cicatrisation
(Blick <i>et al.</i> 1997)	USA	Expérimentale – chez l'humain	Volontaires sains exposés au milieu du dos	2,45 ; 7,5 ; 10 ; 35 et 94 GHz	Chaleur ressentie
(Shckorbatov <i>et al.</i> 1998)	Ukraine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules humaines d'épithélium bucal	42,2 GHz	Effet sur l'état des noyaux des cellules
(Rojavin <i>et al.</i> 1998)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Effet antiprurigineux
(Kues <i>et al.</i> 1999)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins et primates	60 GHz	Modifications des tissus oculaires
(Szabo <i>et al.</i> 2001)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire HaCaT de	42,25 et 61,2 GHz	Abondance de protéines de choc

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
			kératinocytes humains		thermique Effet sur les jonctions communicantes intercellulaires
(Chalfin <i>et al.</i> 2002)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Singes juvéniles	35 et 94 GHz	Lésions cornéennes
(Szabo <i>et al.</i> 2003)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire HaCaT de kératinocytes humains	61,2 GHz	Stress cellulaire Abondance de protéines de choc thermique
(Foster <i>et al.</i> 2003)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Primates	35 et 94 GHz	Lésions cornéennes
(Chen <i>et al.</i> 2004)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire humaine de kératinocytes	30,16 GHz	Effets sur les jonctions communicantes intercellulaires
(Szabo <i>et al.</i> 2006)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignée cellulaire HaCaT de kératinocytes humains Lymphocytes T humains Lignée cellulaire de mélanome de souris	42,25 GHz	Induction de l'extériorisation réversible de la phosphatidylsérine impliquée dans les processus thrombogènes
(Alekseev et Ziskin 2009)	USA	Modélisation	Modèles de peau homogène ou multicouches (peau, graisse, muscles)	42,2, 53,6 et 61,2 GHz	Elévation de la température de la peau
(Kojima <i>et al.</i> 2009)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	60 GHz	Lésions oculaires
(Kojima, Hasanova, Suzuki, <i>et al.</i> 2012)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	40 GHz	Elévation de température oculaire
(Kojima, Hasanova, Sasaki, <i>et al.</i> 2012)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	40 GHz	Elévation de température Lésions oculaires
(Alekseev, Ziskin, et Fesenko 2012)	Russie	Expérimentale – chez l'humain	Volontaires sains exposés sur les avant-bras	42, 53, 61 GHz	Elévation de la température de la peau
(Le Quement <i>et al.</i> 2012)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Kératinocytes primaires humains	60 GHz	Expression génique
(Kojima, Tsai, Suzuki, Okuno, <i>et al.</i> 2014)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	40 GHz	Elévation de température Lésions oculaires
(Kojima, Tsai, Suzuki, Sasaki, <i>et al.</i> 2014)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	40 GHz	Elévation de température oculaire
(Habauzit <i>et al.</i> 2014)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Kératinocytes primaires humains	60 GHz	Expression génique
(Le Quement <i>et al.</i> 2014)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Lignées cellulaires de mélanocytes et de kératinocytes humains	60 GHz	Abondance de protéines
(Kojima <i>et al.</i> 2015)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	18-26,5 GHz (bande K) et 26,5-40 GHz (bande Ka)	Elévation de température oculaire

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Zhadobov <i>et al.</i> 2015)	France	Modélisation	Modèle de peau	20-100 GHz	Focalisation de l'augmentation de température
(Mahamoud <i>et al.</i> 2016)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Kératinocytes primaires néonataux humains Lignée cellulaire HaCaT de kératinocytes humains	60 GHz	Expression génique
(Shrivastava et Rama Rao 2017)	Inde	Modélisation	Modèles homogènes de tête et de cuisse antérieure humaines	60 GHz	Elévation de la température de la peau
(Foster et Colombi 2017)	Suède	Modélisation	Modèle de peau homogène	2-60 GHz	Elévation de la température de la peau
(He <i>et al.</i> 2018)	Chine	Modélisation	Modèle de tête humaine multicouches (peau, graisse, muscle, crâne, dure-mère, liquide cérébro-spinal)	28 GHz	Elévation de la température de la peau
(Shrivastava, Rao, et Abe 2018)	Afrique du Sud	Modélisation	Modèles homogènes de tête et de cuisse antérieure humaines	60 GHz	Elévation de la température de la peau
(Kojima <i>et al.</i> 2018)	Japon	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Lapins pigmentés néerlandais	40 GHz	Elévation de température Lésions oculaires
(Hamed et Maqsood 2018)	Pakistan	Modélisation	Modèle de peau homogène ou multicouches (peau, graisse, muscles)	28 ; 40 et 60 GHz	Elévation de la température de la peau
(Foster <i>et al.</i> 2019)	USA	Modélisation	Modèle de peau homogène	> 3 GHz	Elévation de la température de la peau
(Li <i>et al.</i> 2019)	Japon	Modélisation	Modèle de peau multicouches (derme, épiderme, gras, muscles)	6 GHz à 1 THz	Elévation de la température de la peau
Bactéries et levures					
(Grundler, Keilmann, et Fröhlich 1977)	Allemagne	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	41,8-42 GHz	Croissance cellulaire
(Grundler et Keilmann 1978)	Allemagne	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	41,8-42 GHz	Croissance cellulaire
(Grundler <i>et al.</i> 1982)	Allemagne	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	41,8-42 GHz	Croissance cellulaire
(Grundler et Keilmann 1983)	Allemagne	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	42 GHz	Croissance cellulaire
(Furia, Hill, et Gandhi 1986)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	41 GHz	Croissance cellulaire
(Belyaev <i>et al.</i> 1992)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,62-51,84 GHz et 41,25-41,50 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Belyaev, Alipov, et Shcheglov 1992)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,76 et 41,32 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Belyaev, Shcheglov, et Alipov 1992)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,62-51,84 GHz et 41,25-41,50 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Belyaev, Shcheglov, et al. 1993)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,7 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Belyaev, Alipov, et al. 1993)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	41 et 51 GHz	Longueur du génome
(Belyaev et al. 1994)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,76 et 41,32 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Belyaev et Kravchenko 1994)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,56-51,67 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Rojavin et Ziskin 1995)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	62 GHz	Survie avec ou sans exposition aux UV
(Belyaev et al. 1996)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,56-51,67 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Gos et al. 1997)	Suisse	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	41,7 GHz	Division cellulaire
(Pakhomova, Pakhomov, et Akyel 1997)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Levures	61 GHz	Survie cellulaire et effet sur la mutagenèse induite par UV
(Shcheglov et al. 1997)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,6-51,8 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Ushakov et al. 1999)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,75 GHz + ethidium bromure	Configuration tridimensionnelle du génome
(Belyaev et al. 2000)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli Thymocytes de rats	51,62-51,84 GHz et 41,25-41,50 GHz	Configuration tridimensionnelle du génome
(Guofen et al. 2002)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	41-43 GHz	Taux de croissance
(Yu et al. 2002)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	41-43 GHz	Effets sur l'ADN
(Shcheglov, Alipov, et Byelaev 2002)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,75 GHz	Communications intercellulaires
(Tadevosyan, Kalantaryan, et Trchounian 2008)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,8 et 53 GHz	Croissance cellulaire
(Torgomyan, Tadevosyan, et Trchounian 2011)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,8 et 53 GHz	Survie

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Torgomyan <i>et al.</i> 2012)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Hirae	51,8 et 53 GHz	Changements de propriétés de la membrane cellulaire
(Ohanyan 2012)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Hirae	51,8-53 GHz	Croissance cellulaire et survie
(Torgomyan, Hovnanyan, et Trchounian 2013)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	51,8 ; 53 ; 70,6 et 73 GHz	Croissance cellulaire
(Soghomonyan et Trchounian 2013)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries Lactobacillus acidophilus	51,8 et 53 GHz	Croissance et survie
(Torgomyan, Hovnanyan, et Trchounian 2013)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Souche sauvage de la bactérie E. hirae	51,8 et 53 GHz	Transport membranaire
(Soghomonyan, Kalantaryan, et Trchounian 2014)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries Lactobacillus acidophilus	51,8 et 53 GHz	Inhibition de l'activité ATPase des vésicules membranaires des bactéries
(Torgomyan et Trchounian 2015)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Bactéries E. Coli	53 GHz	Croissance cellulaire
(Gabrielyan, Sargsyan, et Trchounian 2016)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Souche MDC6521 de la bactérie R. sphaeroides.	51,8 et 53 GHz	Effets sur la membrane bactérienne
(Hovnanyan, Kalantaryan, et Trchounian 2017)	Arménie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Souche sauvage ATCC 9790 de la bactérie E. Hirae	51,8 et 53 GHz	Croissance bactérienne
Vésicules lipidiques					
(Alekseev et Ziskin 1995)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques	54-76 GHz	Capacité de charge et conductivité des membranes
(Logani et Ziskin 1996)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques	53,6 ; 61,2 et 71,2 GHz	Peroxydation lipidique des membranes des liposomes
(Zhadobov <i>et al.</i> 2006)	France	Modélisation	Modèles de membranes biologiques	60 GHz	Effets sur les couches de phospholipides dans les membranes biologiques
(Ramundo-Orlando <i>et al.</i> 2009)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques géantes préparées à partir de jaunes d'œufs	53,37 GHz	Changements de géométrie, diffusion et attraction accrue entre les vésicules
(Di Donato <i>et al.</i> 2012)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Liposomes artificiels contenant des enzymes	53,37 GHz	Perméabilité membranaire
(Beneduci <i>et al.</i> 2012)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques formées à partir de jaunes d'œufs	53,57-78,33 GHz	Hydratation des vésicules lipidiques

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Beneduci, Cosentino, et Chidichimo 2013)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques formées à partir de jaunes d'œufs	53,57-78,33 GHz	Hydratation des vésicules lipidiques
(Cosentino <i>et al.</i> 2013)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques	52-72 GHz	Perméabilité membranaire
(Beneduci <i>et al.</i> 2014)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques formées à partir de jaunes d'œufs	53,57-78,33 GHz	Hydratation des vésicules lipidiques
(Albini <i>et al.</i> 2014)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques formées à partir de jaunes d'œufs	53,37 GHz	Mobilité des vésicules lipidiques
(Albini <i>et al.</i> 2019)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Vésicules lipidiques formées à partir de jaunes d'œufs	53,37 GHz	Mobilité des vésicules lipidiques
Système rénal					
(Bush <i>et al.</i> 1981)	Italie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules rénales de hamster	38-48 GHz 65-75 GHz	Abondance de protéines
(Geletyuk <i>et al.</i> 1995)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules rénales du marmouset vert d'Afrique	42,25 GHz	Canaux calciques
Polyténie des chromosomes et expression génique					
(Millenbaugh <i>et al.</i> 2008)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats	35 GHz	Expression génique
(Zhadobov <i>et al.</i> 2009)	France	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules humaines	60,4 GHz	Viabilité cellulaire Expression génique
(Dyka <i>et al.</i> 2016)	Ukraine	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Drosophiles	36,64 GHz	Polyténie des chromosomes
Système reproducteur					
(Kesari et Behari 2010)	Inde	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Wistar males	50 GHz	Système reproducteur
(Shapiro <i>et al.</i> 2013)	USA	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Ovocytes de <i>Xenopus laevis</i>	60 GHz	Protéines impliquées dans l'excitabilité cellulaire
(Volkova <i>et al.</i> 2014)	Ukraine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Spermatozoïdes humains	42,25 GHz	Morphologie et fonction des spermatozoïdes cryopréservés
Système immunitaire					
(Gapeyev <i>et al.</i> 1997)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Neutrophiles péritonéaux de souris	41,8-42,05 GHz	Production de ROS
(Lysenyuk <i>et al.</i> 2000)	Ukraine	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris avec inflammation aiguë	43 et 61 GHz	Effet antiinflammatoire
(Safronova, Gabdoukhakova, et Santalov 2002)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Neutrophiles de souris mâles	41,95 GHz	Production de ROS
(Makar <i>et al.</i> 2003)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Fonctions d'activation, de prolifération et d'effecteur des lymphocytes T

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Lushnikov <i>et al.</i> 2004)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris avec réaction inflammatoire	42 GHz	Effet antiinflammatoire
(Logani <i>et al.</i> 2002)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Effet sur l'effet immunosuppresseur de la cyclophosphamine
Ivanov <i>et al.</i> 2005	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris albinos	37 GHz	Changements pathomorphologiques associés à la formation de l'immunodéficience, entraînant des effets cancérigènes et mutagènes négatifs
(Makar <i>et al.</i> 2005)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Modulation de l'effet de la cytophosphamine, un traitement anticancéreux, sur les fonctions immunitaires
(Makar <i>et al.</i> 2006)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,2 GHz	Modulation de l'effet de la cytophosphamine, un traitement anticancéreux, sur les fonctions immunitaires
(Gapeyev, Mikhailik, et Chemeris 2008)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris avec œdème induit	37,5; 42,2; 51,8; 65 et 70 GHz	Effet antiinflammatoire
(Gapeyev, Mikhailik, et Chemeris 2009)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris avec œdème induit	42,2-42,6 GHz	Effet antiinflammatoire
(Tong <i>et al.</i> 2009)	Chine	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Cellules stromales de moelle osseuse de rats	30-40 GHz	Système immunitaire - différenciation cellulaire
(Sypniewska <i>et al.</i> 2010)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Sprague Dawley	35 GHz	Changements protéiques dans les macrophages
(Gapeyev <i>et al.</i> 2011)	Russie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Effets sur la composition en acides gras des cellules thymiques et du plasma sanguin chez des souris normales et chez des souris présentant une inflammation péritonéale
(Logani <i>et al.</i> 2012)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42,2 GHz	Système immunitaire – formation de cytokines
(Vlasova <i>et al.</i> 2018)	Russie	Expérimentale – <i>in vitro</i>	Echantillons de sang humain	32,9-39,6 GHz	Système immunitaire – activité des neutrophiles
Système cardio-vasculaire					
(Frei <i>et al.</i> 1995)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats	35 GHz	Lien température et changements cardiovasculaires
(Millenbaugh <i>et al.</i> 2006)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats Sprague Dawley	35 et 94 GHz	Pression artérielle

Référence	Pays	Type d'étude	Matériel étudié	Fréquences	Effet étudié
(Jauchem, Ryan, et Walters 2016)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Rats males Sprague Dawley	35 GHz	Système cardio-vasculaire - pression artérielle
Système digestif					
(Logani, Agelan, et Ziskin 2002)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	42 GHz	Diminution de l'effet toxique sur l'activité de la catalase après ou avant administration de cyclophosphamide
(Radzievsky <i>et al.</i> 2002)	USA	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Souris	61,22 GHz	Effets sur le transit intestinal
Végétaux					
(Minasbekyan et Darbinyan 2013)	Roumanie	Expérimentale - <i>in vivo</i> et <i>in vitro</i>	Semences de blé	45-53 GHz	Effets sur les propriétés électrocinétiques des noyaux
(Nikitin <i>et al.</i> 2017)	Biélorussie	Expérimentale – <i>in vivo</i>	Graines germées	66 GHz	Effets sur la résistance aux effets négatifs des températures négatives

5 Synthèse et perspectives

Dans le cadre du déploiement de la technologie 5G, deux nouvelles bandes de fréquences vont être utilisées. Tout d'abord la bande 3,5 GHz, puis la bande 26 GHz. Dans le domaine des fréquences situées à partir de quelques GHz jusqu'à environ 10 GHz, le mode d'interaction des ondes électromagnétiques avec le corps humain change fortement. En effet, l'absorption de l'énergie électromagnétique dans les premières couches cutanées est telle que les rayonnements ne pénètrent pratiquement plus en profondeur, le dépôt d'énergie est alors limité aux couches superficielles. Du fait de ces modes d'interaction différents, il est attendu que les effets biologiques et sanitaires éventuels de l'exposition aux radiofréquences ne soient pas les mêmes en deça et au-delà de quelques GHz.

Lors des travaux d'expertise sur les effets sanitaires des radiofréquences publiés en 2009 (Anses 2009), en 2013 (Anses, 2013) et 2016 (Anses, 2016), les groupes de travail nommés par l'Anses ont choisi de s'intéresser aux effets sanitaires potentiellement liés aux gammes de fréquences utilisées par les technologies nouvelles ou en développement impliquant des radiofréquences comprises entre 8,3 kHz et 6 GHz (communications mobiles, TV, radio, Wi-Fi, etc.). La fréquence de 6 GHz correspond à la fréquence à partir de laquelle les valeurs limites d'exposition protégeant contre l'échauffement des tissus fournies par les lignes directrices internationales de la FCC et de l'Icnirp, ne sont plus exprimées en débit d'absorption spécifique (DAS en W/kg, grandeur volumique) mais en densité surfacique de puissance (en W/m²). En effet, à partir de cette gamme de fréquences, l'échauffement des tissus est limité aux couches superficielles de la peau. Il est possible de considérer, dans un premier temps que, dans le domaine des interactions biophysiques entre les champs électromagnétiques et le corps humain, l'exposition à des fréquences de l'ordre de 3,5 GHz est proche de l'exposition à des fréquences légèrement plus basses, par exemple 2,45 GHz, telles que celles utilisées pour les communications Wi-Fi. Toutefois, la spécificité des signaux 5G (modulation, puissance) pourrait influencer les niveaux d'exposition.

Le domaine des fréquences plus élevées, au-dessus de 20 GHz, a été exploré par l'Anses à l'occasion d'autres travaux concernant des dispositifs de type « scanners corporels » à ondes millimétriques, fonctionnant autour de 24 GHz. Lors de ces expertises, les groupes de travail avaient considéré « concevable de supposer que les effets biologiques potentiels des champs électromagnétiques dans cette gamme de fréquences [autour de 30 GHz] sont similaires à ceux des champs électromagnétiques à des fréquences légèrement plus élevées (comprises entre 40 et 60 GHz) ». Les expositions aux fréquences autour de 26 GHz et au-delà déterminent clairement des phénomènes biophysiques spécifiques, liés à une absorption superficielle de l'énergie des rayonnements.

Dans l'objectif d'évaluer les risques sanitaires potentiels de la technologie 5G, il paraît donc pertinent de distinguer les bandes de fréquences autour de 3,5 GHz de celles situées autour de 26 GHz.

5.1 Bande [3 – 4] GHz

5.1.1 Rappel des travaux d'expertise antérieurs de l'Anses jusqu'à 6 GHz

En 2009, 2013 et 2016, l'Anses a publié des travaux d'expertise portant sur l'évaluation des risques pour la santé liés à l'exposition aux champs électromagnétiques, en considérant la bande

de fréquences 8,3 kHz – 6 GHz. Les technologies les plus étudiées dans la littérature scientifique reflétant les usages les plus développés, les expertises se sont appuyées presque exclusivement sur des données liées à l'exposition à la téléphonie mobile, entre 0,8 et 2,3 GHz environ, et aux signaux Wi-Fi à 2,45 GHz.

L'expertise de l'Anses de 2009 (Afsset 2009) avait conclu, pour la bande 9 kHz-400 MHz, que la plupart des études chez l'humain ne mettait pas en évidence de risque pour la santé humaine à des niveaux d'exposition non thermiques et que les études chez l'animal ne « suggèrent pas d'effets sanitaires, à l'exception de quelques résultats, limités à une légère augmentation de malformations morphologiques mineures chez l'animal ». Pour la bande de fréquences 400 MHz à 6 GHz, cette expertise avait mis en évidence qu'en conditions non thermiques, les données issues de la recherche expérimentale ne montraient pas d'effet sanitaire à court ou à long terme et que les données épidémiologiques ne montraient pas non plus d'effets à court terme mais que des interrogations demeuraient quant aux effets à long terme.

La mise à jour de cette expertise, en 2013 (Anses 2013), avait mis en évidence, pour des expositions à des fréquences de la téléphonie mobile de 800 à 2100 MHz :

- chez l'animal, avec des éléments de preuve limités, des effets concernant le sommeil, la fertilité masculine et les performances cognitives (amélioration des performances) ;
- chez l'humain, avec des éléments de preuve limités, une augmentation du risque de neurinomes du nerf vestibulo-acoustique et du risque de gliome pour les utilisateurs intensifs ayant cumulé plus de 1 640 h d'exposition au téléphone mobile ;
- chez l'humain, avec des éléments de preuve suffisants, une modification physiologique à court terme de l'activité cérébrale pendant le sommeil.

L'expertise Anses de 2016 (Anses 2016) avait mis en évidence, pour l'exposition aux fréquences de la téléphonie mobile, des effets possibles sur les fonctions cognitives d'une part et le bien-être d'autre part (ces derniers pourraient cependant être liés à l'usage des téléphones mobiles plutôt qu'aux radiofréquences qu'ils émettent).

5.1.2 Recherche de publications spécifiques dans la bande [3 – 4] GHz

En ce qui concerne la bande 3,5 GHz, malgré l'obtention d'une grande quantité de publications après insertion de l'équation de recherche dans les différentes bases de données de publications scientifiques, l'analyse de sélection de ces publications a mis en évidence un manque important voire une absence de données relatives aux effets biologiques et sanitaires potentiels dans les bandes de fréquences considérées. Ceci peut naturellement s'expliquer, tout particulièrement pour la bande de fréquences autour de 3,5 GHz, par le fait qu'en l'absence d'exploitation importante jusqu'à présent de cette bande, aucune recherche spécifique sur les effets potentiels de l'exposition n'a jusqu'alors été menée.

5.1.3 Analyse et recommandations du CES quant à l'extrapolation des résultats obtenus jusqu'à présent à la bande [3 - 4] GHz.

De nombreux efforts de recherche ont été produits concernant les effets sanitaires potentiels associés à l'exposition aux fréquences inférieures à 3 GHz, c'est-à-dire celles utilisées par les générations actuelles de téléphonie mobile ou le Wi-Fi.

Compte tenu de la proximité de ces bandes de fréquences avec la bande autour de 3,5 GHz qui sera utilisée pour la 5G, il conviendra d'évaluer dans quelle mesure, et sous quelles conditions, les résultats déjà obtenus en matière d'évaluation des risques pour la santé pourraient être extrapolés et donc pertinents pour la 5G. Le CES a toutefois souligné la nécessité de mener en parallèle des études dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz. La question spécifique de l'impact éventuel de la forme temporelle et des modulations des signaux utilisés pour la technologie 5G devra être étudiée.

5.1.4 Analyse et recommandations du CES quant à l'évolution des expositions environnementales

Au-delà des questionnements sur les interactions ondes - tissus biologiques relatives aux fréquences d'exposition et formes des signaux, une attention particulière devra être portée aux évolutions des expositions environnementales. En effet, pour atteindre les performances annoncées, la 5G utilisera des antennes dites « intelligentes », de type « MIMO¹² ». Ces dispositifs comportent de nombreuses petites antennes, permettant ainsi de focaliser l'émission sur une zone donnée ; elles permettent ainsi de diriger le signal radio uniquement vers les utilisateurs quand ils en ont besoin plutôt qu'il soit émis dans toutes les directions de manière constante. Les puissances instantanées seront donc plus importantes, mais théoriquement plus limitées dans le temps et dans l'espace, ce qui modifiera les schémas d'exposition des utilisateurs. Par conséquent, les méthodes de mesure devront être adaptées, afin de préciser l'exposition du public. Actuellement, l'ANFR étudie, dans le cadre des phases pilotes de tests 5G, l'impact de ces évolutions dans la façon de mesurer les niveaux d'exposition du public aux ondes. Les données recueillies seront communiquées à l'Anses pour qu'elle conduise au mieux son expertise sur les aspects sanitaires.

5.2 Bande [24 – 60] GHz

5.2.1 Rappel des travaux d'expertise antérieurs de l'Anses au-dessus de 20 GHz

L'Anses a mené des travaux sur les effets des expositions à des fréquences supérieures à 20 GHz dans le cadre de deux expertises. La première portait sur l'exposition au scanner corporel à ondes « millimétriques » ProVision 100 utilisé dans les aéroports et émettant dans la bande de fréquences 24 - 30 GHz (Afsset 2010). La seconde portait sur l'exposition au scanner corporel à ondes « millimétriques » Ego utilisé également dans les aéroports et qui repose sur l'utilisation de fréquences autour de 24 GHz (Anses 2012).

Dans ces expertises, aucune étude portant sur des fréquences comprises autour de 24 GHz, y compris jusqu'à 30 GHz, n'a été identifiée et analysée. Toutefois, les effets des ondes millimétriques ont été largement étudiés dans la littérature considérant des expositions à des fréquences comprises entre 40 et 60 GHz. Les groupes de travail impliqués dans ces travaux ayant établi qu'il est « concevable de supposer que les effets biologiques potentiels des champs électromagnétiques dans cette gamme de fréquences [autour de 30 GHz] sont similaires à ceux des champs électromagnétiques à des fréquences légèrement plus élevées (comprises entre 40 et 60 GHz) », les expertises de l'Anses sur les scanners corporels se sont donc appuyées sur les études portant sur la bande [40 - 60] GHz.

L'expertise sur les scanners corporels *ProVision 100* n'avait identifié aucun mécanisme d'interaction onde - cellule pour la bande de fréquences considérée (24 – 30 GHz), bien que plusieurs études *in vitro* suggéraient l'existence d'effets biologiques potentiels des ondes millimétriques, notamment sur les organites riches en membranes ou encore sur les échanges ioniques. Par ailleurs, cette expertise concluait, qu'en l'état actuel des connaissances, aucun effet sanitaire connu n'avait été lié à une exposition à des champs électromagnétiques pour la gamme de fréquences et les densités surfaciques de puissance mises en oeuvre par le portique *Provision 100*.

¹² MIMO : *Multiple input multiple output* (entrées multiples, sorties multiples), technologie utilisant plusieurs antennes pour l'émetteur et le récepteur d'un système de télécommunication, permettant d'améliorer les performances de propagation du signal, et notamment le débit. Ces technologies sont décrites dans les rapports de l'ANFR sur l'évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G « Présentation générale de la 5G » et « Premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G ».

En 2012, l'expertise portant sur les scanners corporels *Ego* concluait que, en l'état actuel des connaissances sur les effets sanitaires des ondes millimétriques et sur la base des informations techniques recueillies pour le portique *Ego*, ce type de *scanner* ne présentait pas de risque pour la santé des personnes.

Suite à ces deux expertises, l'Anses recommandait toutefois d'approfondir la recherche :

- sur les effets biologiques des champs électromagnétiques (notamment sur les effets à long terme des expositions chroniques, les effets conjoints d'expositions multiples et/ou chroniques et sur différents types de stress cellulaire) ;
- sur les effets biologiques des ondes « millimétriques », notamment sur les tissus épithéliaux qui sont les tissus directement exposés à ce type d'ondes ; en particulier les effets sur la cornée et les terminaisons nerveuses cutanées ;
- sur les effets sanitaires potentiels des champs électromagnétiques, notamment sur les effets à long terme ;
- sur les effets sanitaires potentiels des ondes « millimétriques », notamment sur des populations exposées professionnellement.

5.2.2 Recherche de publications spécifiques dans la bande [24 – 60] GHz

La recherche bibliographique effectuée dans l'objectif d'identifier les études s'intéressant aux effets biologiques et sanitaires éventuels liés à l'exposition à la bande de fréquences [24 – 60] GHz a permis d'identifier 174 études sur le sujet. Parmi elles, la plupart portait sur des fréquences d'exposition supérieures à 40 GHz et allant jusqu'à 60 GHz voire au-delà ($n = 137$), 32 s'intéressaient aux fréquences comprises entre 30 et 40 GHz tandis que seulement trois concernaient des fréquences très proches ou dans la bande [24,25 - 27,5] qui sera déployée pour la 5G : dans deux études, la fréquence était de 28 GHz et pour la troisième, elle était de 27,12 GHz. Les autres études portaient sur des bandes de fréquences larges incluant les fréquences de la bande [24 – 60] GHz.

5.2.3 Analyse et recommandations du CES quant aux données disponibles dans la bande [24 – 60] GHz

La question de la pertinence à étendre la prise en compte de publications scientifiques considérant les fréquences supérieures à celles de la bande [24,25 – 27,5] GHz qui sera utilisée pour la 5G pour en documenter les effets éventuels, se pose. Le constat d'un manque de documentation des effets biologiques et sanitaires des ondes électromagnétiques dans cette gamme de fréquences avait déjà été fait lors des expertises précédentes, notamment lors de celle publiée en 2010 sur les scanners corporels (Afsset 2010).

Le CES souligne l'intérêt d'étendre jusqu'à 60 GHz voire 100 GHz l'évaluation des effets biologiques et sanitaires liés à l'exposition dans la bande de fréquences autour de 26 GHz. D'une part, lors de l'expertise de 2010, le groupe de travail avait considéré que les effets biologiques et sanitaires potentiels des ondes électromagnétiques émises par les scanners étudiés (fréquences autour de 24 GHz) étaient similaires à ceux des champs dont les fréquences sont légèrement plus élevées (comprises entre 40 et 60 GHz). D'autre part, les fréquences autour de 60 GHz seront également utilisées dans des développements ultérieurs de la 5G, et sont déjà utilisées aujourd'hui dans certains pays comme l'Angleterre.

Le CES recommande toutefois que soient menées des études portant spécifiquement sur l'exposition à la bande de fréquences [24,25 – 27,5] GHz, compte tenu du manque de données dans cette bande.

5.3 En résumé

À ce point d'étape, le CES s'interroge particulièrement sur les trois points suivants :



- Compte tenu du manque de données dans la bande autour de 3,5 GHz, peut-on extrapoler à cette bande les résultats des expertises précédentes sur les effets sanitaires des radiofréquences (8,3 kHz-2,45 GHz) ?
- À partir des données de la littérature disponibles dans les fréquences entre 20 et 60 GHz, peut-on identifier des effets sanitaires potentiels ?
- Compte tenu des spécificités des signaux de la 5G, peut-on anticiper l'exposition des populations et son impact sanitaire ?

6 Bibliographie

6.1 Presse écrite, audio-visuelle et communication institutionnelle

- AFP. 2019a. "La 5G, une technologie aussi prometteuse que redoutée " *AFP*, 4 avril 2019.
- AFP. 2019b. "La 5G, une technologie mobile sous très haute surveillance " *AFP*, 16 mai 2019.
- AFP. 2019c. "Vodafone lance sa 5G au Royaume-Uni." *AFP*, 3 juillet 2019. <https://www.latribune.fr/techno-medias/telecoms/vodafone-lance-sa-5g-au-royaume-uni-822493.html>.
- Ericsson. 2019. "Ericsson 5G is live in South Korea." Ericsson Consulté le 10 juillet. <https://www.ericsson.com/en/cases/2019/korea-telecom-has-switched-on-5g>.
- France Info. 2019. "La Corée du Sud grille la politesse à tout le monde sur la 5G ", 4 avril 2019. https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/un-monde-d-avance/la-coree-du-sud-grille-la-politesse-a-tout-le-monde-sur-la-5g_3242539.html
- Le Figaro. 2019. "Telecom Italia et Vodafone fusionnent leurs tours en Italie." *Le Figaro*, 26 juillet 2019. <https://www.lefigaro.fr/flash-eco/telecom-italia-et-vodafone-fusionnent-leurs-tours-en-italie-20190726>.
- Le Monde. 2019. "Dans les télécommunications, la course à la 5G s'accélère " *Chaffin, Zeliha* 12 juin 2019. https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/06/11/dans-les-telecommunications-la-course-a-la-5g-s-accelere_5474583_3234.html
- Le Temps. 2019. "Moratoire ou pas, la 5G s'étend en Suisse " *Le Temps*, 17 avril. <https://www.letemps.ch/economie/moratoire-5g-setend-suisse>
- Les Echos. 2019. "La Chine se met en ordre de bataille pour la 5G." *Les Echos*, 10 septembre 2019. <https://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/la-chine-se-met-en-ordre-de-bataille-pour-la-5g-1130461>.
- Les Numériques. 2019a. "La 5G en Europe sans Huawei : 18 mois et 55 milliards d'euros de plus ". Chartier, Mathieu Dernière mise à jour 11 juin 2019 Consulté le 13 juin. <https://www.lesnumeriques.com/mobilite/5g-en-europe-sans-huawei-18-mois-55-milliards-euros-plus-n87851.html>.
- Les Numériques. 2019b. "MWC 2019 – Pourquoi il ne faut pas acheter un smartphone 5G en 2019." Les Numériques,, Dernière mise à jour 1 mars 2019 Consulté le 11 juin. <https://www.lesnumeriques.com/telephone-portable/mwc-2019-pourquoi-ne-faut-pas-acheter-smartphone-5g-en-2019-n84451.html>.
- Nature international journal of science. 2019. "News - Global 5G wireless networks threaten weather forecasts " *Nature international journal of science*, 2 mai 2019. <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01305-4>
- Ouest-France. 2019. "Suisse. Plusieurs milliers de personnes manifestent contre le déploiement de la 5G." *Ouest-France*, 21 septembre 2019. <https://www.ouest-france.fr/europe/suisse/suisse-plusieurs-milliers-de-personnes-manifestent-contre-le-deploiement-de-la-5g-6530995>.
- PCR Wireless News. 2019. "EE to launch commercial 5G in six UK cities on May 30 ". Tomàs, Juan Pedro Dernière mise à jour 23 mai 2019 Consulté le 11 juin. <https://www.rcrwireless.com/20190523/5g/ee-launch-commercial-5g-six-uk-cities-may-30>
- RCRWirelessNews. 2019. Ericsson, Orange launch 5G test network in Poland
- Siècle digital. 2019. "La 5G continue de progresser aux États-Unis !" *Siècle digital*, , 3 juin 2019. <https://siecledigital.fr/2019/06/03/la-5g-continue-de-progresser-aux-etats-unis/>.

6.2 Ouvrages, rapports et articles scientifiques

- Afsset. 2009. "Les radiofréquences - Mise à jour de l'expertise relative aux radiofréquences." ; .
- Afsset. 2010. "Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation du scanner corporel à ondes « millimétriques » ProVision 100." : Afsset. 1-62.
- Albini, M., S. Dinarelli, F. Pennella, S. Romeo, E. Zampetti, M. Girasole, U. Morbiducci, R. Massa, et A. Ramundo-Orlando. 2014. "Induced movements of giant vesicles by millimeter wave radiation." *Biochim Biophys Acta* 1838 (7):1710-8. doi: 10.1016/j.bbmem.2014.03.021.
- Albini, M., M. Salvi, E. Altamura, S. Dinarelli, L. Di Donato, A. Lucibello, F. Mavelli, F. Molinari, U. Morbiducci, et A. Ramundo-Orlando. 2019. "Movement of giant lipid vesicles induced by millimeter wave radiation change when they contain magnetic nanoparticles." *Drug Deliv Transl Res* 9 (1):131-143. doi: 10.1007/s13346-018-0572-y.
- Alekseev, S. I., O. V. Gordiienko, A. A. Radzievsky, et M. C. Ziskin. 2010. "Millimeter wave effects on electrical responses of the sural nerve in vivo." *Bioelectromagnetics* 31 (3):180-90. doi: 10.1002/bem.20547.

- Alekseev, S. I., et M. C. Ziskin. 2009. "Influence of blood flow and millimeter wave exposure on skin temperature in different thermal models." *Bioelectromagnetics* 30 (1):52-8. doi: 10.1002/bem.20444.
- Alekseev, S. I., M. C. Ziskin, et E. E. Fesenko. 2012. "Frequency dependence of heating of human skin exposed to millimeter waves." *Biophysics* 57 (1):90-93. doi: 10.1134/S0006350912010046.
- Alekseev, S., et M.C. Ziskin. 1995. "Millimeter microwave effect on ion transport across lipid bilayer membranes." *Bioelectromagnetics* 16 (2):124-31.
- Alekseev, S.I., et M.C. Ziskin. 1999. "Effects of millimeter waves on ionic currents of *Lymnaea* neurons." *Bioelectromagnetics* 20 (1):24-33.
- Anses. 2012. "Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation du scanner corporel à ondes « millimétriques » Eqo." : Anses. 1-53.
- Anses. 2013. "Radiofréquences et santé - Mise à jour de l'expertise." ; .
- Anses. 2016. "Exposition aux radiofréquences et santé des enfants." : Anses. 1-274.
- Arcep. 2017. "Les enjeux de la 5G." : Arcep.
- Arcep. 2019a. "Grand dossier 5G - Qu'est ce que la 5G?", Dernière mise à jour 7 octobre 2019 Consulté le 10 octobre 2019. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g.html>.
- Arcep. 2019b. "Grand dossier - 5G - Le plan d'action de la Commission européenne pour la 5G - Mis à jour le 14 juin 2019." Dernière mise à jour 14 juin 2019 Consulté le 10 juillet. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g/le-plan-daction-de-la-commission-europeenne-pour-la-5g.html>
- Arcep. 2019c. "Grand dossier - 5G - Les travaux de l'Arcep pour préparer l'arrivée de la 5G - Mis à jour le 24 septembre 2019 ", Dernière mise à jour 28 juin 2019 Consulté le 27 septembre. <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-5g/les-travaux-de-larcep-pour-preparer-larrivee-de-la-5g.html>
- Arcep. 2019d. Plateformes d'expérimentations 5G dans la bande 26 GHz : Agnès PANNIER-RUNACHER et l'Arcep présentent les onze premiers projets retenus.
- Barnes, F. S., et B. Greenebaum. 2006. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, Third Edition - 2 Volume Set*. Edité par CRC Press.
- Bellossi, A., G. Dubost, J.P. Moulinoux, M. Himdi, M. Ruelloux, et C. Rocher. 2000. "Biological effects of millimeter wave irradiation on mice-preliminary results." *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 48 (11). doi: 10.1109/22.884201
- Belyaev, I. Ya. 2005. "Non-thermal biological effects of microwaves." *Microwave Review* 11 (2).
- Belyaev, I. Ya, E.D. Alipov, V.A. Polunin, et V. S. Shcheglov. 1993. "Evidence for Dependence of Resonant Frequency of Millimeter Wave Interaction with *Escherichia coli* K12 Cells on Haploid Genome Length." *Electro Magnetobiol* 12 (1):39-49. doi: 10.3109/15368379309012861
- Belyaev, I. Ya, E.D. Alipov, et V. S. Shcheglov. 1992. "Chromosome DNA as a Target of Resonant Interaction Between *Escherichia Coli* Cells and Low-Intensity Millimeter Waves." *Electro- and Magnetobiology* 11 (2).
- Belyaev, I. Ya, Y.D. Alipov, V. S. Shcheglov, V.A. Polunin, et O.A. Aizenberg. 1994. "Cooperative Response of *Escherichia Coli* Cells to the Resonance Effect of Millimeter Waves at Super Low Intensity." *Electro Magnetobiol* 13 (1). doi: 10.3109/15368379409030698
- Belyaev, I. Ya, V. S. Shcheglov, E.D. Alipov, et V.D. Ushakov. 2000. "Nonthermal effects of extremely high-frequency microwaves on chromatin conformation in cells in vivo-dependence on physical, physiological, and genetic factors " *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques* 48 (11):2172-79. doi: 10.1109/22.884211
- Belyaev, I. Ya, V. S. Shcheglov, et Ye D. Alipov. 1992. "Existence of selection rules on helicity during discrete transitions of the genome conformational state of *E. coli* cells exposed to low-level millimetre radiation." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 27 (3):405-411. doi: 10.1016/0302-4598(92)87015-m.
- Belyaev, I. Ya, V. S. Shcheglov, Ye D. Alipov, et S. P. Radko. 1993. "Regularities of separate and combined effects of circularly polarized millimeter waves on *E. coli* cells at different phases of culture growth." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 31 (1):49-63. doi: 10.1016/0302-4598(93)86105-a.
- Belyaev, I.Y., V.S. Shcheglov, Y.D. Alipov, et V.A. Polunin. 1996. "Resonance effect of millimeter waves in the power range from 10(-19) to 3 x 10(-3) W/cm2 on *Escherichia coli* cells at different concentrations." *Bioelectromagnetics* 17 (4):312-21. doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:4<312::AID-BEM7>3.0.CO;2-6
- Belyaev, IYa, Y. D. Alipov, V. S. Shcheglov, et V. N. Lystsov. 1992. "Resonance effect of microwaves on the genome conformational state of *E. coli* cells." *Z Naturforsch C* 47 (7-8):621-7. doi: 10.1515/znc-1992-7-822.
- Belyaev, SYa, et V. G. Kravchenko. 1994. "Resonance effect of low-intensity millimeter waves on the chromatin conformational state of rat thymocytes." *Z Naturforsch C* 49 (5-6):352-8. doi: 10.1515/znc-1994-5-612.
- Beneduci, A. 2009. "Evaluation of the potential in vitro antiproliferative effects of millimeter waves at some therapeutic frequencies on RPMI 7932 human skin malignant melanoma cells." *Cell Biochem Biophys* 55 (1):25-32. doi: 10.1007/s12013-009-9053-8.
- Beneduci, A., G. Chidichimo, R. De Rose, L. Filippeli, S.V. Straface, et S. Venuta. 2005. "Frequency and irradiation time-dependant antiproliferative effect of low-power millimeter waves on RPMI 7932 human melanoma cell line." *Anticancer Res* 25 (2A):1023-8.

- Beneduci, A., G. Chidichimo, S. Tripepi, et E. Perrotta. 2005. "Transmission electron microscopy study of the effects produced by wide-band low-power millimeter waves on MCF-7 human breast cancer cells in culture." *Anticancer Res* 25 (2A):1009-13.
- Beneduci, A., G. Chidichimo, S. Tripepi, E. Perrotta, et F. Cufone. 2007. "Antiproliferative effect of millimeter radiation on human erythromyeloid leukemia cell line K562 in culture: ultrastructural- and metabolic-induced changes." *Bioelectrochemistry* 70 (2):214-20. doi: 10.1016/j.bioelechem.2006.07.008.
- Beneduci, A., K. Cosentino, et G. Chidichimo. 2013. "Millimeter Wave Radiations Affect Membrane Hydration in Phosphatidylcholine Vesicles." *Materials (Basel)* 6 (7):2701-2712. doi: 10.3390/ma6072701.
- Beneduci, A., K. Cosentino, S. Romeo, R. Massa, et G. Chidichimo. 2014. "Effect of millimetre waves on phosphatidylcholine membrane models: a non-thermal mechanism of interaction." *Soft Matter* 10 (30):5559-67. doi: 10.1039/c4sm00551a.
- Beneduci, A., L. Filippelli, K. Cosentino, M. L. Calabrese, R. Massa, et G. Chidichimo. 2012. "Microwave induced shift of the main phase transition in phosphatidylcholine membranes." *Bioelectrochemistry* 84:18-24. doi: 10.1016/j.bioelechem.2011.10.003.
- Blick, D.W., E.R. Adair, W.D. Hurt, C.J. Sherry, T.J. Walters, et J.H. Merritt. 1997. "Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin." *Bioelectromagnetics* 18 (6):403-9.
- Bush, L.G., D.W. Hill, A. Riazi, L.J. Stensaas, L.M. Partlow, et O. P. Gandhi. 1981. "Effects of millimeter-wave radiation on monolayer cell cultures. III. A search for frequency-specific athermal biological effects on protein synthesis." *Bioelectromagnetics* 2 (2):151-9.
- Chalfin, S., J. A. D'Andrea, P. D. Comeau, M. E. Belt, et D. J. Hatcher. 2002. "Millimeter wave absorption in the nonhuman primate eye at 35 GHz and 94 GHz." *Health Phys* 83 (1):83-90. doi: 10.1097/00004032-200207000-00009.
- Chen, Q., Q.L. Zeng, DQ. Lu, et H. Chiang. 2004. "Millimeter wave exposure reverses TPA suppression of gap junction intercellular communication in HaCaT human keratinocytes." *Bioelectromagnetics* 25 (1):1-4. doi: 10.1002/bem.10140
- Chidichimo, G., A. Beneduci, M. Nicolett, M. Critelli, R. De Rose, Y. Tkatchenko, S. Abonante, S. Tripepi, et E. Perrotta. 2002. "Selective inhibition of tumoral cells growth by low power millimeter waves." *Anticancer Res* 22 (3):1681-8.
- Chuyan, E. N., et N. S. Tribat. 2016. "Changes in effector function of sensory peptidergic perversular fibers after multiple exposures to low-intensity millimeter radiation." *Human Physiology* 42 (4):438-443. doi: 10.1134/S0362119716010072.
- Commission Européenne. 2016. "Communication de la Commission au parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions. Un plan d'action pour la 5G en Europe." : Commission Européenne.
- Cosentino, K., A. Beneduci, A. Ramundo-Orlando, et G. Chidichimo. 2013. "The influence of millimeter waves on the physical properties of large and giant unilamellar vesicles." *J Biol Phys* 39 (3):395-410. doi: 10.1007/s10867-012-9296-2.
- D'Agostino, S., C. Della Monica, E. Palizzi, F. Di Pietrantonio, M. Benetti, D. Cannata, M. Cavagnaro, D. Sardari, P. Stano, et A. Ramundo-Orlando. 2018. "Extremely High Frequency Electromagnetic Fields Facilitate Electrical Signal Propagation by Increasing Transmembrane Potassium Efflux in an Artificial Axon Model." *Sci Rep* 8 (1):9299. doi: 10.1038/s41598-018-27630-8.
- D'Andrea, J.A., E. R. Adair, et J.O. de Lorge. 2003. "Behavioral and cognitive effects of microwave exposure." *Bioelectromagnetics Suppl* 6::S39-S62.
- Debouzy, J. C., D. Crouzier, V. Dabouis, R. Malabiau, C. Bachelet, et A. Perrin. 2007. "[Biologic effects of millimetric waves (94 GHz). Are there long term consequences?]." *Pathol Biol (Paris)* 55 (5):246-55. doi: 10.1016/j.patbio.2006.02.006.
- Degrave, E., B. Meeusen, A. R. Grivegne, M. Boniol, et P. Autier. 2009. "Causes of death among Belgian professional military radar operators: a 37-year retrospective cohort study." *Int J Cancer* 124 (4):945-51. doi: 10.1002/ijc.23988.
- Detlavs, I., L. Dombrovskā, A. Turauska, B. Shkirmante, et L. Slutskii. 1996. "Experimental study of the effects of radiofrequency electromagnetic fields on animals with soft tissue wounds." *Sci Total Environ* 180 (1):35-42. doi: 10.1016/0048-9697(95)04917-7
- Di Ciaula, A. 2018. "Towards 5G communication systems: Are there health implications?" *Int J Hyg Environ Health* 221 (3):367-375. doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.011.
- Di Donato, L., M. Cataldo, P. Stano, R. Massa, et A. Ramundo-Orlando. 2012. "Permeability changes of cationic liposomes loaded with carbonic anhydrase induced by millimeter waves radiation." *Radiat Res* 178 (5):437-46. doi: 10.1667/rr2949.1.
- Dubertret, L. "Peau." Encyclopaedia Universalis [en ligne] Consulté le 04/07/2019. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/peau/>.

- Dyka, L. D., L. A. Shakina, V. Y. Strashnyuk, et Y. G. Shckorbatov. 2016. "Effects of 36.6 GHz and static magnetic field on degree of endoreduplication in *Drosophila melanogaster* polytene chromosomes." *Int J Radiat Biol* 92 (4):222-227. doi: 10.3109/09553002.2016.1137105.
- Elder, J. A. 1994. "Thermal, cumulative, and life span effects and cancer in mammals exposed to radiofrequency radiation. In: Carpenter DO, Ayrapetyan S, eds. Biological effects of electric and magnetic fields " *San Diego, CA: Academic Press:279-295*.
- Elwood, J. M. 2012. "Microwaves in the cold war: the Moscow embassy study and its interpretation. Review of a retrospective cohort study." *Environ Health* 11 (85). doi: 10.1186/1476-069X-11-85.
- European 5G Observatory. 2019a. German mobile strategy towards coverage improvement and elimination of white spots.
- European 5G Observatory. 2019b. "Latest news in Europe." Dernière mise à jour 10 octobre 2019 Consulté le 11 octobre 2019.
- FCC. 2010. Code of Federal Regulations CTR. Dans 47, part 1.1310.
- Foster, K., et D. Colombi. 2017. "Thermal response of tissue to RF exposure from canonical dipoles at frequencies for future mobile communication systems." *Electronics Letters* 53 (5):360-362. doi: 10.1049/el.2016.3488.
- Foster, K., J.A. D'Andrea, S. Chalfin, et D.J. Hatcher. 2003. "Thermal modeling of millimeter wave damage to the primate cornea at 35 GHz and 94 GHz." *Health Phys* 84 (6):764-9. doi: 10.1097/00004032-200306000-00009
- Foster, K. R., M. C. Ziskin, et Q. Balzano. 2016. "Thermal Response of Human Skin to Microwave Energy: A Critical Review." *Health Physics* 111 (6):528-541. doi: 10.1097/HP.0000000000000571.
- Foster, K. R., M. C. Ziskin, Q. Balzano, et A. Hirata. 2019. "Thermal Analysis of Averaging Times in Radio-Frequency Exposure Limits above 1 GHz." *IEEE Access* 6:74536-74546. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2883175.
- Foster, K.R., et R. Glaser. 2007. "Thermal mechanisms of interaction of radiofrequency energy with biological systems with relevance to exposure guidelines." *Health Phys.* 92 (6):609-620.
- Foster, K.R., et H.P. Schwan. 1996. "Dielectric properties of tissues. In: Polk C, eds. Handbook of biological effects of electromagnetic fields." *Boca Raton, FL: CRC Press:25-102*.
- Franchini, V., S. Ceccuzzi, A. Doria, G. P. Gallerano, E. Giovenale, G. L. Ravera, A. De Amicis, S. De Sanctis, S. Di Cristofaro, E. Regalbuto, E. Coluzzi, J. Marinaccio, A. Sgura, R. Bei, M. Benvenuto, A. Modesti, L. Masuelli, et F. Lista. 2018. "Biological Effects of 25 to 150 GHz Radiation After In Vitro Exposure of Human Fibroblasts: a Comparison of Experimental Results." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 39 (9):899-911. doi: 10.1007/s10762-018-0514-2.
- Franchini, V., E. Regalbuto, A. De Amicis, S. De Sanctis, S. Di Cristofaro, E. Coluzzi, J. Marinaccio, A. Sgura, S. Ceccuzzi, A. Doria, G. P. Gallerano, E. Giovenale, G. L. Ravera, R. Bei, M. Benvenuto, A. Modesti, L. Masuelli, et F. Lista. 2018. "Genotoxic Effects in Human Fibroblasts Exposed to Microwave Radiation." *Health Physics* 115 (1):126-139. doi: 10.1097/hp.0000000000000871.
- Frei, M. R., K. L. Ryan, R. E. Berger, et J. R. Jauchem. 1995. "Sustained 35-GHz radiofrequency irradiation induces circulatory failure." *Shock* 4 (4):289-93. doi: 10.1097/00024382-199510000-00010.
- Furia, L., D. W. Hill, et O. P. Gandhi. 1986. "Effect of millimeter-wave irradiation on growth of *Saccharomyces cerevisiae*." *IEEE Trans Biomed Eng* 33 (11):993-9. doi: 10.1109/TBME.1986.325865.
- Gabriel, S., R.W. Lau, et C. Gabriel. 1996. "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues." *Phys. Med. Biol.* 2271-93.
- Gabrielyan, L., H. Sargsyan, et A. Trchounian. 2016. "Biohydrogen production by purple non-sulfur bacteria *Rhodobacter sphaeroides*: Effect of low-intensity electromagnetic irradiation." *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 162:592-596. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2016.07.039.
- Gallerano, G. P., A. Doria, E. Giovenale, A. De Amicis, S. De Sanctis, S. Di Cristofaro, V. Franchini, F. Lista, F. Regalbuto, A. Sgura, E. Coluzzi, J. Marinaccio, R. Bei, M. Fantini, M. Benvenuto, et L. Masuelli. 2015. Effects of mm-waves on human fibroblasts in-vitro. Dans *IEEE 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2015*, : IEEE.
- Gapeyev, A. B., T. P. Kulagina, A. V. Aripovsky, et N. K. Chemeris. 2011. "The role of fatty acids in anti-inflammatory effects of low-intensity extremely high-frequency electromagnetic radiation." *Bioelectromagnetics* 32 (5):388-95. doi: 10.1002/bem.20645.
- Gapeyev, A. B., et N. A. Lukyanova. 2015. "Pulse-modulated extremely high-frequency electromagnetic radiation protects cellular DNA from the damaging effects of physical and chemical factors in vitro." *Biophysics* 60 (5):732-738. doi: 10.1134/S0006350915050061.
- Gapeyev, A. B., E. N. Mikhailik, et N. K. Chemeris. 2009. "Features of anti-inflammatory effects of modulated extremely high-frequency electromagnetic radiation." *Bioelectromagnetics* 30 (6):454-61. doi: 10.1002/bem.20499.
- Gapeyev, A. B., V. G. Safronova, N. K. Chemeris, et E. E. Fesenko. 1997. "Inhibition of the production of reactive oxygen species in mouse peritoneal neutrophils by millimeter wave radiation in the near and far field zones of the radiator." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 43 (2):217-220. doi: 10.1016/s0302-4598(96)05155-0.

- Gapeyev, A.B., E.N. Mikhailik, et N.K. Chemeris. 2008. "Anti-inflammatory effects of low-intensity extremely high-frequency electromagnetic radiation: frequency and power dependence." *Bioelectromagnetics* 29 (3):197-206. doi: 10.1002/bem.20381
- Gathiram, P., B. Kistnasamy, et U. Lalloo. 2009. "Effects of a unique electromagnetic field system on the fertility of rats." *Arch Environ Occup Health* 64 (2):93-100. doi: 10.3200/AEOH.64.2.93-100.
- Geletyuk, VI, VN Kazachenko, NK Chemeris, et EE Fesenko. 1995. "Dual effects of microwaves on single Ca(2+)-activated K⁺ channels in cultured kidney cells Ver0." *FEBS Lett* 359 (1):85-8.
- Gos, P., B. Eicher, J. Kohli, et W.D. Heyer. 1997. "Extremely high frequency electromagnetic fields at low power density do not affect the division of exponential phase *Saccharomyces cerevisiae* cells." *Bioelectromagnetics* 18 (2):142-55. doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1997)18:2<142::aid-bem7>3.0.co;2-2
- Grundler, W, et F Keilmann. 1978. "Nonthermal effects of millimeter microwaves on yeast growth." *Z Naturforsch C* 33 (1-2):15-22.
- Grundler, W, F Keilmann, V Putterlik, et D Strube. 1982. "Resonant-like dependence of yeast growth rate on microwave frequencies." *Br J Cancer Suppl.* 5:206-8.
- Grundler, W., et F. Keilmann. 1983. "Sharp Resonances in Yeast Growth Prove Nonthermal Sensitivity to Microwaves." *Physical Review Letters* 51 (13):1214-1216. doi: 10.1103/PhysRevLett.51.1214.
- Grundler, W., F. Keilmann, et H. Fröhlich. 1977. "Resonant growth rate response of yeast cells irradiated by weak microwaves." *Physics Letters A* 62 (6):463-466. doi: 10.1016/0375-9601(77)90696-x.
- Guofen, Y., E.A. Coln, K. H. Schoenbach, M. Gellerman, P. Fox, L. Rec, et S. J. Beebe. 2002. "A study on biological effects of low-intensity millimeter waves." *IEEE Transactions on Plasma Science* 30 (4):1489-96. doi: 10.1109/TPS.2002.804179
- Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, A. Boriskin, R. Sauleau, et Y. Le Drean. 2016. "Impact of 60-GHz millimeter waves on stress and pain-related protein expression in differentiating neuron-like cells." *Bioelectromagnetics* 37 (7):444-54. doi: 10.1002/bem.21995.
- Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, R. Sauleau, Y. L. Dréan, et C. Saligaut. 2017. "Effect of acute millimeter wave exposure on dopamine metabolism of NGF-treated PC12 cells." *J Radiat Res* 58 (4):439-445. doi: 10.1093/jrr/rrx004.
- Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, R. Sauleau, et Y. Le Drean. 2016. "Effects of 60-GHz millimeter waves on neurite outgrowth in PC12 cells using high-content screening." *Neurosci Lett* 618:58-65. doi: 10.1016/j.neulet.2016.02.038.
- Habauzit, D., C. Le Qument, M. Zhadobov, C. Martin, M. Aubry, R. Sauleau, et Y. Le Drean. 2014. "Transcriptome analysis reveals the contribution of thermal and the specific effects in cellular response to millimeter wave exposure." *PLoS ONE* 9 (10):e109435. doi: 10.1371/journal.pone.0109435.
- Hamed, T., et M. Maqsood. 2018. "SAR calculation & temperature response of human body exposure to electromagnetic radiations at 28, 40 and 60 GHz mmWave frequencies." *Progress In Electromagnetics Research M* 73:47-59.
- Hamnerius, Y., A. Rasmuson, et B. Rasmuson. 1985. "Biological effects of high-frequency electromagnetic fields on *Salmonella typhimurium* and *Drosophila melanogaster*." *Bioelectromagnetics* 6 (4):405-14.
- Hasted, J. B. 1973. "Aqueous Dielectrics (Serie: Studies in Chemical Physics)." *Chapman and Hall* 16 (7):567.
- He, W., B. Xu, S. He, et Z. Ying. 2018. "EMF exposure study of multilayer human head model at close distance of 28 GHz patch arrays."
- Health Protection Agency. 2012. "Health Effects from Radiofrequency Electromagnetic fields. Report from the independant Advisory Group on Non-ionising Radiation." ; .
- Hovnanyan, K., V. Kalantaryan, et A. Trchounian. 2017. "The distinguishing effects of low-intensity electromagnetic radiation of different extremely high frequencies on *Enterococcus hirae*: growth rate inhibition and scanning electron microscopy analysis." *Lett Appl Microbiol* 65 (3):220-225. doi: 10.1111/lam.12764.
- ICNIRP. 1998. "ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)." *Health Physics* 74 (4):494-522.
- ICNIRP. 2018. "Draft ICNIRP Guidelines. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (100kHz to 300 GHz)." : ICNIRP. 1-25.
- IEEE. 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." : IEEE; Contract No.: C95.1. 1-238.
- ITU. 2012. "Radio Regulations Articles." Geneva, Switzerland: ITU.
- Jauchem, J. R., K. L. Ryan, et T. J. Walters. 2016. "Pathophysiological alterations induced by sustained 35-GHz radio-frequency energy heating." *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 27 (1):79-89. doi: 10.1515/jbcpp-2015-0011.
- Kantz, J., J. Muller, K. P. Haderl, F. M. Landstorfer, et F. Lang. 2005. "Insensitivity of cardiovascular function to low power cm/mm-microwaves." *Int J Environ Health Res* 15 (3):207-15. doi: 10.1080/09603120500105695.
- Kesari, K. K., et J. Behari. 2009. "Fifty-gigahertz microwave exposure effect of radiations on rat brain." *Appl Biochem Biotechnol* 158 (1):126-39. doi: 10.1007/s12010-008-8469-8.

- Kesari, K. K., et J. Behari. 2010. "Microwave exposure affecting reproductive system in male rats." *Appl Biochem Biotechnol* 162 (2):416-28. doi: 10.1007/s12010-009-8722-9.
- Khramov, R.N., E.A. Sosunov, S.V. Koltun, E.N. Ilyasova, et V.V. Lednev. 1991. "Millimeter-wave effects on electric activity of crayfish stretch receptors." *Bioelectromagnetics* 12 (4):203-14.
- Kojima, M., N. Hasanova, K. Sasaki, H. Sasaki, Y. Suzuki, M. Taki, K. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, Y. Kamimura, et A. Hirata. 2012. "Investigation of ocular temperature change in rabbits during 40 GHz band exposure."
- Kojima, M., N. Hasanova, Y. Suzuki, K. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, Y. Kamimura, A. Hirata, K. Sasaki, et H. Sasaki. 2012. "Investigation of acute ocular damage threshold of 40 GHz millimeter wave on rabbit."
- Kojima, M., Y. Suzuki, K. Sasaki, M. Taki, K. Wake, S. Watanabe, M. Mizuno, T. Tasaki, et H. Sasaki. 2018. "Ocular Effects of Exposure to 40, 75, and 95 GHz Millimeter Waves." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 39 (9):912-925. doi: 10.1007/s10762-018-0497-z.
- Kojima, M., Y. Suzuki, C. Y. Tsai, K. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, Y. Kamimura, A. Hirata, K. Sasaki, et H. Sasaki. 2015. "Characteristics of ocular temperature elevations after exposure to quasi- and millimeter waves (18-40 GHz)." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 36 (4):390-399. doi: 10.1007/s10762-014-0142-4.
- Kojima, M., C. Y. Tsai, Y. Suzuki, T. Okuno, K. Sasaki, K. Sasaki, et H. Sasaki. 2014. "Ocular temperature measurements during infrared or millimeter wave exposure."
- Kojima, M., C. Y. Tsai, Y. Suzuki, K. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, Y. Kamimura, A. Hirata, K. Sasaki, et H. Sasaki. 2014. "Effect of relative humidity during 40 GHz millimeter wave exposure."
- Kojima, M., Y. Yamashiro, N. Hanazawa, H. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, M. Taki, Y. Kamimura, et H. Sasaki. 2009. "Acute ocular injuries caused by 60-GHz millimeter-wave exposure." *Health Physics* 97 (3):212-8. doi: 10.1097/HP.0b013e3181abaa57.
- Kolosova, L.I., G.N. Akoev, V.D. Avelev, O.V. Riabchikova, et K.S. Babu. 1996. "Effect of low-intensity millimeter wave electromagnetic radiation on regeneration of the sciatic nerve in rats." *Bioelectromagnetics* 17 (1):44-7. doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:1<44::AID-BEM6>3.0.CO;2-6
- Korpan, N. N., K. L. Resch, et P. Kokoschinegg. 1994. "Continuous microwave enhances the healing process of septic and aseptic wounds in rabbits." *J Surg Res* 57 (6):667-71. doi: 10.1006/jsre.1994.1198.
- Korpan, N.N., et T. Saradeth. 1995. "Clinical effects of continuous microwave for postoperative septic wound treatment: a double-blind controlled trial." *Am J Surg* 170 (3):271-6. doi: 10.1016/s0002-9610(05)80013-3
- Koyama, S., E. Narita, Y. Shimizu, Y. Suzuki, T. Shiina, M. Taki, N. Shinohara, et J. Miyakoshi. 2016. "Effects of long-term exposure to 60 GHz millimeter-wavelength radiation on the genotoxicity and heat shock protein (HSP) expression of cells derived from human eye." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 13 (8). doi: 10.3390/ijerph13080802.
- Koyama, S., E. Narita, Y. Suzuki, T. Shiina, M. Taki, N. Shinohara, et J. Miyakoshi. 2014. "Effects of long-term exposure to 60 GHz millimeter-wave on genotoxicities in cells derived from human eye."
- Kues, HA., SA. D'Anna, R. Osiander, WR. Green, et JC. Monahan. 1999. "Absence of ocular effects after either single or repeated exposure to 10 mW/cm(2) from a 60 GHz CW source." *Bioelectromagnetics* 20 (8):463-73.
- Le Dréan, Yves, Yonis Soubere Mahamoud, Yann Le Page, Denis Habauzit, Catherine Le Quément, Maxim Zhadobov, et Ronan Sauleau. 2013. "State of knowledge on biological effects at 40–60 GHz." *Comptes Rendus Physique* 14 (5):402-411. doi: 10.1016/j.crhy.2013.02.005.
- Le Quement, C., C. Nicolas Nicolaz, M. Zhadobov, F. Desmots, R. Sauleau, M. Aubry, D. Michel, et Y. Le Drian. 2012. "Whole-genome expression analysis in primary human keratinocyte cell cultures exposed to 60 GHz radiation." *Bioelectromagnetics* 33 (2):147-58. doi: 10.1002/bem.20693.
- Le Quement, C., C. N. Nicolaz, D. Habauzit, M. Zhadobov, R. Sauleau, et Y. Le Drian. 2014. "Impact of 60-GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression." *Bioelectromagnetics* 35 (6):444-451. doi: 10.1002/bem.21864.
- Li, Kun, Kensuke Sasaki, Soichi Watanabe, et Hiroshi Shirai. 2019. "Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz." *Physics in Medicine & Biology* 64 (6):065016. doi: 10.1088/1361-6560/ab057a.
- Li, X., M. Du, X. Liu, W. Chen, M. Wu, J. Lin, et G. Wu. 2010. "Millimeter wave treatment promotes chondrocyte proliferation by upregulating the expression of cyclin-dependent kinase 2 and cyclin A." *Int J Mol Med* 26 (1):77-84. doi: 10.3892/ijmm_00000437.
- Li, X., M. Du, X. Liu, M. Wu, H. Ye, J. Lin, W. Chen, et G. Wu. 2010. "Millimeter wave treatment inhibits NO-induced apoptosis of chondrocytes through the p38MAPK pathway." *Int J Mol Med* 25 (3):393-9. doi: 10.3892/ijmm_00000357.
- Li, X., G. Wu, M. Wu, W. Chen, et X. Liu. 2011. "In vitro study of inhibitory millimeter wave treatment effects on the TNF-alpha-induced NF-kappaB signal transduction pathway." *Int J Mol Med* 27 (1):71-8. doi: 10.3892/ijmm.2010.549.

- Li, X., H. Ye, L. Cai, F. Yu, W. Chen, R. Lin, C. Zheng, H. Xu, J. Ye, G. Wu, et X. Liu. 2012. "Millimeter wave radiation induces apoptosis via affecting the ratio of Bax/Bcl-2 in SW1353 human chondrosarcoma cells." *Oncology Reports* 27 (3):664-672. doi: 10.3892/or.2011.1558.
- Li, X., H. Ye, F. Yu, L. Cai, H. Li, J. Chen, M. Wu, W. Chen, R. Lin, Z. Li, C. Zheng, H. Xu, G. Wu, et X. Liu. 2012. "Millimeter wave treatment promotes chondrocyte proliferation via G1/S cell cycle transition." *Int J Mol Med* 29 (5):823-831. doi: 10.3892/ijmm.2012.919.
- Logani, M. K., S. Alekseev, M. K. Bhopale, W. S. Slovinsky, et M. C. Ziskin. 2012. "Effect of millimeter waves and cyclophosphamide on cytokine regulation." *Immunopharmacology and Immunotoxicology* 34 (1):107-112. doi: 10.3109/08923973.2011.583252.
- Logani, M. K., A. Anga, I. Szabo, A. Agelan, A. R. Irizarry, et M. C. Ziskin. 2002. "Effect of millimeter waves on cyclophosphamide induced suppression of the immune system." *Bioelectromagnetics* 23 (8):614-21. doi: 10.1002/bem.10058.
- Logani, M. K., I. Szabo, V. Makar, A. Bhanushali, S. Alekseev, et M. C. Ziskin. 2006. "Effect of millimeter wave irradiation on tumor metastasis." *Bioelectromagnetics* 27 (4):258-64. doi: 10.1002/bem.20208.
- Logani, M., Y. Liu, et M.C. Ziskin. 1999. "Millimeter waves enhance delayed-type hypersensitivity in mouse skin." *Electro Magnetobiol* 18 (2):165-176.
- Logani, M.K., A. Agelan, et M.C. Ziskin. 2002. "Effect of millimeter wave radiation on catalase activity " *Electromagnetic Biology and Medicine* 21 (3):303-8. doi: 10.1081/JBC-120016009
- Logani, M.K., et M.C. Ziskin. 1996. "Continuous millimeter-wave radiation has no effect on lipid peroxidation in liposomes." *Radiat Res* 145 (2):231-5.
- Lushnikov, K. V., Y. V. Shumilina, V. S. Yakushina, A. B. Gapeev, V. B. Sadovnikov, et N. K. Chemeris. 2004. "Effects of low-intensity ultrahigh frequency electromagnetic radiation on inflammatory processes." *Bull Exp Biol Med* 137 (4):364-6. doi: 10.1023/b:bebm.0000035131.54215.ca.
- Lysenyuk, V.P., I.Z. Samosyuk, Y.N. Kulikovich, et A.K. Kozhanova. 2000. "Experimental study on the low-intensity millimeter-wave electro-magnetic stimulation of acupuncture points." *Acupunct Electrother Res* 25 (2):91-9.
- Maes, A., U. Van Gorp, et L. Verschaeve. 2006. "Cytogenetic investigation of subjects professionally exposed to radiofrequency radiation." *Mutagenesis* 21 (2):139-42.
- Mahamoud, Y. S., M. Aite, C. Martin, M. Zhadobov, R. Sauleau, Y. Le Dréan, et D. Habauzit. 2016. "Additive effects of millimeter waves and 2-deoxyglucose co-exposure on the human keratinocyte transcriptome." *PLoS ONE* 11 (8). doi: 10.1371/journal.pone.0160810.
- Makar, V., M. Logani, I. Szabo, et M. Ziskin. 2003. "Effect of millimeter waves on cyclophosphamide induced suppression of T cell functions." *Bioelectromagnetics* 24 (5):356-65. doi: 10.1002/bem.10106.
- Makar, V. R., M. K. Logani, A. Bhanushali, S. I. Alekseev, et M. C. Ziskin. 2006. "Effect of cyclophosphamide and 61.22 GHz millimeter waves on T-cell, B-cell, and macrophage functions." *Bioelectromagnetics* 27 (6):458-66. doi: 10.1002/bem.20230.
- Makar, V. R., M. K. Logani, A. Bhanushali, M. Kataoka, et M. C. Ziskin. 2005. "Effect of millimeter waves on natural killer cell activation." *Bioelectromagnetics* 26 (1):10-9. doi: 10.1002/bem.20046.
- Millenbaugh, N. J., J. L. Kiel, K. L. Ryan, R. V. Blystone, J. E. Kalns, B. J. Brott, C. Z. Cerna, W. S. Lawrence, L. L. Soza, et P. A. Mason. 2006. "Comparison of blood pressure and thermal responses in rats exposed to millimeter wave energy or environmental heat." *Shock* 25 (6):625-32. doi: 10.1097/01.shk.0000209550.11087.fd.
- Millenbaugh, N. J., C. Roth, R. Sypniewska, V. Chan, J. S. Eggers, J. L. Kiel, R. V. Blystone, et P. A. Mason. 2008. "Gene expression changes in the skin of rats induced by prolonged 35 GHz millimeter-wave exposure." *Radiat Res* 169 (3):288-300. doi: 10.1667/RR1121.1.
- Minasbekyan, L. A., et M. R. Darbinyan. 2013. "Effects of extremely high frequency EMI on growth and some parameters of wheat seedlings Nuclei."
- Minasyan, S. M., G. Y. Grigoryan, S. G. Saakyan, A. A. Akhmyan, et V. P. Kalantaryan. 2007. "Effects of the action of microwave-frequency electromagnetic radiation on the spike activity of neurons in the supraoptic nucleus of the hypothalamus in rats." *Neurosci Behav Physiol* 37 (2):175-80. doi: 10.1007/s11055-007-0165-6.
- Nicolas Nicolaz, C., M. Zhadobov, F. Desmots, A. Ansart, R. Sauleau, D. Thouroude, D. Michel, et Y. Le Drean. 2009. "Study of narrow band millimeter-wave potential interactions with endoplasmic reticulum stress sensor genes." *Bioelectromagnetics* 30 (5):365-73. doi: 10.1002/bem.20481.
- Nicolas Nicolaz, C., M. Zhadobov, F. Desmots, R. Sauleau, D. Thouroude, D. Michel, et Y. Le Drean. 2009. "Absence of direct effect of low-power millimeter-wave radiation at 60.4 GHz on endoplasmic reticulum stress." *Cell Biol Toxicol* 25 (5):471-8. doi: 10.1007/s10565-008-9101-y.
- Nikitin, A., D. Suhareva, E. Mishchenko, A. Zubareva, O. Shurankova, et R. Spirov. 2017. Influence of electromagnetic radiation of extremely high frequency on sensitivity of plants to cold stress. Dans *IEEE International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS), 2017, : IEEE.*

- Novikova, N.S., T.B. Kazakova, V.J. Rogers, et Korneva E.A. 2002. "C-fos gene expression induced in cells in specific hypothalamic structures by noxious mechanical stimulation and its [correction of it's] modification by exposure of the skin to extremely high frequency irradiation." *Neuro Endocrinol Lett.* 23 (4):315-20.
- Ohanyan, V. 2012. "Combined Effects of Extremely High Frequency Electromagnetic Field and Antibiotics on *Enterococcus Hirae* Growth and Survival." *Biophys J* 112 (1):87-94.
- Pakhomov, A.G., Y. Akyel, O.N. Pakhomova, B.E. Stuck, et M.R. Murphy. 1998. "Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: a review of the literature." *Bioelectromagnetics* 19 (7):393-413.
- Pakhomov, A.G., et M.R. Murphy. 2000. "A comprehensive review of the research on biological effects of pulsed radiofrequency radiation in Russia and the former Soviet Union." *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems* 3:265-290.
- Pakhomov, A.G., H. K. Prol, Satnam P. Mathur, Yahya Akyel, et C. B. G. Campbell. 1997a. "Frequency-Specific Effects of Millimeter-Wavelength Electromagnetic Radiation in Isolated Nerve." *Electro- and Magnetobiology* 16 (1):43-57. doi: 10.3109/15368379709016172.
- Pakhomov, A.G., H.K. Prol, SP. Mathur, Y. Akyel, et C.B.G. Campbell. 1997b. "Search for Frequency-Specific Effects of Millimeter-Wave Radiation on Isolated Nerve Function." *Bioelectromagnetics* 18 (4):324-34.
- Pakhomov, A.G., Howard K. Prol, Satnam P. Mathur, Yahya Akyel, et C. B. G. Campbell. 1997c. "Role of field intensity in the biological effectiveness of millimeter waves at a resonance frequency." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 43 (1):27-33. doi: 10.1016/s0302-4598(97)00022-6.
- Pakhomova, O.N., A.G. Pakhomov, et Y. Akyel. 1997. "Effect of millimeter waves on UV-induced recombination and mutagenesis in yeast." *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 43 (2):227-232. doi: 10.1016/s0302-4598(96)05158-6.
- Partyla, T., H. Hacker, H. Edinger, B. Leutzow, J. Lange, et T. Usichenko. 2017. "Remote Effects of Electromagnetic Millimeter Waves on Experimentally Induced Cold Pain: A Double-Blinded Crossover Investigation in Healthy Volunteers." *Anesthesia and Analgesia* 124 (3):980-985. doi: 10.1213/ANE.0000000000001657.
- Pikov, V., X. Arakaki, M. Harrington, S. E. Fraser, et P. H. Siegel. 2010. "Modulation of neuronal activity and plasma membrane properties with low-power millimeter waves in organotypic cortical slices." *J Neural Eng* 7 (4):045003. doi: 10.1088/1741-2560/7/4/045003.
- Radziewsky, A. A., A. Cowan, C. Byrd, A. A. Radziewsky, et M.C. Ziskin. 2002. "Single millimeter wave treatment does not impair gastrointestinal transit in mice." *Life Sci* 71 (15):1763-70. doi: 10.1016/s0024-3205(02)01944-6
- Radziewsky, A. A., O. V. Gordiienko, S. Alekseev, I. Szabo, A. Cowan, et M. C. Ziskin. 2008. "Electromagnetic millimeter wave induced hypoalgesia: frequency dependence and involvement of endogenous opioids." *Bioelectromagnetics* 29 (4):284-95. doi: 10.1002/bem.20389.
- Radziewsky, A. A., O. V. Gordiienko, I. Szabo, S. I. Alekseev, et M. C. Ziskin. 2004. "Millimeter wave-induced suppression of B16 F10 melanoma growth in mice: involvement of endogenous opioids." *Bioelectromagnetics* 25 (6):466-73. doi: 10.1002/bem.20018.
- Radziewsky, A. A., M.A. Rojavin, A Cowan, S.I. Alekseev, et M.C. Ziskin. 2000. "Hypoalgesic effect of millimeter waves in mice: dependence on the site of exposure." *Life Sci* 66 (21):2101-11. doi: 10.1016/s0024-3205(00)00536-1
- Radziewsky, A. A., M.A. Rojavin, A Cowan, et M.C. Ziskin. 1999. "Suppression of pain sensation caused by millimeter waves: a double-blinded, cross-over, prospective human volunteer study." *Anesth Analg* 88 (4):836-40. doi: 10.1097/0000539-199904000-00029
- Radziewsky, A.A., M.A. Rojavin, A Cowan, S.I. Alekseev, A.A. Jr Radziewsky, et M.C. Ziskin. 2001. "Peripheral neural system involvement in hypoalgesic effect of electromagnetic millimeter waves." *Life Sci* 68 (10):1143-51. doi: 10.1016/s0024-3205(00)01016-x
- Ramundo-Orlando, A., G. Longo, M. Cappelli, M. Girasole, L. Tarricone, A. Beneduci, et R. Massa. 2009. "The response of giant phospholipid vesicles to millimeter waves radiation." *Biochim Biophys Acta* 1788 (7):1497-507. doi: 10.1016/j.bbame.2009.04.006.
- Rojavin, M.A., A Cowan, A. A. Radziewsky, et M.C. Ziskin. 1998. "Antipruritic effect of millimeter waves in mice: evidence for opioid involvement." *Life Sci* 63 (18):251-7. doi: 10.1016/s0024-3205(98)00436-6
- Rojavin, M.A., et M.C. Ziskin. 1995. "Effect of millimeter waves on survival of UVC-exposed *Escherichia coli*." *Bioelectromagnetics* 16 (3):188-96.
- Rojavin, M.A., et M.C. Ziskin. 1997. "Electromagnetic millimeter waves increase the duration of anaesthesia caused by ketamine and chloral hydrate in mice." *Int J Radiat Biol* 72 (4):475-80. doi: 10.1080/095530097143248
- Rojavin, MA, AA Radziewsky, A Cowan, et MC Ziskin. 2000. "Pain relief caused by millimeter waves in mice: results of cold water tail flick tests." *Int J Radiat Biol* 76 (4):575-9.
- Romanenko, S., R. Begley, A. R. Harvey, L. Hool, et V. P. Wallace. 2017. "The interaction between electromagnetic fields at megahertz, gigahertz and terahertz frequencies with cells, tissues and organisms: risks and potential." *J R Soc Interface* 14 (137). doi: 10.1098/rsif.2017.0585.

- Romanenko, S., P. H. Siegel, D. A. Wagenaar, et V. Pikov. 2013. "Comparison of the effects of millimeter wave irradiation, general bath heating, and localized heating on neuronal activity in the leech ganglion."
- Romanenko, S., P. H. Siegel, D. A. Wagenaar, et V. Pikov. 2014. "Effects of millimeter wave irradiation and equivalent thermal heating on the activity of individual neurons in the leech ganglion." *J Neurophysiol* 112 (10):2423-2431. doi: 10.1152/jn.00357.2014.
- Russell, C. L. 2018. "5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications." *Environ Res* 165:484-495. doi: 10.1016/j.envres.2018.01.016.
- Ryan, K. L., J. A. D'Andrea, J. R. Jauchem, et P. A. Mason. 2000. "Radio frequency radiation of millimeter wave length: potential occupational safety issues relating to surface heating." *Health Phys* 78 (2):170-81. doi: 10.1097/00004032-200002000-00006.
- Safronova, V.G., A.G. Gabdoukhakova, et B.F. Santalov. 2002. "Immunomodulating Action of Low Intensity MillimeterWaves on Primed Neutrophils." *Bioelectromagnetics* 23 (8):599-606. doi: 10.1002/bem.10056
- Samoilov, V. O., E. B. Shadrin, E. B. Filippova, Ya Katsnelson, H. Backhoff, et M. Eventov. 2015. "The effect of transcranial electromagnetic brain stimulation on the acquisition of the conditioned response in rats." *Biophysics* 60 (2):303-308. doi: 10.1134/S0006350915020165.
- Shanin, S. N., E. G. Rybakina, N. N. Novikova, I. A. Kozinets, V. J. Rogers, et E. A. Korneva. 2005. "Natural killer cell cytotoxic activity and c-Fos protein synthesis in rat hypothalamic cells after painful electric stimulation of the hind limbs and EHF irradiation of the skin." *Med Sci Monit* 11 (9):BR309-15.
- Shapiro, M. G., M. F. Priest, P. H. Siegel, et F. Bezanilla. 2013. "Thermal mechanisms of millimeter wave stimulation of excitable cells." *Biophys J* 104 (12):2622-8. doi: 10.1016/j.bpj.2013.05.014.
- Shcheglov, V. S., I.Y. Byelaev, E.D. Alipov, et V.D. Ushakov. 1997. "Power-dependant rearrangement in the spectrum of resonance effect of millimeter waves on the genome conformational state of . Coli cells." *Electro- and Magnetobiology* 16 (1):69-82. doi: 10.3109/15368379709016174
- Shcheglov, V.S., E.D. Alipov, et I.Y. Byelaev. 2002. "Cell-to-cell communication in response of E. coli cells at different phases of growth to low-intensity microwaves." *Biochim Biophys Acta* 1572 (1):101-6. doi: 10.1016/s0304-4165(02)00283-0
- Shckorbatov, Y.G., N.N. Grigoryeva, V.G. Shakhbazov, V.A. Grabina, et A.M. Bogoslavsky. 1998. "Microwave irradiation influences on the state of human cell nuclei." *Bioelectromagnetics* 19 (7):414-9.
- Shiina, T., Y. Suzuki, Y. Kasai, Y. Inami, M. Taki, et K. Wake. 2014. "Effect of two-times 24 hour exposures to 60 GHz millimeter-waves on neurite outgrowth in PC12VG cells in consideration of polarization."
- Shrivastava, P., et T. Rama Rao. 2017. "Investigations of SAR distributions and temperature elevation on human body at 60GHz with corrugated antipodal linear tapered slot antenna." *Progress In Electromagnetics Research M* 59:111-121. doi: 10.2528/PIERM17041707.
- Shrivastava, P., T. R. Rao, et B. T. Abe. 2018. "Analysis of human body temperature elevation at 60 GHz with antipodal linear tapered slot antenna."
- Siegel, P. H., et V. Pikov. 2010. "Impact of low intensity millimetre waves on cell functions." *Electronics Letters* 46 (26). doi: 10.1049/el.2010.8442.
- Simko, M., et M. O. Mattsson. 2019. "5G Wireless Communication and Health Effects-A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz." *Int J Environ Res Public Health* 16 (18). doi: 10.3390/ijerph16183406.
- Sivachenko, I. B., D. S. Medvedev, I. D. Molodtsova, S. S. Panteleev, A. Y. Sokolov, et O. A. Lyubashina. 2016. "Effects of Millimeter-Wave Electromagnetic Radiation on the Experimental Model of Migraine." *Bull Exp Biol Med* 160 (4):425-428. doi: 10.1007/s10517-016-3187-7.
- Soghomonian, D., et A. Trchounian. 2013. "Comparable effects of low-intensity electromagnetic irradiation at the frequency of 51.8 and 53 GHz and antibiotic ceftazidime on Lactobacillus acidophilus growth and survival." *Cell Biochem Biophys* 67 (3):829-35. doi: 10.1007/s12013-013-9571-2.
- Soghomonian, D., K. Trchounian, et A. Trchounian. 2016. "Millimeter waves or extremely high frequency electromagnetic fields in the environment: what are their effects on bacteria?" *Appl Microbiol Biotechnol* 100 (11):4761-4771. doi: 10.1007/s00253-016-7538-0.
- Soghomonian, D.R., V.P. Kalantaryan, et A.H. Trchounian. 2014. "Changes in the FOF1-ATPase activity of irradiated Lactibacillus acidophilus growth and survival." *Biolog Journal of Armenia* 3 (66):39-43.
- Stratton, J. A. 1941. "Electromagnetic theory." *New York: McGraw Hill Publishing Co.*
- Sypniewska, R. K., N. J. Millenbaugh, J. L. Kiel, R. V. Blystone, H. M. Ringham, P. A. Mason, et F. A. Witzmann. 2010. "Protein changes in macrophages induced by plasma from rats exposed to 35 GHz millimeter waves." *Bioelectromagnetics* 31 (8):656-63. doi: 10.1002/bem.20598
- Szabo, I., S. Alekseev, G. Acs, A. A. Radzievsky, M. Logani, V.R. Makar, O.R. Gordiienko, et M.C. Ziskin. 2004. "Destruction of cutaneous melanoma with millimeter wave hyperthermia in mice " *IEEE Transaction on Plasma Science* 32 (4):1653-60. doi: 10.1109/TPS.2004.830957

- Szabo, I., J. Kappelmayer, S. I. Alekseev, et M. C. Ziskin. 2006. "Millimeter wave induced reversible externalization of phosphatidylserine molecules in cells exposed in vitro." *Bioelectromagnetics* 27 (3):233-44. doi: 10.1002/bem.20202.
- Szabo, I., M. R. Manning, A. A. Radziewsky, M. A. Wetzel, T. J. Rogers, et M. C. Ziskin. 2003. "Low power millimeter wave irradiation exerts no harmful effect on human keratinocytes in vitro." *Bioelectromagnetics* 24 (3):165-73. doi: 10.1002/bem.10077.
- Szabo, I., M.A. Rojavin, T.J. Rogers, et M.C. Ziskin. 2001. "Reactions of keratinocytes to in vitro millimeter wave exposure." *Bioelectromagnetics* 22 (5):358-64.
- Tadevosyan, H., V. Kalantaryan, et A. Trchounian. 2008. "Extremely high frequency electromagnetic radiation enforces bacterial effects of inhibitors and antibiotics." *Cell Biochem Biophys* 51 (2-3):97-103. doi: 10.1007/s12013-008-9020-9.
- Tong, Y., Z. Yang, D. Yang, H. Chu, M. Qu, G. Liu, Y. Wu, et S. Liu. 2009. "Millimeter-wave exposure promotes the differentiation of bone marrow stromal cells into cells with a neural phenotype." *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci* 29 (4):409-12. doi: 10.1007/s11596-009-0403-y.
- Torgomyan, H., K. Hovnanyan, et A. Trchounian. 2013. "Escherichia coli growth changes by the mediated effects after low-intensity electromagnetic irradiation of extremely high frequencies." *Cell Biochem Biophys* 65 (3):445-54. doi: 10.1007/s12013-012-9448-9.
- Torgomyan, H., V. Ohanyan, S. Blbulyan, V. Kalantaryan, et A. Trchounian. 2012. "Electromagnetic irradiation of *Enterococcus hirae* at low-intensity 51.8- and 53.0-GHz frequencies: changes in bacterial cell membrane properties and enhanced antibiotics effects." *FEMS Microbiol Lett* 329 (2):131-7. doi: 10.1111/j.1574-6968.2012.02512.x.
- Torgomyan, H., H. Tadevosyan, et A. Trchounian. 2011. "Extremely high frequency electromagnetic irradiation in combination with antibiotics enhances antibacterial effects on *Escherichia coli*." *Curr Microbiol* 62 (3):962-7. doi: 10.1007/s00284-010-9811-2.
- Torgomyan, H., et A. Trchounian. 2015. "The enhanced effects of antibiotics irradiated of extremely high frequency electromagnetic field on *Escherichia coli* growth properties." *Cell Biochem Biophys* 71 (1):419-24. doi: 10.1007/s12013-014-0215-y.
- Ushakov, V.D., V. S. Shcheglov, I. Ya Belyaev, et M. Harms-ringdahl. 1999. "Combined Effects of Circularly Polarized Microwaves and Ethidium Bromide on *E. coli* CELLS." *Electro- and Magnetobiology* 18 (3). doi: 10.3109/15368379909022579
- Usichenko, T., et H.F. Herget. 2003. "Treatment of chronic pain with millimetre wave therapy (MWT) in patients with diffuse connective tissue diseases: a pilot case series study." *Eur J Pain* 7 (3):289-94. doi: 10.1016/S1090-3801(02)00125-8
- Usichenko, T. I., H. Edinger, V. V. Gizhko, C. Lehmann, M. Wendt, et F. Feyerherd. 2006. "Low-intensity electromagnetic millimeter waves for pain therapy." *Evid Based Complement Alternat Med* 3 (2):201-7. doi: 10.1093/ecam/nel012.
- Usichenko, T.I., O.I. Ivashkivsky, et V.V. Gizhko. 2003. "Treatment of rheumatoid arthritis with electromagnetic millimeter waves applied to acupuncture points--a randomized double blind clinical study." *Acupunct Electrother Res* 28 (1-2):11-8.
- Vignal, R., D. Crouzier, V. Dabouis, et J. C. Debouzy. 2009. "[Effects of mobile phones and radar radiofrequencies on the eye]." *Pathol Biol (Paris)* 57 (6):503-8. doi: 10.1016/j.patbio.2008.09.003.
- Vijayalaxmi, M.K. Logani, A. Bhanushali, M.C. Ziskin, et T.J. Prihoda. 2004. "Micronuclei in peripheral blood and bone marrow cells of mice exposed to 42 GHz electromagnetic millimeter waves." *Radiat Res* 161 (3):341-5. doi: 10.1667/rr3121
- Vlasova, II, E. V. Mikhailchik, A. A. Gusev, N. G. Balabushevich, S. A. Gusev, et K. D. Kazarinov. 2018. "Extremely high-frequency electromagnetic radiation enhances neutrophil response to particulate agonists." *Bioelectromagnetics* 39 (2):144-155. doi: 10.1002/bem.22103.
- Volkova, N. A., E. V. Pavlovich, A. A. Gapon, et O. T. Nikolov. 2014. "Effects of millimeter-wave electromagnetic exposure on the morphology and function of human cryopreserved spermatozoa." *Bull Exp Biol Med* 157 (5):574-6. doi: 10.1007/s10517-014-2618-6.
- Vorobyov, V.V., et R.N. Khramov. 2002. "Hypothalamic effects of millimeter wave irradiation depend on location of exposed acupuncture zones in unanesthetized rabbits." *Am J Chin Med* 30 (1):29-35. doi: 10.1142/S0192415X0200003X
- Wu, G., T. Sferra, X. Chen, Y. Chen, M. Wu, H. Xu, J. Peng, et X. Liu. 2011. "Millimeter wave treatment inhibits the mitochondrion-dependent apoptosis pathway in chondrocytes." *Mol Med Rep* 4 (5):1001-6. doi: 10.3892/mmr.2011.522.
- Wu, G. W., X. X. Liu, M. X. Wu, J. Y. Zhao, W. L. Chen, R. H. Lin, et J. M. Lin. 2009. "Experimental study of millimeter wave-induced differentiation of bone marrow mesenchymal stem cells into chondrocytes." *Int J Mol Med* 23 (4):461-7. doi: 10.3892/ijmm_00000152.

- Wu, H., D. Wang, Z. Shu, H. Zhou, H. Zuo, S. Wang, Y. Li, X. Xu, N. Li, et R. Peng. 2012. "Cytokines produced by microwave-radiated Sertoli cells interfere with spermatogenesis in rat testis." *Andrologia* 44:590-599. doi: 10.1111/j.1439-0272.2011.01232.x.
- Wu, T., T. S. Rappaport, et C. M. Collins. 2015a. "The human body and millimeter-wave wireless communication systems: Interactions and implications."
- Wu, T., T. S. Rappaport, et C. M. Collins. 2015b. "Safe for generations to come: Considerations of safety for millimeter waves in wireless communications." *IEEE Microwave Magazine* 16 (2):65-84. doi: 10.1109/MMM.2014.2377587.
- Xia, L., Q. L. Luo, H. D. Lin, J. L. Zhang, H. Guo, et C. Q. He. 2012. "The Effect of diVerent treatment time of millimeter wave on chondrocyte apoptosis, caspase-3, caspase-8, and MMP-13 expression in rabbit surgically induced model of knee osteoarthritis." *Rheumatology International* 32 (9):2847-2856. doi: 10.1007/s00296-011-2080-y.
- Xie, T., J. Pei, Y. Cui, J. Zhang, H. Qi, S. Chen, et D. Qiao. 2011. "EEG changes as heat stress reactions in rats irradiated by high intensity 35 GHz millimeter waves." *Health Phys* 100 (6):632-40. doi: 10.1097/HP.0b013e3182027d10.
- Ye, J., G. Wu, X. Li, Z. Li, C. Zheng, X. Liu, et H. Ye. 2015. "Millimeter Wave Treatment Inhibits Apoptosis of Chondrocytes via Regulation Dynamic Equilibrium of Intracellular Free Ca²⁺." *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine* 2015. doi: 10.1155/2015/464161.
- Yoon, M. Y., J. H. Choo, H. H. Yoon, H. C. Park, S. C. Kim, J. K. Park, et Y. K. Seo. 2014. "Effect of millimeter wave for differentiation of bone marrow stromal cells to osteoblasts-like cell." *Tissue Engineering and Regenerative Medicine* 11 (3):230-238. doi: 10.1007/s13770-014-0017-8.
- Yu, G., E. A. Coln, K.H. Schoenbach, M. Gellerman, P. Fox, L. Rec, et S. J. Beebe. 2002. "A study on biological effects of low-intensity millimeter waves." *IEEE Transactions on Plasma Science* 30 (4):1489-96. doi: 10.1109/TPS.2002.804179
- Zhadobov, M., S. I. Alekseev, Y. Le Dréan, R. Sauleau, et E. E. Fesenko. 2015. "Millimeter waves as a source of selective heating of skin." *Bioelectromagnetics* 36 (6):464-475. doi: 10.1002/bem.21929.
- Zhadobov, M., C. Nicolas Nicolaz, R. Sauleau, F. Desmots, et D. Thouroude. 2009. "Evaluation of the Potential Biological Effects of the 60-GHz Millimeter Waves Upon Human Cells " *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 57 (10):2949-56. doi: 10.1109/TAP.2009.2029308
- Zhadobov, M., R. Sauleau, L. Le Coq, L. Debure, D. Thouroude, D. Michel, et Y. Le Drean. 2007. "Low-power millimeter wave radiations do not alter stress-sensitive gene expression of chaperone proteins." *Bioelectromagnetics* 28 (3):188-96. doi: 10.1002/bem.20285.
- Zhadobov, M., R. Sauleau, V. Vie, M. Himdi, L. Le Coq, et D. Thouroude. 2006. "Interactions between 60-GHz millimeter waves and artificial biological membranes: dependence on radiation parameters " *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 54 (6):2534-42. doi: 10.1109/TMTT.2006.875811
- Zhadobov, Maxim, Nacer Chahat, Ronan Sauleau, Catherine Le Quement, et Yves Le Drean. 2011. "Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances." *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* 3 (2):237-247. doi: 10.1017/s1759078711000122.
- Ziskin, M. C. 2013. "Millimeter waves: acoustic and electromagnetic." *Bioelectromagnetics* 34 (1):3-14. doi: 10.1002/bem.21750.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2019-SA-0006

COURRIER ARRIVE

14 JAN. 2019

DIRECTION GENERALE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIREMINISTÈRE DES SOLIDARITÉS
ET DE LA SANTÉMINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE
ET DES FINANCESDirection générale de la Prévention
des risques

Direction générale de la santé

Direction générale des Entreprises

Paris, le

09 JAN. 2019

Le Directeur général
de la prévention des risques

Le Directeur général de la santé

Le Directeur général des entreprises

à

Monsieur le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et
du travail
14 rue Pierre et Marie Curie
94701 Maisons-Alfort

Objet : saisine relative à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et aux effets sanitaires associés.

Le déploiement des infrastructures de communication 5G a pour objectif de favoriser le développement de nouveaux services innovants, à l'attention à la fois des particuliers et des entreprises utilisatrices, dans des domaines variés comme la santé, les médias, les transports, ou encore les industries du futur. Des opérateurs mobiles ont déjà commencé à préparer des expérimentations dans plusieurs villes de France (Bordeaux, Lyon et Villeurbanne avec Bouygues Telecom, Lille, Douai et Marseille avec Orange et bientôt à Nantes et Toulouse avec SFR) visant à tester le fonctionnement des nouvelles infrastructures en vue d'un déploiement commercial à horizon 2020.

La 5G devra en effet s'appuyer sur de nouvelles bandes de fréquences, qui ont déjà été identifiées : en particulier la bande 3,5 GHz (3,4-3,8 GHz) qui permettra d'assurer l'objectif de couverture en 5G, et également la bande 26 GHz (26,5-27,5 GHz) qui assurera des besoins de grandes capacités et de faible latence sur une zone géographique très localisée.

Afin d'accompagner le déploiement et le développement de la 5G, le Gouvernement a présenté le 16 juillet dernier sa feuille de route nationale 5G. Un des quatre chantiers lancés par le Gouvernement vise à « Assurer la transparence et le dialogue sur le déploiement et l'exposition du public ». Un des objectifs de ce chantier est d'examiner l'exposition aux ondes électromagnétiques dues à ces nouveaux développements technologiques et d'évaluer

leur impact sanitaire éventuel dès la phase d'expérimentation puis dans le cadre des premiers déploiements commerciaux.

Il est en effet primordial qu'un travail d'évaluation soit mené dès l'amont afin d'adapter le cadre de contrôle de l'exposition (protocole de mesure) et d'évaluer les expositions du public associées à ces nouveaux usages.

La mise en œuvre de ce chantier nécessitera la mobilisation de différents services de l'État, en particulier la direction générale de la prévention des risques (DGPR), la direction générale de la santé (DGS), la direction générale des entreprises (DGE) ainsi que deux agences, l'Agence nationale des fréquences (ANFR) et l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

Dans ce cadre, nous sollicitons votre agence afin qu'elle réalise une évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition aux technologies associées au déploiement de la 5G. Cette expertise devra permettre :

1. Une description des caractéristiques et de la nature des signaux émis :
 - par les dispositifs rayonnants déployés dans le cadre des expérimentations, notamment dans la bande 3,5 GHz, pour laquelle des premiers résultats sont attendus pour mi 2019 ;
 - par les dispositifs rayonnants lors du déploiement commercial de la 5G, pour toutes gammes de fréquences ;
 - par les objets communicants utilisés dans les projets de déploiement de la 5G, dans la bande de fréquences 3,5 GHz et dans la bande 26 GHz; pour laquelle des premiers résultats sont attendus pour fin 2019.
2. Une évaluation du niveau d'exposition des personnes lié aux communications mobiles de technologie 5G :
 - en particulier dans le cas de l'utilisation de nouvelles antennes actives i) dans le cadre des expérimentations menées par les opérateurs de téléphonie mobile, pour laquelle des premiers résultats sont attendus pour mi 2019 et ii) dans le cadre du déploiement commercial de cette technologie; pour laquelle des premiers résultats seront attendus d'ici fin 2020.
 - dans les contextes d'usage des objets connectés dans les bandes 3,5 GHz et 26 GHz, pour laquelle des premiers résultats seront attendus d'ici fin 2020.
3. Une revue des connaissances existantes sur les effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans les bandes 3,5 GHz et 26 GHz, pour laquelle des premiers résultats sont attendus pour mi 2019.

A cet effet, vous pourrez vous appuyer sur les directions d'administration centrale concernées, l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep) et l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

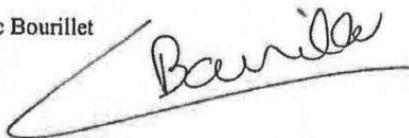
Pour la bonne réalisation de cette expertise (en particulier des points 1 et 2 ci-dessus), il est nécessaire de pouvoir accéder à un ensemble de données relatives à l'exposition du public (à recueillir en particulier lors des expérimentations). Sur ce point, l'établissement d'un protocole d'échange impliquant les acteurs économiques du déploiement de la 5G concernés (opérateurs de téléphonie mobile, équipementiers, ...), l'ANFR et l'Anses pourra être mis en place. Ce dispositif doit permettre à la fois l'adaptation et la réactivité nécessaire, tout en prenant en compte à la fois les contraintes concurrentielles et les prérogatives de l'ANSES au titre de l'article L.1313-2 du Code de la santé publique.

Nous vous remercions de bien vouloir nous transmettre, pour janvier 2019, votre proposition de contrat d'expertise comprenant notamment les modalités de traitement et de restitution des travaux.

Le calendrier de restitution des travaux et des priorités sera à affiner ultérieurement avec vous. Néanmoins, nous attirons votre attention sur le fait que les premiers résultats sont attendus dès mi-2019.

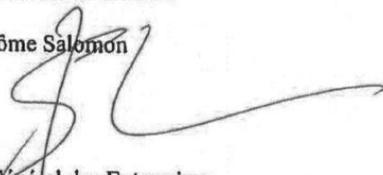
Le Directeur Général de la Prévention des Risques

Cédric Bourillet



Le Directeur Général de la Santé

Professeur Jérôme Salomon



Le Directeur Général des Entreprises

Thomas Courbe



Destinataires pour la réponse mail :

Destinataires DGPR :

Cheffe de la mission Bruit et agents physiques : Natalie.commeau@developpement-durable.gouv.fr

Destinataires DGE :

Sous-directeur des communications électroniques et des postes : Olivier.corolleur@finances.gouv.fr

Chef du bureau de la réglementation des communications électroniques : jean-pierre.labe@finances.gouv.fr

Destinataires DGS :

Adjointe à la cheffe du bureau de l'environnement extérieur et des risques chimiques : delphine.caamano@sante.gouv.fr

Copies :

Gilles BREGANT, Agence nationale des fréquences (ANFR)

Anne LAURENT, Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep)

Annexe 2 : Modèle de courrier envoyé aux constructeurs



LE DIRECTEUR GÉNÉRAL



Maisons-Alfort le 12 JUIN 2019

Objet : demande d'informations techniques sur la technologie 5G nécessaires à l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques

Monsieur le Président Directeur Général,

L'Anses, établissement public chargé d'évaluer les risques sanitaires liés à l'environnement, à l'alimentation et au travail, a été chargée par ses ministères de tutelle, et en particulier par les directions générales en charge de la santé, de l'environnement et de l'économie, de conduire une expertise relative à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication 5G et aux effets sanitaires associés. Vous trouverez la saisine datée du 9 janvier 2019 jointe à ce courrier. Cette expertise sera menée en collaboration avec l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

Afin de tenir compte du calendrier prévisionnel de déploiement de la technologie 5G, les premiers résultats de cette expertise, attendus pour mi-2019, devront permettre :

- de décrire les caractéristiques et la nature des signaux émis par les dispositifs rayonnants déployés dans le cadre des expérimentations, notamment dans la bande 3,5 GHz ;
- d'évaluer le niveau d'exposition des personnes lié aux communications mobiles de technologie 5G dans le cas de l'utilisation de nouvelles antennes actives dans le cadre des expérimentations menées par les opérateurs de téléphonie mobile.

Votre entreprise constitue un acteur important du déploiement de la technologie 5G. Afin de répondre à la demande d'expertise des pouvoirs publics, nous avons besoin d'informations de votre part sur les questions suivantes, relatives à des données sur les stations radioélectriques déployées, nécessaires à la simulation et à la mesure de l'exposition *in situ*, ainsi qu'à des données concernant les terminaux :

1. Données sur les antennes déployées

Les questions suivantes concernent chaque type d'antenne déployée dans le cadre des expérimentations.

- 1.1. Quelles sont les dimensions de l'antenne ?
- 1.2. Quelles sont la fréquence et la largeur de bande utilisées ?
- 1.3. Quelles sont les amplitudes de balayage horizontal et vertical des faisceaux de signalisation (broadcast) et des faisceaux de trafic ?
- 1.4. Quels sont les gains pour les faisceaux de signalisation et les faisceaux de trafic dans l'axe et dépointés ?
- 1.5. Quel type de beamforming est utilisé (grid of beam ou eigen beamforming) ?
- 1.6. Quel est le nombre de faisceaux de trafic possibles ?

- 1.7. Quel est le nombre maximal de faisceaux de trafic simultanés ?
- 1.8. Quelles sont les dimensions du périmètre de sécurité ?

2. Données supplémentaires pour la simulation de l'exposition

Les questions suivantes concernent chaque type d'antenne déployée dans le cadre des expérimentations.

- 2.1. Quelle est la puissance maximale nominale déclarée ?
- 2.2. Quelle est la puissance réelle maximale sur 6 minutes ?
- 2.3. Quel est le nombre d'antennes élémentaires du réseau mMIMO ?
- 2.4. Quelle est la loi de regroupement des antennes élémentaires ?
- 2.5. Quel est l'espacement vertical et horizontal des éléments rayonnants ?
- 2.6. Quels sont les diagrammes de rayonnement dans les configurations suivantes :
 - un faisceau de trafic dans l'azimut principal
 - un faisceau de trafic désaxé au maximum en azimut et en tilt.
- 2.7. Quelle est l'enveloppe du diagramme de rayonnement ?

3. Données supplémentaires pour la mesure *in situ*

Les questions suivantes concernent chaque type d'antenne déployée dans le cadre des expérimentations.

- 3.1. Quels sont les ratios TDD expérimentés ?
- 3.2. Quel est le SCS (espacement des sous porteuses) en kHz ?
- 3.3. Quel est le format des trames et quels sont les formats des slots ?
- 3.4. Quelle est la périodicité du SS burst ?
- 3.5. Quel est le nombre maximal de SSB (L) ?
- 3.6. Quelle est la puissance transmise des SSB ?
- 3.7. Quelle est la fréquence centrale exacte (F_REF ou N_REF) ?
- 3.8. Quelle est la position du SSB en fréquence (SSREF ou GSCN) ?

4. Données concernant les terminaux

- 4.1. Le trafic peut-il être généré sans terminal ?
- 4.2. Comment sont gérées les transmissions dans le cas où plusieurs terminaux sont utilisés simultanément dans une même cellule (séquençement des transmissions, nombre de faisceaux simultanés, puissance transmise dans les faisceaux, partage de largeur de bande...)?
- 4.3. Est-il possible d'avoir un téléchargement UDP pour 100% de la bande passante et en continu, quelles sont les limites ?

Nous vous demandons de répondre à ces questions de manière aussi précise que possible. Conscients de la nature confidentielle des expérimentations menées, les données récoltées sont uniquement destinées à la réalisation de l'expertise. Elles ne seront donc partagées qu'entre les équipes de l'Anses et de l'ANFR et n'ont pas vocation à être rendues publiques.

Compte tenu du calendrier de nos travaux, vous voudrez bien nous transmettre votre réponse dans le mois suivant la réception de ce courrier valant demande officielle. Merci de bien vouloir communiquer votre réponse par voie électronique à Emmanuelle Conil (emmanuelle.conil@anfr.fr) et à Lucile Migault (lucile.migault@anses.fr).

Je vous remercie de votre coopération et vous prie de croire, Monsieur le Président Directeur Général, à l'assurance de ma considération distinguée.

Le Directeur général
de l'Anses

Le Directeur général
de l'ANFR

Roger GENET

Gilles BRÉGANT

Pièce jointe : Saisine du 9 janvier 2019

3/3

Annexe 3 : Modèle de courrier envoyé aux opérateurs



LE DIRECTEUR GÉNÉRAL



Maisons-Alfort le 12 JUIN 2019

Objet : demande d'informations techniques sur la technologie 5G nécessaires à l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques

Monsieur le Directeur,

L'Anses, établissement public chargé d'évaluer les risques sanitaires liés à l'environnement, à l'alimentation et au travail, a été chargée par ses ministères de tutelle, et en particulier par les directions générales en charge de la santé, de l'environnement et de l'économie, de conduire une expertise relative à l'exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication 5G et aux effets sanitaires associés. Vous trouverez la saisine datée du 9 janvier 2019 jointe à ce courrier. Cette expertise sera menée en collaboration avec l'Agence nationale des fréquences (ANFR).

Afin de tenir compte du calendrier prévisionnel de déploiement de la technologie 5G, les premiers résultats de cette expertise, attendus pour mi-2019, devront permettre :

- de décrire les caractéristiques et la nature des signaux émis par les dispositifs rayonnants déployés dans le cadre des expérimentations, notamment dans la bande 3,5 GHz ;
- d'évaluer le niveau d'exposition des personnes lié aux communications mobiles de technologie 5G dans le cas de l'utilisation de nouvelles antennes actives dans le cadre des expérimentations menées par les opérateurs de téléphonie mobile.

Votre entreprise constitue un acteur important du déploiement de la technologie 5G. Afin de répondre à la demande d'expertise des pouvoirs publics, nous avons besoin d'informations de votre part sur les questions suivantes, relatives aux schémas de déploiement des expérimentations, à des données sur les stations radioélectriques déployées, à des données nécessaires à la simulation et à la mesure de l'exposition *in situ*, ainsi qu'à des données concernant les futurs schémas de déploiement prévus :

1. Données sur les schémas de déploiement des expérimentations

- 1.1. Quel est le calendrier de déploiement des expérimentations ?
- 1.2. Dans quels lieux ?

2. Données sur les antennes déployées pour les expérimentations

Les questions suivantes concernent les antennes déployées dans le cadre de chacune des expérimentations.

- 2.1. Quel est le nombre d'antennes pour chaque expérimentation ?
- 2.2. Quelle est la position GPS de chaque antenne ?
- 2.3. Quel est l'emplacement de chaque antenne (extérieur, intérieur) ?
- 2.4. Quelle est la hauteur du bas de l'antenne ?

- 2.5. Quelles sont les dimensions de l'antenne ?
- 2.6. Quelles sont la fréquence et la largeur de bande utilisées ?
- 2.7. Quelles sont les amplitudes de balayage horizontal et vertical des faisceaux de signalisation et des faisceaux de trafic ?
- 2.8. Quel est le tilt mécanique ?
- 2.9. Quel est l'azimut central ?
- 2.10. Quel est le gain pour les faisceaux dans l'axe et dépointés ?
- 2.11. Quel type de beamforming est utilisé (grid of beam ou eigen beamforming) ?
- 2.12. Quel est le nombre de faisceaux de trafic possibles ?
- 2.13. Quel est le nombre maximal de faisceaux simultanés ?
- 2.14. Quelles sont les dimensions du périmètre de sécurité ?

3. Données supplémentaires pour la simulation de l'exposition

Les questions suivantes concernent les antennes déployées dans le cadre des expérimentations.

- 3.1. Quelle est la puissance maximale nominale déclarée ?
- 3.2. Quelle est la puissance réelle maximale sur 6 minutes ?
- 3.3. Quel est le nombre d'antennes élémentaires du réseau mMIMO ?
- 3.4. Quelle est la loi de regroupement des antennes élémentaires ?
- 3.5. Quelle est l'ouverture horizontale et verticale pour les faisceaux SSB et les faisceaux de trafic ?
- 3.6. Quel est l'espacement vertical et horizontal des éléments rayonnants ?
- 3.7. Quels sont les diagrammes de rayonnement dans les configurations suivantes :
 - un faisceau de trafic dans l'azimut principal
 - un faisceau de trafic désaxé au maximum en azimut et en tilt
- 3.8. Quelle est l'enveloppe du diagramme de rayonnement ?
- 3.9. Quel est le périmètre de sécurité ?

4. Données supplémentaires pour la mesure *in situ*

Les questions suivantes concernent les antennes déployées dans le cadre des expérimentations.

- 4.1. Quels sont les ratios TDD expérimentés ?
- 4.2. Quel est le SCS (espacement des sous porteuses) en kHz ?
- 4.3. Quel est le format des trames et quels sont les formats des slots ?
- 4.4. Quelle est la périodicité du SS burst ?
- 4.5. Quel est le nombre maximal de SSB (L) ?
- 4.6. Quelle est la fréquence centrale exacte (F_REF ou N_REF) ?
- 4.7. Quelle est la position du SSB en fréquence (SSREF ou GSCN) ?

5. Données sur les schémas de déploiement futurs

- 5.1. Quel est niveau de couverture attendu et à quelle échéance ?
- 5.2. Combien d'antennes vont être déployées par quartier / par site / par rue, en intérieur et extérieur ?
- 5.3. Quelle sera la cohabitation avec les autres générations de téléphonie mobile ?

Nous vous demandons de répondre à ces questions de manière aussi précise que possible. Conscients de la nature confidentielle des expérimentations menées, les données récoltées sont uniquement destinées à la réalisation de l'expertise. Elles ne seront donc partagées qu'entre les équipes de l'Anses et de l'ANFR et n'ont pas vocation à être rendues publiques.

Compte tenu du calendrier de nos travaux, vous voudrez bien nous transmettre votre réponse dans le mois suivant la réception de ce courrier valant demande officielle. Merci de bien vouloir communiquer votre réponse par voie électronique à Emmanuelle Conil (emmanuelle.conil@anfr.fr) et à Lucile Migault (lucile.migault@anses.fr).

Je vous remercie de votre coopération et vous prie de croire, Monsieur le Directeur, à l'assurance de ma considération distinguée.

Le Directeur général
de l'Anses

Le Directeur général
de l'ANFR

Roger GENET

Gilles BRÉGANT

Pièce jointe : Saisine du 9 janvier 2019

Annexe 4 : Effet thermique des radiofréquences

Rappelons que l'on désigne sous le terme de « radiofréquences » des rayonnements électromagnétiques de fréquences comprises entre environ 10 kHz et 300 GHz. Parmi les applications utilisant des radiofréquences, on trouve les émissions radio AM et FM (80 MHz à 110 MHz), la télévision (jusqu'à 800 MHz), les téléphones mobiles et autres systèmes de communications sans fil (entre 700 MHz et 2,6 GHz), les fours à micro-ondes, le *Bluetooth* et le Wi-Fi (2,45 GHz) et les radars (> 10 GHz). À des fréquences plus élevées, on retrouve les ondes Téra Hertz, les infrarouges (IR) puis la lumière visible.

L'état actuel des connaissances sur la pénétration des radiofréquences dans les systèmes biologiques et les mécanismes d'interaction qui s'en suivent repose sur deux considérations principes :

- le fait que la matière biologique (vivante) est un milieu diélectrique car très riche en eau ; or l'eau est une petite molécule qui, parmi toutes les molécules biologiques, a le plus fort moment dipolaire (1,84 Debye, le Debye valant $3,356 \cdot 10^{-30}$ C.m) ;
- l'étude de l'interaction des radiofréquences avec différents matériaux diélectriques (dont la matière biologique) qui a permis de mettre en relief l'impact de la composante électrique des radiofréquences avec le moment dipolaire des molécules biologiques, essentiellement l'eau (Stratton 1941).

En pratique, la profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques radiofréquences est fortement dépendante de la fréquence (cf. Figure 6).

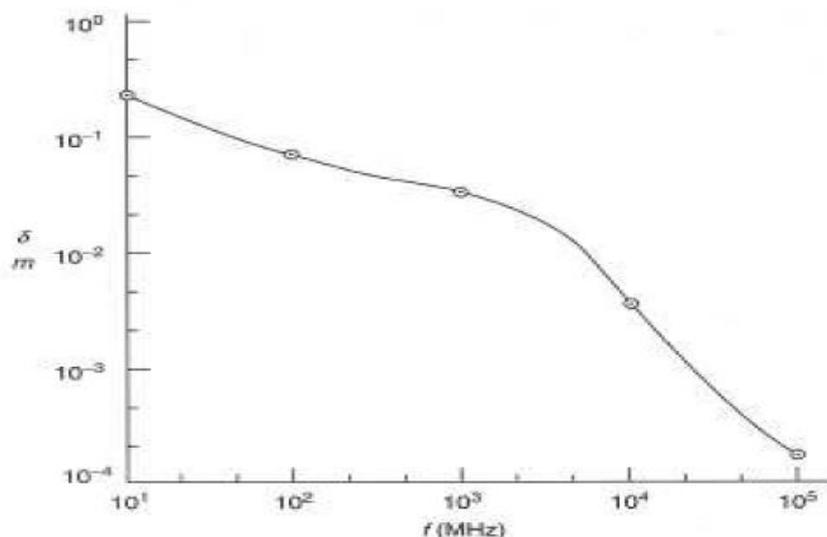


Figure 6 : Profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un muscle

(Barnes et Greenebaum 2006)

La considération d'effets néfastes sur la santé a imposé la définition de valeurs limites d'exposition, établies par la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp) :

- en basses fréquences (jusqu'à 10 MHz), la restriction s'établit à partir du champ électrique interne (V/m). Cette restriction est destinée à prévenir les phénomènes de courants induits dans les tissus excitables (muscles et cellules nerveuses), ainsi que certains effets sensoriels.
- entre 100 kHz et 10 GHz, les ondes sont plus ou moins pénétrantes et sont transformées, pour l'essentiel, en chaleur. C'est le débit d'absorption spécifique (DAS, voir plus loin) qui rend compte de l'énergie absorbée/dissipée sous forme de chaleur dans l'organisme par unité de temps et de masse. Evalué localement ou sur l'organisme entier, il s'exprime en W/kg selon la formule suivante : $DAS = \sigma \cdot E^2 / \rho$, où E est l'intensité du champ électrique (valeur RMS ou efficace), σ la conductivité spécifique du tissu (en S/m) et ρ sa densité (en kg/m³).
- la pénétration des ondes dans l'organisme est très limitée entre 10 GHz et 300 GHz. Les effets sont donc essentiellement surfaciques. Le DAS est alors remplacé par la densité superficielle de puissance (DSP), exprimée en W/m² selon la formule suivante : $DSP = P \cdot G / (4\pi r^2)$ où P est la puissance totale rayonnée dans l'espace libre par l'antenne, G est le gain isotropique maximal de l'antenne et r la distance antenne - cible. Il reste que, pour ces ondes « millimétriques » (de 30 à 300 GHz, λ_{vide} varie

entre 1 et 10 mm), les seuls effets connus à ce jour sont d'ordre thermique. Les valeurs limites d'exposition sont donc fixées, en conséquence, à 5 mW/cm² pour les travailleurs et 1 mW/cm² pour le grand public.

Entre 100 kHz et 10 GHz, les moments dipolaires de l'eau et des molécules biologiques n'absorbent pas, de façon résonante, l'énergie de ces radiofréquences. Cependant, la composante électrique alternative entraîne, par couplage, le moment dipolaire des molécules d'eau du milieu biologique. Ces molécules ont alors tendance à suivre les oscillations du champ, ce qui génère des frottements intermoléculaires, une élévation de température et une dispersion diélectrique, c'est-à-dire une modification de la permittivité du milieu, sans effet sur sa conductivité.

Les pertes engendrées par frottements se traduisent, au sein du tissu exposé, par une relaxation thermique, c'est à dire une transformation en chaleur.

Cette relaxation thermique dépend de la fréquence et s'atténue exponentiellement avec le temps, avec une constante de temps de 5,84.10⁻¹¹ s (17,1 GHz) pour l'eau liquide à 20°C (Hasted 1973). Dans les matériaux biologiques, des mécanismes diélectriques supplémentaires impliquant les charges des membranes cellulaires, des protéines et des différentes interfaces, sont sensibles à différents domaines de fréquences ; ils suivent donc une atténuation exponentielle propre à chacun, laissant apparaître finalement trois domaines de relaxation thermique notés alpha, bêta et gamma.

Le « processus » caractérisé par la relaxation alpha entraîne une surperméabilité (jusqu'à 106 fois) de la matière biologique aux basses fréquences (quelques centaines de Hz, optimum à 100 Hz environ). Le « processus » caractérisé par la relaxation bêta disparaît au-dessus de quelques MHz. Le « processus » caractérisé par la relaxation gamma est quant à lui essentiellement celui de l'eau biologique¹³ ; il implique une bande de fréquences étendue, pratiquement comprise entre 1 GHz et 100 GHz, avec un optimum centré aux environs de 25 GHz à 37°C (Foster et Schwan 1996). Ce dernier processus est exploité industriellement dans les fours à micro-ondes par exemple, qui utilisent des fréquences dans le domaine des GHz (généralement 2,4 GHz suffisent car, au-delà de 1 GHz, l'eau a déjà du mal à suivre les oscillations du champ électrique des micro-ondes).

Les effets thermiques sont invoqués, sur des modèles de cultures cellulaires animales ou humaines, lorsque la température des cellules ou des tissus augmente suite à une exposition aux radiofréquences. Ce sont des effets qui concernent la partie haute des radiofréquences, au-dessus de 100 kHz, mais surtout à partir de 10 MHz et jusqu'à plusieurs dizaines de GHz. En pratique, le niveau d'échauffement des tissus biologiques est quantifié par le DAS (Débit d'absorption spécifique, ou SAR des anglo-saxons pour *Specific Absorption Rate*). Le DAS permet de fixer, de façon empirique, les limites d'énergie déposable par relaxation thermique *in vivo*, donc sous forme de chaleur. L'expérience acquise sur différentes espèces animales pour différentes fréquences montre qu'une augmentation de 1°C de la température centrale d'un organisme vivant impose un DAS moyen d'environ 4 W/kg (Afsset 2009, D'Andrea, Adair, et de Lorge 2003, Elder 1994). Au-dessous de cette valeur, le système de thermorégulation de l'organisme exposé est capable de maintenir la température corporelle, car la vascularisation des tissus biologiques permet l'évacuation de la chaleur.

Le DAS est l'énergie représentative d'une augmentation de température pour une masse de tissu donnée. Cette énergie est proportionnelle au carré de la valeur efficace du champ électrique appliqué :

$$DAS = \frac{\sigma |E_{eff}|^2}{\rho} = c \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\rho\sigma}$$

E_{eff} : valeur efficace de l'amplitude du champ électrique dans les tissus (V/m), c'est-à-dire la valeur crête divisée par racine de 2.

σ : conductivité du tissu (S/m)

ρ : masse volumique du tissu (kg/m³)

dT/dt : variation de température dans le tissu (°C/s)

J : densité de courant induit dans le tissu (A/m²)

c : Chaleur massique des tissus du corps humain exprimée en J/kg/K°

L'effet thermique sera donc d'autant plus important que le champ électrique sera élevé. Ainsi, une onde entretenue aura un effet thermique beaucoup plus important qu'une onde pulsée ou intermittente de même niveau énergétique. Il ne faut donc pas confondre énergie et puissance. Ainsi, à valeur efficace du champ

¹³ Les molécules d'eau liées à des protéines se comportent différemment de l'eau libre.

électrique égale, une onde de quelques nanosecondes (ns) déposera beaucoup moins d'énergie qu'une onde de quelques millisecondes (ms). Des signaux d'aussi courte durée ne peuvent donc engendrer que des effets thermiques négligeables et non détectables par la mesure.

Un article de revue de Foster et Glaser, publié en 2007, a fait le point sur les mécanismes thermiques liés à l'interaction entre les champs électromagnétiques radiofréquences et les systèmes biologiques (Foster et Glaser 2007). L'augmentation de température, en régime transitoire (peu de temps après le début de l'exposition), pour un DAS de 10 W/kg, est de 0,15°C/min. En régime permanent, l'augmentation de température, pour le même DAS, est de 0,1 à 0,3°C avec une constante de temps d'environ 1 à 2 min. Parmi les effets explorés par les auteurs, ils soulignent que le seuil de perception de chaleur chez l'Homme se situe à environ 0,06°C, et le seuil de la douleur, dans le cas de la peau exposée à des impulsions intenses de 3 s à 94 GHz, à une température de 43,9°C.

Les autres effets des champs électromagnétiques sur le vivant, pour ceux qui impliquent des expositions de forte intensité que l'on ne rencontre qu'exceptionnellement au quotidien, sont bien décrits dans la littérature scientifique. Cette connaissance a conduit à l'établissement de valeurs limites d'exposition, pour la population générale et pour les professionnels, qui préviennent la survenue des effets aigus à court terme (Icnirp 1998, Icnirp 2010). Si certains effets sur le vivant résultant d'expositions à de faibles intensités (inférieures aux valeurs limites d'exposition réglementaires) ont pu être décrits, leur implication dans la survenue d'effets sur la santé, à court ou long terme, est encore largement débattue (Anses 2013).

Les éléments relatifs aux effets des champs électromagnétiques radiofréquences sur les tissus biologiques sont principalement issus des rapports publiés par l'Anses (Afsset 2009, Anses 2013).