
**Expositions aux champs électromagnétiques liées
au déploiement de la technologie de communication
« 5G » et effets sanitaires éventuels associés**

Saisine n°2019-SA-0006 « 5G »

**RAPPORT
d'expertise collective**

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

Groupe de travail « 5G »

Mars 2021

Citation suggérée

Anses. (2021). Expositions aux champs électromagnétiques liées au déploiement de la technologie de communication « 5G » et effets sanitaires éventuels associés. (saisine 2019-SA-0006). Maisons-Alfort : Anses, 241 p.

Mots clés

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

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

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Présidente

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

Membres

Pierre DEGAUQUE – Professeur émérite, Université de Lille, Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN), UMR CNRS 8520, Groupe Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique (Telice)

Laura DRAETTA – Sociologue, Maître de conférences, Institut Interdisciplinaire de l'Innovation (i3) - UMR 9217, CNRS - Télécom Paris.

Jean-François DORÉ – Directeur de recherche émérite à l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm), UMR 1296 Radiations : Défense, Santé, Environnement, Inserm - Centre Léon Bérard, Lyon.

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

Jürg KESSELRING – Professeur de neurologie et neuro-ré-adaptation, membre du groupe consultatif d'experts en matière de RNI (BERENIS) de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFE) en Suisse

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

Frédérique PERONNET – Directrice de recherche CNRS, Equipe Contrôle épigénétique de l'homéostasie et de la plasticité du développement, Laboratoire de Biologie du Développement, Institut de Biologie Paris Seine

Hakeim TALLEB – Maître de Conférence-HDR, Laboratoire Génie Électrique et Électronique de Paris - GeePs, UMR 8507 CNRS- Centrale Supélec-Sorbonne Université-Université Paris Saclay

György THUROCZY – Chef d'unité, Unité de Rayonnement Non-Ionisant, Centre National de Santé Publique (CNSP), Hongrie

Marie-Pierre ROLS – Directrice de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS, Institut de Pharmacologie et de Biologie Structurale - Université de Toulouse.

Benjamin VATOVEZ – Ingénieur civil physicien, Responsable de la Cellule Champs électromagnétiques, Direction des Risques chroniques, Institut scientifique de Service public (ISSeP), Belgique.

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

Les travaux, objets du présent rapport, ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

« Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » (mandat 2017-2021)
puis par le CES « Agents physiques et nouvelles technologies » (mandat 2021 – 2024).

■ CES « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » – 2017-2021

Présidente

Anne PEREIRA DE VASCONCELOS – Neurobiologiste, Chargée de recherche hors classe, 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 – Chercheur / 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 retraitée.

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 Grenoble Alpes, 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.

■ CES « Agents physiques et nouvelles technologies » – 2021

Présidente

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

Membres

Valentina ANDREEVA - Maître de conférences à l'université Sorbonne Paris Nord, Équipe de recherche en épidémiologie nutritionnelle.

Serge BOARINI - Professeur agrégé en Philosophie, Bourgoin-Jallieu.

Anne BOURDIEU - Médecin du travail, experte au pôle des risques physiques et psychosociaux, domaine des rayonnements ionisants et non ionisants, INRS, Département Études et assistance médicales, Paris.

Jean-Marie BURKHARDT - Directeur de recherche en Psychologie, Ergonomie Cognitive à l'université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR) - Laboratoire de Psychologie et d'ergonomie appliquée.

Philippe CHAUMET-RIFFAUD - Professeur des universités – Praticien hospitalier, spécialiste en médecine nucléaire à l'université Paris-Saclay

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

Pierre DEGAUQUE - Professeur émérite à l'université de Lille Institut d'Electronique, Microélectronique et Nanotechnologies (IEMN – UMR CNRS 8520), Groupe Télécommunications, Interférences et Compatibilité Electromagnétique (TELICE).

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

Didier DULON - Directeur de Recherche à l'INSERM, en Neurosciences, Institut de l'Audition, Institut Pasteur, Paris.

Guillaume DUTILLEUX - Professeur acoustique de l'environnement à l'université de sciences et techniques de Norvège, Trondheim, Département des Systèmes Électroniques.

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.

Nicolas FELTIN - Responsable du Département matériaux au laboratoire national de métrologie et d'essais, direction de la métrologie scientifique et industrielle, Paris.

Luc FONTANA - Professeur de Médecine et santé au travail à l'université Jean Monnet Faculté de médecine, Consultation de pathologies professionnelles et environnementales, Saint-Etienne.

Pierre-Marie GIRARD - Chargé de Recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en biologie des radiations, Institut Curie – Centre de Recherche – UMR3347, Centre Universitaire, Orsay.

Fabrice GIRAUDET - Maître de Conférences HDR à l'université de Clermont-Auvergne, - UMR 1107 Inserm NEURO DOL Biophysique Neurosensorielle, Clermont Ferrand.

Pascal GUENEL - Directeur de recherche, directeur de l'équipe cancer et environnement, INSERM, Centre de recherche en épidémiologie et santé des populations (CESP Inserm U1018), Villejuif.

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

Thierry LETERTRE - Enseignant Chercheur, CentraleSupélec, Laboratoire SONDRRA, Gif-sur-Yvette.

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

Jean-Luc MOREL - Chargé de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Institut des Maladies Neurodégénératives, Bordeaux.

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).

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).

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, Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France.

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

Dina ATTIA – Chef de projets scientifiques – Unité Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements – Anses.

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 scientifiques - 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.

CONTRIBUTIONS EXTÉRIEURES AU(X) COLLECTIF(S)

« Les risques du déploiement. L'émergence de la controverse sur la 5G en France », Demortain D. et Féron A. 2020 Rapport de recherche, LISIS

« La couverture médiatique du problème de la 5G en France. Une analyse quantitative », Demortain D., 2021, Rapport de recherche, LISIS

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Sigles et abréviations.....	12
Liste des tableaux	13
Liste des figures.....	14
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise	16
1.1 Contexte et objet de la saisine	16
1.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	17
1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts	18
2 Déploiement de la 5G et controverse publique associée.....	19
2.1 Déploiement de la 5G en France et à l'étranger.....	19
2.1.1 Introduction	19
2.1.2 Déploiement au niveau international	19
2.1.3 Déploiement en France	21
2.2 La controverse publique autour du déploiement de la 5G, en France	24
2.2.1 5G : un assemblage d'évolutions technologiques qui pose problème	26
2.2.2 Temporalité de la controverse	27
2.2.3 Les acteurs	34
2.2.4 Les arènes d'opposition	36
2.2.5 La médiatisation de la 5G en France. Analyse de la presse	40
2.2.6 Le cadrage sanitaire.....	48
2.2.7 Le positionnement de la communauté universitaire	49
2.2.8 Conclusion	58
3 Positions institutionnelles internationales concernant les effets sanitaires de la 5G	61
3.1 Instances internationales	61
3.2 Instances nationales étrangères	63
3.2.1 États Unis.....	63
3.2.2 Australie et Nouvelle Zélande.....	64
3.2.3 Europe	65
3.2.4 Conclusion	68
4 Données d'exposition à la 5G	69
4.1 Cadre normatif et réglementaire	69
4.1.1 Présentation des lignes directrices de l'Icnirp	69
4.1.2 Lignes directrices de l'Icnirp publiées en 1998	70
4.1.3 Lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2020	72
4.1.4 Comparaison des valeurs limites d'exposition	79

4.1.5	L'application et l'évolution des valeurs limites dans le contexte du déploiement de la 5G	80
4.2	Évolutions technologiques menant à la 5G dans la bande de fréquences inférieures à 6 GHz	81
4.2.1	Rappel des principales caractéristiques du signal 4G et de ses versions successives	81
4.2.2	Introduction à la 5G	83
4.2.3	Modalités de déploiement de la 5G	84
4.2.4	Faisceaux générés par la station de base 5G et affectation temporelle des liens émission - réception	85
4.3	Évaluation du niveau d'exposition dans les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz	90
4.3.1	Considérations sur l'exposition aux sources proches (téléphones mobiles)	90
4.3.2	Principes généraux de la mesure de l'exposition aux stations de base	91
4.3.3	Mesures régulières de l'exposition due aux stations de base en France	92
4.3.4	Mesures de l'exposition due aux stations de base sur des réseaux 5G opérationnels (Royaume-Uni et Corée du sud) ou en cours de déploiement (France)	93
4.3.5	Introduction à la notion d'indicateur d'exposition	97
4.3.6	Indicateur d'exposition fondé sur une taille estimée des fichiers à transmettre	97
4.3.7	Indicateurs d'exposition basés sur une approche statistique	101
4.3.8	Indicateur d'exposition basé sur une extrapolation des résultats de mesures effectuées sur les blocs de signalisation	103
4.3.9	Environnements particuliers : distribution du champ électromagnétique au sein d'un milieu confiné	103
4.3.10	Synthèse de l'analyse bibliographique et conclusion	105
4.4	Évaluation du niveau d'exposition dans la bande (24 – 60) GHz en champ lointain et en champ proche	108
5	Éléments de réflexion sur les interactions des ondes électromagnétiques avec le vivant dans les nouvelles bandes de fréquences des technologies 5G	109
5.1	Aspects biophysiques des interactions champs électromagnétiques – vivant dans la bande 3,5 GHz	109
5.1.1	Absorption de l'énergie électromagnétique dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz	109
5.1.2	Profondeur de pénétration et coefficient de réflexion des ondes électromagnétiques	110
5.1.3	Rôle des caractéristiques des signaux de communication (forme temporelle, modulation) dans les interactions biophysiques	111
5.1.4	Absorption moléculaire, effets microthermiques et « points chauds »	113
5.2	Réflexions sur les caractéristiques possibles des futures expositions dans la bande 26 GHz	114

5.2.1	Introduction	114
5.2.2	Exposition en champ lointain	118
5.2.3	Exposition en champ proche	125
5.2.4	Conclusions	127
6	Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par la technologie 5G	129
6.1	Méthode d'évaluation	129
6.1.1	Des approches différentes selon la bande de fréquences considérée	129
6.1.2	Recueil de la littérature scientifique pour les bandes de fréquences autour de 3,5 GHz et 26 GHz	130
6.1.3	Une analyse collective	131
6.1.4	Critères de qualité retenus pour l'analyse des études et présentation des résultats	131
6.1.5	Évaluation du niveau de preuve d'un effet sanitaire ou biologique donné pour la bande 26 GHz	132
6.2	Effets éventuels liés à l'exposition aux champs radiofréquences dans la bande 700 – 2 500 MHz	133
6.2.1	Introduction	133
6.2.2	Les rapports annuels suédois « Recent research on EMF and health risk » par le SSM's scientific council on electromagnetic fields 2018, 2019, 2020	134
6.2.3	Rapport du Conseil de la santé des Pays bas 2020 « 5G et Santé » (<i>Background document to the advisory report 5G and health</i> , N° 2020/16e - La Hague, 2 septembre 2020)	137
6.2.4	Autres rapports	141
6.2.5	Conclusion	142
6.3	Effets éventuels liés à l'exposition aux champs radiofréquences dans la bande 3,5 GHz	142
6.3.1	Analyse des publications issues de la recherche bibliographique	142
6.3.2	Réflexions sur l'impact de la fréquence des champs électromagnétiques sur les effets biologiques ou sanitaires observés	148
6.3.3	Conclusion	155
6.4	Effets éventuels liés à l'exposition aux champs radiofréquences dans la bande (24 – 60) GHz	156
6.4.1	Effets sur la peau	156
6.4.2	Effets sur l'œil	165
6.4.3	Effets sur le système nerveux central	170
6.4.4	Effets sur les membranes cellulaires	177
6.4.5	Effets génotoxiques	184
6.4.6	Autres effets	188

7	Conclusions et recommandations du groupe de travail	195
7.1	Conclusions	195
7.1.1	Déploiement	195
7.1.2	Valeurs limites d'exposition	195
7.1.3	Controverse publique liée au déploiement de la 5G	195
7.1.4	Évaluation des effets sanitaires éventuels liés au déploiement de la 5G	196
7.2	Recommandations du groupe de travail	202
8	Bibliographie	205
Annexe 1 : Lettre de saisine		229
Annexe 2 : Effet thermique des radiofréquences		232
Annexe 3 : Rappel des notions d'apoptose et de nécrose		235
Annexe 4 : Titres de presse couverts dans le corpus d'articles constitué sur Factiva		237
Annexe 5 : Articles du corpus <i>The Conversation</i>		239
Annexe 6 : Mots clef utilisés dans la recherche bibliographique		241

Sigles et abréviations

5G : cinquième génération

5G-PPP : *5G Public Private Partnership* – Partenariat public-privé pour la 5G

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

ANFR : Agence nationale des fréquences

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

DGS : Direction générale de la santé.

FACS : *Fluorescence-activated cell sorting* - tri cellulaire induit par fluorescence

FDD : *Frequency Division Duplex* – Duplexage par division en fréquence

FFTe : Fédération française des télécoms

GHz : gigaHertz

GSM : *Global System for Mobile communications* – système global de communications mobiles

ICNIRP : *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* – Internet des objets

kHz : kiloHertz

LTE : *Long Term Evolution* – Évolution à long terme (évolution des normes UMTS)

ORNI : Ordonnance pour la protection contre le rayonnement non ionisant (Suisse)

RF : radiofréquences

TDD : *Time Division Duplex* – Duplexage par division du temps

UMTS : *Universal Mobile Telecommunication System* – système de communication mobile universel

URLLC : *Ultra-Reliable Low Latency Communication* – Communication ultra-fiable à faible latence

WiMAX : *Worldwide interoperability for Microwave Access* – Interopérabilité globale pour l'accès microonde

Liste des tableaux

Tableau 1 : Repères temporels et chronologiques de la controverse sur la 5G	27
Tableau 2 : Les formes de mobilisation contre la 5G	37
Tableau 3 : <i>Clusters</i> de termes présents dans la presse en 2019	41
Tableau 4 : <i>Clusters</i> de termes dans le corpus de 2020	44
Tableau 5 : Niveaux de référence en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp 1998 et recommandation européenne 1999/519/CE)	71
Tableau 6 : Niveaux de référence pour les travailleurs et la population générale	71
Tableau 7 : Niveaux de référence aux fréquences utilisées en téléphonie mobile (Icnirp, 1998) et recommandation européenne (1999/519/CE)	72
Tableau 8 : Restrictions de base (valeurs moyennes sur 6 minutes) en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)	73
Tableau 9 : Restrictions de base pour une exposition de moins de 6 minutes en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)	73
Tableau 10 : Niveaux de référence pour l'exposition du corps entier (moyenne sur 30 minutes) en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp 2020)	73
Tableau 11 : Niveaux de référence pour l'exposition localisée (moyenne sur 6 minutes) en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)	74
Tableau 12 : Niveaux de référence pour une exposition localisée inférieure à 6 minutes en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)	74
Tableau 13 : Niveaux de référence pour l'exposition localisée (moyenne sur 6 minutes)	76
Tableau 14 : Valeur des champs électriques obtenus dans différentes zones ou sur les trajets concernés	94
Tableau 15 : Comparaison des valeurs de champ, calculées au niveau de façades pour divers scénarios	100
Tableau 16 : Niveaux des champs calculés pour divers scénarios. Les 2 valeurs successives indiquées dans le Tableau correspondent à des points situés respectivement à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol et sur le devant des façades	100
Tableau 17 : Restrictions de base de l'Icnirp à 26 GHz	117
Tableau 18 : Niveaux de référence de l'Icnirp en fonction du type d'exposition (locale ou corps entier)	117
Tableau 19 : Caractéristiques des Femo-Pico-Micro-Cellules	118
Tableau 20 : Scénarios d'exposition pour une antenne femto-cellule	125
Tableau 21 : Modalités d'expertise en fonction des bandes de fréquences considérées	130

Liste des figures

Figure 1 : Déploiement de la 5G à travers le monde – août 2020	21
Figure 2 : Sites ouverts commercialement répartis selon les bandes 5G	23
Figure 3 : Le corpus Presse 2019 par nombre et date de publication des documents (n = 837)	40
Figure 4 : <i>Clusters</i> des termes les plus fréquemment utilisés ensemble dans les articles de presse papier et en ligne sur la 5G et ses risques pour la sante, en 2019.	42
Figure 5 : Le corpus Presse 2020 par nombre et date de publication des documents (n = 2 400)	44
Figure 6 : <i>Clusters</i> d'expressions les plus fréquemment utilisés ensemble dans les articles de presse papier et en ligne sur la 5G et ses risques pour la santé, en 2020	45
Figure 7 : <i>Clusters</i> hétérogènes rassemblant titres de presse et expressions les plus fréquemment utilisés dans les articles traitant de la 5G et des risques pour la santé en 2020.....	47
Figure 8 : Clusters issus de l'analyse du corpus <i>YouTube</i> , 2019	49
Figure 9 : Le corpus <i>The Conversation</i> par nombre et date de publication des documents (n = 39) ...	50
Figure 10 : Distribution du corpus des articles de <i>The Conversation</i> sur la 5G par champs scientifiques de leurs auteurs (n = 39).....	51
Figure 11 : Exemple de l'allure temporelle d'un symbole OFDM de durée T_{OFDM} : amplitude (échelle arbitraire) en fonction du temps.	82
Figure 12 : Principe de fonctionnement de la technique de duplexage FDD et TDD	83
Figure 13 : Couverture d'une zone depuis la station de base en 4G et en 5G.	84
Figure 14 : Différence d'architecture entre NSA et SA.....	85
Figure 15 : Exemple de la distribution temporelle de signaux de synchronisation	85
Figure 16 : Allocation des différents canaux et partages dans le domaine temporel	87
Figure 17 : Envoi des données depuis la BS (Liaison descendante).....	87
Figure 18 : Envoi des données depuis le mobile UE1	87
Figure 19 : Illustration d'affectation de RBs à 3 utilisateurs	88
Figure 20 : Valeurs limites d'exposition réglementaires en France - décret n° 2002-775 du 3 mai 2002	91
Figure 21 : Exemple d'enregistrement du champ total mesuré en un point fixe de Nantes.....	92
Figure 22 : Profondeur de pénétration des champs de radiofréquences dans les tissus corporels en fonction de la fréquence et du type de tissu	110
Figure 23 : forme temporelle d'un signal 5G en mode TDD.....	113
Figure 24 : Surface effective d'illumination sur un plan issu d'un rayonnement	119
Figure 25 : Mesure à 26 GHz et caractéristiques de l'antenne cornet utilisée.....	119
Figure 26 : Simulation d'un modèle simplifié multicouches soumis à un faisceau.....	121
Figure 27 : Simulation de la distribution de l'élévation de la température sur l'œil pour 10 W/m ² à 30 GHz (Bernardi <i>et al.</i> , 1998).....	122
Figure 28 : Valeurs de DAS dans les tissus de l'œil à 30 GHz (exposition de 10 W/m ²)	122
Figure 29 : Élévation de la température du visage suite à l'exposition pendant 5s à une onde plane de 1 000 W/m ²	123
Figure 30 : Réseaux d'antennes dans la bande « millimétrique »	124
Figure 31 : Élévations de température de la peau liées à différentes formes d'onde (modèle analytique)	125
Figure 32 : Illustrations pour les emplacements des futures antennes (Curtis)(Morelli)	127
Figure 33 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études sur les modèles animaux	132
Figure 34 :Schéma de la structure de l'œil.....	166
Figure 35 : Présentation du système nerveux central (à gauche), d'un neurone (au milieu) et d'un potentiel d'action (à droite)	171

Figure 36 : Représentation schématique d'une membrane	178
Figure 37 : Photos de cellules contrôle (A), ou traitées à la bléomycine (D)	185
Figure 38 : Spermatogénèse	190
Figure 39 : Section de tube séminifère.....	190
Figure 40 : Profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un muscle	232

DOCUMENT EN CONSULTATION PUBLIQUE

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

1.1 Contexte et objet de la saisine

L'Anses a été saisie le 9 janvier 2019 par les ministères en charge de la santé, de l'environnement et de l'économie pour la réalisation de l'expertise suivante : « Exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et effets sanitaires associés ».

Le déploiement des infrastructures de communication 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 grande capacité pour fournir des services riches en contenu, comme les vidéos, et les perspectives de croissance de l'internet des objets (IoT), qui alimentent le besoin d'une connectivité massive d'appareils, mais aussi d'une connectivité très fiable et à très faible latence (délai dans le temps de communication) pour des applications telles que les voitures connectées, les automatisations industrielles ou encore certaines applications dans le domaine de 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) permettra d'assurer l'objectif de couverture en téléphonie mobile à très haut débit et la bande 26 GHz (24,25-27,5 GHz) couvrira des besoins de communication pour un grand nombre d'objets et de faible latence sur une zone géographique très localisée.

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 5G¹. Un des quatre chantiers lancés par le Gouvernement vise à « assurer la transparence et le dialogue sur le déploiement et l'exposition du public ».

La saisine de l'Anses se décompose en trois points :

1. Une description des caractéristiques et de la nature des signaux émis.
2. Une évaluation du niveau d'exposition des personnes lié aux communications mobiles de technologie 5G.
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 https://www.economie.gouv.fr/files/files/Actus2018/Feuille_de_route_5G-DEF.pdf

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 étaient exploratoires.

La réponse à la saisine est donc fournie sous la forme de rapports de l'Anses et de l'ANFR complémentaires :

- deux rapports de l'ANFR : le premier, publié en juillet 2019, est une présentation générale de la 5G abordée sous l'angle de l'exposition des personnes² ; le second, publié en version intermédiaire en juillet 2019³ puis mis à jour en avril 2020⁴, présente les résultats de mesures d'exposition effectuées pendant les expérimentations pilotes 5G.
- deux rapports de l'Anses, un rapport préliminaire publié en janvier 2020⁵ qui a permis d'identifier les études disponibles portant sur les effets sanitaires éventuels liés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans les bandes 3,5 GHz et 26 GHz, et le rapport de cette présente expertise qui vise à évaluer le niveau de preuve associé aux effets étudiés dans la littérature scientifique.

L'expertise s'inscrit également dans le cadre d'une attente sociétale forte, émergeant d'une controverse publique qui accompagne le déploiement de la 5G en France et à l'étranger (cf. 2.2), et qui a la double particularité de relancer le débat sur l'exposition humaine aux radiofréquences et de faire intervenir une grande variété d'acteurs porteurs d'une pluralité de points de vue (associations, citoyens, représentants et partis politiques, collectivités locales, mais aussi médecins et scientifiques).

1.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « 5G », rattaché au comité d'experts spécialisé « Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements » l'instruction de cette saisine.

Le groupe de travail a été constitué à la suite d'un appel à candidatures public. Les experts membres de ce groupe ont été retenus pour leurs compétences scientifiques et techniques dans le domaine des champs électromagnétiques, de l'ophtalmologie, des neurosciences, de la dermatologie, de la génomique, de la biologie des membranes ainsi que des sciences sociales. Le groupe de travail a été créé en janvier 2020, il s'est réuni 14 fois en séances plénières entre janvier 2020 et mars 2021.

L'Anses a par ailleurs commandité une étude auprès du Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations Sociétés (Lisis) visant à quantifier la médiatisation de la controverse associée à la thématique de la technologie 5G entre 2019 et 2020.

² <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/CND/Rapport-ANFR-presentation-generale-5G.pdf>.

³ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/CND/Rapport-ANFR-resultats-mesures-pilotes-5G.pdf>.

⁴ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/5G/20200410-ANFR-rapport-mesures-pilotes-5G.pdf>.

⁵ <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2019SA0006Ra.pdf>.

Les travaux d'expertise ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires discutés avec les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) »

1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

2 Déploiement de la 5G et controverse publique associée

2.1 Déploiement de la 5G en France et à l'étranger

2.1.1 Introduction

La 5G est la norme technique de téléphonie mobile de 5^e génération et, à ce titre, elle succède à la 4G et peut être utilisée en complément de la 2G, de la 3G et de la 4G. Les principales caractéristiques de cette technologie ont été décrites dans le rapport préliminaire publié par l'Anses en janvier 2020 (Anses, 2020).

La norme 5G est plus particulièrement ouverte et flexible, tant au niveau de la configuration que des usages (téléphonie mobile à haut débit, Internet des objets, conduite automatique, télémédecine, etc.).

La 5G peut être déployée de plusieurs manières différentes, relatives aux bandes de fréquences et à son infrastructure (mode « *stand alone* » et « *non stand alone* »⁶). Le « *refarming* », par exemple, consiste à utiliser, pour la 5G, une bande de fréquences allouée à la 4G. Cette réallocation permet donc d'émettre de la 5G avec des antennes conventionnelles.

Le partage dynamique du spectre fréquentiel -*Dynamic Spectrum Sharing* (DSS)-, quant à lui, permet d'émettre simultanément de la 4G et de la 5G dans une même bande de fréquences.

L'agrégation de porteuses consiste à utiliser, de manière adaptative et dynamique, plusieurs bandes de fréquences, ce qui permet d'accroître le débit en fonction des bandes disponibles.

Ces notions sont détaillées au paragraphe 4.2.

2.1.2 Déploiement au niveau international

La téléphonie mobile de 5^e génération a débuté son déploiement à des rythmes différents selon les pays et les continents.

Le 3 avril 2019, la Corée du Sud est le premier pays à déployer la 5G sur son territoire, suivie par l'Australie en juillet 2019. La Corée du Sud possède actuellement le plus haut taux de pénétration au monde, il est prévu que 60 % des abonnements de téléphonie mobile soient des forfaits incluant la 5G en 2025. Comme ailleurs dans le monde, le réseau 5G repose tout d'abord sur l'infrastructure 4G existante (mode « *non stand alone* » ou NSA) dans la gamme des fréquences inférieures à 6 GHz (désignée par le terme « FR1 », bien que cette gamme puisse s'étendre jusqu'à 7 125 MHz environ).

L'utilisation d'une infrastructure « *stand alone* » (SA) a débuté aux États-Unis et en Chine, alors que les autres régions du monde ne s'équiperont pas d'une infrastructure complètement 5G avant au moins 2021 (avec des disparités prévisibles entre les pays).

En outre, la 5G utilise des bandes de fréquences spécifiques qui n'étaient pas allouées aux générations précédentes de téléphonie mobile, à savoir la bande 3,4-3,8 GHz et la gamme

⁶ En résumé : infrastructure reposant totalement sur les spécifications 5G, ou partiellement. Les notions techniques utilisées dans ce chapitre sont détaillées au chapitre 4.2.

des ondes dites « millimétriques » à partir de 24 GHz. Le déploiement de la 5G dans la bande 3,5 GHz représente la bande « cœur de réseau » avec un équilibre entre couverture et débit, tandis que l'utilisation de la gamme des ondes « millimétriques » ne sera pas généralisée avant plusieurs années. Remarquons toutefois quelques développements dans cette gamme aux États-Unis, au Japon et marginalement en Europe. En Chine, les premiers développements sont attendus à partir de 2022.

Enfin, aux fréquences inférieures à 6 GHz, la 5G peut utiliser des antennes conventionnelles qui ne sont pas conçues pour employer les techniques du *massive MIMO* (cf. paragraphe 4.2) et de la focalisation (*beamforming*), en employant la séparation en fréquence (FDD) des canaux montants (du téléphone à la station de base) et descendants (de la station de base au téléphone). C'est le cas, par exemple, de la bande 700 MHz qui n'a pas encore été allouée dans plusieurs pays ou de la bande 2 100 MHz qui a déjà été allouée à la 3G et à la 4G et dont l'usage est partiellement réaffecté à la 5G (« *refarming* »). Ce déploiement dans les bandes de fréquences conventionnelles a essentiellement pour but de répondre à des besoins de couverture en 5G, alors que les antennes à 3,5 GHz et celles fonctionnant dans la gamme des ondes « millimétriques » ont pour objectif d'atteindre des débits élevés. Cette stratégie de déploiement est appliquée sur le continent européen, aux États-Unis, en Amérique latine et en Australie. Elle est planifiée en Chine, au Japon et en Corée à partir de 2021.

Le déploiement de la 5G a été fortement encouragé par les institutions européennes, notamment via la création et le financement, en 2013, d'un partenariat public-privé dédié à la recherche sur la thématique (*5G Public Private Partnership*⁷), avec un budget de 700 millions d'euros de fonds publics. Le plan d'action de la Commission européenne pour le déploiement, présenté en 2016, prévoyait un lancement commercial coordonné en 2020 qui inclut la couverture d'une ville par État membre en 2020 et de toutes les zones urbaines et les axes de transport principaux d'ici 2025. L'identification et l'allocation des fréquences de la 5G devait également faire l'objet d'une collaboration entre les États membres et les acteurs du secteur. L'organisation d'essais 5G au niveau européen à partir de 2018, la promotion de normes communes au niveau mondial et l'incitation à l'adoption de feuilles de routes nationales étaient également des objectifs de ce plan.

En Grande-Bretagne, l'opérateur EE a officiellement lancé ses services commerciaux le 30 mai 2019, avec une première phase du déploiement axée sur l'utilisation combinée des technologies 4G et 5G. La deuxième phase constitue le passage à une infrastructure centrale 5G complète (mode « *stand alone* ») et un accroissement des capacités compatibles avec l'Internet des objets. La troisième phase, dès 2023, sera consacrée aux technologies de très faible latence (*Ultra Low Reliable Low Latency Communications*, URLLC), le découpage en tranches du réseau (« *slicing* ») et des débits plus élevés. Vodafone, quant à lui, a débuté son déploiement 5G en juillet 2019, après EE.

En Suisse, l'opérateur Swisscom avait annoncé une couverture de 90 % de la population d'ici fin 2019, un taux semblable ayant été avancé par Sunrise tandis que Salt misait sur le deuxième semestre 2019. Ces annonces ont été faites alors dans le contexte d'un moratoire en faveur de l'arrêt du déploiement de la 5G, par crainte des effets éventuels des champs électromagnétiques. Suite à une importante manifestation à Berne et à des pétitions, plusieurs cantons ont en effet suspendu les procédures pour la construction de nouvelles antennes au

⁷ <https://5g-ppp.eu/>

The 5G PPP will deliver solutions, architectures, technologies and standards for the ubiquitous next generation communication infrastructures of the coming decade. The challenge for the 5G Public Private Partnership (5G PPP) is to secure Europe's leadership in the particular areas where Europe is strong or where there is potential for creating new markets such as smart cities.

nom du principe de précaution. Les opérateurs continuent toutefois d'activer leurs antennes 5G.

Le 24 juin 2019, l'opérateur italien Telecom Italia (TIM) a déployé une 5G commerciale à Rome et à Turin. Vodafone a également déployé son réseau, entre autres dans ces deux villes et le 26 juillet 2019, pour développer la 5G en Italie, TIM et Vodafone ont conclu un accord pour fusionner leurs 22 000 sites d'antennes.

Le Japon a commencé son déploiement en 2020, tandis qu'en Chine les droits d'utilisation des premières bandes de fréquence ont été attribués en juin 2019.

Aux États-Unis, la bande 3,5 GHz est surtout utilisée par l'armée, ce qui en interdit l'usage pour le déploiement immédiat de la 5G. Pour cette raison, c'est la bande 24 - 28 GHz qui a été choisie initialement pour le déploiement de la 5G, malgré des portées plus faibles. Les opérateurs sont AT&T, Verizon et Sprint. Le gouvernement américain compte investir 20 milliards de dollars pour assurer le déploiement dans les zones moins peuplées.

La Figure 1 reprend l'état d'avancement, des investissements au développement commercial de la 5G à travers le monde, en date du mois d'août 2020. On distingue le déploiement de la 5G de son développement commercial à destination de l'utilisateur.



Figure 1 : Déploiement de la 5G à travers le monde – août 2020

2.1.3 Déploiement en France

Alors que le déploiement de la 5G était prévu en France pour 2020, conformément à l'agenda européen, la crise sanitaire de la Covid-19 a bousculé ce calendrier. Le 31 décembre 2019, l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (Arcep) avait annoncé

que l'appel à candidatures pour l'attribution des fréquences de la bande 3,4 - 3,8 GHz ainsi que l'arrêté lançant la procédure d'attribution avaient été publiés au Journal Officiel. La date de remise des dossiers de candidature des opérateurs avait été fixée au 25 février 2020, tandis que la procédure d'attribution et de délivrance des autorisations d'utilisation de fréquences était prévue pour le 21 avril 2020. Mais dans un communiqué du 2 avril 2020, l'Arcep mentionnait que « les circonstances actuelles de crise sanitaire n'ont pas permis de conduire les préparatifs nécessaires à l'organisation matérielle de cette enchère, initialement prévue au mois d'avril ».

Parallèlement, des recours au fond et en référé contre la 5G ont été déposés au Conseil d'État par les associations Priartem et Agir pour l'environnement, craignant les effets éventuels d'un lancement précipité de cette technologie en l'absence d'évaluation environnementale et sanitaire. Ces recours, déposés le 17 février 2020, demandaient la suspension des textes juridiques relatifs au déploiement de la 5G⁸, invoquant le principe de précaution inscrit dans la Charte de l'environnement de 2004, la sobriété énergétique et électromagnétique, ainsi que la réglementation européenne et nationale sur la protection de la santé. Ces deux associations avaient déjà mis en ligne – en octobre 2019 – la pétition « Stop à la 5G » demandant « au gouvernement d'adopter un moratoire sur l'attribution des enchères 5G ».

À noter également que le syndicat CFE-CGC d'Orange avait déposé un recours complémentaire contre ce qu'il considérait comme des irrégularités de nature à léser les salariés du groupe.

Les enchères pour l'attribution des fréquences 5G se sont déroulées du 29 septembre au 1^{er} octobre 2020. Elles ont permis aux quatre opérateurs nationaux, Bouygues Telecom, Free, Orange et SFR, d'acquérir des fréquences pour un montant total de 2,789 milliards d'euros versés à l'État français. Les premières offres commerciales à destination du public ont été proposées en novembre 2020.

Le 31 décembre 2020, le Conseil d'État⁹ a rejeté les recours contre la procédure d'attribution des fréquences 5G par l'État. La Haute juridiction administrative n'a pas retenu notamment que l'État avait commis un excès de pouvoir en définissant la procédure d'attribution des fréquences, que le gouvernement avait contrevenu au principe de précaution, ni les arguments fondés sur un défaut d'information du public, s'appuyant sur les deux consultations publiques conduites par l'Arcep, du 26 octobre au 19 décembre 2018 et du 15 juillet au 4 septembre 2019.

Quant au recours de la CFE-CGC d'Orange, justifié par l'absence de référence au « développement de l'emploi » dans la procédure d'appel d'offres, le Conseil d'État considère que « l'exécution des actes litigieux ne sont pas de nature à léser de façon suffisamment directe et certaine les intérêts matériels et moraux, collectifs et individuels. »

Entretemps, plusieurs maires de grandes villes ont déclaré être en faveur d'un moratoire jusqu'à la publication du rapport de l'Anses.

Les données mentionnées dans ce qui suit sont reprises de l'Observatoire du déploiement 5G de l'Arcep, datées du 15 décembre 2020, ainsi que des données mises à disposition du public par l'ANFR. Dans le présent paragraphe, on distingue les sites d'antennes « techniquement opérationnels », à même de générer un rayonnement radiofréquences, des sites

8 L'arrêté du 30 décembre 2019 relatif aux modalités et aux conditions d'attribution d'autorisations d'utilisation de fréquences dans la bande 3,5 GHz en France métropolitaine pour établir et exploiter un système mobile terrestre, et le Décret n° 2019-1592 du 31 décembre 2019 fixant les prix de réserve et les redevances pour l'utilisation des bandes de fréquences nécessaires au déploiement de la 5G.

9 Conseil d'Etat, décision du 31 décembre 2020.

« commercialement ouverts » qui, comme leur nom l'indique, offrent des services à des utilisateurs du réseau.

En France, à la date du 15 décembre 2020, 4 opérateurs de téléphonie mobile se partagent l'exploitation commerciale du parc national des antennes-relais : Bouygues Telecom, Free Mobile, Orange et SFR. Comme le montre la Figure 2, c'est Free Mobile qui a déployé le plus grand nombre d'antennes 5G sur le territoire, avec 5 303 sites d'antennes¹⁰ déployées commercialement, contre 1 344 sites 5G pour Bouygues Telecom, 646 pour Orange et 278 pour SFR. Free Mobile se démarque donc des autres opérateurs en développant, seul et massivement, la 5G dans les bandes 700 et 800 MHz. Bouygues Telecom, quant à lui, s'est orienté pour l'instant vers les bandes 1 800 et 2 100 MHz (1 323 sites contre 115 sites à 3,5 GHz). Orange a majoritairement déployé des antennes dans la bande 3,5 GHz (l'opérateur, avec 90 MHz, y possède la bande de fréquences la plus large), tandis que SFR comptait 181 sites à 1 800 et 2 100 MHz et 97 sites à 3,5 GHz.

Nombre de sites ouverts commercialement répartis selon la bande de fréquences activée en 5G la plus haute.

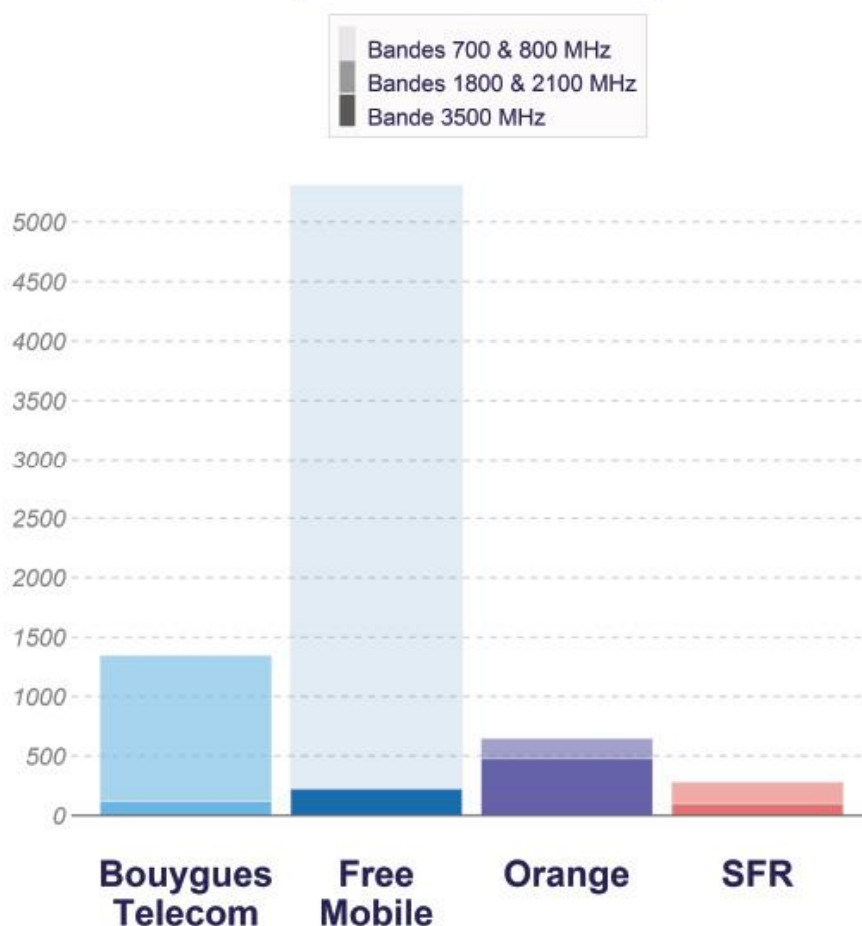


Figure 2 : Sites ouverts commercialement répartis selon les bandes 5G

Source : Arcep, 2020

¹⁰ Un même site 5G peut être constitué d'antennes rayonnant dans des bandes de fréquences différentes.

À l'exception de 2 sites exclusivement 5G, à la date du 1^{er} mars 2021, tous les 21 714 sites 5G autorisés par l'ANFR (dont 10 693, soit 49,2 %, sont déclarés techniquement opérationnels par les opérateurs de téléphonie mobile¹¹) sont des sites utilisant déjà les technologies 2G, 3G et 4G. Ceci traduit une augmentation de 8,9 % du nombre de sites 5G autorisés par rapport au mois de février.

En accord avec les données de l'observatoire de l'Arcep, les bandes de fréquences utilisées sont la bande 700 MHz par Free Mobile (15 734 sites autorisés dont 7 054 sont déclarés techniquement opérationnels), la bande 2 100 MHz (6 090 sites 5G Bouygues Telecom, Orange et SFR dont 3 261 sont déclarés techniquement opérationnels) et la bande 3,5 GHz (5 631 sites répartis entre les quatre opérateurs dont 1995 sont déclarés techniquement opérationnels). Ces chiffres indiquent une augmentation significative du nombre de sites pouvant être exploités commercialement par rapport aux données de 2020. Notons que les données sont mutualisées : plusieurs sites définis par bande de fréquences peuvent être présents sur une même structure.

En parallèle, le déploiement de la 4G se poursuit, avec une augmentation de 0,5 % du nombre des demandes d'autorisation et de mise en service par rapport au mois de février 2021. Le nombre de sites 4G s'élève à 52 819 en métropole, à la date du 1^{er} mars 2021, dont 48 053 sont en service.

En particulier, le nombre de sites d'antennes 4G en service est de 25 483 pour Orange, soit 207 de plus qu'en février 2021, 21 621 sites SFR dont 123 de plus sur la même période, 21 194 pour Bouygues Telecom dont 88 de plus et 19 231 pour Free Mobile dont 191 supplémentaires durant la même période. Outre-Mer, on compte 2 869 sites autorisés dont 2 677 en service pour la 4G.

2.2 La controverse publique autour du déploiement de la 5G, en France

Présentée par ses promoteurs comme « une génération de rupture » ou une « technologie-clé » (DGE, 2016), la 5G succède aux technologies numériques 2G, 3G et 4G pour amener dans la communication mobile un saut de performance en matière de débits perçus, de délais de transmission des données et de fiabilité de la communication (Arcep, 2021). Derrière ces performances, il y a la double promesse de la réponse aux besoins de croissance exponentielle du trafic de données mobiles et de l'ouverture à des innovations de service de la part de plusieurs secteurs industriels et dans le domaine du grand public.

Mais depuis les annonces de son déploiement, en France et à l'étranger, la 5G est aussi au cœur d'une controverse sociotechnique, au sens d'un désaccord public qui prend place dans plusieurs arènes, en particulier médiatiques, et qui porte autour de ses qualités, de ses impacts et de sa régulation. Cette controverse engage une multitude d'acteurs hétérogènes provenant de différentes composantes de la société civile : associations militantes, citoyens isolés ou en collectifs locaux, représentants politiques, municipalités, agences publiques, mais aussi scientifiques et médecins. La plupart de ces acteurs s'opposent au déploiement de la 5G, en raison des incertitudes scientifiques et techniques entourant les effets sanitaires et environnementaux associés au fonctionnement et aux usages à venir de cette nouvelle génération d'équipements de télécommunication.

¹¹ Un site techniquement opérationnel est un site d'antennes émettant des radiofréquences. Il n'est pas nécessairement déjà ouvert à une utilisation commerciale.

D'une manière générale, cette controverse relance le débat sur la nocivité des ondes électromagnétiques, tout en y associant une diversité inédite de formes de mobilisation individuelle et collective : appels de scientifiques, actions en justice, manifestations locales, initiatives populaires en ligne, actions politiques importantes, et même actes de destruction contre les antennes-relais, soient-elles 5G ou non. En France, des associations interrogent l'exposition croissante aux radiofréquences¹² générées par les stations de base 5G, des collectifs locaux s'opposent à l'installation des nouveaux équipements ou à leurs expérimentations, des maires et des parlementaires demandent au gouvernement un moratoire sur le déploiement pour donner à l'expertise le temps de l'évaluation des risques. Mais surtout, la controverse dépasse la façon binaire de poser le débat – en matière d'existence ou d'absence de risques – et l'inscrit plutôt dans une contestation pluridimensionnelle, portant sur les différents enjeux de la nouvelle infrastructure technique et ayant comme fil rouge la critique du processus étatique de prise de décision. Dans les discours les plus critiques, les promoteurs du programme de déploiement (le gouvernement, certaines agences administratives et les opérateurs industriels) sont mis en accusation publiquement pour ce qui est perçu comme un triple déni : déni de la hausse d'exposition de la population aux ondes électromagnétiques et de ses effets sanitaires éventuels, déni de l'augmentation de la consommation énergétique en lien avec les usages à venir, dans un contexte d'urgence climatique et, plus généralement, déni de démocratie, ce dernier au sens d'une décision de déploiement prise en l'absence de débat public et qui ne laisse pas de possibilité de choix aux citoyens.

Cette section présente une analyse exploratoire de la controverse publique entourant la 5G en France. Elle en interroge la **chronologie** (quelles sont les étapes de son développement ?), les **acteurs** (qui est impliqué dans la controverse ?), les **arènes** (dans quels espaces et par quels moyens se développe-t-elle ?) et les **objets** (quels cadrages thématiques et critiques sont mis en avant ? Quels sont les sujets de préoccupation ?).

Pour renseigner ces éléments, trois sources de données ont été mobilisées. La première est constituée par une série d'entretiens réalisés avec des acteurs impliqués à différents niveaux dans la controverse (syndicats industriels, associations, agences gouvernementales, scientifiques experts)¹³. La seconde source de données est constituée d'un ensemble de documents hétérogènes émanant de ces différents organismes et personnes ou d'autres entités impliquées dans le dossier, et portant sur la 5G (sa nature, ses caractéristiques techniques, ses effets, son déploiement), ou sur la controverse. Enfin, la troisième source de données, qui est aussi la principale, est constituée de différents corpus médiatiques (presse, réseaux sociaux, vulgarisation scientifique).

Prenant appui sur l'hypothèse d'une corrélation entre couverture médiatique et orientation du débat public, le choix a été fait d'approcher la controverse principalement au travers du prisme de son traitement dans les médias appréhendés comme un lieu dans lequel la controverse se déroule, voire comme une arène – parmi d'autres – où sont produits et mis en circulation les arguments des acteurs concernés (Neresini, Lorenzet 2016) et où les trajectoires

¹² Les termes « ondes électromagnétiques », « champs électromagnétiques », « radiofréquences » ou leurs acronymes (respectivement « OEM », « CEM », « RF »), seront ici utilisés indistinctement, en tant que synonymes, puisque c'est dans cette uniformité sémantique qu'ils apparaissent dans les discours et les écrits qui composent le matériau de cette analyse.

¹³ Au nombre de 13, ces entretiens ont été réalisés par le Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations Sociétés (Lisis) au cours de la deuxième moitié de l'année 2019. Les personnes et organismes suivants ont été interviewés : syndicats industriels : MWF, FFT, AFNUM ; associations : Robin des Toits, Alerte Phone Gate, ASEF, CCARRA, Criirem ; agences gouvernementales : ANFR, Arcep ; scientifiques experts : Annie Sasco, Dominique Belpomme, Joe Wiart.

argumentatives d'une controverse peuvent être observées (Chateauraynaud, 2011). L'arène médiatique est aussi, très souvent, l'espace de l'alerte. C'est plus généralement un espace privilégié par les acteurs pour publiciser des sujets de préoccupation, et soulever des enjeux éthiques, de justice ou d'identité collective. En d'autres termes, l'arène médiatique donne à voir la dimension politique la plus explicite d'une controverse. Pour ces raisons, ce rapport s'intéresse aussi à la couverture médiatique de la controverse sur la 5G. Trois corpus médiatiques ont été exploités : le premier est constitué des articles de presse - généraliste et spécialisée, nationale et locale, papier et en ligne - couvrant le sujet de la 5G en 2019 et 2020 (3 237 articles au total) ; le second se compose des vidéos partagées sur le réseau *YouTube* et des commentaires qu'elles ont générés (508 vidéos et 3208 commentaires) ; le troisième est constitué des articles publiés en ligne sur le média de vulgarisation scientifique *The Conversation*, dans ses versions francophone et anglophone (39 articles). L'objectif de cette analyse des médias n'est pas de prendre position dans les débats, ni d'interroger le fondement des arguments mobilisés par les acteurs en jeu, ni, encore, de produire une étude des médias (par ex. sur leur rôle dans la controverse). Il est plutôt de rendre compte de la mise en problème de la 5G dans la sphère médiatique car celle-ci peut être le reflet de l'opinion publique, tout en contribuant à la construire¹⁴.

Cette partie du rapport est purement descriptive et se distingue des parties portant sur l'évaluation des effets sanitaires de la 5G. Les données et analyses sont en grande partie issues de deux études (Demortain, Féron 2020 ; Demortain 2021) réalisés au sein du Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations Sociétés (LISIS – UMR CNRS, INRAE et Université Gustave Eiffel), dans le cadre d'une recherche menée pour le compte de l'Anses en 2019-2021 (Convention de Recherche & Développement n° 2017-CRD-11).

2.2.1 5G : un assemblage d'évolutions technologiques qui pose problème

Présentée au public comme une technologie d'ensemble, la 5G, pour « cinquième génération » de réseaux mobiles, est une appellation conventionnelle pour qualifier un assemblage d'évolutions technologiques permettant de donner forme à un nouveau réseau dans lequel les communications gagneront en vitesse, en débit, en stabilité et en nombre et nature d'objets connectés.

Ainsi, la 5G ce sont de nouvelles antennes, de nouveaux sites et supports, de nouveaux modes de transmission des données, de nouvelles architectures de réseau pour combiner les nouvelles antennes, de nouveaux téléphones portables dotés d'antennes compatibles avec le nouveau réseau, de nouveaux objets connectés. Mais, surtout, la 5G ce sont deux nouvelles bandes de fréquence (autour de 3,5 GHz et de 26 GHz), qui viennent s'ajouter à celles de 700 MHz à 2 100 MHz déjà connues et utilisées pour la 4G (et qui à son tour demandera une reconfiguration des antennes associées). Or, cette pluralité de propriétés qui composent l'offre technologique, lorsqu'elles investissent la scène publique, se chargent de significations supplémentaires prenant place dans le débat comme autant d'avancées sur le plan technique que des sources de préoccupation sur le plan sanitaire, environnemental, mais aussi économique, social et géopolitique.

¹⁴ Pour une vision plus large et approfondie de la controverse, cette analyse des médias s'est nourrie également de documents complémentaires qui ne figuraient pas dans les bases de données mentionnées. Ces documents complémentaires ont été obtenus à partir d'interrogations ciblées sur Twitter (184 tweets touchant au sujet 5G [ET risque OU santé] collectés depuis la base de données Europresse) et sur les sites web de médias audiovisuels et d'associations impliquées dans le dossier 5G (à partir du mot-clé 5G).

2.2.2 Temporalité de la controverse

Bien que la trajectoire d'une controverse ne soit pas prédictible, l'analyse de la médiatisation de plusieurs affaires en environnement, sciences et techniques, qui opposent sur la durée différents acteurs aux représentations et intérêts divergents, permet de repérer quelques récurrences dans les dimensions et la temporalité d'une controverse. Ainsi, sans que cela lui soit spécifique, la controverse sur la 5G témoigne de débats sur des contenus non stabilisés, d'informations contradictoires et d'acteurs hétérogènes dotés d'intérêts et de positions sociales contrastés. Comme pour d'autres controverses, les argumentations visent à convaincre plus des tiers, témoins ou observateurs du débat, que les acteurs mêmes qui débattent. Quant à sa temporalité, il est déjà possible de distinguer quelques phases majeures : les prémices, l'alerte, l'émergence, la publicisation (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Repères temporels et chronologiques de la controverse sur la 5G

Prémices : la controverse sur les ondes électromagnétiques	
1998	- Premières oppositions collectives contre l'installation des antennes-relais de téléphonie mobile
2006-2009	- Apparition de la cause des personnes électrohypersensibles (EHS)
2009	- Débats sur la diffusion du Wi-Fi (Conférence citoyenne à Paris, 18/06)
2015- ...	- Fronde anti-Linky
L'alerte	
2017	<i>5G Appeal</i> (13/09)
Latence	
2018	- Médiatisation de la promesse technologique - Feuille de route, par le Gouvernement et l'Arcep (16/07), et expérimentations - Pas de débat contradictoire et public
Emergence	
2019	- Médiatisation des premières oppositions locales dans la presse locale - Saisine de l'Anses (09/01) - Début de la médiatisation nationale : la presse nationale fait état des « rumeurs » sur les risques d'exposition aux ondes électromagnétiques (été 2019) - Appel à moratoire de Priartem-Agir Pour l'Environnement (02/10)
Publicisation¹⁵	
2020	- Mobilisations à l'échelle nationale coordonnées par les associations - Journée mondiale de protestation contre la 5G (25/01) - Recours de Priartem-APE devant le Conseil d'État (17/02, annonce du 24/01) - Rapport intermédiaire de l'Anses (27/01) - Médiatisation nationale des risques sanitaires et des oppositions locales - Conférence citoyenne sur le climat – demande de moratoire (21/06) - Demande de moratoire des ministres de l'Écologie et de la Santé (21/06) - Saisine des CGEDD, CGE, IGAS et IGF pour mission d'inspection (02/07)

¹⁵ Le terme « publicisation » est utilisé ici au sens de la sociologie de la construction des problèmes publics (Gusfield, 2009). Il définit le processus de construction par lequel le « problème 5G » devient, par l'action d'une pluralité d'acteurs ou de groupes d'acteurs (y compris les médias), un objet de discussion publique.

2.2.2.1 Les prémices : la controverse générale sur les ondes électromagnétiques

Les effets sanitaires des ondes électromagnétiques émises par les équipements de téléphonie mobile sont l'objet d'une controverse déjà ancienne et bien étudiée en France¹⁶. On peut ici rappeler que la première partie de la controverse touchant aux ondes électromagnétiques en France a concerné l'installation des antennes-relais à la fin des années 1990, les premières oppositions collectives à ces installations apparaissant en 1998. La controverse est alors marquée par trois phénomènes, qui se répéteront ultérieurement : des conflits locaux autour de l'installation d'équipements, allant parfois jusqu'à des actions judiciaires, y compris au niveau national ; la création et la mobilisation locale, puis nationale, d'associations porteuses de la cause de la protection de la santé contre les champs électromagnétiques ; la production d'expertises successives pour caractériser au mieux les effets sanitaires possibles des radiofréquences, à la suite, notamment, de rapports mettant en évidence leur caractère cancérigène possible¹⁷ (cf. Circ, 2011). L'ensemble participe d'une controverse marquée par le cadrage initial du problème des antennes-relais en matière de risques sanitaires pour les populations locales. Les narrations de la controverse générale sur les ondes électromagnétiques en France mettent souvent en avant une deuxième phase, liée à l'apparition de la cause des personnes qui se déclarent électrohypersensibles (EHS), à partir des années 2006-2009¹⁸. La diffusion du Wi-Fi (en 2008) et le déploiement des compteurs électriques communicants Linky (à partir de fin 2015) semblent marquer une troisième et une quatrième phase de la controverse générale sur les effets des ondes électromagnétiques. Ainsi, la 5G arrive non seulement comme la cinquième génération de réseaux de téléphonie mobile, mais aussi comme la cinquième étape de cette controverse générale sur les effets sanitaires des ondes électromagnétiques, controverse couvrant désormais de multiples dimensions).

2.2.2.2 L'alerte ou le début d'une controverse qui démarre à bas bruit

On peut dater le début de la controverse sur les risques sanitaires liés au déploiement de la 5G au 13 septembre 2017. Ce jour-ci, 180 scientifiques et médecins de 37 pays lancent une pétition transnationale – *5G Appeal* – pour alerter la Commission européenne au sujet de l'augmentation massive de l'exposition aux ondes électromagnétiques qui sera induite par la 5G et pour demander un moratoire sur son déploiement dans l'attente que des études d'impact sanitaire et environnemental indépendantes soient réalisées¹⁹. L'appel, qui est adressé spécifiquement au Commissaire européen à la santé, fait référence à plus de 10 000 études publiées, documentant les dommages causés à la santé humaine et à l'environnement par le rayonnement des radiofréquences : les signataires réclament des mesures immédiates pour protéger l'humanité et l'environnement. Les rédacteurs s'inquiètent également de l'altération de l'environnement électromagnétique de la Terre par les milliers de satellites 5G prévus dans le dispositif technique, ils y voient une menace pour la vie et ils demandent l'interdiction de leur déploiement. L'appel dénonce aussi l'exclusion de scientifiques spécialistes des champs électromagnétiques du débat sur le développement de la 5G mené par l'industrie et les gouvernements nationaux. Il cite diverses Conventions, Déclarations, Chartes, Rapports signés aux Nations Unies ou dans d'autres instances internationales pour exhorter ses

¹⁶ Voir par exemple : Borraz 2008 ; Chateauraynaud, Debaz 2010 ; Dieudonné, 2019 ; Ollitrault 2014.

¹⁷ « peut-être cancérigène pour l'homme » (Groupe 2B).

¹⁸ Pendant cette période, les médias vont traiter la thématique des EHS en rendant publics quelques cas qui vont donner corps à la revendication d'une plus grande sensibilité individuelle aux ondes (cf. Anses, 2018).

¹⁹ www.5gappeal.eu

destinataires à prendre des mesures immédiates pour arrêter le déploiement de la 5G, informer les citoyens des risques sanitaires du rayonnement des radiofréquences, mettre en œuvre des communications câblées à la place du sans-fil, établir des normes et mettre en place un cadre réglementaire en dehors de toute influence de l'industrie.

L'appel reçoit deux premières réponses, en date du 12/10/2017 et du 29/11/2017 (publiées sur le site de l'appel). La première, faite par courrier électronique du Directeur général de la santé et de la sécurité alimentaire au Luxembourg, mentionne les travaux de l'Icnirp (Commission internationale sur la protection contre les rayonnements non ionisants) et du Comité scientifique sur les risques sanitaires émergents et nouvellement identifiés (Scenihp) comme fournissant la preuve que l'exposition aux champs électromagnétiques ne représente pas un risque pour la santé, si elle reste inférieure aux limites fixées par la recommandation 1999/519/CE du Conseil²⁰. La lettre rappelle également le cadre juridique établi par la directive sur les équipements radio²¹, comme garantissant la sécurité des appareils radioélectriques mis sur le marché de l'UE. Puis elle reconnaît la nécessité d'actualiser constamment les connaissances scientifiques, qui devront également être prises en compte dans le développement de la technologie 5G. Ces connaissances – il est écrit – contribueront à l'objectif d'équilibrer l'exposition du grand public aux champs électromagnétiques avec les avantages apportés par la 5G (y compris la santé en ligne) pour la qualité de vie²². Quant à la deuxième réponse, elle est envoyée par le Cabinet du Commissaire européen à la santé à Bruxelles. Elle ne fait que rappeler la solidité scientifique des études mobilisées dans le cadre des différents avis du Scenihp sur les effets potentiels sur la santé de l'exposition aux champs électromagnétiques²³. Mais surtout, elle réfute la demande des signataires de l'appel au sujet de la mise en application du principe de précaution. Elle explique que le recours à ce principe pour arrêter la distribution de produits 5G apparaît comme une mesure trop drastique, et qu'avant cela « *Nous devons d'abord voir comment cette nouvelle technologie sera appliquée et comment les preuves scientifiques vont évoluer* ». Trois autres réponses seront envoyées aux auteurs de l'appel – Lennart Hardell et Rainer Nyberg – suite à leurs différentes réfutations, respectivement en date du 27 Avril 2018, du 5 septembre 2019 et du 19 décembre 2019, laissant voir qu'un dialogue sans convergence s'est instauré entre les parties²⁴. Dans la dernière réponse, il est indiqué que de nouvelles lignes directrices sont attendues de l'Icnirp.

Rédigé en anglais, le *5G Appeal* est signé, en France, par sept médecins et scientifiques, pour la plupart mobilisés de longue date contre les risques liés à la téléphonie mobile et l'exposition aux radiofréquences (Marc Arazi, Dominique Belpomme, Philippe Irigaray, Vincent Lauer et Annie Sasco)²⁵. Au moment de son lancement, l'appel est invisible dans la presse française, et ignoré sur les réseaux sociaux²⁶. Lancé en septembre 2017, le *5G Appeal* ne fera l'objet

²⁰ https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/electromagnetic_fields/docs/emf_rec519_en.pdf

²¹ Directive 2014/53/UE.

²² Le texte de la réponse est publié en ligne : http://www.5gappeal.eu/wp-content/uploads/2018/06/reply_ryan.pdf.

²³ http://www.5gappeal.eu/wp-content/uploads/2018/06/reply_vinciunas.pdf.

²⁴ L'ensemble de ces échanges est présenté dans un article publié par les auteurs de l'appel – L. Hardell et R. Nyberg – dans la revue *Molecular and Clinical Oncology* (cf. Hardell, Nyberg 2020).

²⁵ Les deux autres signataires français sont Victor Norris, professeur émérite de biologie à l'Université de Rouen, et Stefan Naumann, médecin anesthésiste-réanimateur.

²⁶ Il est à noter que, sur l'année 2019, on ne compte en tout qu'une cinquantaine de tweets sur la question des enjeux sanitaires de la 5G. Ces tweets suscitent peu, sinon pas d'activité à leur tour, étant peu relayés ou retweetés.

que de deux articles de presse en France, parus au cours de l'été 2019, respectivement dans *Le Monde*²⁷ et dans le quotidien régional *Le Journal de Saône et Loire*²⁸.

Depuis son lancement, l'appel a connu différentes rééditions. À ce jour (fin février 2021), il est traduit en 7 langues sur son site web et affiche plus de 415 signataires dans 39 pays.

2.2.2.3 Latence

Le passage de l'alerte à la publicisation n'est pas immédiat. L'année 2018 ne laisse pas encore apparaître un caractère controversé de la 5G. Tant la presse papier que les réseaux sociaux se concentrent plutôt sur la promesse technologique délivrant nombre de communiqués sur les applications de la 5G, le saut technologique par rapport à la 4G, la maturité de la technologie chez les opérateurs français, les dates possibles d'arrivée de la technologie en France. L'un des seuls *tweets* émis cette année-là pour marquer une préoccupation sur la 5G vient d'un média en ligne suisse - *Nouvo RTS*, un magazine sur les nouvelles technologies - qui met l'accent sur les risques possibles associés à la démultiplication d'ondes électromagnétiques, notamment celles produites pour relier les nouveaux objets connectés à l'infrastructure²⁹.

En France, la 5G devient un sujet d'actualité nationale en 2018 lorsque le gouvernement, en partenariat avec l'Arcep³⁰, présente pendant l'été (16 juillet 2018) la feuille de route pour le déploiement national de la technologie. Cette feuille de route - présentée par Mounir Mahjoubi, secrétaire d'État chargé du Numérique, Delphine Gény-Stephann, secrétaire d'État auprès du ministre de l'Économie et des Finances, et Sébastien Soriano, président de l'Arcep - prévoit quatre chantiers prioritaires : (1) planifier et mettre en œuvre l'attribution des fréquences radioélectriques ; (2) lancer des expérimentations et des projets pilotes sur le territoire national pour faire émerger de nouveaux usages ; (3) accompagner le renforcement des infrastructures existantes et le déploiement des nouvelles ; (4) assurer la transparence et le dialogue avec les parties prenantes au sujet des déploiements et de l'exposition du public. Ce dernier chantier s'appuiera, d'une part, sur la saisine de l'Anses et de l'Agence nationale des fréquences (ANFR) de la part des ministères de la Transition écologique, de la Santé, de l'Économie et des Finances pour évaluer l'exposition de la population aux champs électromagnétiques de la 5G et les effets sanitaires associés et, d'autre part, sur la discussion des travaux des deux Agences avec les parties prenantes, dans le cadre de leurs Comités de dialogue. Le présent rapport émane de la saisine de l'Anses (lettre du 9 janvier 2019).

L'année 2018 est surtout l'année de la réalisation des projets d'expérimentation des opérateurs privés de téléphonie mobile³¹. Les autorisations sont données par l'Arcep, qui publiera la carte de ces projets fin décembre 2018. La 5G n'est pas, jusque-là, objet de controverses en France, et ni les ministères concernés, ni l'Arcep, ni l'Anses ou la ANFR, ne sont aux prises avec un réel débat contradictoire et public, sur les risques de la 5G. Le discours public le plus répandu porte plutôt sur le programme de la 5G et les promesses associées.

²⁷ Mathilde Damgé, « "5G appeal" : pourquoi cette pétition sur les ondes et la santé est exagérément alarmiste », *Le Monde.fr*, 24 septembre 2019.

²⁸ Jean-Michel Lahire, « La 5G présente-t-elle un danger ? », *Le Journal de Saône et Loire*, 7 septembre 2019.

²⁹ « La 5G, un danger pour la santé ? » <https://www.rts.ch/play/tv/nouvo-news/video/la-5g-un-danger-pour-la-sante-?urn=urn:rts:video:10091243>.

³⁰ Autorité de régulation des communications électroniques et des Postes.

³¹ Notamment à Belfort, Bordeaux, Douai, Grenoble, Lannion, Lille, Lyon, Marseille, Nantes, Toulouse, Sophia-Antipolis et en Ile-de-France.

Même les sites internet des associations aujourd'hui parties prenantes de la controverse ne montrent pas d'activité sur la 5G pendant cette année, alors qu'en décembre 2017 l'association Priartem avait relayé la pétition « 5G Appeal » dans sa *Lettre* n° 36.

En 2018, la 5G n'est l'objet d'une controverse qu'en dehors de la France³². En Suisse, le Conseil des États rejette l'assouplissement des dispositions en matière de précaution et le Département fédéral de l'environnement mandate un groupe de travail paritaire – « Téléphonie mobile et rayonnement » – pour peser les besoins et les risques liés au déploiement des réseaux 5G. Pendant que ce groupe de travail s'attèle à sa tâche, 25 interventions parlementaires sont déposées sur le sujet de la 5G et des effets des rayonnements non-ionisants sur l'être humain et l'environnement. Un collectif de citoyens crée le site www.stop5G.ch en novembre. Les oppositions locales se multiplient dans les cantons. En Belgique, une initiative citoyenne – *Ondes.brussels* – est lancée en mars 2018 par des associations et citoyens bruxellois préoccupés par les effets des ondes électromagnétiques sur la santé et l'environnement. En novembre 2018, *Ondes.brussels* demande au parlement bruxellois d'arrêter le déploiement de la 5G dans la région bruxelloise. Son initiative fait suite à deux rapports publiés par le collectif respectivement en mars et en novembre 2018, le premier pour documenter les risques associés aux technologies sans fil déjà en place, et le second pour documenter les préoccupations associées à la technologie 5G³³. La France restera largement en dehors de ces premières mobilisations européennes en 2018.

2.2.2.4 Émergence

En 2019, le gouvernement travaille à la préparation de la mise aux enchères des fréquences, avec l'Arcep. Entre-temps, les ministères de la Transition écologique, de la Santé et de l'Économie saisissent l'Anses, en janvier 2019, pour conduire une évaluation de l'exposition des populations aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la 5G, et des effets sanitaires associés. La nouvelle ne reçoit pratiquement pas de couverture médiatique, seul le site web du journal *Libération* en fait mention³⁴. La presse continue de se focaliser sur les promesses de la technologie 5G ainsi que sur son calendrier de déploiement en France. Ce n'est que lors des premières oppositions de riverains à l'installation d'antennes-relais que la couverture médiatique de la 5G se réoriente autour de positions défavorables que la nouvelle technologie et son infrastructure suscite auprès de certains citoyens.

La 5G devient l'objet de mobilisations à partir de janvier 2019, lorsqu'affleurent des conflits à l'échelle locale. En ce début d'année, le journal *Le Progrès* couvre l'opposition d'habitants à l'installation d'une « antenne-relais évolutive », permettant à terme le déploiement d'équipements pour la 5G, à Neuville-sur-Saône³⁵. En mars 2019, l'édition grenobloise du journal *20 Minutes* fait le point sur une information diffusée sur les réseaux sociaux, selon laquelle on avait coupé les arbres de la rue Lesdiguières à Grenoble pour préparer le quartier

³² Le consortium européen de journalistes d'investigation *Investigate Europe* consacrera 19 articles aux enjeux de la 5G pendant le seul mois de janvier 2019.

³³ De Belgique partira aussi un appel de chercheurs et de médecins contre la 5G, officiellement lancé en mai 2019 : le *Electrosmog Appeal Belgium*. Le mouvement demande l'application du principe de précaution.

³⁴ « Le développement de la 5G est-il dangereux pour la santé ? », *Libération* (site web), 15 février 2019.

³⁵ « Le projet d'antennes-relais abandonné mais pas écarté », *Le Progrès* - Lyon, 18 janvier 2019 ; Serge Naltchayan. « Après une lutte anti-toit, une bataille anti-5G ? », *Le Progrès* - Lyon, 18 janvier 2019.

à des tests de la 5G³⁶. En mai 2019, *Ouest-France* relate l'opposition des habitants à l'installation d'une antenne-relais au sommet du Mont des Avaloirs en Mayenne. Un habitant de la région, responsable d'un site internet faisant la promotion de ce site touristique, incite les autres habitants à exprimer leur opposition à la 5G, de manière préventive³⁷. Le 8 août 2019, le journal *Le Parisien* fait état de la constitution d'un collectif local pour empêcher l'implantation d'une antenne-relais 5G à Gargenville³⁸.

2.2.2.5 Publicisation

C'est peu avant l'été 2019 que le sujet de la controverse 5G monte en généralité, venant à être inscrit à l'agenda de quotidiens nationaux. Des mobilisations locales et ponctuelles contre l'installation d'antennes-relais, on passe à la question de la dangerosité plus générale de cette génération d'équipements. Alors que les articles sur les risques de la 5G étaient jusque-là sporadiques³⁹, ils deviennent plus fréquents au cours de l'été. Le site du journal *Le Figaro* fait le point sur les « rumeurs » entourant les risques liés à l'exposition aux radiofréquences⁴⁰. *Le Monde*, au mois d'août 2019, produit plusieurs articles de vérification des faits, sur l'affaire des arbres supposément abattus pour les expérimentations 5G à Grenoble⁴¹, ou sur la mobilisation bruxelloise contre la 5G⁴². Le même journal couvre la pétition « 5G Appeal » en août 2019, en insistant sur la nature exagérée des énoncés sur sa dangerosité⁴³. Mais le titre fait le point, le même mois, et ce pour la première fois, sur les connaissances des dangers liés à la 5G⁴⁴. Un changement de cadrage sur l'objet de la controverse intervient, avec cette nationalisation du sujet : on parle moins d'antenne-relais – les objets symboles des controverses passées sur la téléphonie mobile – qu'on ne s'interroge sur un système technologique d'ensemble, une infrastructure d'une nouvelle génération⁴⁵.

C'est après cette extension au niveau national du sujet, et la montée en force du débat sur la nocivité générale de la 5G que la mobilisation la plus visible prend place : le 2 octobre 2019, les associations Priartem et Agir pour l'Environnement lancent un appel à un moratoire sur le déploiement de la 5G en France. Quatorze autres associations de santé environnementale ou mobilisées sur la question des ondes électromagnétiques se joignent à l'appel (Association Santé Environnement France, Associations Familiales Laïques, Réseau Environnement

³⁶ Alexis Orsini, « Des arbres sont-ils régulièrement abattus pour des tests 5G ? », *20 Minutes*, 21 mars 2019.

³⁷ Alix Demaison, « Il n'est pas question de la 5G dans les Avaloirs », *Ouest-France*, 30 mai 2019.

³⁸ Virginie Wéber, « Yvelines : ils ne veulent pas de l'antenne-relais de 36 m dans leur quartier », *Le Parisien*, 8 août 2019.

³⁹ Par exemple Leila Marchand, 6 avril 2019, « 5G : que sait-on de ses effets sur la santé ? », *Les Echos*, (site web), 6 avril 2019.

⁴⁰ Pascal Grandmaison, « Bonnes et mauvaises ondes, le vrai du faux », *Le Figaro.fr*, 14 juin 2019.

⁴¹ Mathilde Damgé, août 2019, « Tués, coupés, abattus ? Démêler le vrai du faux sur les arbres et la 5G en trois exemples », *LeMonde.fr*.

⁴² Mathilde Damgé, « Non, Bruxelles n'a pas interdit la 5G pour des raisons de santé », *Le Monde*, 07 août 2019.

⁴³ Mathilde Damgé, « "5G appeal" : pourquoi cette pétition sur les ondes et la santé est exagérément alarmiste », *LeMonde.fr*, 24 septembre 2019.

⁴⁴ Arthur Carpentier, « La 5G est-elle dangereuse pour la santé ? », *LeMonde.fr*, 08 août 2019.

⁴⁵ Jean-Michel Lahire, « La 5G présente-t-elle un danger ? », *Le Journal de Saône et Loire*, 07 septembre 2019.

Santé, WECF France, Alter-Ondes...). La demande de moratoire confirme l'inscription du sujet des risques de la 5G à l'agenda médiatique national, puisqu'elle fait l'objet d'une dépêche AFP, reprise par une série de médias nationaux ou de médias régionaux à tirage important⁴⁶. *Ouest-France* évoque la 5G dans un article sur les effets des radiofréquences sur les élevages⁴⁷.

De novembre 2019 à février 2020, une activité à peu près continue est observable à propos du rôle de l'Arcep. En début janvier 2020, un *tweet* du média *Vie Publique*⁴⁸ est plus repris que les autres, posant la question du rôle de l'Arcep dans un déploiement qui comporterait des risques pour la santé. Entre janvier et février, une quinzaine d'articles de presse nationale généraliste et spécialisée (dont *Le Monde*, *Le Figaro*, *La Recherche*, *Les Echos* et *L'Usine Nouvelle*) couvrent le rapport intermédiaire alors juste publié par l'Anses sur l'exposition aux champs électromagnétiques liée à la 5G⁴⁹. À partir de cette publication, des *tweets* et *retweets* en plus grand nombre, mais n'excédant pas la trentaine, se portent sur ce sujet précis, pointant les remarques de l'Anses dans le rapport sur le manque actuel d'études pour pouvoir conclure sur l'existence ou non de risques.

Quelques semaines plus tard, le 25 janvier 2020, est proclamée la première « Journée mondiale de protestation contre la 5G ». Organisée aux États-Unis, elle est planifiée dans une trentaine de pays, dont la France, avec des manifestations organisées à Paris et dans les territoires. À Paris, la journée est organisée par Robin des Toits, Ondes.Saint-Ouen, Solidarité et Coordination Anti-Linky-Île-de-France⁵⁰. Cette journée mondiale de protestation est précédée, la veille, de l'annonce d'un recours devant le Conseil d'État par Priartem et Agir pour l'Environnement. Les deux associations dénoncent l'absence d'évaluations sanitaire et environnementale préalables à la décision d'enclencher le déploiement de la 5G en France, ainsi que la consultation publique des textes dont la durée est jugée trop courte⁵¹. Elles saisiront le Conseil d'État le 17 février 2020, dans le cadre de recours au fond et en référé,

⁴⁶ AFP, 2019, « Exposition aux ondes, hyper-connexion... des ONG réclament un moratoire sur la 5G », *La Tribune*, 2 octobre 2019, 2019 ; « Ondes, hyperconnexions ... des ONG réclament un moratoire sur la 5G », *Le Parisien*, 2 octobre 2019.

⁴⁷ Christophe Violette, 2019, « Ils traquent ondes et courants dans les élevages », *Ouest-France*, 3 octobre 2019.

⁴⁸ Vie-publique.fr est un site gratuit d'information qui donne des clés pour comprendre les politiques publiques et les grands débats qui animent la société. Le site est réalisé par la Direction de l'information légale et administrative, rattachée aux services du Premier ministre.

⁴⁹ Anses, 2020, *Exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et effets sanitaires associés*, Rapport intermédiaire, Saisine n°2019-SA-0006 d'octobre 2019, mis en ligne le 27 janvier 2020.

⁵⁰ Cette journée sera aussi l'occasion, pour les organisateurs, de transmettre aux gouvernements de tous les pays l'*International Appeal Stop 5G on Earth and in Space*, un appel international demandant l'interdiction du déploiement des antennes 5G sur la Terre et des satellites 5G dans l'espace. Cet appel, lancé en septembre 2018 et traduit en 30 langues sur son site internet (www.5gspaceappeal.org), a collecté à ce jour (fin mars 2021) près de 302 000 signatures depuis 214 pays et territoires.

⁵¹ Du 28 novembre au 12 décembre 2019.

pour demander la suspension de l'arrêté⁵² et du décret⁵³ de fin décembre 2019 lançant la procédure d'attribution des fréquences dans la bande 3,5 GHz.

L'année 2020 débute donc par des mobilisations à l'échelle nationale, coordonnées par les associations pour contester le déploiement de la 5G. Au même moment (le 27 janvier), l'Anses publie un rapport préliminaire dans le cadre de ses travaux d'expertise sur l'exposition à la 5G et les effets sanitaires associés⁵⁴, et annonce le lancement de travaux supplémentaires. L'évènement est modérément médiatisé : quatorze articles de presse nationale généraliste et spécialisée (dont *Le Monde*, *Le Figaro*, *La Recherche*, *Les Echos* et *L'Usine Nouvelle*) couvrent le sujet, sur la période fin janvier-février 2020. Des tweets et retweets en plus grand nombre, mais n'excédant pas la trentaine, se portent aussi sur ce sujet précis, pointant les remarques de l'Anses – contenues dans son rapport préliminaire – à propos du manque actuel d'études pour pouvoir conclure sur l'existence ou non de risques.

2.2.3 Les acteurs

Souvent réduite à un problème de désinformation, ou à un débat passionné sur les risques sanitaires de la nouvelle technologie, ou encore à un rapport de force entre le gouvernement et des détracteurs hostiles au progrès, la controverse 5G s'en démarque au contraire par son caractère largement pluridimensionnel et par son évolution distribuée en différents axes problématiques, eux-mêmes régis par une variété d'acteurs, d'institutions et de modes d'accès au débat public. Cette section vise à identifier et qualifier la pluralité de publics intervenant dans cette controverse. En allant au-delà de la catégorisation binaire classique « promoteurs-détracteurs », il s'agit ici de faire plutôt le point sur les acteurs « historiques », institutions et réseaux d'acteurs déjà identifiés, qui contribuent à une certaine stabilité des débats, et les nouveaux acteurs, qui viennent démarquer cette controverse de celles qui l'ont précédée sur la question des ondes électromagnétiques.

2.2.3.1 Acteurs historiques

La scène de la controverse sur la 5G est posée par des acteurs historiques de la controverse plus large sur les champs électromagnétiques, dans ses différentes manifestations (antennes-relais, EHS, Wi-Fi, compteurs Linky). Deux associations couvrant le territoire national se distinguent nettement quant au niveau de médiatisation de leurs prises de position et actions contre le déploiement de la 5G : Robin des Toits et Priartem-Électrosensibles de France. À celles-ci s'y ajoute Alerte Phonegate, issue d'une scission avec Priartem en 2018, et qui travaille spécifiquement sur le dossier de la surexposition aux ondes électromagnétiques des téléphones mobiles qui dépassent les limites réglementaires. Ces associations, qui se sont constituées dans les premiers temps de la controverse sur la téléphonie mobile, avant

⁵² Arrêté du 30 décembre 2019 relatif aux modalités et aux conditions d'attribution d'autorisations d'utilisation de fréquences dans la bande 3,5 GHz en France métropolitaine pour établir et exploiter un système mobile terrestre.

⁵³ Décret n° 2019-1592 du 31 décembre 2019 relatif aux redevances d'utilisation des fréquences radioélectriques dues par les titulaires d'autorisations d'utilisation de fréquences délivrées par l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes.

⁵⁴ Anses, 2020, *Exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication « 5G » et effets sanitaires associés*, Rapport préliminaire, Saisine n°2019-SA-0006 d'octobre 2019, mis en ligne le 27 janvier 2020.

l'émergence de l'affaire 5G, sont toujours présentes et restent les premiers acteurs de ce débat sur la 5G, étant souvent mentionnées par la presse ou intervenant dans des émissions audiovisuelles. D'autre part, les opérateurs industriels et leurs associations restent également les mêmes, ainsi que les agences gouvernementales (d'un côté l'ANFR et, de l'autre, l'Anses avec son collège d'experts indépendants).

Pas de renouveau donc du côté de ces acteurs qui, par ailleurs, se connaissent mutuellement et ont des relations récurrentes. C'est le cas notamment des associations qui participent régulièrement aux instances de concertation – les comités de dialogue – créés d'abord par l'Anses, puis par l'ANFR. C'est aussi le cas des opérateurs industriels, qui confirment cette structuration relationnelle de la controverse, lorsqu'ils délèguent le traitement de la question scientifique des effets de l'exposition aux champs électromagnétiques à l'Anses, et la mesure de l'exposition aux ondes dans le cadre des expérimentations à l'ANFR.

La stabilité de l'environnement de la controverse 5G en matière d'acteurs, peut être retrouvée également au niveau des nombreux collectifs informels qui portent l'action contre le déploiement de la 5G, du moins à l'échelle locale. Ces collectifs, qui ne sont pas dotés de personnalité juridique, sont trop nombreux pour être identifiés individuellement et il n'existe pas, à l'heure actuelle, de plateforme de recensement comme celle qui comptabilise les collectifs anti-Linky⁵⁵. Néanmoins, en regardant le répertoire d'actions dont la sphère publique numérique (articles de presse et pages web) rend compte, il est possible de constater que, surtout à l'échelle locale, nombre de ces collectifs ne sont pas nouveaux et prennent forme dans les territoires où existent des groupes déjà mobilisés, parfois de longue date, sur la première génération d'antennes-relais, la cause des personnes électrohypersensibles et, particulièrement, les compteurs Linky. Adossés à des départements ou des villes, les collectifs anti-Linky deviennent très souvent des collectifs anti-Linky-5G (dans le Finistère, la Drôme, l'Isère, les Pyrénées Orientales, en Ardèche, ...). Les pratiques de contestation sont aussi similaires : actions pour bloquer l'installation des équipements, réunions publiques d'information, interpellation des administrateurs locaux, pétitions... Mais surtout, ces groupes anti-5G et anti-Linky ont en commun la création d'alliances avec les associations, qui interviennent à leur côté pour apporter soutien dans les échanges avec les institutions, partager des connaissances, créer des réseaux de protestation.

2.2.3.2 Nouveaux acteurs

La nationalisation du sujet 5G, autour de l'été 2019, entraîne un changement de cadrage sur l'objet de la controverse : la question de l'exposition aux ondes électromagnétiques s'inscrit dans une interrogation plus générale sur un système technologique qui ne touche pas qu'à la santé des personnes mais aussi à celle de l'environnement. Si l'association de ces deux problématiques – sanitaire et environnementale – était déjà relativement présente dans la controverse sur les compteurs Linky (cf. Draetta, Tavner 2019), elle s'impose ici naturellement et de manière très prégnante lorsque des alliances de circonstance se tissent au sein des ministères et des associations impliqués dans le dossier 5G.

Deux nouveaux acteurs s'imposent ainsi comme parties prenantes de cette controverse déjà bien cadrée : le ministère de la Transition écologique et l'association Agir pour l'Environnement. Le premier intervient d'abord aux côtés des ministères de la Santé et de l'Économie dans la saisine de l'Anses, en vue de son évaluation sanitaire de la nouvelle technologie (janvier 2019). Puis une deuxième fois, en juin 2020 après la Convention

⁵⁵ Voir le site Plateforme Opérationnelle Anti-Linky (POAL), <https://www.poal.fr/appfree/accueil-plateforme-operationnelle-anti-linky.html>

citoyenne pour le climat, lorsque la ministre Elisabeth Borne et le ministre Olivier Véran adressent une lettre au Premier ministre pour lui demander « *d'attendre l'évaluation de l'Anses [l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail] avant le déploiement de la 5G*⁵⁶ ».

Quant à l'association Agir pour l'Environnement (24 000 adhérents), elle s'unit à Priartem (qui lutte contre les « risques liés aux technologies électromagnétiques »), d'abord pour lancer l'appel à moratoire « Stop à la 5G », en octobre 2019, et demander la mise en place d'une évaluation environnementale et d'un débat public sous l'égide de la Commission nationale du débat public (CNDP) ; puis, dans les recours devant le Conseil d'État, en février 2020, en vue d'obtenir l'annulation de l'arrêté et du décret de fin décembre 2019 relatifs à l'attribution des fréquences dans la bande 3,5 GHz en France. Parmi les justifications apportées à ces recours communs, les deux associations mettent en avant, de manière conjointe, la violation des principes de sobriété énergétique et de sobriété électromagnétique⁵⁷.

L'appel à moratoire lancé en ligne par les deux associations et soutenu par plusieurs ONG, a collecté à ce jour presque 128 000 signatures, montrant que l'opposition à la 5G passe aussi par le Web et les réseaux sociaux. Ici, un ensemble hétéroclite d'anciens et nouveaux acteurs contestent le déploiement de la 5G : au-delà des associations et des collectifs locaux, on y retrouve aussi des citoyens et des représentants politiques qui interpellent le gouvernement en se basant sur des arguments de raison, mais aussi des internautes ou des chaînes YouTube qui partagent des fausses informations ou relayent des thèses complotistes⁵⁸.

2.2.4 Les arènes d'opposition

La diversité et la multitude des formes de mobilisation constituent l'une des caractéristiques principales de la controverse sur la 5G. La sphère publique numérique rend compte d'événements de toute sorte : protestations de riverains, actes de sabotage, réunions publiques d'information, journées d'actions dans les rues ou en ligne, pétitions électroniques, motions municipales, interpellations politiques, ...

Cette section vise à donner un aperçu de ces actions, sans prétendre à l'exhaustivité. Elle veut illustrer la densité des mobilisations qui se développent dans un espace temporel relativement court (à partir de la mi-2019), ainsi que la diversité des échelles spatiales et des formes de l'action, l'ensemble pouvant être un indicateur de la structuration particulièrement complexe et de la portée de cette contestation.

Le Tableau 2 ci-après est une compilation de dates, lieux, acteurs et événements relatifs à différentes formes d'engagement des publics visant à contester, arrêter ou réguler le déploiement de la 5G. Il a été construit à partir d'un enchaînement d'interrogations ciblées de la presse française en ligne et des sites et pages web dédiés à la contestation de la 5G, en France et à l'étranger. Les contenus sont issus de citations ou de leurs synthèses. Ils n'ont qu'une valeur informative et ne reflètent aucunement la position de l'Anses.

⁵⁶ Selon les déclarations de la ministre Elisabeth Borne dans un *interview* au *Journal du Dimanche* publiée le 21 juin : « INFO JDD. Borne et Véran ont écrit au Premier ministre pour demander d'attendre sur la 5G », *Le Journal du Dimanche*, 21 juin 2020.

⁵⁷ Elles soutiennent également que l'arrêté du 30 décembre 2019 pour l'attribution des fréquences aurait pu être considéré comme un plan ou un programme ayant une incidence sur l'environnement, et de ce fait il aurait dû faire l'objet d'une évaluation environnementale préalable, conformément aux dispositions de la directive 2001/42/CE sur les études d'impact et de l'article L. 122-4 du code de l'environnement.

⁵⁸ « Qui sont les « anti-5G » qui se mobilisent sur le web ? », *FranceInter*, 29 septembre 2020.

Tableau 2 : Les formes de mobilisation contre la 5G

09/04/2019	Suisse, Canton de Vaud	Adoption de moratoire sur la construction de nouvelles antennes 5G, jusqu'à publication du rapport du groupe de travail « Téléphonie mobile et rayonnement » instauré par le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) et dirigée par l'Office fédéral de l'environnement (publié en novembre 2019).
10/04/2019	Suisse, Canton de Genève	Adoption d'une motion demandant la mise en place d'un moratoire concernant l'installation de la 5G sur le territoire cantonal et demandant à l'OMS de piloter des études sur la nocivité de la 5G.
10/05/2019	Suisse, Berne	Manifestation publique contre la 5G. Demande de moratoire et refus de l'augmentation des valeurs de l'ORNI ⁵⁹ .
08/06/2019	France, Nantes Collectif 44 contre Linky et la 5G	<i>Sitting</i> contre la 5G, contre les expérimentations SFR et Orange, demande de consultation publique.
18/06/2019	France, Albi Association Exit 5G	Manifestation publique contre la 5G.
29/06/2019	France, Albi Association Exit 5G	Marche contre la 5G + Conférence-débat avec Robin des Toits et Annie Sasco.
14/09/2019	France, Albi Association Exit 5G	Manifestation publique contre la 5G.
21/09/2019	Suisse, Berne	Manifestation publique contre la 5G. Demande de moratoire national et de création de zones blanches.
02/10/2019	France Priartem-Agir pour l'environnement	Pétition électronique. Appel à moratoire et à débat public.
08/10/2019	Suisse Komitee Mobilfunkhaftungs-Initiative (admin.ch)	Initiative populaire fédérale « Responsabilité en matière de téléphonie mobile ». Elle concerne particulièrement le cas de dommages corporels ou matériels dus à l'exploitation d'antennes de téléphonie mobile.
15/10/2019	Suisse Komitee Mobilfunk-Initiative (admin.ch)	Initiative populaire fédérale « Pour une téléphonie mobile respectueuse de la santé et économe en énergie ». Elle porte sur la protection de la population contre le rayonnement non ionisant.
18/10/2019	Suisse Stop 5G in Switzerland	Pétition électronique réclamant un moratoire sur la 5G. Lancée par une physiothérapeute et déposée au Dép. Fédéral de l'Environnement (39 488 signatures).
31/10/2019	Suisse, Canton du Jura	Adoption de moratoire sur le déploiement de la 5G au moins jusqu'à publication du rapport du groupe de travail « Téléphonie mobile et rayonnement » instauré par le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) et dirigé par l'Office fédéral de l'environnement

⁵⁹ ORNI : Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (Suisse).

09/01/2020	International	5G Space Appeal : pétition électronique de médecins, scientifiques, membres d'organisations environnementales et citoyens de 204 pays, pour l'arrêt du déploiement de la 5G sur la Terre et dans l'espace (302 000 signatures à ce jour).
04/02/2020	International	Astronomers' Appeal : pétition électronique d'astronomes contre le lancement de satellites 5G, pour la sauvegarde des observations astronomiques professionnelles (2 000 signatures à ce jour).
25/01/2020	International et France Stop5Ginternational.org Robin des Toits, ondes Saint-Ouen, SCALP-IDF	Première journée mondiale de protestation contre la 5G (5G Global Protest Day). À Paris, conférence-débat d'Annie Sasco et rassemblement public.
27/02/2020	Suisse, Canton de Genève	Adoption de la modification de la loi cantonale sur les constructions et les installations diverses, impliquant que - pour une durée de 3 ans - la modification d'antennes existantes (notamment pour y installer la 5G) soit soumise à autorisation. Un recours a été déposé par les opérateurs de téléphonie mobile contre cette décision.
03/03/2020 01/04/2020 01/10/2020	Suisse, Cantons de Genève, Neuchâtel et Jura	Initiatives cantonales auprès des chambres fédérales. Demande de moratoire au niveau fédéral sur les ondes millimétriques. Proposition d'élaboration d'un projet d'acte de l'Assemblée fédérale par une commission.
29/03/2020	Suisse, Genève	Création de la Coordination Genevoise Moratoire 5G (moratoire5G.ch).
29/03/2020	Suisse, Genève moratoire5G.ch	Demande de moratoire sur l'installation d'antennes 5G, en application du Principe de précaution. Lettre envoyée aux Conseils municipaux des communes genevoises.
25/04/2020	International Stop5Ginternational.org	Journée mondiale de protestation contre la 5G (stop5G !). Cyber-manifestation et conférence avec un panel d'orateurs international. Participants : médecins, scientifiques, avocats, astronomes, artistes et militants.
01/05/2020	Belgique "Electrosmog Appeal Belgium"	Pétition électronique. 527 médecins et diverses Communes demandent à l'opérateur Proximus de geler ses projets. Ils demandent aussi au gouvernement : 1) un moratoire sur le déploiement de la 5G dans l'attente d'études d'impact sanitaire ; 2) l'application du Principe de précaution pour protéger la population (spécialement femmes enceintes et enfants) ; 3) la mise en place de dispositifs de sensibilisation des citoyens sur les usages des objets connectés ; 4) l'établissement de normes d'exposition protectrices et d'un centre de vigilance.
11/05/2020	France Assemblée Nationale	34 députés LR font une proposition de résolution pour la création d'une Commission d'enquête sur le déploiement de la 5G, chargée d'évaluer les risques sanitaires du déploiement, d'estimer les scénarios d'exposition et d'anticiper les éventuels impacts sur la santé. Proposition renvoyée à la commission des affaires économiques.
20/06/2020	France Gouvernement	Demande de moratoire sur le déploiement de la 5G dans l'attente de l'avis de l'Anses, adressée par les ministres de la Transition écologique et de la Santé au 1 ^{er} ministre.

25/06/2020	France, Corse Collectif Terra libera	Pétition électronique. Manifeste citoyen lancé par le collectif « Terra libera pour une Corse sans 5G et un monde vivant ». Il s'adresse aux élus locaux pour demander l'arrêt du déploiement en Corse.
06/07/2020	France, Ville de Grenoble	Arrêtés municipaux pour bloquer les travaux d'installation d'antennes 5G par les opérateurs (refus de déclaration préalable). Les arrêtés évoquent l'incertitude sur les impacts sanitaires et l'attente de l'avis de l'Anses.
23- 24/07/2020	France, Conseil municipal de Paris	Vœu de moratoire sur le déploiement de la 5G. Les élus écologistes du Conseil municipal demandent un moratoire avant le déploiement et un débat démocratique dans le Grand Paris.
26/08/2020	France, Hendaye (Pays Basque)	Vote de moratoire par le Conseil municipal, sur le déploiement de la 5G dans le territoire de la Commune.
12/09/2020	France, Grandes villes et autres Communes	Demande de moratoire sur la 5G et de tenue d'un débat démocratique décentralisé, adressée au Gouvernement, par une soixantaine d'élus locaux, nationaux et européens.
19/09/2020	France, Lyon Collectif Stop Linky-5G Auvergne-Rhône Alpes, Saône et Loire, Gard et Montpellier	Manifestation publique contre le déploiement de la 5G, devant le Circ.
29/09/2020	France, Calais	Pétition électronique pour demande de moratoire, adressée aux maires de Calais et Coquelles. La pétition demande d'attendre l'avis de l'Anses et des études d'impact environnemental.
05/10/2020	France, Montpellier	Le Maire refuse l'implantation d'antennes 5G sur les bâtiments publics de la ville, en attendant l'avis de l'Anses et les décisions qui seront engagées au niveau national.
09/10/2020	France, Lille	Moratoire sur le déploiement de la 5G dans la ville, en attendant l'avis de l'Anses.
19/10/2020	International, Union Européenne	15 États-membres demandent à la CE de développer une stratégie contre la désinformation sur les champs électromagnétiques et la 5G (Autriche, Bulgarie, Croatie, République tchèque, Chypre, Estonie, Finlande, Grèce, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Pologne, Portugal, Slovaquie, Suède).
25/10/2020	International Stop5G.org	Demande de moratoire dans l'attente d'une évaluation de coûts pour la santé, la faune et la Terre. Lettre adressée au Secrétaire Général des Nations Unies.
01/12/2020	France, Fontenay-sous-Bois	Moratoire sur le déploiement de la 5G dans la ville (arrêté 5G), jusqu'à la publication de l'avis de l'Anses et la réalisation de l'étude d'impact environnemental. Aussi, organisation de débat contradictoire en présence des opérateurs.

Trois constats découlent du Tableau 2 présenté ci-dessus : (1) on y reconnaît des formes de mobilisation classiques, déjà vues au cours des différents enchaînements de la méta-controverse sur les ondes électromagnétiques (comme les protestations de riverains contre l'installation d'antennes-relais, la constitution de collectifs locaux ou la prise d'arrêtés municipaux) ; (2) on voit émerger des alliances de circonstance entre porteurs de cause

(associations, citoyens, scientifiques, représentants politiques locaux et nationaux) ; et, surtout, (3) on voit apparaître de nouvelles formes de l'action individuelle et collective qui coïncident avec une intensification des recours au numérique.

2.2.5 La médiatisation de la 5G en France. Analyse de la presse⁶⁰

Cette section porte sur la couverture médiatique de la controverse de la 5G en France, sur la période 2019 – 2020. Elle se base sur l'analyse de deux corpus d'articles de presse : le premier couvrant l'année 2019 est composé de 837 articles, le deuxième couvrant l'année 2020 est composé de 2 400 articles, soit le triple de l'année précédente⁶¹.

2.2.5.1 La couverture du sujet 5G en 2019

La chronologie présentée plus haut fait bien apparaître que la question des effets sanitaires de la 5G ne s'impose pas dans l'agenda médiatique pendant la phase d'émergence de la controverse (2019), et que la question des risques sanitaires liés à l'exposition à des champs électromagnétiques nouveaux créés par la nouvelle infrastructure 5G ne s'impose que comme l'une des manières de définir l'enjeu de la 5G en France.

Pendant l'année 2019, 837 articles de presse nationale sont recensés par la base Factiva⁶². Ce chiffre n'est pas le signe d'une couverture très intense. Qu'il s'agisse de titres papier ou en ligne, généralistes ou spécialisés, le nombre de parutions est relativement constant tout au long de l'année : entre 50 et 100 par mois. On y distingue un seul pic de couverture du sujet, au cours du mois d'octobre (cf. Figure 3). Assez modéré, ce pic est lié à l'appel à moratoire lancé par Priartem et Agir pour l'Environnement, le 2 octobre.

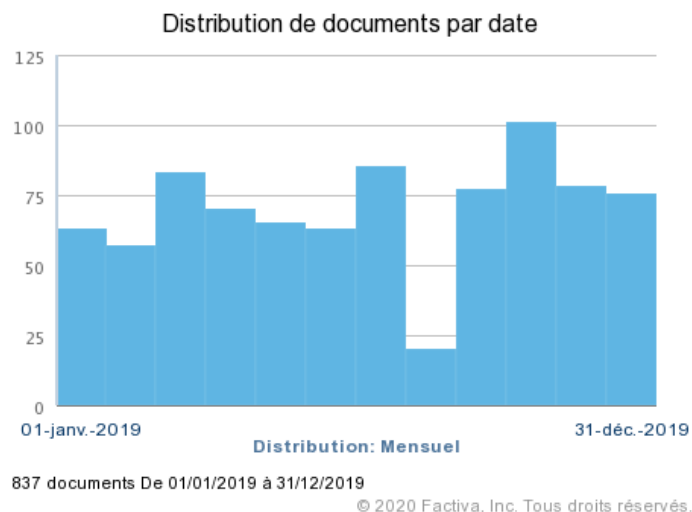


Figure 3 : Le corpus Presse 2019 par nombre et date de publication des documents (n = 837)

⁶⁰ Cette analyse est une synthèse de Demortain, 2021.

⁶¹ Les corpus ont été constitués par extraction des articles depuis la base de données Factiva en cherchant la présence des termes 5G ET [risques OU santé OU effets sanitaires] dans le texte complet des articles, excluant les titres étrangers. L'analyse a été réalisée avec l'outil CorText Manager, développé par la plateforme CorText du laboratoire Lisis, qui a permis de faire une analyse de cooccurrences pour représenter quantitativement les thèmes les plus fréquents et les visualiser. Il est à noter que la fréquence de l'emploi des termes ne préjuge ni de la pertinence de leur emploi, ni de l'incidence des termes dans le débat public.

⁶² La liste des titres couverts dans la base est présentée en annexe.

Cette couverture du sujet de la 5G n'est que très partiellement motivée par la question des risques sanitaires de la technologie, qui n'est qu'une des thématiques structurant le corpus. En d'autres termes, le discours sur les risques sanitaires de la 5G et des ondes électromagnétiques est présent dans la presse de 2019, mais ne constitue que l'un des discours dominants. Car le champ d'ensemble est plutôt structuré par plusieurs thématiques.

Dans le texte des 837 articles composant le corpus, sept *clusters* ou ensembles de termes les plus fréquents apparaissent distinctement, comme illustré dans le Tableau 3 ci-dessous et la carte qui suit (cf. Figure 4) :

Tableau 3 : *Clusters* de termes présents dans la presse en 2019

<i>Clusters</i> de termes
1. Attribution des fréquences 5G & Bouygues Telecom et Free
2. Haut débit & nouveaux services
3. Équipements Huawei & sécurité nationale
4. Transformation numérique & grandes entreprises
5. Commission von der Leyen
6. Entreprises chinoises & groupe chinois
7. Champs & ondes électromagnétiques Autres termes fréquemment utilisés composant ce cluster : « réseaux 5G », « principe de précaution », « champs » et « ondes électromagnétiques », « sécurité sanitaires », « ANSES », « compteur Linky », « antennes-relais », « déploiement de la 5G ».

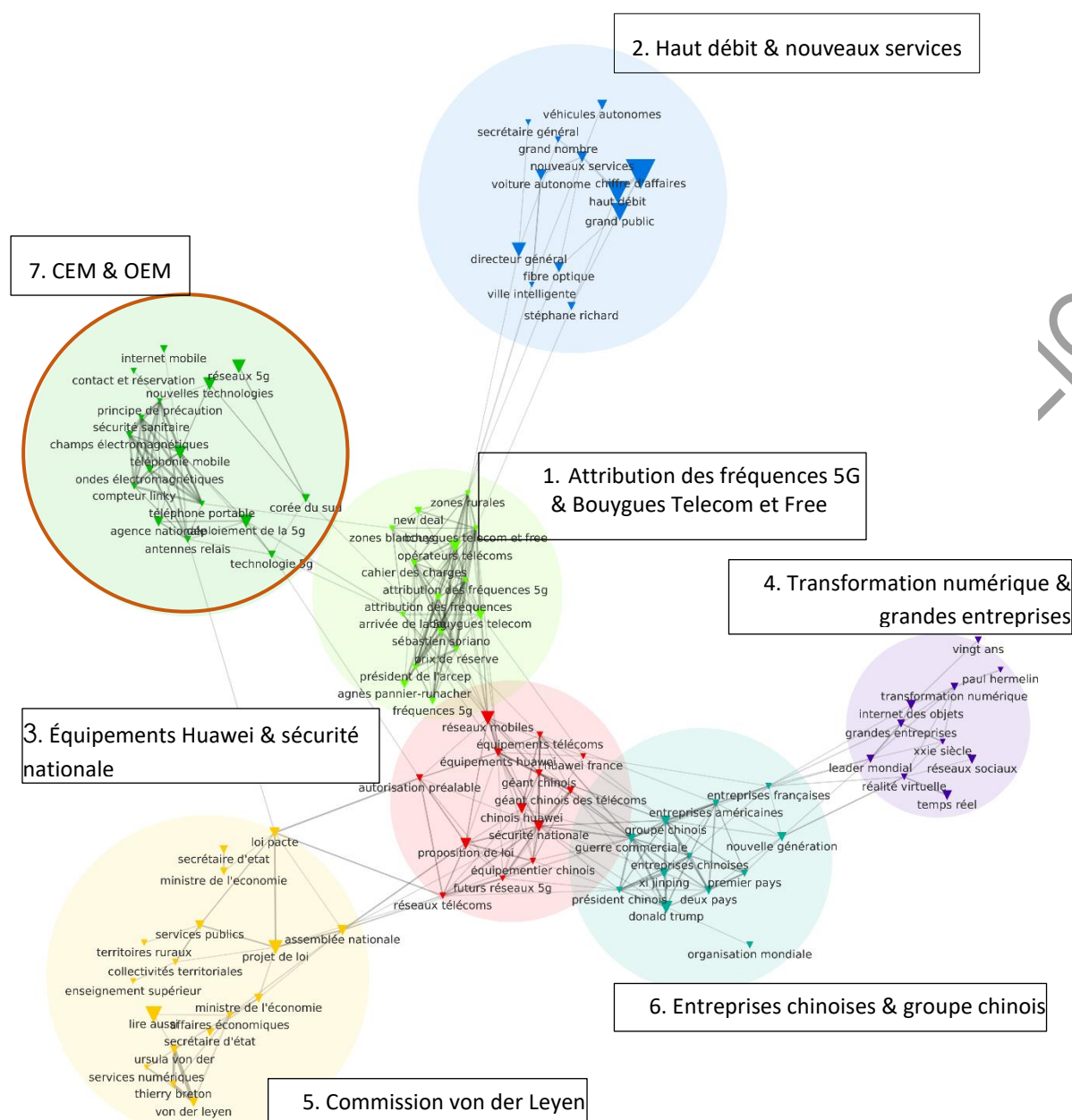


Figure 4 : Clusters des termes les plus fréquemment utilisés ensemble dans les articles de presse papier et en ligne sur la 5G et ses risques pour la santé, en 2019.

Corpus = 837 articles de presse

La Figure 4 représente des *clusters* de termes, regroupés en fonction de leur fréquence de cooccurrence dans le texte des 837 articles composant le corpus. Sept *clusters* de termes apparaissent distinctement sur cette carte.

Le *cluster* 7, vert en haut à gauche, cerclé de rouge, est celui qui touche à la question des risques posés par l'exposition aux ondes ou champs électromagnétiques, des compteurs Linky, des antennes-relais et, surtout, de la 5G. Ce *cluster*, qui touche aussi à la question du principe de précaution dont on demande l'application avant le déploiement de la 5G, est étroitement lié à la saisine de l'Anses de janvier 2019. Cependant, le cœur des conversations médiatiques dans la presse concerne bien quatre autres *clusters* thématiques, notamment sur : les attributions de fréquences (1), le déploiement des technologies permettant et permises par le haut débit (2), l'équipementier Huawei (3), la compétition entre les industriels

chinois, américains et européens (6). Ces thèmes traduisent d'autres définitions sociales de la question 5G qui comptent davantage que celle des risques sanitaires (*cluster* 7) pour des acteurs comme le gouvernement français – qui montre une préoccupation spécifique pour les questions de couverture du territoire et de réussite du tournant de la 5G en France. Du côté des opérateurs industriels, cette problématique de la couverture du territoire et du calendrier du déploiement est évidemment centrale, bien que l'enjeu qui transparait dans leurs discours sur la 5G est celui de la sécurisation des réseaux et nouveaux équipements, beaucoup plus susceptibles de défaillance et de piratage.

La dynamique historique est nette : le *cluster* sémantique relatif aux risques des ondes ou champs électromagnétiques et au principe de précaution (*cluster* n°7), est celui qui gagne le plus en force au cours de l'année 2019. Il est par contre notable que le terme « compteur Linky » fasse partie de ce *cluster*. Il montre bien que le sujet « risques de la 5G » ne se constitue pas en référence aux spécificités techniques de la nouvelle infrastructure. Il est bien davantage saisi sous l'angle de la généralisation de l'exposition aux champs électromagnétiques, et de la multiplication des sources d'ondes au plus près des espaces de vie⁶³.

2.2.5.2 La couverture du sujet 5G en 2020

L'année 2020 débute par deux événements qui seront couverts par la presse nationale généraliste et spécialisée : (1) le recours de Priartem et Agir pour l'Environnement devant le Conseil d'État contre la procédure de déploiement imminent de la 5G (annonce du 24/01 et recours du 17 février 2020) et (2) la publication du rapport préliminaire de l'Anses sur l'exposition à la 5G et les effets sanitaires associés, notant « un manque important, voire une absence de données relatives aux effets biologiques et sanitaires potentiels dans les bandes de fréquences considérées » (publication du 25 janvier 2020).

À partir de mars 2020, la pandémie Covid-19 prend évidemment le pas sur tout autre sujet, mais celui de la 5G est néanmoins beaucoup plus traité dans la presse que l'année précédente. Entre 200 et 300 articles par mois minimum paraissent sur le sujet (contre 50 à 100 en 2019). Sur toute l'année, le nombre d'articles récupérés est le triple de celui de l'année précédente (2 400 articles contre 837)⁶⁴.

Contrairement à 2019, on distingue des moments de couverture médiatique et de débats plus intenses au cours de l'année 2020, notamment en juillet et en septembre. Juillet 2020 correspond aux premières mesures des maires écologistes récemment élus contre le déploiement de la 5G (prise de mesures de « moratoire » sur le déploiement, à l'initiative d'Eric Piolle, maire de Grenoble).

Le 12 septembre 2020, 68 élus, dont 11 maires de grandes villes comme Bordeaux, Grenoble, Marseille ou Strasbourg, mais aussi des parlementaires nationaux et européens représentants des partis écologistes et de la France Insoumise, exhortent le gouvernement à décider d'un

⁶³ Le lien avec le moment de controverse sur le déploiement des compteurs Linky est visible à plusieurs niveaux : dès 2015 la « fronde anti-Linky » arguait déjà du cumul d'exposition aux ondes électromagnétiques et de ses effets sanitaires. Elle dénonçait également la menace sur l'autonomie et sur l'intimité de la consommation du foyer par cette nouvelle technologie du « big data ». Aujourd'hui, les « collectifs anti-Linky » sont devenus « collectifs anti-Linky-5G », et plusieurs articles de presse traitent des similitudes entre la polémique sur la 5G et celle plus ancienne – mais toujours en cours – sur les compteurs Linky.

⁶⁴ Articles récupérés par l'intermédiaire de la même requête que celle appliquée pour produire le corpus de 2019, c'est-à-dire comportant les termes 5G et risques ou santé, excluant les titres étrangers.

moratoire sur le déploiement de la 5G. Ils plaident aussi pour « la tenue d'un débat démocratique décentralisé sur la 5G et sur les usages numériques ». L'appel est publié dans une tribune parue le 13 septembre dans *Le Journal du dimanche*⁶⁵.

Tout le mois de septembre est marqué par la poursuite des débats sur les demandes de moratoire émanant de différentes communes à travers toute la France, des mobilisations d'associations et de groupes citoyens dans différentes régions contre l'installation de la 5G, dans le contexte du lancement alors imminent des enchères pour l'attribution des nouvelles fréquences (29 septembre). Au cours de ce mois-ci, le Président de la République intervient et intensifie le débat par une prise de position (durant une rencontre avec les firmes technologiques françaises à l'Élysée) en faveur du processus de déploiement de la 5G et contre les positions des élus écologistes, assimilées à la défense d'un supposé « modèle Amish » (discours prononcé le 15 septembre). Une fois les enchères démarrées, la couverture médiatique diminue graduellement, mais reste haute par rapport à 2019 (cf. Figure 5).

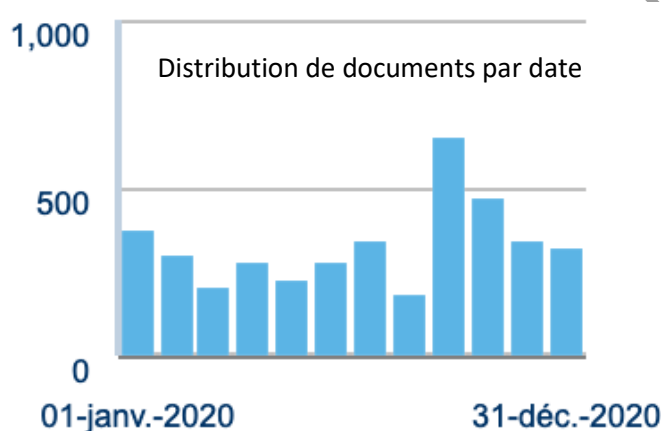


Figure 5 : Le corpus Presse 2020 par nombre et date de publication des documents (n = 2 400)

D'un point de vue thématique, la différence est marquante avec l'année 2019. On peut distinguer cinq axes thématiques qui composent l'espace du débat français sur la 5G : les deux principaux, en opposition, concernent (1) les risques liés au déploiement et (2) la promesse économique de la nouvelle technologie. Les trois autres, mineurs, sont ceux (3) des fausses nouvelles sur la 5G et les théories du complot, (4) de la guerre économique entre les États-Unis et la Chine, (5) du rôle de la 5G dans la relance économique (en relation avec la crise de Covid-19). Ces axes sont présentés sous la forme de *clusters* de termes dans le Tableau 4 et la carte ci-après (cf. Figure 6).

Tableau 4 : *Clusters* de termes dans le corpus de 2020

Clusters de termes
1. Fake news et complots
2. Guerre économique USA/Chine
3. 5G & relance économique
4. Déploiement, risques et choix

⁶⁵ « EXCLUSIF. Lyon, Bordeaux, Marseille : les maires de 11 grandes villes demandent un moratoire sur la 5G », *Le Journal du Dimanche*, 12 septembre 2020.

Clusters de termes

Termes dans ce *cluster* : « déploiement de la 5G », « téléphone mobile », « ANFR », « antennes 5G », « antennes relais », « ondes électromagnétiques », « sécurité Sanitaire », « principe de précaution », « santé environnement », « risques sanitaires », « impact sanitaire », « impact environnemental », « débat public », « moratoire » ...

5. Réseau mobile & nouvelles technologies

Termes dans ce *cluster* : « nouvelles technologies », « arrivée de la 5G », « réseau 5G », « réseau mobile », « fibre optique », « haut débit », « voiture autonome », « intelligence artificielle » ...

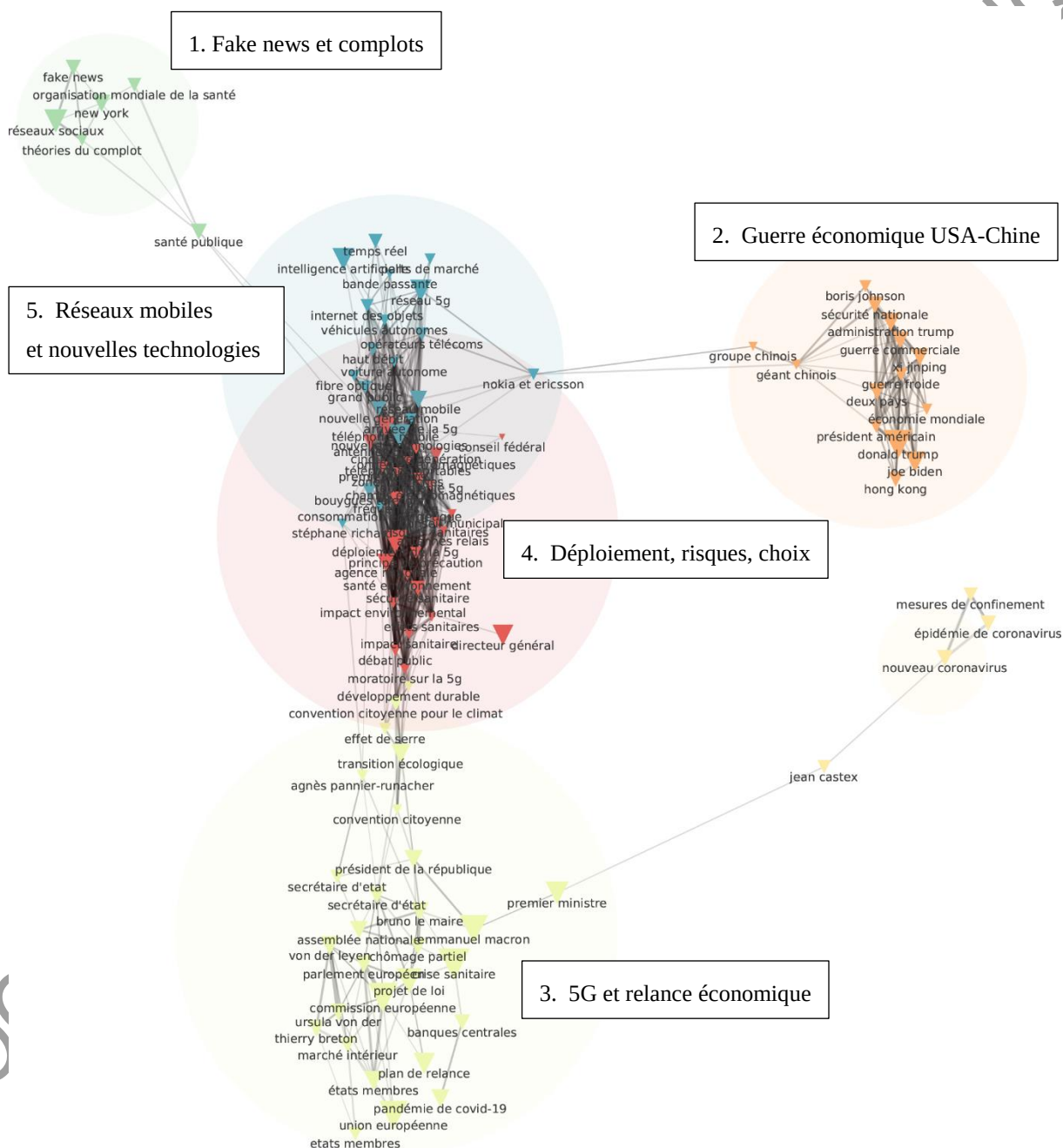


Figure 6 : Clusters d'expressions les plus fréquemment utilisés ensemble dans les articles de presse papier et en ligne sur la 5G et ses risques pour la santé, en 2020

Corpus = 2 400 articles de presse

La carte montre, en périphérie, trois *clusters* de termes (1, 2, 3) qui ne sont reliés au cœur de la controverse sur la 5G que de manière indirecte, et qui sont également moins fréquents dans le corpus d'ensemble :

- en haut à gauche, un *cluster* regroupant des termes constituant un discours sur les théories du complot et les fausses nouvelles sur la 5G, dont on sait qu'elle est associée, sur les réseaux sociaux notamment, à des discours complotistes (par exemple en lien avec la pandémie de Covid-19) ;
- à droite en haut, un *cluster* concernant la couverture de la guerre industrielle opposant les États-Unis à la Chine et à Huawei en particulier ;
- en bas, le *cluster* vert pale touche à l'actualité des politiques économiques de relance industrielle pour pallier la crise de Covid-19, contexte dans lequel le déploiement de la 5G est perçu comme d'autant plus bénéfique et urgent.

Les deux *clusters* centraux (4, 5) constituent deux ensembles de discours sur la 5G, largement opposés. C'est leur coexistence qui constitue un état de controverse.

Le *cluster* 4 rassemble des marqueurs thématiques sur les risques liés à la 5G, son impact sanitaire et environnemental, et la possibilité de choisir – ou de refuser – le déploiement exprimée par divers publics, au nom de ces risques. Des termes anciens du débat sur les risques des radiofréquences sont au cœur de ce *cluster* (« champs » et « ondes électromagnétiques »), ainsi que les objets de risque identifiés depuis maintenant longtemps en la matière, les antennes-relais, ou ici les antennes 5G, avec leurs particularités. Ils se mêlent au terme « zones blanches », marqueur du débat sur le fait que, plutôt que d'avancer dans les générations technologiques, il faudrait travailler à déployer complètement les technologies existantes pour en faire profiter tous les publics et territoires. En continuité avec ce débat opposant innovation et égalité, des termes marquent une nouvelle dimension : celle du choix qui devrait être ouvert en matière d'adoption de nouvelles technologies. Débat public, moratoires, décisions de conseils municipaux sont ainsi très largement discutés, dans la presse, en lien avec les thèmes du risque et de l'impact sanitaire de la 5G. Ces derniers marqueurs sémantiques sont nouveaux par rapport à 2019, année pendant laquelle on parlait davantage de résistance à l'installation d'antennes, dans la continuité des polémiques sur le compteur Linky.

Dans le *cluster* 5, la 5G est discutée sous l'angle d'une nouvelle technologie prometteuse, pourvoyeuse de développement économique, liée à un ensemble d'autres innovations qu'elle va contribuer à faire décoller. L'arrivée de la 5G est discutée comme faisant partie d'un ensemble technologique qui dépasse largement le domaine des télécommunications. Il peut être noté que la question de l'impact énergétique de la nouvelle infrastructure apparaît dans ce *cluster*, et non dans le *cluster* 4. Le thème n'est donc pas traité comme celui de l'impact sanitaire, au titre des risques et autres effets négatifs de la 5G.

Une analyse rapprochant les thèmes des titres de presse permet de discerner nettement que le thème « déploiement, risques et choix » est principalement traité par la presse générale régionale, tandis que le thème « réseaux mobiles et nouvelles technologies » l'est par une presse économique nationale (*L'économiste*, *La Tribune*, *Les Echos*, mais aussi *Le Figaro*) (cf. Figure 7). Ainsi, les discours sur les risques sanitaires, les problèmes environnementaux et l'opposition à l'installation de la 5G, occupent l'espace de la presse locale beaucoup plus que la presse nationale, qui relaie ces mobilisations irrégulièrement. On est face à un traitement médiatique dans lequel les risques de la 5G sont représentés comme des enjeux particuliers, locaux, objets de mobilisations dans des territoires donnés, beaucoup plus que comme un sujet de préoccupation général du public.

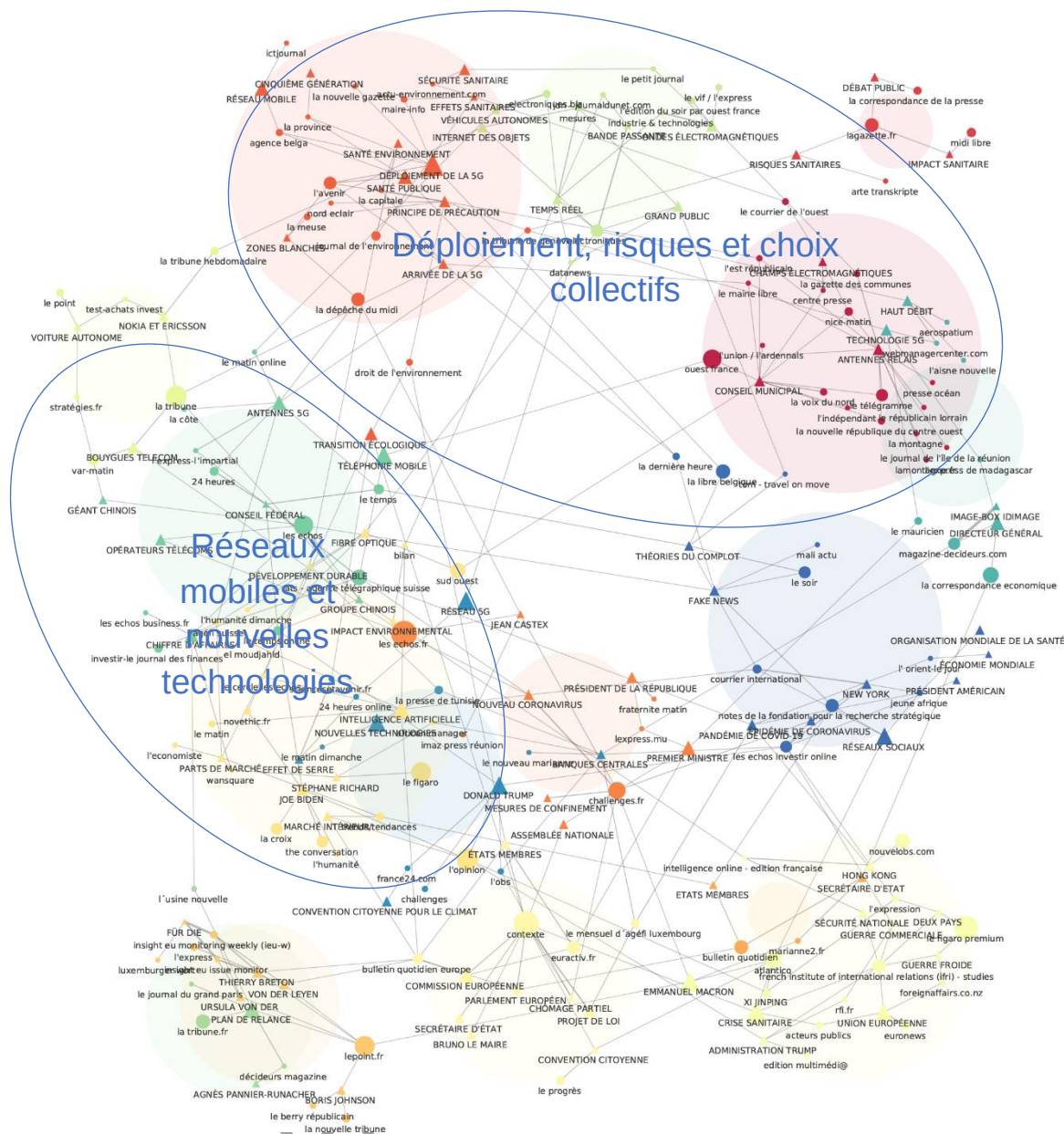


Figure 7 : Clusters hétérogènes rassemblant titres de presse et expressions les plus fréquemment utilisés dans les articles traitant de la 5G et des risques pour la santé en 2020

2.2.5.3 Comparaison de la médiatisation en 2019 et en 2020

L'évolution entre les années 2019 et 2020 est importante. Quantitativement, le sujet de la 5G a beaucoup plus largement été traité en 2020 que l'année précédente. Thématiquement, il est possible de constater la disparition du thème « enchères » de la couverture médiatique, à mesure que la tenue de ces enchères est devenue sûre, et qu'aucun report ne serait accordé pour attendre d'éventuelles nouvelles données sur les risques sanitaires de la 5G. Le thème laisse la place à une confrontation évidente entre deux registres discursifs, celui de l'arrivée de la 5G, avec le discours positif sur la technologie 5G en matière de développement économique et d'innovation ; et celui du moratoire, en réponse au programme de déploiement et aux risques et choix qu'il implique. Encore une fois donc, les discours médiatiques sur la 5G sont très structurés par le rythme et les séquences du déploiement, dont la nature inéluctable paraît plus évidente en 2020 qu'en 2019.

2.2.6 Le cadrage sanitaire

L'analyse de la presse sur la période 2019-2020 a montré le caractère polymorphe du sujet de la 5G, telle qu'il se configure à partir de ses sept puis cinq pôles (ou *clusters*) thématiques, et de la diversité de sujets de préoccupation connexes. Elle a aussi montré que la question des risques du déploiement, fondée sur la problématique de l'exposition humaine aux radiofréquences créées par la nouvelle infrastructure, s'impose dans le débat médiatique français comme l'une des deux manières de définir les enjeux de la 5G, en opposition au discours positif sur la nouvelle technologie et ses promesses.

Cependant, la controverse publique autour de la 5G se déploie plus nettement dans un autre espace médiatique, *YouTube*. C'est ici que l'on trouve le plus d'activité de publication, de consultation, de « *likes* » ou de commentaires sur le sujet de la 5G.

2.2.6.1 Risque, ondes, preuve : la chambre d'écho de YouTube⁶⁶

À partir d'une requête simple, en français, sur « 5G ET santé », effectuée sur la seule année 2019, 508 contenus vidéos sont retournés par *YouTube*⁶⁷. L'activité de commentaire générée par ces vidéos est aussi substantielle, 3 208 commentaires ayant été faits sur ces vidéos. L'analyse de ce matériau donne à voir des discours organisés autour de quatre thèmes principaux qui signalent l'existence de préoccupations marquées en relation avec la question sanitaire (cf. carte de la Figure 8 ci-après). Ces thèmes sont les suivants : (1) les études établissant la réalité des risques ou des effets sanitaires des ondes et micro-ondes, par exemple sur le système immunitaire ou le cerveau ; (2) les ondes « millimétriques », spécifiquement utilisées pour la 5G ; (3) l'absence de preuves de la non-nocivité des ondes et de la 5G en particulier, avec des expressions comme conflit d'intérêt, consensus scientifique, *cherry-picking*, double-aveugle ; (4) la 5G comme risque global, au sens d'un risque touchant toutes les populations et les territoires, et d'un risque s'accroissant avec l'accumulation des ondes issues des différentes générations de téléphonie mobile.

Cet aperçu de l'activité de commentaires sur la 5G sur le site *YouTube* laisse donc bien transparaître le fait qu'il y a une controverse sur la 5G et ses risques sur la santé, bien plus active que ne le laisse penser une lecture rapide de la presse sur la période, ou même une consultation d'autres réseaux sociaux.

Il est à noter, par ailleurs, que cette activité sur *YouTube* ne mobilise pas, ni comme auteur ni comme objet des discussions, les acteurs de la controverse, qu'ils soient institutionnels, industriels ou associatifs, comme si l'activité discursive sur *YouTube* était détachée des lieux habituels de la controverse, et désencastrée des relations sociales entre acteurs institutionnels ou associatifs connus de celle-ci. À titre d'exemple, aucun des scientifiques cités comme experts dans les médias, ou présents dans les arènes institutionnelles, n'apparaissent dans les contenus *YouTube*.

⁶⁶ L'analyse qui suit est une synthèse de Demortain et Féron, 2020.

⁶⁷ Collecte effectuée le 03 juin 2020.

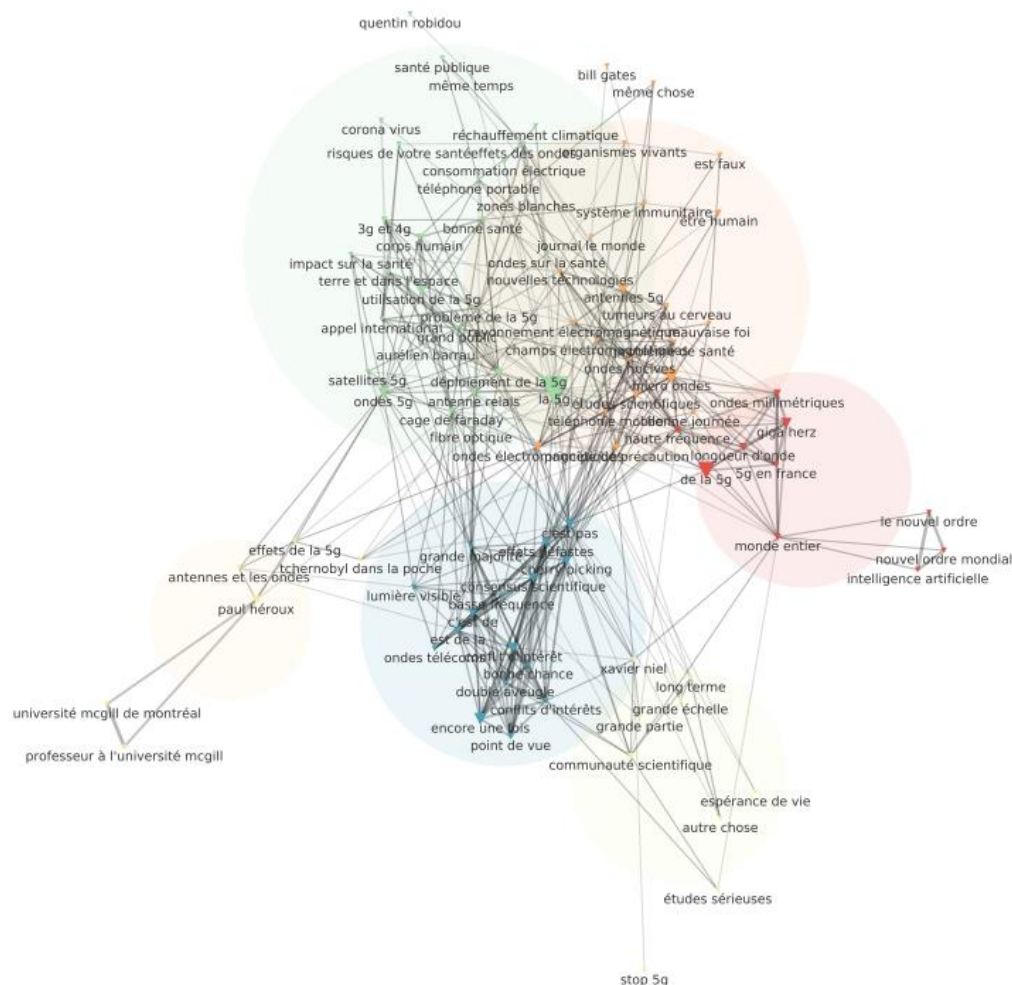


Figure 8 : Clusters issus de l'analyse du corpus YouTube, 2019

2.2.7 Le positionnement de la communauté universitaire

Cette dernière section porte sur le positionnement de la communauté universitaire sur la thématique de la 5G, abordé à partir des publications sur le média de vulgarisation scientifique *The Conversation*⁶⁸. Le choix de cette source est motivé par la diversité de disciplines qui s'y expriment et par sa volonté d'amener des universitaires et des chercheurs à contribuer au débat public à partir de leurs propres champs d'expertise.

L'analyse porte sur l'ensemble des articles que *The Conversation* a publié sur la 5G depuis janvier 2014 jusqu'à décembre 2020, dans ses versions francophone et anglophone. Le corpus est constitué de 39 articles : 28 sont publiés en anglais, entre janvier 2014 et octobre 2020, et 11 sont publiés en français entre avril 2017 et novembre 2020 (cf. Figure 9). Tous les articles ont fait l'objet d'une lecture extensive et d'une analyse qualitative de contenu visant à

⁶⁸ *The Conversation* est un média d'information et d'analyse de l'actualité en ligne, qui publie des articles grand public écrits par des universitaires (professeurs, chercheurs ou doctorants) et édités par des journalistes. Son objectif est d'amener la communauté universitaire à contribuer au débat public en commentant des sujets d'actualité en matière de technologie, santé, société, culture, économie. Ce média, qui est associatif, compte neuf sites à travers le monde (Australie, Afrique, Canada en français et en anglais, France, États-Unis, Grande-Bretagne, Espagne et Indonésie). Les contenus publiés sur ces sites sont traduits et republiés à travers tout le réseau. Les auteurs n'écrivent que sur les sujets de leur champ d'expertise, précisé dans le cadre de leurs articles.

repérer les thématiques abordées, les positionnements des auteurs, ainsi que les champs scientifiques et disciplines engagés dans la discussion de la 5G. Sur les 39 articles analysés, 22 ont fait l'objet de synthèses présentées ci-après. Les articles descriptifs centrés sur les aspects strictement techniques ou économiques de la 5G ont été exclus de la présentation. Cette entrée sur la 5G par ce média spécifique, qui ne saurait pas couvrir la totalité du traitement d'une controverse publique par la communauté académique à l'heure de la multiplication des supports de communication publique de la science, permet néanmoins d'apercevoir les différentes arènes de traitement du sujet (pays et disciplines), ainsi que les cadrages thématiques et critiques opérés par cette communauté, dans le temps.

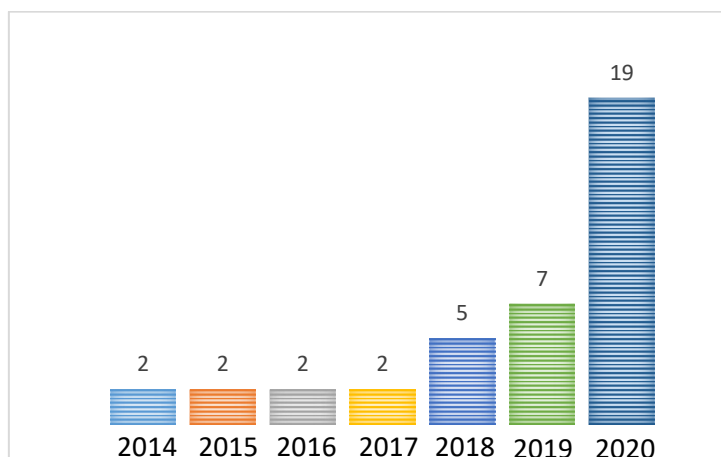


Figure 9 : Le corpus *The Conversation* par nombre et date de publication des documents (n = 39)

Les auteurs qui se sont exprimés sur *The Conversation* au sujet de la 5G sont d'abord australiens et britanniques puis, à partir de 2017, français, américains, néo-zélandais et canadiens. Ils sont pour la plupart enseignants et chercheurs en sciences de l'ingénieur (électronique, sécurité des réseaux, communication sans fils, informatique) ou en sciences économiques et de gestion, mais aussi en sciences sociales (science politique, sociologie, droit) et en sciences de l'information et de la communication (cf. Figure 10).

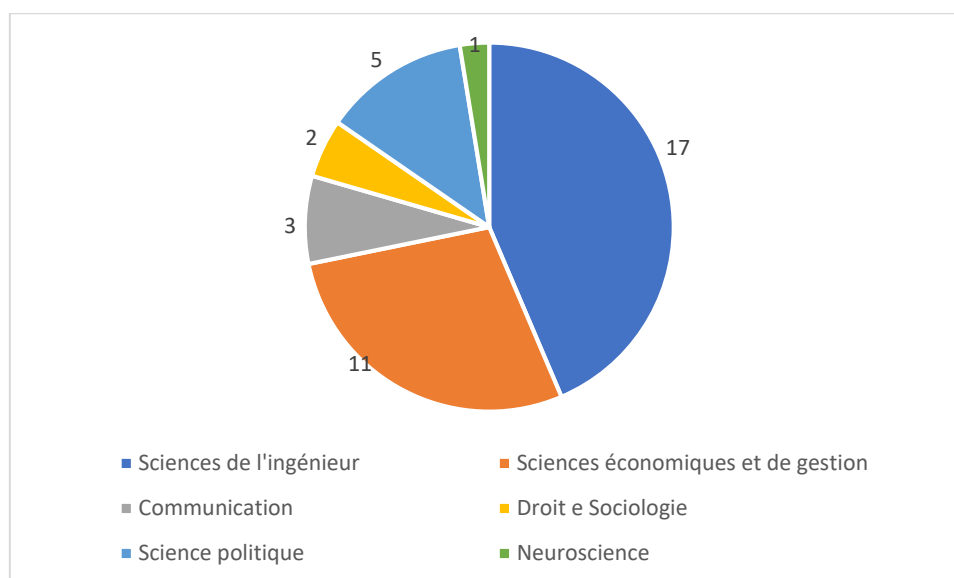


Figure 10 : Distribution du corpus des articles de The Conversation sur la 5G par champs scientifiques de leurs auteurs (n = 39)

L'analyse des articles publiés par ces universitaires fait apparaître, comme dans la presse, une pluralité de questionnements associés à la technologie 5G et un champ d'ensemble qui est structuré par des discours où la thématique des risques pour la santé n'est qu'une parmi d'autres. Celle-ci est abordée initialement en 2017, mais elle ne sera véritablement développée qu'au cours de l'année 2020, surtout en association avec la question des fausses informations sur la 5G et des théories du complot sur le lien entre 5G et pandémie de Covid-19.

Ainsi, il est possible de distinguer quatre thématiques principales autour desquelles s'organisent les prises de position des auteurs : (1) Santé et Risques ; (2) Intox et complot, 5G-Covid19 ; (3) Le cas Huawei et les enjeux géopolitiques ; (4) La promesse technologique et l'Internet des objets. Deux autres thèmes apparaissent vers la fin 2020, de manière très minoritaire : (5) Capitalisme numérique et risque de surveillance ; (6) 5G et consommation d'énergie. Une synthèse des articles, présentés par thématique, auteur et date de parution, est reportée ci-après⁶⁹.

2.2.7.1 Santé et risques

Dès les premiers articles, c'est la thématique de la santé qui est mise en avant par les auteurs. Elle est tout d'abord citée parmi les nombreux bénéfices attendus du déploiement de la 5G et prend rang au niveau de la promesse des nouveaux usages : « *The best doctors and surgeons could then perform diagnosis and even surgery remotely using connected, tactile technologies* » (Mischa Dohler, Professor of Wireless Communications, King's College London, 09/2014).

Les risques sanitaires liés aux ondes émises et à la multiplication des antennes-relais, quant à eux, sont évoqués une première fois en 2017 comme étant, en quelque sorte, une hypothèque à lever devant « la véritable révolution numérique » et ses promesses de relance économique et de nouveaux emplois, « si toutefois les conclusions vont bien dans le sens

⁶⁹ Leur présentation prend volontairement la forme de comptes-rendus de lecture pour éviter les risques de mésinterprétation voire de surinterprétation des propos des auteurs.

d'impacts réduits » (Hugues Poissonnier, Professeur d'économie et de management, Grenoble E.M., 04/2017).

Deux ans plus tard, en Australie, Sarah Loughran (Director of the *Australian Centre for Electromagnetic Bioeffects Research at University of Wollongong*, 08/2019) essaye de lever le doute avec un article au titre très explicite : « *There's no evidence 5G is going to harm our health, so let's stop worrying about it* ». Elle base sa thèse sur deux explications techniques, celle du mode de fonctionnement des très hautes fréquences – qui fait qu'elles sont pour la plupart absorbées par la peau au lieu de pénétrer dans le corps – et celle du type de rayonnement – non ionisant – qui caractérise toutes les générations de téléphonie mobile et qui n'endommage pas notre ADN comme peuvent le faire les rayonnements ionisants du soleil ou des rayons X. L'auteure fait aussi un point sur la recherche et la régulation, l'une n'ayant pas pu établir l'existence d'effets sur la santé liés à l'exposition produite par les téléphones mobiles, l'autre fournissant des limites de sécurité qui – d'après l'auteure – sont bien en deçà des niveaux connus pour causer des dommages. L'article conclut pointant la désinformation du public autour de la 5G et les préoccupations au sujet des nouvelles fréquences et de la multiplication des stations de base, préoccupations qui seraient non-fondées. Argumentant qu'il a été prouvé que la peur et l'anxiété peuvent être nuisibles à notre santé et à notre bien-être, l'auteur pose au final le défi, à la communauté scientifique, de contrecarrer la désinformation, considérée plus dangereuse que la technologie elle-même.

En janvier 2020, en Angleterre, c'est l'opposition politique de personnes craignant que cette technologie ne nuise à la santé humaine qui est mise en avant dans la concurrence entre les deux systèmes d'infrastructures qui supportent d'un côté la fibre et de l'autre la 5G, ceci pour les zones où il pourrait y avoir un choix à faire entre les deux solutions. Mohamad S. Hasan (*Senior lecturer in Computing, Staffordshire University*, 01/2020), considère qu'il pourrait être difficile de convaincre tout le monde de la non dangerosité de cette technologie, bien qu'il n'existe – il affirme – aucune preuve d'effets de la 5G sur la santé. D'après cet auteur, la méfiance du public à l'égard de cette technologie pourrait peser dans les arbitrages entre la fibre et la 5G, particulièrement dans les zones rurales où la 5G pourrait remplacer avantageusement la fibre en évitant le raccordement de toutes les habitations.

En France, Delia Arnaud-Cormos et Philippe Lévêque (respectivement Maître de conférences en bio-ingénierie, Université de Limoges et directeur de recherche en électronique au CNRS, 10/2020) alimentent la discussion sur 5G et santé avec un article visant à faire le point sur l'état des connaissances en matière d'expositions aux ondes électromagnétiques, article qui se veut lui-aussi rassurant, dans le même registre que celui de l'Australienne Sarah Loughran. Après avoir brièvement rappelé les impératifs à l'origine de l'évolution des réseaux de télécommunications, les auteurs décrivent les nouvelles fréquences qui seront exploitées par la 5G ainsi que les évolutions par rapport à la 4G pour en venir à l'exposition et aux interactions avec le corps humain. Ils détaillent l'effet thermique résultant de l'exposition aux ondes et les niveaux de référence qui ont été définis sur la base des recommandations de l'Icnirp. Ils notent la proximité de la bande de fréquences autour de 3,5 GHz avec celles utilisées pour la 4G, et le consensus des scientifiques – sans les citer – sur une absence d'effet sanitaire avéré. Rassurants sur ce point, ils considèrent que des questions subsistent vis à vis de l'exposition des enfants et des femmes enceintes, ainsi que des expositions chroniques. Plus loin, ils détaillent aussi les principales caractéristiques des futures gammes de fréquences (26 et 60 GHz) en soulignant l'attention avec laquelle sont regardés les risques potentiels sur la peau, les terminaisons nerveuses et la circulation sanguine associés à la plus faible pénétration des ondes.

2.2.7.2 Intox et complot, 5G-Covid19

Tim Hill, (*lecturer in marketing*, University of Bath, 04/2020) et ses deux co-auteurs (Robin Canniford, University of Melbourne et Stephen Murphy, University of Essex) s'intéressent quant à eux au nombre croissant de groupes qui, au Royaume-Uni, en Australie et aux États-Unis, estiment que la 5G est la véritable cause de la pandémie Covid-19, et qu'il est nécessaire de perturber le réseau 5G pour arrêter la propagation du virus. Ils donnent une explication de la popularité des théories du complot sur les bases d'un esprit contemporain de méfiance envers les gouvernements et les organisations de santé et d'une attirance particulière pour les explications alternatives en temps de crise. Mais, contrairement « aux cabales de l'ombre et aux forces occultes » qui supportent habituellement les théories conspirationnistes, ils observent que la conspiration du « 5G-coronavirus » peut se matérialiser par des actions de terrain du fait des caractéristiques du réseau 5G, composé d'infrastructures matérielles faciles à identifier et à atteindre. Ainsi, les actes de vandalisme contre les antennes et les pylônes téléphoniques représentent la possibilité d'exercer un certain contrôle sur des événements troublants. L'« infodémie » s'intensifie sous l'effet conjugué des médias sociaux, de la méfiance croissante envers les affirmations de la science et de figures populistes opposant une communauté éclairée de « gens du commun » à des élites corrompues. Face à cela, les auteurs placent le défi à relever au niveau des gouvernements et des médias dans le rétablissement de la confiance du public.

Destiny Tchéhouali (Professeur en communication internationale à l'UQAM, 06/2020), prolonge ce sujet et se positionne sur d'autres thèmes développés dans les théories conspirationnistes, comme le lien qui est fait entre l'épicentre de la pandémie de Covid-19 à Wuhan et les nombreuses tours 5G de la ville, alors que le réseau n'y serait pas entièrement déployé, ou encore d'autres théories qui prétendent que les ondes émises par l'infrastructure 5G affaibliraient notre système immunitaire. Après une description des nouveautés de l'infrastructure et de la promesse technologique, l'auteur s'interroge sur le coût social de ces nouveaux dispositifs ultra-connectés compte tenu des risques et de leurs effets potentiels et réels sur la santé humaine, alors que la 5G est en phase de pré-commercialisation au Canada où elle est considérée par certains comme « *The last beachfront property* ». Il prend acte des controverses qui entourent l'utilisation de la 5G, cristallisant les préoccupations de la société, qu'il attribue à « une peur irrationnelle générée par l'incertitude quant aux risques d'une technologie perçue comme envahissante ». À partir de ce cadre, il cherche une voie médiane entre « l'enthousiasme des technophiles » et « le scepticisme des technophobes ». Il recommande alors une troisième voie, qu'il qualifie de « rationnelle », pour une relation apaisée de la société à la technologie.

En juin 2020, la Rédaction de *The Conversation* a choisi de participer à la mise en lumière de « la théorie de la conspiration 5G » en sollicitant quatre universitaires, britanniques (Wasim Ahmed, *Lecturer in Digital Business* à Newcastle University ; Joseph Downing, Fellow à London School of Economics ; Peter Knight, *Professor of American Studies* à University of Manchester) et néerlandais (Marc Tuters, du Department of Media & Culture, University of Amsterdam), ayant déjà mené des recherches approfondies dans le domaine. Ceux-ci questionnent les origines, le développement et les mutations de cette théorie pour proposer des modes d'action susceptibles de contribuer à endiguer la vague de fausses nouvelles. Sur le plan historique, ils notent que les médecins ont parlé de « radiophobie » pour la première fois en 1903 et que, dans la lignée des craintes suscitées par les lignes électriques et les micro-ondes dans les années 70, les opposants à la 2G des années 90 laissaient entendre que les téléphones mobiles pouvaient provoquer des cancers et que cette information était

dissimulée. Concernant la théorie de la conspiration coronavirus-5G, ils distinguent une déclinaison « en plusieurs souches différentes, de degrés de vraisemblance variables ». L'une des premières versions de la théorie constatait la coïncidence entre l'expérimentation de la technologie 5G à Wuhan et l'origine géographique de la pandémie. Elle affirmait par la suite que la pandémie était une création délibérée pour garder les gens chez eux pendant que l'on déployait la 5G partout, et dans la continuité de ce récit, qu'elle affaiblissait le système immunitaire en rendant vulnérable à l'infection, ou encore, qu'elle transmettait directement le virus.

Ces auteurs notent que les récits sur la 5G et les théories de la conspiration COVID-19 se combinent souvent en « un cocktail toxique de désinformation » en citant la théorie selon laquelle la pandémie est un plan des élites mondiales (Bill Gates ou Georges Soros), en ligue avec les *Big Pharma* « visant à instituer des vaccinations planétaires obligatoires qui injecteraient des puces pour le contrôle des porteurs, et qui seraient activées par les ondes radio 5G ». Plus loin, ils expliquent la spécificité des théories du coronavirus-5G. Leur première particularité est de rassembler des personnes appartenant aussi bien à l'extrême droite qu'à la communauté des *antivax*, semblant créer des liens à travers le spectre politique. Par une analyse quantitative de *Twitter*, ils montrent aussi le rôle des influenceurs des médias sociaux qui s'efforcent de relier des communautés auparavant séparées et que les suiveurs, ceux qui croient aux théories du complot et les propagent, sont aujourd'hui représentatifs d'une partie de la société actuelle. Dans une analyse de plus de 10 000 *tweets* avec le #5Gcoronavirus hashtag, effectuée du 27 mars au 4 avril 2020, les quatre auteurs ont découvert un compte qui répandait la théorie de la conspiration avec plus de 300 *tweets* en 7 jours. Sur l'ensemble, plus d'1/3 des utilisateurs ont cru la théorie ou partagé des points de vue en sa faveur.

Jaron Harambam, *Postdoctoral Researcher in Sociology*, University of Leuven (06/2020), utilise la 5G comme cas d'étude pour approcher les théories conspirationnistes, et soutenir que pour comprendre ces théories il faudrait se concentrer sur la signification, la diversité et le contexte de chacune d'elle, ainsi que sur les personnes qui y souscrivent. Ceci permettrait d'après lui d'éviter de « stigmatiser collectivement certaines idées et personnes – et de les exclure prématurément du débat politique légitime ».

Michaël Jensen (*Senior Research Fellow, Institute for Governance and Policy Analysis*, University of Canberra, 07/2020), constate tout d'abord que la confiance des personnes dans la 5G a été ébranlée par une vaste campagne de désinformation, s'appuyant sur les craintes du public, diffusée sur internet et présentée comme des faits, et que celle-ci affecte les institutions et le gouvernement. Pour étayer sa thèse, il rend compte d'une recherche qu'il a menée en s'appuyant sur l'analyse de 530 *public submissions* (interrogations et commentaires de citoyens) adressés à une Commission parlementaire australienne sur le lancement de la 5G. Il soutient qu'une part importante de ces « soumissions » colportaient des allégations inexactes sur les effets de la 5G sur la santé, reprenant des termes tirés de sites web bien connus sur la théorie de la conspiration. Notamment, il explique avoir suivi le fil de deux sites conspirationnistes (CRG et Zéro Hedge) jusqu'aux groupes Facebook ciblant spécifiquement l'Australie, et avoir identifié 73 similitudes de formulation entre les articles publiés sur Facebook et les soumissions analysées. Il précise aussi que 50 % des discours des soumissions correspondait mot à mot à celui des contributions des groupes de conspiration extrême sur Facebook. À partir de cette recherche, il affirme que des groupes de conspiration cherchent à influencer sur la façon dont les australiens pensent la 5G, aidés en cela par les algorithmes de Facebook, les trolls et les robots en ligne. Il conclut cette partie en suggérant aux gouvernements d'être proactifs en matière de communication des informations techniques et scientifiques au public et en rappelant qu'une « sphère publique sans voix de confiance se

remplit rapidement de désinformation ». Il poursuit son développement en soutenant, à partir de l'étude des Antivax, que les gens peuvent se tromper mais qu'il ne faut pas pour autant les qualifier d'irrationnels, et que « *plutôt que de manquer de faits scientifiques, ils manquent de confiance dans les établissements qui produisent et diffusent la science* ».

Si les discussions sur la désinformation sont très souvent associées à celles sur les questions de santé, c'est moins le cas pour les autres thématiques, qui semblent plus relever du débat entre experts que de campagnes de désinformations relayées sur les réseaux sociaux.

2.2.7.3 Le cas Huawei (+ZTE) et les enjeux géopolitiques

Le débat autour de l'intégration des équipements télécom des entreprises chinoises Huawei et ZTE sur les réseaux 5G de différents pays a donné lieu à plusieurs articles dans la version anglophone de *The Conversation*.

Dès 2018, Sandeep Gopalan (Professor of Law at Deakin University, 06/2018) aborde la question des risques de sécurité liés à l'inclusion des équipementiers Huawei et ZTE dans l'infrastructure mobile 5G de l'Australie. En mentionnant les différentes inquiétudes suscitées par les deux entreprises chinoises et après avoir recensé nombre d'affaires, soupçons et accusations portés contre Huawei ou ZTE aux États-Unis et dans d'autres pays (Norvège, Mongolie, Algérie et Philippines), il soutient qu'au regard du passé « *il est difficile de justifier un écart par rapport à l'approche américaine* » et suggère que l'Australie s'aligne sur l'exemple américain dans ses relations avec les deux entreprises.

David Belgrave (Lecturer in Politics and Citizenship, Massey University, 02/2019) poursuit la discussion à partir du terrain de la Nouvelle-Zélande. Après la décision de l'État néo-zélandais de bloquer Huawei pour des raisons de sécurité, il questionne la situation de la Nouvelle-Zélande dans une région Asie-Pacifique en transition vers un système dans lequel les règles chinoises remplacent peu à peu celles des américains. Il met en balance des valeurs telles que la vie privée, la sécurité nationale ou la liberté d'expression avec le besoin de commercer avec la Chine, alors qu'elle représente une menace pour les valeurs qui importent aux néo-zélandais. Dès lors, s'interroge l'auteur, jusqu'où repousser les intérêts de Pékin, et sinon, combien les citoyens seront-ils prêts à payer pour une relation commerciale facile avec la Chine ?

Marina Yue Zhang (Associate Professor of Innovation and Entrepreneurship, Swinburne University of Technology, Melbourne, 06/ 2019) développe le sujet des enjeux économiques et géopolitiques de la 5G. Elle revient sur le conflit commercial entre les États-Unis et la Chine qui a mis un terme aux infrastructures 5G en provenance de Chine, aux États-Unis comme en Australie (août 2018). Elle décentre le sujet 5G du *smartphone* et de l'Internet rapide pour le particulier, pour le poser comme enjeu de la collaboration, de l'innovation et du commerce mondial. Dans cet espace, la Chine est résolue à prendre la tête en imposant ses spécifications techniques 5G au travers des marchés qu'elle conquiert, principalement en Europe, en Asie-Pacifique et au Moyen-Orient. Elle précise une des raisons du positionnement des États-Unis vis à vis de Huawei en remarquant que les fréquences de la bande moyenne (autour de 3,5 GHz), qui offrent une couverture plus large et nécessitent moins d'investissement en infrastructures, ont un accès limité pour la 5G commerciale aux États-Unis, la plupart de ces spectres étant destinés à la défense. Les États-Unis ont donc développé leur technologie 5G pour les spectres à bande haute (26 GHz), contrairement à la technologie 5G de Huawei qui a été développée pour la bande moyenne, l'essentiel du marché mondial. Les États-Unis poussant leurs alliés à exclure Huawei de leurs réseaux 5G, elle estime qu'il faudra dépenser plus d'argent et attendre plus longtemps pour avoir un système 5G

pleinement opérationnel. Elle considère que la croissance de la 5G devrait « *accélérer le développement d'un écosystème dans lequel différent pays peuvent coexister et se développer conjointement, soutenus par des réseaux de chaîne d'approvisionnement, interconnectés et interdépendants... mais cela risque d'échouer si les pays concernés construisent différemment leurs infrastructures 5G* ».

Christopher Findlay (Honorary Professor of Economics, Australian National University, 12/2019) lui emboîte le pas. Pour lui, le déploiement de la 5G est une des sources potentielles les plus importantes pour la croissance future de la productivité.

Poursuivant l'analyse, Greig Paul (Lead Mobile Networks & Security Engineer, University of Strathclyde, Glasgow, 01/2020) s'intéresse au compromis qui accorde à Huawei la possibilité d'équiper 35 % du réseau d'accès radio en Grande-Bretagne, tout en lui interdisant l'équipement du noyau, qui traite les aspects sensibles en matière de sécurité du réseau mobile. Pour lui, il ne fait aucun doute que les intérêts commerciaux des opérateurs de réseau sont potentiellement en contradiction avec les intérêts de sécurité du Royaume-Uni concernant Huawei.

Jamie Gaskarth (Senior Lecturer in Politics and International Relations, University of Birmingham, 02/2020) examine les conséquences de la décision du Royaume-Uni d'autoriser partiellement Huawei malgré l'opposition des États-Unis sur la collaboration des deux pays en matière de renseignements.

La française Christine Dugoin-Clément (analyste en géopolitique à l'IAE Paris Sorbonne et Saint Cyr Coëtquidan, 09/2020), regrette, quant à elle, que le débat se cristallise autour des problématiques environnementales en le privant de la lecture géopolitique du développement de la 5G, qui est également – selon elle – d'une grande importance. Pour elle, la 5G sera probablement une révolution technologique ouvrant sur la maîtrise, ou non, du monde de demain.

2.2.7.4 La promesse 5G, l'Internet des objets en question

En 2015, l'Australien Mark A. Gregory (Senior Lecturer in Electrical and Computer Engineering, RMIT University, 04/2015) n'attendait pas le déploiement du réseau 5G avant la fin de la décennie, mais il annonçait plutôt le déploiement de l'Internet des objets. Il s'attendait à voir, à l'approche de 2020, « *plus de 50 milliards d'appareils connectés dans le monde* » et que l'internet des objets ne soit plus « *une chose à laquelle nous pensons, mais sera présent tout autour de nous* ».

Un an plus tard, David Glance (Director of UWA Centre for Software Practice, University of Western Australia, 02/2016) affiche, quant à lui un certain scepticisme devant l'offensive *marketing* des sociétés comme Intel, Ericsson et Cisco qui avancent la capacité de la 5G à prendre en charge l'Internet des objets. Reprenant les estimations de Gartner et de Cisco, qui annonçaient respectivement 21 et 50 milliards d'objets connectés d'ici 2020, il note qu'avec « de telles estimations, on peut comprendre pourquoi les entreprises de télécommunications et les gouvernements voient l'importance des réseaux 5G ». De son point de vue, il y a de nombreux défis à traiter avant que cette technologie ne produise de réels avantages : « le principal défi à relever pour que les appareils de l'Internet des objets apportent réellement des avantages est le développement de logiciels qui interpréteront réellement les données produites par ces appareils et qui transformeront ces données en connaissances sur lesquelles on pourra agir ».

En 2020, Valérie Michaux (Enseignant-Chercheur HDR à la Neoma Business School, 09/2020), confirme cette perspective « sceptique ». D'après elle « La 5G représente une « potentialité » technologique... ce qui ne dit rien de ce qui peut se passer. Par exemple, en 2013 on prévoyait 50 milliards d'objets connectés en 2020, mais fin 2019, on avait seulement 7,6 milliards d'objets connectés, si on exclut les ordinateurs et les smartphones ». Elle explique que si on surestime la vitesse de diffusion des innovations à court terme, par des effets de mode, on sous-estime par contre les transformations induites au sein de la société à plus long terme. Dans cette perspective, elle prévoit l'apogée de la 5G plutôt pour 2035, sauf accélération inattendue, et estime que « le frein majeur au développement de la 5G sera sociétal ».

2.2.7.5 Capitalisme de surveillance

Yannick Chatelain (enseignant chercheur à Grenoble Ecole de Management, 09/2020) pointe le risque de surveillance sur la vie privée inhérent à la technologie 5G, surpuissante, qui s'accompagnera d'une augmentation du nombre d'appareils connectés et confiera nos données personnelles à un seul opérateur. Face à une économie dont le moteur serait le profit généré par l'orientation et la connaissance de nos préférences personnelles, l'auteur invite la France à se doter d'un plan directeur pour prévenir l'évolution vers une surveillance généralisée au service de quelques grandes entreprises : « un plan plaçant le citoyen au centre du processus de conception des innovations numériques afférentes permise par la 5G ».

2.2.7.6 5G et consommation d'énergie

Enfin, Alain Cappy (professeur émérite en électronique à l'Université de Lille, 11/2020), fait porter sa contribution sur les conséquences de l'introduction de la 5G sur la consommation d'énergie. Il rappelle tout d'abord qu'il faut nécessairement cumuler la consommation de la partie transmission des données avec celle de la partie traitement des données transmises pour avoir une vue intégrale, le traitement représentant à lui seul plus de 50 % de la consommation d'énergie. À ce propos, il pointe les processeurs qui effectuent le traitement, « nous ne pouvons pas nous attendre à une amélioration sensible dans les années futures de la rapidité de calcul ou de la consommation d'énergie ». Selon l'auteur, cela s'applique à tous les processeurs, le problème étant leur très mauvaise efficacité énergétique : « un processeur est avant tout un radiateur électrique ». À partir de deux exemples, dont celui de la voiture autonome, qui serait « boostée » par la 5G, il dévoile la puissance de calcul considérable qui est nécessaire à cette autonomie et la part significative d'énergie prise à la batterie pour traiter l'information. Il met alors en regard le traitement gratuit de cette information lorsque le véhicule est conduit par un humain, pour affirmer que « *favoriser une technologie énergivore comme celle des véhicules autonomes à grande échelle constitue donc un non-sens écologique* ». Il conclut en dénonçant la confusion faite entre « intelligence » et « puissance de calcul » et propose d'ajouter la contrainte d'une utilisation limitée de ressources matérielles et énergétique lors de tous processus d'innovation : « *encourager l'innovation frugale et parcimonieuse* ».

2.2.7.7 La 5G, entre discussion de la promesse et mise en problème

Deux pôles de discussion se dégagent de l'ensemble des articles examinés. Le premier, depuis 2014, est organisé autour de la transition numérique de la société, qui poursuivrait son cours dans une nouvelle phase, avec le déploiement du système technologique 5G et la

nécessité de mettre en place son système technique et normatif. À l'image de l'écosystème 5G en construction, les articles donnent à voir un ensemble de contributions, de positionnements ou de questionnements portant sur la promesse technologique (et ses applications, dont l'Internet des objets), les questions techniques à résoudre (sécurité des réseaux), et les aspects économiques ou géopolitiques.

À partir de 2017, une deuxième discussion est lancée, cette fois-ci autour du « frein sociétal », principalement représenté par la problématique des ondes électromagnétiques et de la crainte de leurs effets sur la santé. Cette question de la crainte est discutée dans les articles du corpus plus que celle des risques. Parfois, cette crainte est considérée comme plus dangereuse que les ondes elles-mêmes et, dans la plupart des cas, les auteurs se positionnent sur l'absence d'effets sanitaires avérés, prenant appui sur des études existantes. Ces études ne sont pas citées. Il est à noter que seulement deux articles portent sur l'évaluation du risque et sont rédigés par des spécialistes de l'exposition aux champs électromagnétiques⁷⁰.

Dès avril 2020, dans le contexte de pandémie Covid-19, le débat bifurque sur la prolifération des théories conspirationnistes, notamment celles sur la relation « 5G-Covid19 », attribuées à la fois au manque d'information et à l'inquiétude des publics. Si la plupart des articles traitant de ce sujet se focalisent sur la déconstruction des fausses informations, notamment autour de « 5G-Covid19 », une minorité invitent à prendre au sérieux le phénomène et à l'appréhender à partir de sa dynamique de construction pour le comprendre. Ce débat sur « Intox et complot » est surtout présent dans la partie anglophone du corpus (seul un article du sous-corpus francophone s'intéresse à la question).

Du côté de la communauté francophone, la discussion sur les « freins sociétaux » est plus diversifiée. Elle s'élabore progressivement, en greffant sur la question des risques sanitaires celles des risques pour la vie privée (capitalisme de surveillance) et des risques pour l'environnement (augmentation des consommations énergétiques). Les articles publiés dans la version francophone de *The Conversation* se distribuent à part égale entre la couverture des aspects *business* de la 5G et sa mise en problème. La discussion sur les questions de santé, de surveillance et de crise énergétique ne s'arrête pas au cadre spécifique de la 5G. Elle déborde parfois sur la mise en question d'un modèle de développement, renforcé par le système 5G, qui exposerait tout un chacun à divers risques au nom de la croissance, en l'absence de réels lieux de contrôle et d'arbitrage démocratique de cette dynamique.

2.2.8 Conclusion

2.2.8.1 Une controverse sociotechnique pas comme les autres

La 5G n'est pas *une* technologie comme les autres. C'est un assemblage d'évolutions techniques (antennes, supports, modes de transmission des données, ..., bandes de fréquence) et d'évolutions d'usages qui prêtent à la controverse. Ces différentes propriétés sont en effet présentées dans les discours des promoteurs comme autant d'avancées sur le plan technique, économique et sociétal, alors qu'elles se chargent de nouvelles significations lorsqu'elles investissent la scène publique. Ici, elles prennent place dans les débats comme autant de sources de préoccupation sur le plan sanitaire, environnemental, social et politique.

⁷⁰ L'article de Sarah Loughran, du Centre australien pour la recherche sur les bio-effets électromagnétiques - Université de Wollongong, et l'article des français Delia Arnaud-Cormos et Philippe Lévêque, respectivement Maître de conférences en bio-ingénierie à l'Université de Limoges et directeur de recherche en électronique au CNRS.

La 5G fait peur et suscite contre elle une mobilisation inédite. L'absence de littérature scientifique sur le sujet, du fait du peu de recul sur une situation récente et évolutive, a introduit la nécessité de s'appuyer sur l'étude de corpus médiatiques (presse, réseaux sociaux, vulgarisation scientifique) pour en rendre compte.

L'analyse de ces corpus montre tout d'abord le caractère pluridimensionnel de la contestation publique de ce nouveau complexe technologique que représente la 5G. Trois dimensions sont visées par la critique : (1) le système technique lui-même dont les propriétés intrinsèques (l'infrastructure, ses composants et ses externalités) font l'objet de controverse en tant que sources de risques éventuels – sanitaires, environnementaux et sécuritaires ; (2) le processus de prise de décision, avec la dénonciation d'un déploiement lancé en l'absence de consultation citoyenne et sans attendre les résultats de l'évaluation experte des risques ; (3) la dimension sociétale du programme de déploiement, vis-à-vis de laquelle les opposants manifestent leur scepticisme, aussi bien sur le plan des usages que de l'efficacité énergétique, notamment en relation avec l'évolution des usages eux-mêmes.

L'analyse fait aussi ressortir quelques spécificités majeures de cette controverse sociotechnique. Si la controverse sur la 5G s'inscrit dans la méta-controverse sur les ondes ou champs électromagnétiques, dont elle représente une ultérieure étape après celles des antennes-relais « pré-5G », du Wi-Fi et des compteurs Linky, elle s'en écarte néanmoins par l'irruption de la question écologique. Celle-ci est centrée sur deux problématiques, celle de la consommation d'énergie – qu'on associe à la fois à la transmission et au traitement des données – et celle du remplacement des terminaux et des infrastructures obsolètes, avec la conséquente exploitation de ressources naturelles et la production de déchets, préjudiciables pour l'environnement. Cette question, qui est portée à l'unanimité par l'ensemble des acteurs de la critique, est aussi discutée dans différentes arènes (médiatique, politique, scientifique).

Une deuxième spécificité de cette controverse est donnée par son caractère éminemment public. Celui-ci est soutenu à la fois par la couverture médiatique du sujet « 5G et risques » – qui prend de l'ampleur en peu de temps (de 837 articles de presse en 2019 à 2 400 en 2020) après une période de latence (l'année 2018) – mais aussi par des formes de mobilisation collective qui se développent particulièrement dans l'espace public numérique, et par des prises de position politique importantes.

Enfin, l'analyse des médias donne aussi à voir la dimension politique de cette controverse. À la question des risques pour la santé et pour l'environnement, dont on en demande l'évaluation dans le cadre d'expertises indépendantes, la contestation y associe celle de la possibilité de choisir – ou de refuser – le déploiement de la technologie en question. Débat public, moratoires, décisions de conseils municipaux sont en effet très largement discutés, dans les médias, en lien avec les thèmes du risque et de l'impact sanitaire et écologique de la 5G.

Cette question du libre choix ne peut par ailleurs être réduite au seul déploiement de la 5G en tant que technologie spécifique ni aux seuls risques sanitaires et environnementaux, dans la mesure où cette technologie est souvent présentée – autant par ses défenseurs que par ses opposants – comme une étape vers un programme plus vaste de numérisation généralisée de la société. Avec la technologie 5G c'est un type de société qui est en cause, la société du tout numérique et du tout connecté, avec ses implications en matière de saturation des espaces de vie par un cumul d'expositions aux champs électromagnétiques, de consommations énergétiques accrues par la multiplication des usages, mais aussi de surveillance généralisée. La source de la conflictualité en matière de 5G tient donc très probablement au fait que de

nombreux publics ont le sentiment de se voir imposer tous ces changements sans possibilité de choix ou de participation à leur construction.

2.2.8.2 Les nœuds de l'évaluation informelle de la problématique sanitaire de la 5G

La 5G n'en est qu'à ses débuts, mais elle suscite de grandes craintes pour la santé. L'analyse de différents corpus médiatiques, interrogés spécifiquement sur le cadrage sanitaire de la question de la 5G, laisse apparaître une variété de préoccupations et d'interrogations formulées à son égard et, plus particulièrement, à l'égard des « ondes 5G ».

Ces préoccupations et interrogations s'imposent comme les nœuds d'une évaluation *informelle*, voire profane, de la technologie sur le plan de ses aspects sanitaires. Dès lors, elles sont présentées ici, pour conclure cette section sur la controverse, comme autant de questions adressées par la société civile à l'expertise scientifique. La liste ci-dessous réunit les plus fréquentes :

- Qu'impliquent les nouvelles antennes pour l'exposition des personnes ?
- La population sera-t-elle exposée à un rayonnement plus intense avec les téléphones mobiles 5G ?
- C'est quoi les ondes millimétriques ? Sont-elles risquées pour la santé ?
- Quid de la superposition/accumulation de radiofréquences ?
- Pourquoi les limites d'exposition sont-elles différentes entre pays ?
- Ne faudrait-il pas réviser les normes sur les valeurs limites ?
- Est-ce que l'exposition aux champs électromagnétiques diminue les défenses immunitaires ?
- Quels sont les effets de l'exposition des enfants et des femmes enceintes à la 5G ?
- Quid de l'exposition chronique ?
- Les études sur les risques : où sont les preuves ?
- Pourquoi n'y a-t-il pas d'études sur les nouvelles ondes ? Quelles devraient être les conditions de production de ces études ?
- Pourquoi n'y-a-t-il pas de consensus scientifique sur le danger des ondes électromagnétiques ?

3 Positions institutionnelles internationales concernant les effets sanitaires de la 5G

Le développement de la 5G a suscité des inquiétudes sur les effets sanitaires qui pourraient accompagner cette nouvelle génération de technologie de communication, à travers la publication d'un grand nombre de commentaires et/ou de prises de position, mais dont bien peu émanent d'agences sanitaires ou de groupes d'experts. Plusieurs pays ont cependant publié les positions de leurs entités administratives ou sanitaires sur les possibles effets sanitaires du déploiement de la 5G. Parmi ces pays, comme le remarque un récent rapport d'un groupe d'experts du Conseil général de l'environnement et du développement durable, de l'Inspection générale des affaires sociales, de l'Inspection générale des finances et du Conseil général de l'économie⁷¹, certains s'appuient sur les conclusions d'experts ou de groupes de travail nationaux (la Suède, l'Australie, l'Espagne, les États-Unis, les Pays-Bas ou encore la Suisse), alors que d'autres se basent sur les conclusions d'agences internationales ou de celles d'autres pays.

Certaines de ces positions sont indiquées ci-après et leurs conclusions résumées brièvement.

3.1 Instances internationales

L'Organisation mondiale de la santé (OMS - Division *Western Pacific*), a publié sur son site internet en février 2020, une courte question/réponse consacrée aux effets sanitaires de la 5G⁷². L'OMS y déclare notamment : « à ce jour, et après de nombreuses recherches réalisées, aucun effet néfaste sur la santé n'a été lié de manière causale à l'exposition aux technologies sans fil. Les conclusions liées à la santé sont tirées d'études réalisées sur l'ensemble du spectre radioélectrique, mais, jusqu'à présent, seules quelques études ont été menées aux fréquences qui seront utilisées par la 5G ». L'OMS ajoute que le principal mécanisme d'interaction entre les champs électromagnétiques et le corps humain est un effet thermique, et que, lorsque la fréquence augmente, la pénétration dans les tissus est moindre, l'absorption d'énergie étant confinée à la surface du corps (peau et œil), mais qu'on n'attend aucune conséquence sanitaire si l'exposition reste en dessous des valeurs limites internationales (voir la partie 4.1 de ce rapport).

La Commission européenne (CE) « n'a pas encore réalisé d'étude sur les risques potentiels pour la santé de la technologie 5G ». À la question du parlement européen quant à l'innocuité de cette technologie, la CE a répondu le 7 décembre 2018 que « Les preuves scientifiques actuelles n'ont pas permis d'associer l'exposition aux champs électromagnétiques (CEM) en dessous des limites recommandées par la recommandation du Conseil n° 1999/519/EC3 avec des effets néfastes sur la santé. ». Cependant, la CE « convient qu'il est nécessaire d'actualiser constamment les connaissances scientifiques ».⁷³

⁷¹Déploiement de la 5G en France et dans le monde : aspects techniques et sanitaires. Septembre 2020. <https://www.igas.gouv.fr/spip.php?article794>.

⁷²<https://www.who.int/westernpacific/news/q-a-detail/radiation-5g-mobile-networks-and-health>.

⁷³https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-8-2018-005128-ASW_EN.pdf.

La nécessité d'approfondir les recherches sur « *les potentiels effets biologiques négatifs des champs électromagnétiques (CEM) et de la 5G* » est citée dans un document (*briefing*) intitulé « Les effets de la communication sans fil 5G sur la santé humaine », disponible en français sur le site du parlement européen.⁷⁴ Il s'agit d'une synthèse rédigée par une collaboratrice du service de recherche du parlement européen pour faciliter le travail des députés européens. Le document présente pêle-mêle les avantages et inconvénients de la 5G et met en avant plusieurs synthèses et études qui suggèrent des effets biologiques et sanitaires néfastes en lien avec la 5G. Le document rappelle les résolutions du parlement et du Conseil de l'Europe attirant l'attention sur les dangers potentiels et demandant de réévaluer les valeurs limites d'exposition. Les études sont référencées et certaines sont accessibles par des liens hypertexte. La qualité de ces études n'est pas décrite, de même que la méthode de la recherche documentaire et de son analyse et l'évaluation critique, le document étant destiné à l'usage interne d'information des parlementaires. Contrairement à d'autres rapports nationaux, le document présente les différences entre la technologie 5G et les technologies précédentes et précise notamment que « *les dispositions actuelles de l'Union européenne sur l'exposition aux signaux radio, figurant dans la recommandation du Conseil relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz), ont été énoncées il y a 20 ans et ne prennent donc pas en considération les caractéristiques techniques spécifiques de la 5G* ». Il insiste par ailleurs sur le problème de sécurité que posent les réseaux sans-fil notamment en comparaison avec la transmission filaire et la fibre optique plus particulièrement.

Enfin, ce document cite la résolution 1815 (2011) du Conseil de l'Europe⁷⁵ qui : « ... *insiste sur l'importance cruciale de l'indépendance et de la crédibilité des expertises scientifiques effectuées pour assurer une évaluation transparente et objective des éventuels effets nocifs sur l'environnement et la santé humaine.* » et recommande « *de prendre toutes les mesures raisonnables pour réduire l'exposition aux CEM (notamment émises par les téléphones portables), et de protéger tout particulièrement les enfants et les jeunes pour qui les risques de tumeurs de la tête semblent les plus élevés; revoir les fondements scientifiques des normes actuelles d'exposition aux champs électromagnétiques fixées par la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants, qui présentent de graves faiblesses; diffuser des campagnes d'information et de sensibilisation aux risques d'effets biologiques potentiellement nocifs à long terme pour l'environnement et la santé humaine, en particulier à destination des enfants, des adolescents et des jeunes en âge de procréer; privilégier des systèmes d'accès à l'internet par connexion filaire (pour les enfants en général, et plus particulièrement dans les écoles et salles de classe) et réglementer de façon stricte l'utilisation du portable par les élèves dans l'enceinte de l'école; augmenter le financement public de la recherche indépendante, pour évaluer les risques sanitaires.* ».

⁷⁴https://www.europarl.europa.eu/thinktank/fr/document.html?reference=EPRS_BRI%282020%29646172

⁷⁵<http://assembly.coe.int/nw/xml/XRef/Xref-XML2HTML-FR.asp?fileid=17994&lang=FR>

3.2 Instances nationales étrangères

3.2.1 États Unis

La *Food and Drug Administration (FDA)* consacre une page de son site internet à la sécurité des téléphones mobiles⁷⁶. Rappelant que la limite actuelle d'absorption d'énergie fixée par la Commission fédérale des communications (FCC) reste acceptable pour la protection de la santé publique, et se basant sur une revue de la littérature scientifique 2008-2018 (effectuée par ses propres spécialistes et revue par des experts extérieurs)⁷⁷, la FDA déclare notamment : « il n'y a pas à ce jour de preuve scientifique solide ou crédible de problèmes de santé causés par l'exposition à l'énergie radiofréquence émise par les téléphones mobiles ». S'agissant spécifiquement de la 5G, la position de la FDA est qu'il n'y a pas de nouvelles conséquences avec la 5G : « bien que de nombreuses spécificités de la 5G restent mal définies, on sait que les téléphones mobiles 5G utiliseront des fréquences couvertes par les directives d'exposition actuelles de la FCC (300 kHz-100 GHz), et les conclusions tirées sur la base du corpus actuel de preuves scientifiques couvrent ces fréquences ».

Le *US Government accountability Office (GAO)*, a produit un rapport sur la 5G⁷⁸, commandité par des membres du Sénat et de la Chambre des Représentants. Pour cela, le personnel du GAO a procédé à de très nombreuses auditions de parties prenantes et d'institutions scientifiques et sanitaires et a organisé une réunion de 17 experts. Le rapport traite essentiellement des opportunités, des défis, de la sécurité des réseaux, de la protection de la vie privée et des politiques à mettre en œuvre pour le déploiement et l'utilisation des réseaux 5G. Il comporte toutefois un chapitre consacré à l'inquiétude sur les effets sanitaires possibles de l'exposition aux radiofréquences émises par la 5G. « Le déploiement de la technologie 5G, incluant les nombreuses antennes nécessaires pour transmettre et recevoir les fréquences hautes, peut exacerber les craintes du public que l'exposition à l'énergie des radiofréquences puisse être cause de cancers ou mettre en danger la santé humaine, bien qu'il n'y ait que des preuves limitées pour soutenir ces inquiétudes ». S'appuyant sur les analyses et positions d'organismes américains (FCC, FDA, NCI) pour avancer qu'« il n'y a actuellement aucune preuve solide de risque sanitaire relié à l'exposition aux radiofréquences 5G chez l'homme », le rapport insiste sur la nécessité de répondre aux inquiétudes du public sur la possibilité d'effets sanitaires à long terme encore inconnus du fait que la technologie est encore très récente. Le chapitre pointe notamment les hautes fréquences de la 5G, les antennes actives, les effets sur des populations vulnérables et les effets autres que cancérogènes. En conclusion de ce chapitre, le rapport suggère comme pistes de recherche la mesure des expositions radiofréquences des populations, et la réalisation régulière de synthèses des recherches pour les décideurs et le public.

La *Chambre des Représentants de l'Etat du New Hampshire* a mis en place, pour étudier les effets environnementaux et sanitaires de l'évolution de la technologie 5G, une Commission⁷⁹ de treize membres : 3 représentants, 2 sénateurs, 3 membres des administrations de l'État (Procureur général, Affaires économiques, Santé), 2 universitaires, 2 représentants des

⁷⁶<https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/cell-phones/scientific-evidence-cell-phone-safety>

⁷⁷ <https://www.fda.gov/media/135043/download>.

⁷⁸ *5G Wireless: Capabilities and Challenges for an Evolving Network*. GAO-21-26SP: Published: Nov 24, 2020. Publicly Released: Nov 24, 2020. <https://www.gao.gov/products/GAO-21-26SP>.

⁷⁹ www.gencourt.state.nh.us/statstudcomm/committees/1474/reports/5G%20final%20report.pdf.

industries de télécommunication et 1 citoyen, avec des compétences en physique, ingénierie électromagnétique, épidémiologie, biostatistique, santé au travail, toxicologie, médecine, politique de santé publique, commerce et droit. La Commission avait pour mandat de répondre à 8 questions. Elle s'est réunie entre septembre 2019 et octobre 2020, n'a pas évalué elle-même des publications scientifiques, mais a auditionné dix experts scientifiques en physique, épidémiologie, toxicologie et politiques publiques qui ont contribué à une sélection de références bibliographiques. « Tous, à l'exception du représentant de l'industrie des télécommunications, ont reconnu le grand nombre de recherches « *peer-reviewed* » qui montrent que le type de rayonnement RF généré par les dispositifs sans fil peuvent avoir un effet délétère sur les humains et en particulier les enfants, aussi bien que sur les animaux, les insectes et la végétation ». Le rapport de la majorité de la Commission ne se limite pas à la 5G mais envisage l'ensemble des radiofréquences de téléphonie mobile et est en défaveur d'un déploiement massif de la 5G dans l'État du New Hampshire. Le rapport est en lui-même très bref, limité à une synthèse et à 15 recommandations, dont la révision des limites d'exposition, la réalisation d'études objectives et sans conflit d'intérêt, la surveillance des expositions, la protection des populations vulnérables (enfants, femmes enceintes), l'implantation de panneaux de signalisation de l'exposition. Il est complété par de volumineuses annexes, dont les transcriptions des séances et des auditions de la Commission. Trois membres de la Commission (un sénateur et deux membres de l'industrie) considérant que la Commission avait « négligé son mandat d'étudier les avantages et les risques associés à la technologie 5G », que « l'ensemble de la littérature scientifique sur la technologie sans fil avait été ignoré » et que « les Recommandations n'étaient pas basées sur des faits scientifiques et étaient irresponsables » ont rédigé un rapport minoritaire qui déclare notamment que « de nombreuses analyses indépendantes d'études « *peer-reviewed* » par des organisations nationales et internationales concluent qu'il n'y a pas de risques sanitaires connus des énergies RF émises par les appareils sans fil et les infrastructures pour les humains ».

3.2.2 Australie et Nouvelle Zélande

L'Agence Australienne de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Arpansa) a posté sur son site internet, en mars 2019, une brève communication⁸⁰ indiquant notamment : « La norme de sécurité de l'Agence australienne de radioprotection et de sûreté nucléaire (ARPANSA) fixe des limites d'exposition aux champs électromagnétiques-radiofréquences (CEM-RF). Ces limites sont fixées bien en deçà des niveaux susceptibles de présenter un risque pour la santé des personnes. Les fréquences de fonctionnement du réseau 5G sont comprises dans les limites fixées par la norme de sécurité de l'ARPANSA. L'infrastructure et les appareils 5G émettant des CEM-RF sont réglementés par l'Autorité australienne des communications et des médias (ACMA), et les émissions doivent respecter les limites définies par la norme de sécurité de l'ARPANSA ». Et : « À des niveaux d'exposition en dessous des limites fixées par l'ARPANSA et des organisations internationales comme l'OMS et l'Icnirp [cf. partie 4.1 du rapport] évaluent qu'il n'y a pas de preuves scientifiques établies d'effets délétères pour la santé de très faibles expositions CEM-RF des populations ou des individus ».

⁸⁰ <https://www.arpansa.gov.au/news/5g-new-generation-mobile-phone-network-and-health>

Le ministère de la Santé de Nouvelle Zélande a publié sur son site internet plusieurs documents⁸¹, et notamment un document « 5G et Santé » (janvier 2021) faisant état de mesures effectuées récemment en Nouvelle Zélande et tendant à montrer que les expositions aux signaux 5G sont semblables ou inférieures à celles des sites existants. Ce document renvoie en outre à des positions d'organismes internationaux pour conclure que la recherche n'a pas démontré d'effets sanitaires en dessous des limites [d'exposition] du type utilisé en Nouvelle Zélande.

3.2.3 Europe

3.2.3.1 Allemagne

L'office fédéral de protection contre les rayonnements (*Bundesamt für Strahlenschutz*, Bfs) recommande sur son site internet (très succinct) une expansion prudente de la 5G⁸². Le Bfs note que « dans un premier temps, les fréquences utilisées pour la norme de communication mobile 5G seront celles que nous utilisons déjà aujourd'hui pour les communications mobiles. L'effet du rayonnement électromagnétique des communications radioélectriques mobiles sur les humains a été bien étudié. En dessous des valeurs limites, aucun effet sur la santé n'a été prouvé. Les valeurs limites sont respectées ». Le Bfs ajoute que dans quelques années, la 5G utilisera des fréquences plus hautes dont les effets n'ont pas encore été bien étudiés, conseille un développement prudent et étudiera les effets des nouvelles bandes de fréquences. Le Bfs note encore que le développement de la 5G aura probablement pour résultat plus d'antennes avec une moindre puissance de transmission et indique qu'il faudra étudier si l'exposition des humains aux rayonnements augmente au cours des différentes étapes de développement de la 5G.

3.2.3.2 Espagne

Le Comité *Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud* (CCARS)⁸³ ne présente pas de revue des études sur les effets sanitaires de la 5G, mais renvoie à la base de données EMF Portal (www.emf-portal.org) (705 références dont 263 en anglais sur le sujet) et conclut : « Pouvons-nous être tranquilles ? Oui, en fonction des preuves scientifiques disponibles. On peut s'attendre à ce que les niveaux d'exposition prévisibles ne changent pas de manière significative et, dans tous les cas, ne dépassent pas les limites maximales autorisées qui garantissent la santé publique en ce qui concerne les émissions électromagnétiques » (cf. § 6.2.4 pour complément).

3.2.3.3 Italie

Un document du Centre national de radioprotection et de physique computationnelle de l'Institut supérieur de santé (Rome) évoque brièvement les risques possibles de la 5G pour la santé⁸⁴. Ce document note « Non seulement les niveaux d'exposition de la population seront bien inférieurs aux seuils d'effets thermiques à court terme, mais la « prolifération d'antennes »

⁸¹<https://www.health.govt.nz/your-health/healthy-living/environmental-health/radiation-environment/cellsites-and-5g>

⁸²<https://www.bfs.de/SharedDocs/Stellungnahmen/BfS/EN/2019/0320-5G.html>

⁸³<http://ccars.org.es/attachments/article/229/5G%20y%20Salud.pdf>

⁸⁴https://www.iss.it/documents/20126/2265547/5G_e_rischi_per_la_salute.pdf/d50f25e6-25e4-48c8-b8c3-7da28cc57827?t=1575725274470.

redoutée ne devrait pas conduire à des augmentations généralisées des expositions en raison de la taille des *petites cellules* qui impliqueront des puissances d'émission inférieures à celles utilisées par les *macrocellules* » et conclut : « les données disponibles ne suggèrent pas de problème particulier pour la santé de la population liés à l'introduction de la 5G. Cependant, il est important que l'introduction de cette technologie s'accompagne d'une surveillance attentive des niveaux d'exposition (comme d'ailleurs c'est déjà en cours pour les technologies de téléphonie mobile actuelles) et que la recherche se poursuive sur les effets possibles à long terme ».

3.2.3.4 Pays Bas

Le Conseil de Santé des Pays Bas a publié en septembre 2020 un rapport « 5G et Santé », à la demande du Parlement⁸⁵. Dans ce rapport, les experts font le constat que les effets de la 5G sur la santé n'ont pas encore été complètement étudiés, mais notent que la 5G utilisera dans une certaine mesure des fréquences déjà utilisées dans les télécommunications mobiles 3G et 4G et dont les effets ont déjà été évalués. Le comité d'experts se déclare dans l'incapacité de dire si l'exposition aux fréquences 5G cause réellement un risque pour la santé humaine. Les experts ont réévalué leurs conclusions antérieures sur les relations entre l'exposition aux radiofréquences et la survenue d'effets sur des processus biologiques ou des maladies telles que les cancers, la réduction de fertilité des mâles, les problèmes de grossesse et de malformations néonatales, et concluent qu'il n'y a pas de risque avéré ni même probable mais qu'il n'est pas possible d'exclure une relation avec l'exposition aux radiofréquences (la seule exception étant que les experts considèrent comme probable l'effet des radiofréquences sur l'activité électrique du cerveau) (cf. § 6.2.3 pour plus de détails sur les articles analysés et les conclusions). Finalement, les experts recommandent au Parlement de déployer la 5G avec les bandes de fréquences les plus basses (3,5 GHz) qui ont déjà été utilisées depuis des années pour des applications de télécommunication et le Wi-Fi sans avoir d'effets nocifs avérés sur la santé, de suivre l'exposition des populations avec l'introduction de la 5G, et d'attendre avant de déployer la 5G avec les fréquences plus élevées (bandes 26 GHz et supérieures).

3.2.3.5 Royaume Uni

Public Health England (PHE) consacre une page (très succincte) de son site Internet aux technologies 5G, radiofréquences et santé⁸⁶. À propos des plus hautes fréquences prévues pour la 5G, PHE note que ces fréquences ne sont pas nouvelles et ont été utilisées depuis des années pour différentes transmissions, et que le principal changement réside dans le fait que ces ondes radio pénètrent moins dans les tissus et qu'un éventuel échauffement serait confiné aux surfaces corporelles. En résumé, PHE indique qu'« il est possible qu'il y ait une

⁸⁵<https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2020/09/02/5g-and-health>

⁸⁶<https://www.gov.uk/government/publications/5g-technologies-radio-waves-and-health/5g-technologiesradio-waves-and-health>

<https://www.gov.uk/government/publications/5g-technologies-radio-waves-and-health/5g-technologiesradio-waves-and-health>

<https://www.gov.uk/government/publications/5g-technologies-radio-waves-and-health/5g-technologiesradio-waves-and-health>

<https://www.gov.uk/government/publications/5g-technologies-radio-waves-and-health/5g-technologiesradio-waves-and-health>

légère augmentation de l'exposition globale aux ondes radio lorsque la 5G est ajoutée à un réseau existant ou dans une nouvelle zone. Cependant, l'exposition globale devrait rester faible par rapport aux lignes directrices et, à ce titre, il ne devrait y avoir aucune conséquence négative pour la santé publique ».

3.2.3.6 Suède

L'Autorité Suédoise de Sûreté des Radiations (SSM) a publié en 2020 sur son site internet le 14^e rapport de son Conseil scientifique sur les champs électromagnétiques⁸⁷, qui couvre l'ensemble des champs électromagnétiques (statiques, basses fréquences, hautes fréquences). Ce rapport, rédigé par un groupe d'experts internationaux conclut que : « aucune relation causale établie entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les risques pour la santé n'a été identifiée » (cf. § 6.2.2 pour plus de détails sur l'analyse des articles et les conclusions). S'agissant plus spécifiquement de la 5G, l'Autorité mentionne que « même s'il n'y a pas de mécanisme établi pour que la santé soit affectée par une faible exposition aux radiofréquences, il y a besoin de plus de recherche couvrant les nouveaux domaines de fréquences utilisés pour la 5G. L'Autorité encourage aussi les chercheurs à entreprendre des études épidémiologiques de cohorte dans ce domaine ».

3.2.3.7 Suisse

Le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) a mis en place un groupe de travail pluridisciplinaire qui a produit en novembre 2019 un Rapport « Téléphonie mobile et rayonnement »⁸⁸. Il est à noter que le mandat de ce groupe de travail était de « rédiger un rapport présentant des recommandations quant aux étapes futures de la téléphonie mobile, à court et à long terme, en tenant compte des intérêts de protection et d'utilisation[...] (et) d'examiner si les VLI (valeurs limites d'immission) et les VLIInst (valeurs limites d'installations) préventives applicables aux antennes de téléphonie mobile en vigueur respectent encore, en cas de développement de celle-ci, les critères relatifs au principe de précaution ou si des adaptations sont nécessaires. Il n'avait toutefois pas pour tâche de se prononcer sur le déploiement de la 5G en Suisse ou de réaliser des études sur les effets du rayonnement de la téléphonie mobile sur la santé ». « Le recensement des connaissances concernant les effets du rayonnement de téléphonie mobile sur la santé s'appuie sur le rapport Hug *et al.*, (2014), élaboré pour le rapport sur les réseaux de téléphonie mobile adaptés aux exigences futures publié par le Conseil fédéral [...]. Ce rapport a été complété par de nouvelles études sélectionnées dans la newsletter du groupe consultatif d'experts en matière de rayonnements non ionisants (Berenis) [1 757 publications parues entre le 1^{er} janvier 2014 et fin novembre 2018, dont 189 ont fait l'objet d'un examen détaillé et 83 ont été résumées et évaluées dans une newsletter]. D'autres rapports d'évaluation internationaux publiés depuis 2014 ont également été pris en considération ».

Le groupe a noté que « seules quelques rares études ont été menées sur les effets aigus de la technologie 5G sur les cellules et les animaux. L'évaluation des risques réalisée par le groupe de travail s'est donc fondée sur des études menées sur les technologies 2G, 3G et 4G et a porté sur des fréquences dans la même gamme que celles utilisées pour la 5G ».

Le groupe de travail a actualisé les connaissances à la lumière des publications parues depuis le rapport Hug (à l'exception des données de biologie cellulaire) et a constaté que « jusqu'à

⁸⁷ <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/radiation-protection/2020/202004/>

⁸⁸ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/bericht-mobilfunk-undstrahlung.pdf.download.pdf/Rapport_TelephonieMobile-Rayonnement.pdf

présent, aucun effet sanitaire n'a été prouvé de manière solide en dessous des VLI fixées dans l'ORNI [ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant] pour les fréquences de téléphonie mobile utilisées actuellement » (cf. § 6.2.4 pour compléments).

Enfin, notant que « les effets sur la santé ne peuvent jamais être exclus sur le plan scientifique avec une certitude absolue », le groupe de travail a décrit quels effets potentiels nécessitent de plus amples recherches (par ex. effets des ondes « millimétriques » spécifiquement utilisées par la 5G, effet de la modulation du signal, électrohypersensibilité, étude approfondie de la sensibilité des cellules de Schwann aux radiations non ionisantes de haute fréquence...).

3.2.4 Conclusion

Ainsi, les positions exprimées par différents pays ou leurs autorités sanitaires concluent toutes, sur la base des données actuelles, à l'absence de risque sanitaire supplémentaire avec l'introduction de la 5G (à l'exception toutefois du document parlementaire européen et du rapport de la Commission établie par la Chambre des représentants de l'État du New Hampshire). S'agissant du document parlementaire européen, ce document, qui ne correspond pas à une expertise collective, a été préparé par le Service de recherche du Parlement européen (EPRS)⁸⁹ à l'attention des Membres et du personnel du Parlement européen comme documentation de référence pour les aider dans leur travail parlementaire. Le contenu du document est de la seule responsabilité de l'auteur et les avis qui y sont exprimés ne reflètent pas la position officielle du Parlement. Quant au rapport de la Commission parlementaire du New Hampshire, il visait à fournir des arguments en faveur d'une révision des normes de la FCC, et la Commission s'est basée sur les positions exprimées par les personnes auditionnées et n'a pas conduit d'analyse critique des documents et références recueillis lors des auditions. Les positions exprimées par certains états (Allemagne, Italie, Royaume Uni) sur les sites Internet de leurs autorités sanitaires ne consacrent que peu de place aux considérations sanitaires.

Certains pays, comme l'Allemagne et les Pays Bas, recommandent toutefois un développement prudent s'agissant notamment des nouvelles bandes de fréquences « millimétriques ». La plupart des pays émettent des recommandations de recherche, en particulier sur les effets biologiques des hautes fréquences de la bande autour de 26 GHz, et de suivi des expositions des populations.

⁸⁹ <https://www.europarl.europa.eu/at-your-service/fr/stay-informed/research-and-analysis>.

4 Données d'exposition à la 5G

4.1 Cadre normatif et réglementaire

Dans cette partie, nous proposons un aperçu des valeurs limites réglementaires au niveau international.

4.1.1 Présentation des lignes directrices de l'Icnirp

La commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants est un organisme qui publie des lignes directrices définissant des valeurs limites d'exposition à partir des seuils d'apparition d'effets sanitaires qui ont été scientifiquement établis. Ces limites sont définies dans des lignes directrices (« *guidelines* ») accessibles sur le site de l'Icnirp (<https://www.icnirp.org>).

Comme son nom l'indique, les compétences de l'Icnirp sont relatives aux effets des rayonnements non ionisants qui couvrent la gamme des fréquences allant de 0 Hz à 3 000 THz. Ces gammes de fréquences comprennent les champs statiques (0-1 Hz), les champs basses fréquences (jusqu'à 100 kHz), les radiofréquences (de 100 kHz à 300 GHz), l'infrarouge (300 GHz – 385 THz), le spectre visible (385 à 790 THz) et les ultraviolets (jusqu'à 3 000 THz). Par définition, les rayonnements non ionisants ne peuvent ioniser la matière vivante. Cela n'exclut cependant pas que d'autres effets biologiques (délétères ou non) puissent survenir, le corps humain étant un organisme complexe constitué de très nombreux types de tissus et de molécules susceptibles d'interagir avec les champs électromagnétiques.

Les fréquences allouées à la téléphonie mobile font partie de la gamme des radiofréquences (entre 100 kHz⁹⁰ et 300 GHz) qui couvre l'ensemble des applications de type radioélectriques. L'Icnirp a publié deux documents servant de lignes directrices pour les radiofréquences. Le premier a été publié en 1998 (Icnirp, 1998) et sert de référence aux valeurs limites d'exposition dans de nombreux pays. Ces recommandations ont été mises à jour en 2020 (Icnirp, 2020). Cette version récente des lignes directrices n'a cependant pas encore été transposée dans les réglementations nationales et internationales.

Les valeurs limites définies par l'Icnirp sont fondées sur les seuils à partir desquels des effets délétères sont considérés comme avérés. Dans la gamme des radiofréquences, à partir de 100 kHz⁹¹, les effets avérés d'une exposition du corps sont thermiques. À ces fréquences, le champ électromagnétique produit, par effet Joule, un échauffement des tissus qu'il traverse. Des effets néfastes peuvent donc survenir à partir de certains seuils d'exposition. Ainsi, l'objectif des limites d'exposition proposées par l'Icnirp est d'éviter une élévation de la

⁹⁰ Cette borne inférieure est la convention choisie entre autres par l'Icnirp. Il en existe d'autres compte tenu de la possibilité d'émettre des signaux de télécommunications à des fréquences inférieures à 100 kHz. On peut par exemple définir les radiofréquences comme la gamme des fréquences allant de 3 kHz à 300 GHz. L'Union internationale des télécommunications place la borne basse des radiofréquences à 8,3 kHz (cf. rapports Anses 2009, 2013).

⁹¹ Jusqu'à 10 MHz, les lignes directrices de l'Icnirp définissent des limites afin d'éviter que des effets non thermiques, tels que des courants induits dans le corps dépassent les niveaux recommandés. Entre 100 kHz et 10 MHz, les effets non thermiques et thermiques peuvent donc coexister et il convient de respecter les limites pour les deux types d'effet. Les fréquences de la téléphonie mobile sont supérieures à 10 MHz, de sorte que seules les limites relatives aux effets thermiques s'appliquent.

température du corps de plus d'un degré Celsius dans le cas d'une exposition du corps entier, ainsi qu'une augmentation locale de la température des tissus au-delà de 41°C lorsque l'exposition est localisée à une partie du corps.

L'Icnirp définit deux types de limite :

Les restrictions de base sont déterminées par les seuils d'exposition à partir desquels des effets néfastes peuvent se manifester, auxquels on applique un facteur de sécurité supplémentaire. À ce niveau, l'Icnirp distingue l'exposition du public de celle des travailleurs. Les travailleurs sont définis comme des adultes exposés sous des conditions connues, informés des risques éventuels et en mesure de prendre des précautions appropriées. Au contraire, le public comprend des individus de tous âges, dans un état de santé variable et peut inclure des groupes de personnes ayant une sensibilité particulière. En tous cas, les membres du public ne connaissent *a priori* pas les niveaux auxquels ils sont exposés et ne prennent pas nécessairement des mesures de précaution pour minimiser ou éviter l'exposition. Pour cette raison, les limites d'exposition sont plus strictes pour le public, le facteur de réduction choisi par l'Icnirp étant de 50 pour l'exposition du public et de 10 pour celle des travailleurs. Nous nous limiterons à l'exposition du public dans la suite.

Les restrictions de base sont cependant relatives à des grandeurs physiques qui ne sont pas toujours directement mesurables, telles que le débit d'absorption spécifique (DAS) exprimé en watts par kilogramme (W/kg) ou, dans le cas des recommandations de 2020, la densité de puissance absorbée par les tissus qui s'exprime en watts par mètre carré (W/m²). En particulier, l'évaluation du DAS nécessite généralement l'utilisation de simulations basées sur des modèles biophysiques des parties exposées.

Les niveaux de référence, quant à eux, sont fondés sur des grandeurs physiques directement mesurables, dont le champ électromagnétique, exprimé en volts par mètre (V/m). Ils sont établis de manière à garantir que le respect des niveaux de référence implique que les restrictions de base ne seront pas dépassées. La réciproque n'est pas vraie : un dépassement des niveaux de référence n'implique pas nécessairement le non-respect des restrictions de base mais il faut alors vérifier que celles-ci ne sont pas également dépassées, notamment s'il n'est pas possible de réduire l'exposition en dessous des niveaux de référence.

Les lignes directrices de l'Icnirp définissent des limites entre 0 Hz et 300 GHz, fréquence qui est aussi la borne inférieure de la gamme des rayonnements infrarouges. Ce rapport étant consacré aux radiofréquences, les valeurs limites ne seront décrites dans la suite qu'à partir de 10 MHz, fréquence à partir de laquelle les effets non thermiques établis ne peuvent survenir.

4.1.2 Lignes directrices de l'Icnirp publiées en 1998

Comme mentionné ci-avant, les lignes directrices publiées par l'Icnirp en 1998 sont à la base de la législation européenne visant à limiter l'exposition du public, raison pour laquelle elles sont abordées dans ce paragraphe. Les restrictions de base sont reprises dans le Tableau 5 ci-dessous. Les limites portant sur le DAS correspondent à des valeurs moyennées sur 6 minutes, les DAS localisés devant être évalués sur 10 grammes de tissu. Entre 10 GHz et 300 GHz, la densité de puissance doit être évaluée sur une surface de 20 cm² (sur 1 cm², la limite est multipliée par 20) et la moyenne doit être évaluée sur une durée qui dépend de la fréquence selon la formule $68/f^{1,05}$ où f est exprimée en gigahertz (GHz). Par exemple, à 26 GHz, la durée est de 2 minutes 13 secondes).

**Tableau 5 : Niveaux de référence en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz
(Icnirp 1998 et recommandation européenne 1999/519/CE)**

Population	Fréquences	DAS corps entier (W/kg)	DAS tête et tronc (W/kg)	DAS membres (W/kg)	Densité de puissance incidente (W/m²)
Travailleurs	De 10 MHz à 10 GHz	0,4	10	20	-
	De 10 GHz à 300 GHz	-	-	-	50
Public	De 10 MHz à 10 GHz	0,08	2	4	-
	De 10 GHz à 300 GHz	-	-	-	10

Les valeurs des niveaux de référence dépendent de la fréquence. Elles sont reprises dans le Tableau 6 où f est la fréquence exprimée en mégahertz (MHz).

Tableau 6 : Niveaux de référence pour les travailleurs et la population générale

Population	Fréquences	Champ électrique E (V/m)	Induction magnétique B (μ T)	Densité de puissance équivalente en onde plane S (W/m²)
Travailleurs	De 10 à 400 MHz	61	0,2	10
	De 400 à 2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0,01 f^{1/2}$	$f / 40$
	De 2 à 300 GHz	137	0,45	50
Public	De 10 à 400 MHz	28	0,092	2
	De 400 à 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f / 200$
	De 2 à 300 GHz	61	0,20	10

Rappelons, à toute fin utile, que les niveaux de référence dépendent de la fréquence et non de la technologie : à titre d'exemple, la limite dans la bande 2 100 MHz est la même pour les trois normes techniques de téléphonie mobile à laquelle elle est allouée, à savoir la 3G, la 4G et la 5G, à savoir 61 V/m (valeur moyennée sur 6 minutes) et s'applique donc également à cette dernière technologie.

Réciproquement, il n'existe pas une limite unique pour l'ensemble des bandes de fréquences pouvant être utilisées par la 5G, pas plus que pour les réseaux de téléphonie mobile de 2^e, 3^e et 4^e génération. Le Tableau 7 prend des exemples de fréquences utilisées par différentes générations de téléphonie mobile en France ainsi que les niveaux de référence associés.

Tableau 7 : Niveaux de référence aux fréquences utilisées en téléphonie mobile (Icnirp, 1998) et recommandation européenne (1999/519/CE)

Fréquence (MHz)	Technologie	Niveau de référence (V/m)
700	4G, 5G	36,4
800	4G	38,9
900	2G, 3G	41,3
1800	2G, 4G, 5G	58,3
2100	3G, 4G, 5G	61
2600	4G	61
3600	5G	61
26000	5G	61

Pour les champs composés ou dans les cas d'expositions simultanées à plusieurs sources radiofréquences, les lignes directrices proposent que la somme des carrés des rapports entre les grandeurs physiques calculées et mesurées aux différentes fréquences et les restrictions de base (niveaux de référence) correspondantes, reste inférieure à 100 %. Sous cette forme, la limite sur le cumul des rayonnements correspond à l'hypothèse la plus sécuritaire.

4.1.3 Lignes directrices de l'Icnirp publiées en 2020

La dernière version des recommandations de l'Icnirp apporte quelques modifications. Sans prétendre à l'exhaustivité, les principales sont celles-ci :

- seule la valeur du DAS moyen corps entier est prise en compte pour l'exposition du corps entier d'une durée supérieure ou égale à 6 minutes. De plus, elle est évaluée sur une durée de 30 minutes au lieu de 6 minutes. La valeur de la limite est inchangée mais elle s'applique également aux fréquences comprises entre 10 GHz et 300 GHz ;
- pour l'exposition localisée à une partie du corps, le DAS tête et tronc ainsi que le DAS membres restent les grandeurs pertinentes pour évaluer le respect des restrictions de base aux fréquences inférieures à 6 GHz (et non plus 10 GHz comme dans les recommandations de 1998). Aux fréquences supérieures et jusqu'à 300 GHz, la grandeur jugée pertinente n'est plus la densité de puissance incidente mais la densité de puissance absorbée par les tissus (densité de puissance incidente moins densité de puissance réfléchiée). Celle-ci doit désormais être évaluée sur une aire de 4 cm², avec une contrainte supplémentaire à partir de 30 GHz : la densité de puissance absorbée localement ne doit pas dépasser deux fois la limite sur une aire d'1 cm² ;
- des niveaux de référence ont été définis lorsque l'exposition est localisée ;
- des restrictions de base et des niveaux de référence ont été définis pour les expositions dont la durée est inférieure à 6 minutes. Dans ce cas, les limites dépendent de la durée de l'exposition.

Ces limites sont reprises dans les Tableau 8 à Tableau 12 où t est la durée exprimée en secondes et f est la fréquence en mégahertz (MHz).

Tableau 8 : Restrictions de base (valeurs moyennes sur 6 minutes) en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)

Population	Fréquences	DAS corps entier (W/kg)	DAS tête et tronc (W/kg)	DAS membres (W/kg)	Densité de puissance absorbée localement (W/m²)
Travailleurs	De 10 MHz à 6 GHz	0,4	10	20	-
	De 6 GHz à 300 GHz	0,4	-	-	100
Public	De 10 MHz à 6 GHz	0,08	2	4	-
	De 6 GHz à 300 GHz	0,08	-	-	20

Tableau 9 : Restrictions de base pour une exposition de moins de 6 minutes en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)

Population	Fréquences	Absorption spécifique tête et tronc (kJ/kg)	Absorption spécifique membres (kJ/kg)	Densité d'énergie absorbée localement (kJ/m²)
Travailleurs	De 10 à 400 MHz	-	-	-
	De 0,4 à 6 GHz	$3,6[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$	$7,2[0,025+0,975(t/360)^{0,5}]$	-
	De 6 à 300 GHz	-	-	$36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
Public	De 10 à 400 MHz	-	-	-
	De 0,4 à 6 GHz	$0,72[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$	$1,44[0,025+0,975(t/360)^{0,5}]$	-
	De 6 à 300 GHz	-	-	$7,2[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$

Tableau 10 : Niveaux de référence pour l'exposition du corps entier (moyenne sur 30 minutes) en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp 2020)

Population	Fréquences	Champ électrique E (V/m)	Champ magnétique (A/m)	Densité de puissance incidente (W/m²)
Travailleurs	De 10 à 30 MHz	$660/f^{0,7}$	$4,9/f$	-
	De 30 à 400 MHz	61	0,16	10
	De 400 à 2000 MHz	$3 f^{0,5}$	$0,008 f^{0,5}$	$f / 40$
	De 2 à 300 GHz	-	-	50
Public	De 10 à 30 MHz	$300/f^{0,7}$	$2,2/f$	-
	De 30 à 400 MHz	27,7	0,073	2
	De 400 à 2000 MHz	$1,375 f^{0,5}$	$0,0037 f^{0,5}$	$f / 200$
	De 2 à 300 GHz	-	-	10

Tableau 11 : Niveaux de référence pour l'exposition localisée (moyenne sur 6 minutes) en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)

Population	Fréquences	Champ électrique E (V/m)	Champ magnétique (A/m)	Densité de puissance incidente (W/m²)
Travailleurs	De 10 à 30 MHz	$1504/f^{0,7}$	$10,8/f$	-
	De 30 à 400 MHz	139	0,36	50
	De 400 à 2000 MHz	$10,58 f^{0,43}$	$0,008 f^{0,43}$	$0,29 f^{0,86}$
	De 2 à 6 GHz	-	-	200
	De 6 à 300 GHz	-	-	$934/f^{0,177}$
	300 GHz	-	-	100
Public	De 10 à 30 MHz	$671/f^{0,7}$	$4,9/f$	-
	De 30 à 400 MHz	62	0,163	10
	De 400 à 2000 MHz	$4,72 f^{0,43}$	$0,0123 f^{0,43}$	$0,058 f^{0,86}$
	De 2 à 6 GHz	-	-	40
	De 6 à 300 GHz	-	-	$186,8/f^{0,177}$
	300 GHz	-	-	20

Tableau 12 : Niveaux de référence pour une exposition localisée inférieure à 6 minutes en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (Icnirp, 2020)

Population	Fréquences	Densité d'énergie incidente (kJ/m²)
Travailleurs	De 10 à 400 MHz	-
	De 400 à 2000 MHz	$0,29 f^{0,86} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	De 2 à 6 GHz	$200 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	De 6 à 300 GHz	$934/f^{0,177} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	300 GHz	$100 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
Public	De 10 à 400 MHz	-
	De 400 à 2000 MHz	$0,058 f^{0,86} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	De 2 à 6 GHz	$40 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	De 6 à 300 GHz	$186,8/f^{0,177} \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$
	300 GHz	$20 \times 0,36[0,05+0,95(t/360)^{0,5}]$

Dans l'Union européenne

La directive 2013/35/UE concerne l'exposition sur le lieu de travail et devait être transposée dans les États membres au plus tard le 1^{er} juillet 2016. Les limites adoptées sont fondées sur celles de l'Icnirp 1998, les restrictions de base sont appelées « valeurs limites d'exposition » ou VLE et les niveaux de référence sont nommés « valeurs déclenchant l'action » (VA). Comme dans les lignes directrices de l'Icnirp 1998, les valeurs limites pour le public (recommandation 1999/519/CE et réglementations nationales et régionales) sont inférieures à celles relatives à l'exposition sur le lieu de travail.

Le Conseil de l'Union européenne a également adopté les valeurs limites, les restrictions de base et les niveaux de référence des lignes directrices de l'icnirp publiées en 1998 dans la recommandation 1999/519/CE⁹² visant à limiter l'exposition du public (voir Tableau 5 et Tableau 6).

En outre, la directive RED⁹³ (*Radio Equipment Directive*) définit les conditions de mise sur le marché d'équipements hertziens (dont les téléphones mobiles), lesquels doivent satisfaire des normes essentielles relatives notamment à la protection de la santé des personnes.

En Europe, plusieurs pays, dont la France, ont adopté les niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE comme limites d'exposition du public à la téléphonie mobile. Pour d'autres pays de l'Union (à savoir l'Autriche, le Danemark, la Lettonie, les Pays-Bas et la Suède), ces limites ne sont pas contraignantes.

La recommandation 1999/519/CE permet aux États membres de définir des limites plus strictes. Certains pays et certaines régions d'Europe ont ainsi défini des limites inférieures aux niveaux de référence en ce qui concerne l'exposition par des antennes-relais de téléphonie mobile.

Belgique

En Belgique, chacune des trois régions a défini sa propre limite d'exposition du public aux champs électromagnétiques générés par les antennes émettrices.

La Région de Bruxelles-Capitale fixe une limite⁹⁴ sur le cumul des rayonnements entre 100 kHz et 300 GHz provenant de l'ensemble des antennes présentes sur un site. La norme stipule que dans les lieux accessibles au public, la densité de puissance ne peut dépasser à aucun moment la valeur limite de 0,096 W/m² (équivalent à 6 V/m en champ lointain) pour une fréquence de référence de 900 MHz, ce qui signifie que les valeurs limites sont obtenues à partir des niveaux de référence de l'icnirp 1998 affectés d'un facteur de sécurité supplémentaire de 46. La limite est donc égale à 0,043 W/m² entre 100 kHz et 400 MHz, égales à $f / 9375$ entre 400 MHz et 2 GHz, f étant exprimée en MHz et 0,22 W/m² (soit, à titre indicatif, 9,1 V/m) entre 2 et 300 GHz pour les fréquences comprises entre 2 GHz et 300 GHz, gamme qui inclut la bande de fréquences 5G 3,4-3,8 GHz.

En Région flamande, deux limites sont appliquées⁹⁵ : l'une porte sur le cumul des expositions générées par les différents émetteurs présents (un quart des niveaux de référence de l'icnirp 1998), la seconde, plus basse, est appliquée sur chaque antenne comptée individuellement (3 V/m à la fréquence de 900 MHz, soit un rapport de 196 par rapport à l'icnirp) dans les lieux de résidence. Celles-ci sont reprises dans le Tableau 13.

⁹² Recommandation du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz) (1999/519/CE). Journal officiel des Communautés européennes – 30.7.1999.

⁹³ Directive 2014/53/UE du Parlement européen et du 16 avril 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE.

⁹⁴ Ordonnance de la Région de Bruxelles-Capitale du 1^{er} mars 2007 relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes (M.B. du 14.03.07).

⁹⁵ Arrêté du Gouvernement flamand du 19 novembre 2010 modifiant l'arrêté du Gouvernement flamand du 1^{er} juin 1995 fixant les dispositions générales et sectorielles en matière d'hygiène de l'environnement, pour ce qui concerne les normes d'antennes émettrices fixes et temporaires pour des ondes électromagnétiques entre 10 MHz et 10 GHz (M.B. 13.01.2011).

**Tableau 13 : Niveaux de référence pour l'exposition localisée (moyenne sur 6 minutes)
en fonction de la fréquence à partir de 10 MHz (autorité flamande, 2011)**

Fréquences	Limite portant sur le cumul (V/m)	Limite par antenne (V/m)
De 10 à 400 MHz	13,7	2
De 400 à 2000 MHz	$0,686 f^{1/2}$	$0,1 f^{1/2}$
De 2 à 10 GHz	30,7	4,48

En Wallonie, le décret du 3 avril 2009⁹⁶ fixe une limite de 3 V/m par antenne dans les lieux de séjour. La norme exige en outre que soient cumulées les contributions, dans différentes bandes de fréquences, des émetteurs d'un même réseau (GSM, UMTS, LTE) dans une zone géographique⁹⁷.

Bulgarie

Comme en Wallonie, la limite est unique dans la gamme des fréquences où elle s'applique. Elle est de 0,01 W/m².

Croatie

Les valeurs limites sont reprises dans l'Ordonnance de protection contre les champs électromagnétiques (ordonnance du Ministère de la santé). Les valeurs limites prescrites sont fondées sur celles de la recommandation 1999/519/CE :

- 90 % de la densité de puissance (95 % du champ électromagnétique en V/m) dans les lieux publics ;
- dans les « zones sensibles », (maisons, bureaux, écoles, terrains de jeux, jardins d'enfants, maternités, hôpitaux, maisons pour personnes âgées et handicapées et hébergements touristiques) : 40 % des niveaux de référence de l'intensité du champ électrique et du champ magnétique et 16 % pour la densité de puissance.

Grand-Duché de Luxembourg

La réglementation grand-ducale⁹⁸ stipule que « *l'exploitant doit obligatoirement installer ses antennes de façon à garantir en tout lieu où peuvent séjourner des personnes une intensité maximale du champ électrique de 3 V/m par élément rayonnant.* »

⁹⁶ Décret du 3 avril 2009 relatif à la protection contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les rayonnements non ionisants générés par des antennes émettrices stationnaires (M.B. 06.05.2009)

⁹⁷ Comme le stipule l'article 4 du décret, « *les antennes dites multi-bandes conçues pour rayonner simultanément les signaux de N réseaux sont considérées comme équivalentes à N antennes distinctes. « Lorsque plusieurs antennes installées sur un même support sont utilisées pour émettre les signaux d'un même réseau dans une zone géographique, elles sont considérées comme ne formant qu'une seule antenne.* »

⁹⁸ Conditions d'exploitation pour les émetteurs d'ondes électromagnétiques à haute fréquence. Prescriptions de sécurité types. Inspection du Travail et des Mines, ITM-SST 1105.1 (ancien ITM-CL 179).

Grèce

En Grèce, les limites d'exposition du public à proximité de stations de base⁹⁹ sont égales, dans tous les cas, à 70 % des restrictions de base et des niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE et à 60 % de ces valeurs pour les stations de base situées à moins de 300 mètres du périmètre d'écoles, de jardins d'enfants, d'hôpitaux et d'établissements de soins pour personnes âgées.

Italie

L'Italie applique les restrictions de base et les niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE lorsque les sources ne sont pas des systèmes fixes de télécommunication incluant la radiodiffusion et la télévision. Pour ces systèmes, la limite est de 20 V/m et de 1 W/m² entre 3 MHz et 3 GHz.

Une « valeur d'attention » s'applique en outre dans les maisons, les écoles, les terrains de jeux et les lieux où des personnes peuvent séjourner plus de quatre heures, la « valeur d'attention » pour l'intensité du champ électrique est de 6 V/m à 900 MHz et 0,1 W/m². L'« objectif de qualité » pour les espaces extérieurs très fréquentés est identique à la valeur d'attention.

Lituanie

À l'intérieur et aux alentours des bâtiments résidentiels et publics, la densité de puissance ne doit pas dépasser 10 % du niveau de référence de la recommandation 1999/519/CE à la fréquence de 900 MHz.

Pologne

Dans les lieux accessibles au public, l'intensité du champ électromagnétique et la densité de puissance ne peuvent pas dépasser, respectivement, 17 % et 2 % du niveau de référence de la recommandation 1999/519/CE à la fréquence 900 MHz.

Slovénie

Pour les fréquences supérieures à 10 kHz et dans les « zones sensibles » telles que les maisons, les écoles et les hôpitaux, les limites d'exposition pour le champ électrique et pour le champ magnétique sont égales à 31 % des niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE, ce qui correspond à 10 % pour la densité de puissance. Dans tous les autres lieux, ce sont les niveaux de référence de ladite recommandation qui sont utilisés.

Hors Union européenne

Australie

Les restrictions de base et les niveaux de référence sont identiques à ceux de la recommandation 1999/519/CE.

Chine

La norme nationale GB 8702-2014 définit des limites différentes de celles des lignes directrices de l'Icnirp. En outre, selon la norme environnementale HJ/T 10.3-1996, pour chaque site, un facteur de sécurité égal à $\sqrt{5}$ est appliqué pour les nouvelles installations d'antennes.

La loi sur la protection de l'environnement fixe des limites d'exposition pour la population générale qui ne s'appliquent pas aux équipements terminaux de communication sans fil. Les

⁹⁹ Loi No 4070, Act. No. 82/A/10.04.2012 : Règlements concernant les communications électroniques, les transports, les travaux publics et autres dispositions

limites sont inférieures aux niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE, mais le pourcentage varie avec la fréquence. À 900 MHz par exemple, la limite portant respectivement sur l'intensité du champ électrique et sur la densité de puissance est de 29 % et de 9 % du niveau de référence dans ladite recommandation. La norme cite également le principe de précaution et encourage les propriétaires d'installations et d'équipements à prendre des mesures efficaces pour réduire l'exposition du public.

Pour les téléphones mobiles, une norme distincte définit une limite qui est identique aux restrictions de base de la recommandation 1999/519/CE.

États-Unis

La législation fédérale applique la restriction de base de la recommandation 1999/519/CE mais des niveaux de référence supérieurs (+15 % pour le champ électrique, +14 % pour le champ magnétique et +33 % pour la densité de puissance à 900 MHz), car un autre modèle de calcul est utilisé pour les obtenir. Les niveaux de référence servent de limites pour l'exposition aux équipements non portables.

Pour les appareils portables proches du corps, les limites sont identiques à la restriction de base de ladite recommandation pour l'exposition des extrémités (mains, poignets, chevilles, pieds, oreilles externes) et 80 % des restrictions de base pour la tête et le tronc.

Inde

La limite sur le DAS relative à l'exposition locale de la tête générée par les téléphones mobiles est égale à 80 % de la restriction de base correspondante.

La limite portant sur l'exposition du public par des stations de base est égale à 33 % des niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE pour l'intensité du champ électrique et du champ magnétique et à 10 % pour la densité de puissance.

Japon

Les limites relatives à l'exposition par les stations de base sont presque identiques aux niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE. La limite portant sur le DAS pour l'exposition aux téléphones mobiles est la restriction de base de ladite recommandation.

Russie

La limite d'exposition pour la densité de puissance pour les fréquences comprises entre 300 MHz et 300 GHz dans et autour des bâtiments résidentiels et à l'intérieur des locaux publics et industriels est de 2 % du niveau de référence de la recommandation 1999/519/CE. L'objectif annoncé est d'éviter les effets biologiques qui ne sont généralement pas considérés comme présentant un risque pour la santé dans les pays occidentaux.

La limite relative à l'exposition aux téléphones mobiles n'est pas relative au DAS mais porte également sur la densité de puissance et est égale à 22 % du niveau de référence de ladite recommandation.

Suisse

En Suisse, une ordonnance¹⁰⁰ régit « la limitation des émissions des champs électriques et magnétiques générées par des installations stationnaires dans une gamme de fréquence allant de 0 Hz à 300 GHz (rayonnement) ». La valeur limite porte sur les installations

¹⁰⁰ Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant. ORNI, 814.710, 23 décembre 1999 (Etat le 1er juin 2019)

émettrices des réseaux de téléphonie mobile cellulaires et aux installations émettrices pour raccordements téléphoniques sans fil dont la puissance rayonnée équivalente (ERP, égale à 1,64 fois la puissance isotrope rayonnée équivalente) est supérieure à 6 W (ou dont l'ERP est inférieure ou égale à 6 W mais situées à moins de 5 mètres d'autres antennes telles que l'ERP totale de ces émetteurs est supérieure à 6 W). L'ordonnance définit la limite portant sur la valeur efficace de l'intensité du champ électrique comme suit :

« a. 4,0 V/m pour les installations qui émettent exclusivement dans la gamme de fréquence autour de 900 MHz ou dans des gammes de fréquence plus basses ;

« b. 6,0 V/m pour les installations qui émettent exclusivement dans la gamme de fréquence autour de 1 800 MHz ou dans des gammes de fréquence plus élevées ;

« c. 5,0 V/m pour toutes les autres installations. »

La limite doit être respectée dans les lieux sensibles (appartements, écoles, lieux de travail... où des personnes peuvent séjourner pendant des périodes de temps prolongées) lorsque la puissance maximale est émise.

En Suisse, les limites d'exposition dépendent donc de la fréquence, la limite la plus stricte étant de 4 V/m dans la bande 700 MHz. Dans la bande 3,4-3,8 GHz, elle est de 5 V/m.

4.1.4 Comparaison des valeurs limites d'exposition

Pour rappel, les limites établies par l'Icnirp et d'autres organisations extra-européennes telles que l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) se fondent sur les effets avérés des champs électromagnétiques. L'Icnirp, notamment, et la recommandation 1999/519/CE qui en découle, rappellent toutefois que les États membres peuvent adopter des limites plus basses.

Le choix d'un coefficient de sécurité supplémentaire aux restrictions de base ou aux niveaux de référence, voire d'une limite unique nettement inférieure aux niveaux de référence, résulte de l'application d'un principe de précaution ou de la volonté de réduire l'exposition ou à tout le moins, de garantir que celle-ci ne dépassera pas un certain niveau défini par la limite réglementaire dans les lieux concernés.

Si l'utilisation de limites basses contribue à limiter l'exposition dues aux antennes émettrices conventionnelles (qui n'utilisent pas le *massive MIMO* ni le *beamforming*¹⁰¹) à des niveaux inférieurs aux valeurs limites choisies, on constate que les niveaux d'exposition moyens dans les lieux accessibles au public tels que la voirie, les parcs ou les bâtiments publics sont du même ordre de grandeur que dans les pays où les limites sont celles de la recommandation 1999/519/CE¹⁰². Ceci s'explique notamment par la directivité des antennes émettrices et le fait que les puissances rayonnées par les stations de base restent comparables dans les différents pays pour une même technologie.

Même si les valeurs limites d'exposition peuvent être exprimées en pourcents d'une valeur de référence commune (par exemple, les niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE à 900 MHz, comme ci-dessus), même lorsque le coefficient de réduction varie en fonction de la fréquence, comparer des limites d'exposition de différents pays ou régions

¹⁰¹ Cf. paragraphe 4.2.

¹⁰² Voir à ce propos et malgré l'existence des points atypiques, les résultats de mesures commanditées par l'ANFR et les valeurs mesurées par l'ISSeP lors des contrôles réalisés en Wallonie ou au Grand-Duché de Luxembourg.

et ce faisant, déterminer lesquelles sont les plus strictes peut s'avérer complexe. Par exemple, les lieux où les limites s'appliquent peuvent être différents : lieux accessibles au public ou seulement les lieux où des personnes peuvent séjourner ; la limite peut porter sur tous les émetteurs présents ou sur une partie d'entre eux. En outre, les méthodes de calcul et de mesure, ainsi que les prescriptions légales pour effectuer les contrôles (soit en des points spécifiques, soit tout autour des émetteurs) peuvent varier. D'autres facteurs doivent également être considérés, tels que les éventuelles puissances minimales à l'entrée des antennes sous lesquelles les limites ne s'appliquent pas.

4.1.5 L'application et l'évolution des valeurs limites dans le contexte du déploiement de la 5G

Comme indiqué précédemment, les limites d'exposition relatives au champ électrique, au champ magnétique et à la densité de puissance dépendent généralement de la fréquence même lorsqu'elles ne s'appliquent qu'à certaines sources radiofréquences telles que les systèmes de télécommunication, notamment les stations de base de téléphonie mobile.

Les niveaux de référence de la recommandation 1999/519/CE correspondent à une valeur moyenne sur 6 minutes, jusqu'à 10 GHz. Les mesures sur site peuvent être effectuées de deux manières :

- une campagne de mesures ponctuelles ou continues, dans les lieux accessibles incluant la voirie, en vue d'estimer l'exposition moyenne de la population. Les niveaux moyens mesurés à proximité d'une antenne 5G dépendent notamment de la taille des fichiers téléchargés, la durée d'émission lors du transfert augmentant lorsque la taille des données augmente à débit constant ;
- des mesures de contrôle de la limite qui, dans plusieurs cas, considèrent l'hypothèse maximaliste où les antennes émettent à pleine puissance de façon continue.

Ces deux types de mesures *in situ* peuvent conduire à des résultats très différents, car le rapport entre les niveaux d'exposition maximum et les niveaux moyens est plus grand que pour la 4G. Il en résulte que la mesure des niveaux maximum d'exposition conduit à une nette surestimation de l'exposition moyenne réelle des utilisateurs de l'antenne 5G dans la bande 3,4 - 3,8 GHz et probablement dans la gamme des ondes « millimétriques ». Ce constat soulève la difficulté de certains pays et de certaines régions du monde de faire respecter les limites d'exposition nettement inférieures à celles de la recommandation 1999/519/CE en l'état.

En outre, lorsque les antennes évoquées ci-avant utilisent les techniques du *massive MIMO* et du *beamforming*, il en résulte une exposition plus localisée et un rayonnement de l'antenne-relais orienté vers l'utilisateur qui génère du trafic, ce qui constitue une configuration d'exposition différente par rapport aux antennes utilisées par les précédentes générations de téléphonie mobile (et par la 5G dans les bandes de 700 à 2 100 MHz) où la direction du rayonnement de l'antenne est fixe. Dans ce cas, l'exposition est moins localisée.

Ces innovations ont motivé la mise en place de méthodes de mesure spécifiques aux antennes non conventionnelles (« *smart antennas* »), notamment sur la manière de déduire les niveaux d'exposition maximum à partir des données disponibles ou acquises sur le terrain. Ces méthodes de mesure sont reprises dans le document qui décrit deux approches conservatives, l'une déterministe et l'autre statistique. Le choix de l'une ou l'autre méthode peut être dicté, selon le pays et la région, par les éventuelles prescriptions légales des valeurs limites

d'exposition et de leur mise en application, mais dans les deux cas, l'opérateur doit montrer que cette limite n'est jamais dépassée.

Il appartient aux États membres de l'Union européenne ainsi qu'aux autres pays situés hors de l'UE de déterminer dans quelles mesures les limites doivent être revues ou les prescriptions légales relatives à l'application de la norme doivent être modifiées en prévision du déploiement de la 5G.

4.2 Évolutions technologiques menant à la 5G dans la bande de fréquences inférieures à 6 GHz

4.2.1 Rappel des principales caractéristiques du signal 4G et de ses versions successives

Pour améliorer les performances des liaisons entre une station de base (nommée par la suite « BS », pour « *base station* ») et les terminaux des utilisateurs (dénommés ensuite « UE », pour « *user equipment* »), la technologie 4G a été successivement amendée, menant aux appellations suivantes : « *Long Term Evolution* », « *LTE-Advanced* », et enfin « *LTE-Advanced Pro* » qui préfigure la 5G. L'objectif de ce rapport étant axé sur l'exposition des personnes, les caractéristiques les plus récentes des techniques d'émission – réception qui peuvent avoir un impact sur les modalités d'exposition, seront brièvement résumées, tout en retenant le terme générique 4G pour simplifier la présentation.

Toutes les spécifications liées à ces diverses technologies sont décrites en détail dans les versions successives des documents, disponibles en libre accès sur le Web, produits par le « *3rd Generation Partnership Project* » (3GPP)¹⁰³. Cet organisme regroupe 7 organisations impliquées dans le développement de normes en télécommunication et s'appuie sur de nombreux groupes techniques.

Dans cette section, seuls la modulation et le codage du canal radioélectrique seront brièvement présentés car, d'une part, ce sont eux qui jouent un rôle important sur le niveau et la distribution spatiale du champ rayonné par les antennes, donc sur l'exposition et, d'autre part, beaucoup de leurs caractéristiques sont communes à celles de la 5G.

C'est la modulation OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) qui a été choisie pour la 4G, compte tenu de sa grande souplesse de paramétrage et qui permet de s'adapter aux caractéristiques du canal de propagation et d'optimiser le débit de la liaison vers chaque UE. Cette modulation a fait l'objet de nombreuses publications et a été largement utilisée ces 15 dernières années. Une présentation complète est détaillée par Ergen (Ergen 2009).

La bande passante disponible, comprise entre 1,25 et 20 MHz, est divisée en une multitude de sous-bandes appelées sous-porteuses. D'un point de vue conceptuel, chaque symbole de données, associé à un certain nombre de bits, module en amplitude et en phase une sous-porteuse différente, ce qui revient à émettre en parallèle, donc simultanément, un grand nombre de symboles dont l'ensemble forme le « symbole OFDM » (Ergen 2009). Pour la 4G, l'espacement fréquentiel entre chaque sous-porteuse est fixé à 15 kHz. Cette modulation nécessiterait donc de disposer d'un très grand nombre de sources générant ces sous-porteuses, ce qui est impossible à mettre en œuvre pratiquement. Elle est donc réalisée grâce à une transformée de Fourier inverse. Cela mène à un signal dont les composantes ont une

¹⁰³ <https://www.3gpp.org/>

allure temporelle voisine de celle d'un « bruit », présentant donc des variations aléatoires et substantielles dans le temps, en matière d'amplitude, de phase et de fréquence instantanée. Un exemple issu de l'enregistrement d'un tel signal est donné dans la Figure 11.

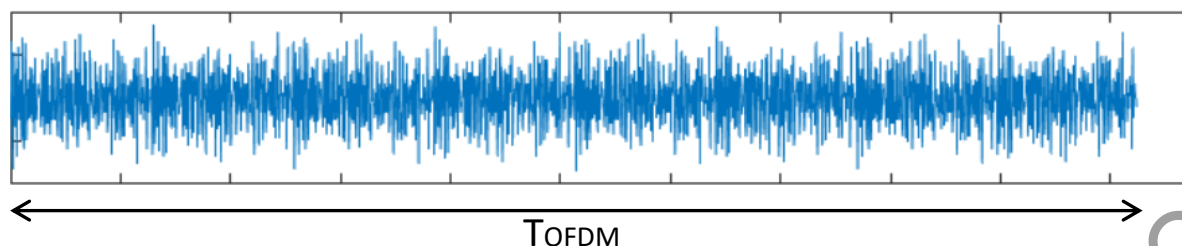


Figure 11 : Exemple de l'allure temporelle d'un symbole OFDM de durée T_{OFDM} : amplitude (échelle arbitraire) en fonction du temps.

Le signal total sera donc formé par une suite temporelle de symboles OFDM présentant une allure globale similaire à celle de la Figure 11. Ce signal est ensuite transposé autour de la fréquence centrale d'émission (1,8 GHz ou autre) et sa puissance est ainsi répartie dans la bande allouée à la BS. Pour assurer une liaison duplex entre la BS et chaque UE, donc permettant de transporter l'information dans les 2 sens, la 4G utilise en France et dans le reste de l'Union européenne une technique de division en fréquences, dite « *Frequency Division Duplex* » (FDD). Celle-ci consiste à séparer le spectre de fréquences disponibles en 2 parties : l'une affectée aux liaisons dites « descendantes », de la BS vers l'UE, et l'autre aux liaisons « montantes », de l'UE vers la BS. Avec cette approche, le duplexage peut se faire simultanément.

L'évolution la plus marquante lors du développement de la 4G a été l'introduction de la technique MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Pour montrer son intérêt, envisageons d'abord le cas simple d'une liaison entre la BS et un seul UE. Si, d'une part, la BS dispose d'un réseau d'antennes et si, d'autre part, l'UE a au moins 2 antennes, le traitement MIMO permet de réaliser des canaux parallèles sur lesquels des informations différentes peuvent être transmises. Cette diversité « spatiale » permet ainsi un multiplexage (répartition des ressources) et donc une augmentation du débit. Il faut cependant noter que ses performances dépendent des caractéristiques du canal de propagation, donc de l'environnement entre la BS et l'UE et du nombre d'antennes du réseau. Ce concept peut être généralisé au cas d'un certain nombre d'utilisateurs répartis dans la zone de couverture de la BS. Pour une liaison FDD, la connaissance des caractéristiques du canal par les terminaux est complexe puisque les fréquences des liens montants et descendants sont différentes. D'autres approches de traitement du signal ont donc été développées mais ont souvent conservé cette appellation « MIMO ». Pour améliorer la qualité de la réception, par exemple, il est possible d'augmenter la puissance reçue par l'UE à puissance d'émission constante, donc en quelque sorte de « focaliser » l'énergie, surtout dans le cas où la BS et l'UE ne sont pas en visibilité directe. Dans une première phase de développement, les antennes formant le réseau MIMO étaient implantées au niveau d'une seule BS, donc co-localisées. Ce concept peut être généralisé en envisageant non plus une seule BS mais un ensemble de BS qui communiquent entre elles grâce à un réseau de communication haut débit supportant notamment les échanges de données. On réalise ainsi un réseau qui n'est plus co-localisé sur une BS, mais dont les antennes sont « distribuées » entre les BS, et donc de taille plus importante. On aboutit ainsi à un réseau dit « virtuel ». Cette méthode est connue sous l'appellation de technique « *Coordinated MultiPoint* » ou « *Distributed MIMO* », avec de nombreuses variantes.

Ce sont ces diverses approches de codage du signal et du lien radio, développées et mises en œuvre pour la 4G, qui ont ensuite été transposées à la 5G. Le paragraphe suivant ne mettra donc l'accent que sur les différences importantes entre 4G et 5G.

4.2.2 Introduction à la 5G

Une présentation très générale de la 5G est donnée dans un document ANFR¹⁰⁴ (ANFR, 2019a). Par rapport à la 4G, les logiciels de traitement de l'information ont été modifiés afin, notamment, de diminuer le temps de latence et le temps de traitement des données, menant donc à une augmentation des débits. La modulation choisie est l'OFDM, identique à celle de la 4G. En plus des fréquences déjà utilisées par les technologies mobiles 2G, 3G et 4G, que la 5G peut réutiliser, une nouvelle bande de fréquences spécifique a été allouée à la 5G, centrée autour de 3,5 GHz, avec une bande passante maximum de 100 MHz. Pour cette gamme de fréquences, le duplexage est assuré par le mode « *Time Division Duplex* » (TDD), la même bande de fréquences étant utilisée alternativement dans le temps pour la liaison descendante et la liaison montante. Ce mode de fonctionnement TDD et celui de FDD pour la 4G sont illustrés sur la Figure 12.

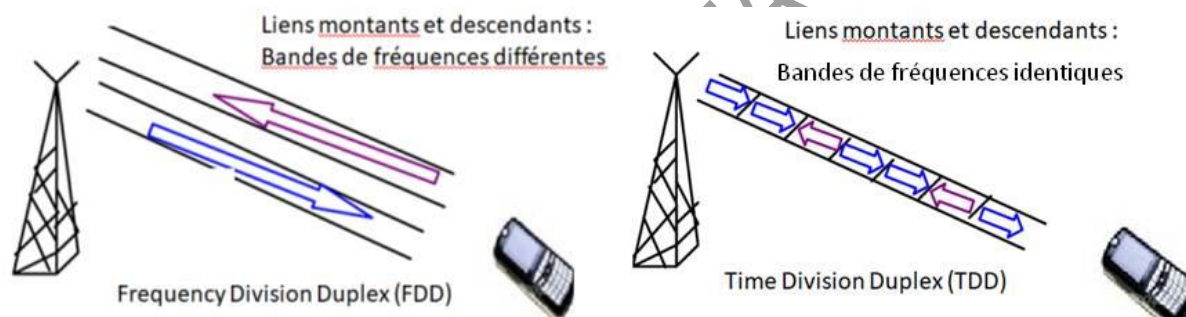


Figure 12 : Principe de fonctionnement de la technique de duplexage FDD et TDD

La principale différence entre la 5G et les générations antérieures ayant un impact en matière d'exposition des personnes, est essentiellement liée à l'emploi, au niveau de la BS, d'un réseau d'antennes de grande taille pouvant assurer une focalisation de l'énergie vers l'utilisateur, et ceci grâce aux techniques dites « *massive MIMO* » et notées par la suite « mMIMO ». Comme il a été souligné précédemment, MIMO figurait déjà dans les spécifications de la 4G, mais avec un nombre moins important d'antennes, d'où la dénomination actuelle de « massif » pour désigner un réseau comportant un grand nombre d'éléments rayonnants, 64 ou 128 par exemple.

La Figure 13 montre ainsi, de façon très schématique, la différence entre 4G et 5G sur la technique de couverture d'une zone depuis la BS.

¹⁰⁴ ANFR, 2019a. Évaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 1 : présentation générale de la 5G. Rapport ANFR disponible en ligne.

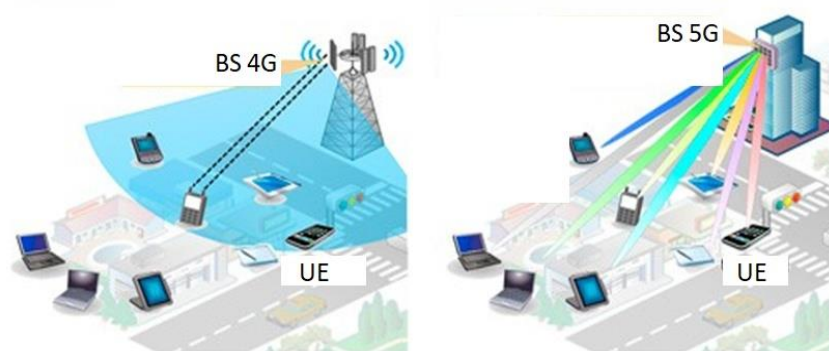


Figure 13 : Couverture d'une zone depuis la station de base en 4G et en 5G.

4.2.3 Modalités de déploiement de la 5G

4.2.3.1 Réutilisation des infrastructures 4G par la 5G

Dans une étape préliminaire d'implantation de la 5G, une solution dite « *refarming* » consiste à utiliser les BS 4G existantes afin de permettre un développement plus rapide et moins onéreux. Les fréquences associées, donc comprises entre 700 et 2 100 MHz, sont réaffectées à la transmission entre les UE et cette BS, mais suivant le protocole de communication 5G. Le spectre de la 4G peut être soit entièrement dédié à la 5G, soit être en partage dynamique entre les trafics 4G et 5G. Cette dernière technologie, connue sous le nom de « *dynamic spectrum sharing* » (DSS), permet, entre autres, d'augmenter la capacité de la liaison. Les liaisons 4G utilisant un mode de duplexage FDD, les liaisons 5G dans cette configuration de « *refarming* » se baseront également sur le duplexage FDD pour éviter notamment les problèmes de synchronisation entre BS. D'un point de vue performances, cette solution est évidemment nettement moins bonne que celle associée au déploiement total en 5G. On peut donc s'attendre à ce que l'exposition à une BS suite au *refarming* 4G/5G soit du même ordre de grandeur que celle de la BS 4G, à gain d'antennes et à puissance émise identiques, les fréquences étant les mêmes, mais ce point devra être vérifié lors du déploiement de la 5G.

4.2.3.2 5G « *standalone* » versus « *non-standalone* »

L'implantation de la 5G, dite « *standalone* » (SA), consiste à déployer les stations de base et le réseau suivant toutes les spécifications requises, la bande de fréquence dédiée se situant autour de 3,5 GHz. Une première étape pour l'implantation du réseau, dite « *non standalone* » (NSA), consiste à envoyer les données entre l'UE et les antennes d'une BS 5G suivant ce protocole 5G, donc à 3,5 GHz. Cependant, cette BS 5G n'est pas reliée à un « cœur » 5G, qui serait élaboré dans une étape ultérieure, mais au « cœur » 4G existant. Il en résulte que tous les signaux de contrôle et, éventuellement, des données supplémentaires, transitent par une BS 4G comme l'indique la Figure 14 (a). Il faut cependant noter que d'autres architectures sont possibles. La Figure 14 (b) correspond au cas SA, le mobile étant relié à tout le réseau en 5G ou éventuellement au réseau 4G, en l'absence, par exemple, d'un réseau 5G disponible dans la zone du mobile.

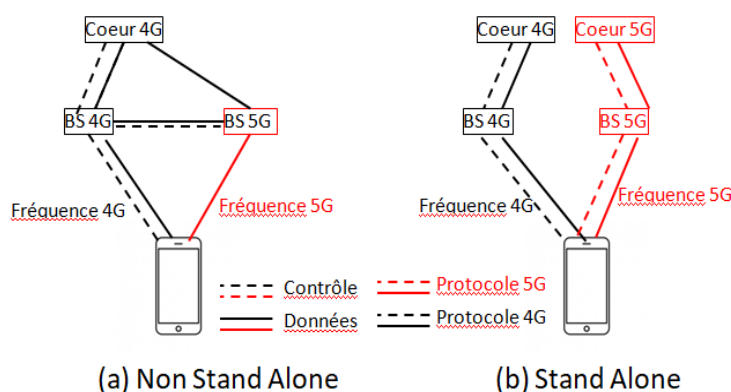


Figure 14 : Différence d'architecture entre NSA et SA

L'approche NSA présente évidemment l'avantage de permettre un déploiement plus rapide et moins onéreux, la contrepartie étant des performances un peu moindres que celles de la 5G SA, notamment en matière de débit et de temps de latence.

4.2.4 Faisceaux générés par la station de base 5G et affectation temporelle des liens émission - réception

4.2.4.1 Faisceaux générés par la BS

On distingue 2 phases successives lors de l'établissement d'une liaison entre BS et UE : i) la « signalisation » et ii) le « trafic » c'est-à-dire les échanges de données.

Dans la première phase, dite de signalisation, l'antenne 5G scrute son environnement pour identifier les utilisateurs à servir. La zone géographique dédiée à la BS sera couverte par au maximum 8 faisceaux successifs avec une périodicité typiquement égale à 20 ms. Chaque faisceau envoyé successivement par la BS dans une direction donnée transporte un signal caractéristique de celui-ci, ainsi que des signaux de synchronisation et de contrôle, notés SB. L'ensemble de ces signaux (SSB - *Synchronisation Signal Block*) est envoyé dans un intervalle de temps de 5 ms au maximum comme le montre la Figure 15. Chaque UE informe la BS du faisceau pour lequel la puissance reçue est la plus importante. Dans un environnement dégagé et en cas de visibilité directe entre la BS et l'UE, le faisceau choisi correspondra évidemment à celui qui est dirigé vers l'UE.

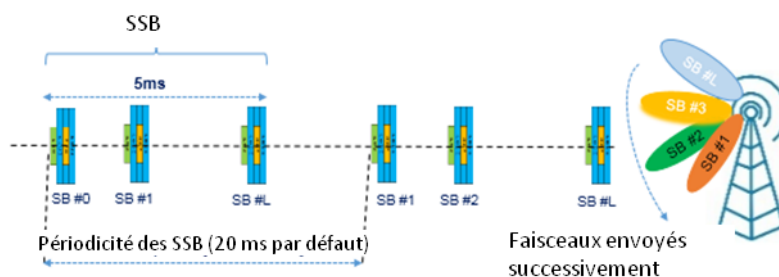


Figure 15 : Exemple de la distribution temporelle de signaux de synchronisation

« L » signaux successifs de synchronisation, SB_{#0} à SB_{#L}, sur un intervalle de temps de 5 ms, chacun de ces signaux étant associé à un faisceau de direction donnée (partie droite de la Figure)¹⁰⁵.

¹⁰⁵ <http://www.techplayon.com/5g-nr-cell-search-and-synchronization-acquiring-system-information/>.

Dans une deuxième phase, les signaux de « trafic » sont échangés entre BS et UE. L'opérateur de télécommunications a une grande liberté de choix du mode de transmission en liaison descendante. Il pourra utiliser le traitement du signal qu'il juge le plus adéquat et des diagrammes de rayonnement d'antenne différents menant à une focalisation plus ou moins importante du signal, donc à une augmentation possible de la puissance reçue par l'UE. Pour donner un ordre de grandeur, les puissances reçues dans la phase « signalisation » et dans la phase « trafic », qui joue le plus grand rôle pour l'exposition, pourront, par exemple, différer de 5 à 15 dB.

À titre indicatif (Franci, 2020a), les divers types de faisceaux pour établir la liaison descendante en phase trafic sont les suivants :

- un ensemble de faisceaux fixes, ayant une couverture angulaire et une direction prédéterminée, comme dans l'étape initiale de signalisation, la liaison étant établie dans le lobe maximisant la puissance reçue par l'UE ;
- un faisceau dont l'orientation est variable, de manière à ce que la puissance maximale soit dirigée vers l'UE, cette technique étant souvent dite « *beam steering* » ;
- des faisceaux générés par des antennes « adaptatives » qui permettent, par exemple, d'assurer le meilleur compromis entre maximiser la puissance envoyée vers l'UE et minimiser les interférences avec les autres UEs ;
- l'application de la technologie MIMO avec précodage adéquat des données. Grâce à un traitement du signal approprié, cette technique MIMO revient, comme nous l'avons déjà expliqué, à réaliser des canaux indépendants les uns des autres sur lesquels des informations différentes peuvent être transmises pendant le même intervalle temporel, augmentant ainsi la capacité du canal.

Le choix entre ces diverses techniques, dont certaines d'entre elles peuvent d'ailleurs cohabiter, dépend de nombreux facteurs comme la densité d'utilisateurs, les caractéristiques de l'environnement, les quantités d'informations à transmettre, etc. Divers enregistrements temporels des signaux émis illustrent l'article de Franci.

4.2.4.2 Affectation temporelle des blocs d'information transmis

Des interrogations sont parfois soulevées sur l'évolution de l'allure ou de la forme des signaux, du GSM à la 5G, et notamment de ses aspects transitoires ou non, pouvant éventuellement jouer un rôle du point de vue sanitaire. Pour illustrer ces notions, on se focalisera sur 4 exemples : le GSM (2G), la 4G, la 5G avec « *refarming* » sur la 4G, et la 5G à 3,5 GHz.

4.2.4.2.1 *Mode GSM*

En GSM (*Global System for Mobile*, technologie 2G), et dans la phase initiale d'implantation des réseaux 2G autour d'une fréquence centrale de 900 MHz, 2 bandes de fréquences ayant chacune une largeur de 25 MHz sont affectées respectivement aux liens montants et descendants, le duplexage étant en FDD.

Chaque bande est divisée en 124 sous-bandes, correspondant à 124 canaux de transmission possibles, ayant donc chacun une largeur d'environ 200 kHz.

Comme le montre la Figure 16, le temps est divisé, pour chaque canal, en paquets successifs de 8 créneaux, chacun d'eux étant affecté à un utilisateur.

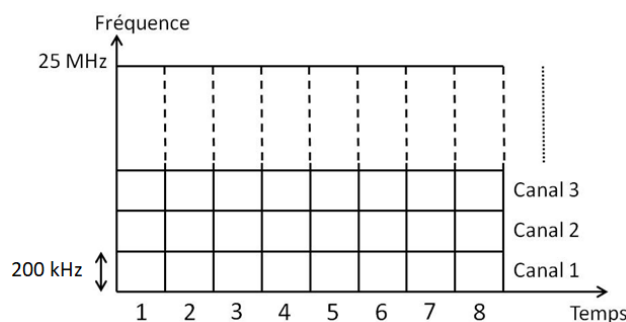


Figure 16 : Allocation des différents canaux et partages dans le domaine temporel

Envisageons par exemple le canal 1 qui servira de base pour communiquer avec 8 UE. En liaison descendante, la BS émet successivement les données pour l'UE1, puis pour l'UE2, jusqu'à l'UE8, et recommence ensuite les envois avec la même périodicité. Comme l'illustre la Figure 17, la BS illumine en GSM toute la cellule à couvrir. L'UE1 recevra donc le message (signal modulé) qui lui est destiné mais aussi, au fur et à mesure du temps, les messages à destination des autres UE. D'un point de vue télécommunication, l'UE1 ne retiendra que le sien. Par contre, en matière d'exposition, l'UE1 (comme les autres UE) sera soumis à un signal pratiquement « continu », formé d'une suite de signaux modulés.

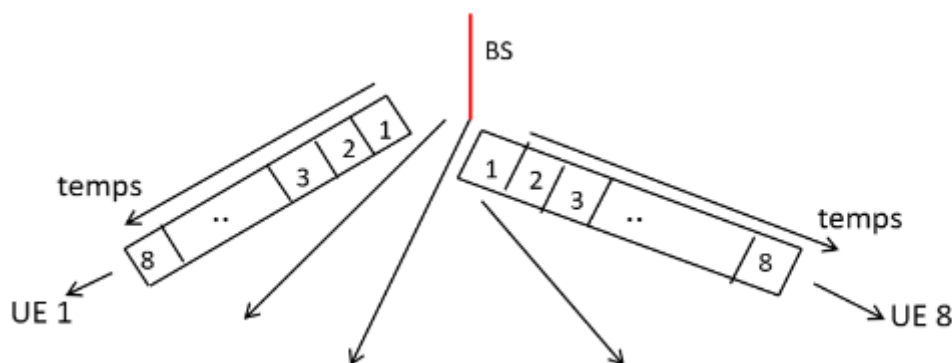


Figure 17 : Envoi des données depuis la BS (Liaison descendante)

En liaison montante, la configuration est différente puisque les 8 UE doivent émettre dans le même canal. Pour qu'il n'y ait pas de collision de messages, les UE vont transmettre successivement leurs données (cf. Figure 18).

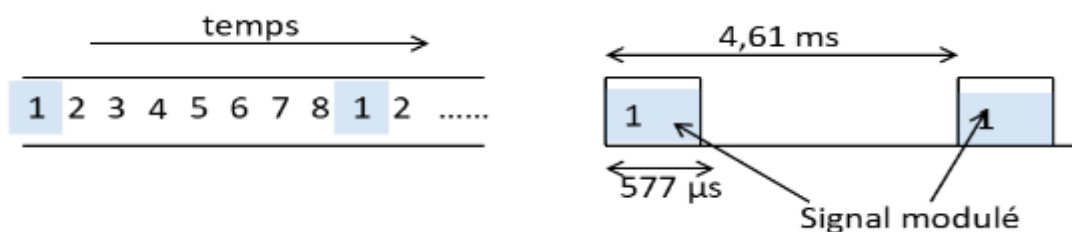


Figure 18 : Envoi des données depuis le mobile UE1

Pour le GSM, toutes les structures de trames sont parfaitement définies. Chaque UE, donc l'UE1 en particulier, enverra des « paquets de données modulées » successifs, chacun ayant une durée de 577 µs et avec une périodicité de 4,61 ms, correspondant à une fréquence

d'envoi de 217 Hz. La durée totale de ces émissions « intermittentes » dépend évidemment de la quantité d'information à transmettre.

4.2.4.2.2 Mode 4G (FDD)

Le principe d'affectation temporelle des différents liens est différent de celui du GSM, avec une souplesse de mise en œuvre beaucoup plus importante, grâce, entre autres, à une grande bande de fréquences disponibles et surtout à la modulation OFDM. Si on considère la liaison montante (sachant que la même approche s'applique à la liaison descendante), la bande de fréquence totale et les intervalles de temps sont divisés en un certain nombre de « blocs de ressources » (*Resource bloc RB*). La taille d'un RB dans le domaine fréquentiel est de 12 sous-porteuses de 15 kHz, soit 180 kHz, et de 0,5 ms dans le domaine temporel, correspondant à la durée de 7 symboles OFDM successifs.

Un certain nombre de RB dans cet espace temps-fréquence sera affecté à chaque UE, mais c'est le processus de gestion au niveau de la BS qui décide de cette attribution au fil du temps. Un exemple extrêmement simplifié, vu le nombre restreint de RB dessinés, est donné sur la Figure 19.

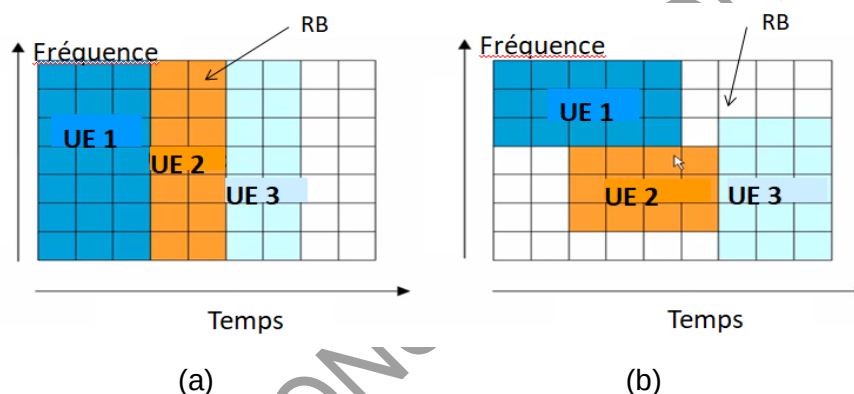


Figure 19 : Illustration d'affectation de RBs à 3 utilisateurs

un RB est schématisé par un carré élémentaire

Sur la Figure 19 (a), les 3 UE transmettent dans la même bande de fréquence mais à des instants différents tandis que, pour la Figure 19 (b), la répartition temps-fréquence choisie par la BS est totalement différente. Pour donner une brève explication, si le canal de propagation pour l'UE1 devient meilleur pour les fréquences « élevées » dans ce dessin, la BS lui affectera des RB dans cette bande (Figure 19 (b)). Si, dans un autre cas, le flux de données de l'UE1 est important et doit être transmis rapidement, la BS lui affectera une grande bande de fréquence, donc beaucoup de blocs suivant l'axe vertical, mais éventuellement sur un temps plus réduit (Figure 19 (a)). Avec cette approche, on remarque que la notion de paquets de données envoyés de façon intermittente mais avec une périodicité parfaitement définie comme en GSM, ne s'applique plus. Au sein de chaque RB, la forme d'onde est celle représentée sur la Figure 11, transposée autour de la fréquence porteuse. Il faut également souligner que, dans ces liaisons FDD, il n'y a plus d'intervalle de temps prédéfini dans lequel une émission ou une réception doit avoir lieu, puisque les liaisons montantes et descendantes sont simultanées.

4.2.4.2.3 Mode 5G mais avec réutilisation des infrastructures 4G existantes, dite « refarming »

Un des paramètres principaux de l'OFDM est la largeur de bande de chaque sous-porteuse. Pour la 4G, elle a été fixée à 15 kHz. En 5G, pour les fréquences inférieures à 6 GHz, cette valeur peut être choisie égale à 15, 30 ou 60 kHz. Il en résulte diverses tailles possibles des RB dans l'espace temps-fréquence, mais le concept général décrit pour la 4G reste le même. En « refarming », le mode duplex étant le FDD comme en 4G, la conclusion précédente sur les « paquets de données » reste valable.

4.2.4.2.4 Mode 5G à 3,5 GHz (NSA ou SA).

Dans ce mode de fonctionnement de la 5G, le duplex se fait en TDD. Il est donc nécessaire de découper le temps en différents intervalles, appelés « slots », réservés soit aux liaisons montantes, notées U (pour « Uplink »), soit aux liaisons descendantes, notées D (pour « Downlink »). La durée d'un slot est identique à celle d'un RB. Pour la 4G, comme indiqué précédemment, cette durée est fixe, égale à 500 µs. Par contre, pour la 5G, elle peut être choisie entre ces différentes valeurs : 1 ms, 500 µs, 250 µs, voire 125 µs. Durant une trame, une série de slots D et U seront répartis. Si le trafic descendant est beaucoup plus important que le trafic montant, ce qui est souvent le cas, le nombre de slots D sera privilégié pour augmenter la durée de transmission dans ce sens. Un grand nombre de combinaisons est cependant possible suivant le trafic et les applications, comme par exemple : DDSU, DDDDDDDDSUU. On remarque qu'entre le dernier slot D consacré au lien descendant et le slot U du lien montant, un slot noté « S » est introduit. C'est un slot intermédiaire pour prendre en compte le temps de basculement nécessaire à l'UE pour passer de la réception à l'émission, mais surtout les temps de propagation entre BS et UE. Le rapport entre les temps alloués respectivement au lien descendant et au lien montant est de $\frac{3}{4}$, soit 75 %, ou de 8/10, soit 80 %, pour les 2 exemples précédents. Certains slots peuvent éventuellement être inoccupés par les données, dans le cas d'un trafic très faible. Suivant les usages, ce rapport peut être modifié pour favoriser davantage un lien ou un autre. Au sein de chaque slot, les RB sont affectés par la BS à différents utilisateurs comme en 4G (cf. Figure 19).

Les instants pendant lesquels un UE émet ou reçoit ne sont donc pas définis de manière fixe, car ils dépendent de la densité du trafic, de l'usage, de la quantité d'informations à transmettre, de la qualité de la liaison, etc. Enfin, en liaison descendante, un degré de liberté supplémentaire existe compte tenu de la focalisation possible vers les UE. Les données à transmettre sont ainsi réparties dans un ensemble à 3 dimensions : espace, temps, fréquence. Il est difficile dans ce cas d'introduire la notion de signaux envoyés de façon intermittente mais parfaitement périodique¹⁰⁶.

Une étude statistique de la répartition des intervalles d'émission et de réception pour un UE donné pourrait éventuellement être réalisée à partir de mesures faites sur un réseau opérationnel. Cependant, celles-ci devraient être réalisées en très grand nombre, compte tenu de l'ensemble des paramètres, comme notamment l'usage, jouant un rôle dans cette répartition.

Dans le chapitre suivant, après avoir présenté quelques aspects liés à l'exposition à des sources d'émission proches du corps, comme c'est le cas pour les téléphones mobiles, les résultats issus de l'analyse bibliographique sur les champs rayonnés par les stations de base

¹⁰⁶ En France, l'ARCEP a pris une décision fixant un format de trame harmonisée pour assurer la synchronisation des réseaux terrestres dans la bande 3,4 – 3,8 GHz. Décision n° 2019 0862.

seront résumés. Il faut cependant noter dès à présent que, compte tenu de l'état actuel du développement de la 5G, le nombre d'articles ou de rapports décrivant avec finesse des résultats de mesure est très limité.

4.3 Évaluation du niveau d'exposition dans les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz

4.3.1 Considérations sur l'exposition aux sources proches (téléphones mobiles)

L'optimisation des structures rayonnantes (antennes) 5G et de l'électronique radiofréquence associée est un enjeu important pour la conception des téléphones mobiles, compte tenu du nombre d'antennes devant y être intégrées pour couvrir une grande bande de fréquences, même si des antennes planaires large bande ont été développées au fil des années. Il faut en effet que les liaisons Wi-Fi, *Bluetooth*, 2G à 5G puissent être assurées. De plus, pour exploiter au mieux les techniques MIMO, l'antenne 5G du portable, comme celle de la 4G, doit comporter au moins 2 éléments rayonnants. L'exposition des personnes aux ondes électromagnétiques rayonnées par toutes ces antennes est encadrée réglementairement. En particulier, le débit d'absorption spécifique (DAS) propre à chaque modèle de téléphone doit être inférieur aux valeurs limites réglementaires, dans des conditions de mesure normalisées pour les usages proches de la tête, du tronc et des membres. Le DAS maximal est de 2 W/kg pour la tête et le tronc et de 4 W/kg pour les membres (cf. paragraphe 4.1.3).

Les travaux menés sur l'exposition aux téléphones mobiles par de nombreuses équipes de recherche, notamment universitaires, que ce soit pour la 4G ou la 5G, ont notamment porté sur la définition de différentes structures d'antennes pour minimiser le DAS et assurer le maximum de rayonnement de l'antenne vers l'espace libre. Les modélisations numériques tridimensionnelles permettent le calcul du DAS en tout point du corps proche de la source en fonction de la position du téléphone et de son orientation. Pour une configuration MIMO, le DAS est calculé pour toutes les combinaisons de phase des signaux alimentant les différentes antennes de manière à évaluer le pire cas et vérifier que ce DAS reste inférieur aux valeurs limites applicables.

Comme pour la 4G, il sera intéressant de comparer le DAS des différents téléphones mobiles 5G lorsqu'un nombre suffisant d'entre eux seront mis sur le marché. De plus, quand le réseau 5G sera pleinement opérationnel, des mesures *in-situ* permettront d'évaluer la variation de l'exposition en fonction du type de cellule, micro ou macro¹⁰⁷, et de l'usage comme la voix ou l'échange de données. Cet aspect a été traité pour la 4G, par exemple par Mazloun (Mazloun *et al.*, 2019).

¹⁰⁷ À titre d'ordre de grandeur, une micro cellule en milieu urbain couvre une zone inférieure à 500 m autour de la BS et une macro cellule au-delà de cette distance. Cependant, il n'y a pas de définition précise des tailles de cellules car cela dépend fortement du type d'environnement (dense, semi-rural ou rural par exemple).

4.3.2 Principes généraux de la mesure de l'exposition aux stations de base

En présence de plusieurs sources de rayonnement, qui peuvent s'étendre par exemple de la radio FM à la 5G, deux approches sont possibles pour évaluer le niveau d'exposition correspondant.

1^{re} procédure : mesure du champ électrique total

Le champ électrique total E_{total} est mesuré directement grâce à un capteur associé à un « exposimètre » très large bande, l'ensemble couvrant donc toute la bande de fréquences dans laquelle se situent les sources d'émission, par exemple entre 700 MHz et 2,4 GHz. Dans certains documents et notamment dans le protocole édité par l'ANFR, ce type de mesure est dénoté « cas A¹⁰⁸ ».

2^{de} procédure : évaluation détaillée de l'exposition

Dans cette approche, dite « cas B », on mesure séparément les champs E_i dans les différentes bandes d'émission associées aux « services », comme par exemple le champ E_1 dû à la FM, puis E_2 dû à la 2G autour de sa fréquence porteuse, etc. La bande passante de l'appareil de mesure est ajustée successivement pour correspondre à la bande utilisée par chacun de ces services. Si on souhaite obtenir la puissance totale due à l'ensemble des bandes émises, on somme les puissances reçues et donc le carré des champs mesurés :

$$(E_{total})^2 = (E_1)^2 + (E_2)^2 + (E_3)^2 + \dots \quad (1)$$

Cette procédure de mesure permet tout d'abord de vérifier qu'une émission particulière ne dépasse pas la valeur maximale autorisée $E_{l,i}$, valeur qui dépend de la fréquence comme le montre la Figure 20.

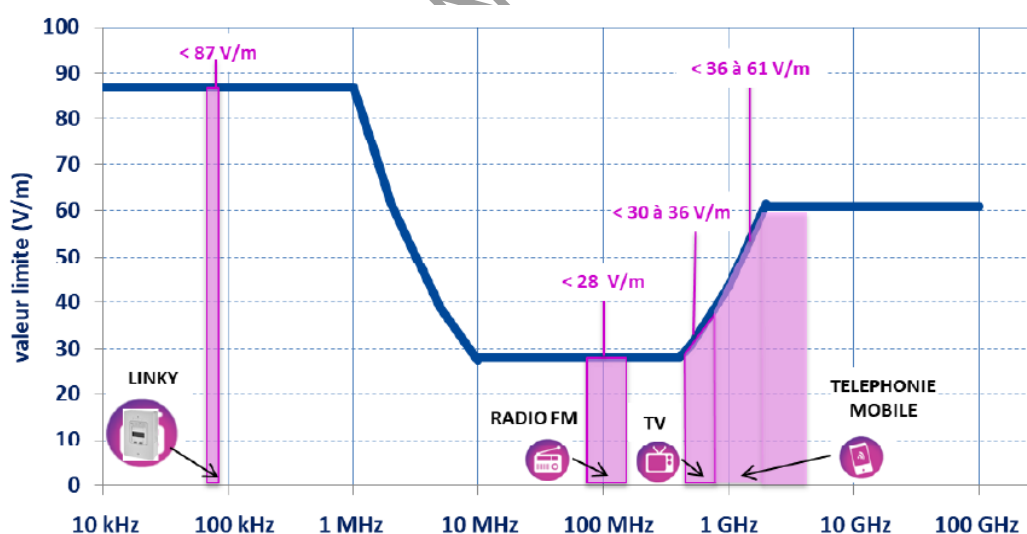


Figure 20 : Valeurs limites d'exposition réglementaires en France - décret n° 2002-775 du 3 mai 2002¹⁰⁹

De plus, pour assurer la conformité aux valeurs limites réglementaires, pour les fréquences d'émission supérieures à 100 kHz, il faut également s'assurer que l'inégalité (2), fondée sur la somme des puissances normalisées, soit vérifiée¹¹⁰.

¹⁰⁸ ANFR, Protocole de mesures, DR 15-4.1, Oct. 2019.

¹⁰⁹ Figure extraite du rapport ANFR Etude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques (Mai 2020).

¹¹⁰ <https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/Protocole-mesure-15-4.1.pdf>.

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

avec $c = 87/\sqrt{f_i}$, la fréquence f_i étant exprimée en MHz, la quantité c ayant comme unité le V/m.

Comme précisé dans le protocole de mesure de l'ANFR, cette évaluation détaillée de l'exposition doit être menée notamment si le résultat d'une mesure directe large bande est supérieur ou égal à 6 V/m, cette valeur ayant été choisie car elle dépasse substantiellement le niveau de champ moyen observé à l'échelle nationale française (de l'ordre de 0,8 V/m). Le point de mesure correspondant est appelé « *atypique* » par l'ANFR.

4.3.3 Mesures régulières de l'exposition due aux stations de base en France

En des points particuliers, choisis en extérieur ou à l'intérieur des bâtiments, la mesure en point fixe permet de réaliser des enregistrements sur des périodes de 6 minutes. À l'échelle nationale, de telles mesures sont effectuées par l'ANFR, et les résultats sont publiés sur un site internet¹¹¹. Le site *Cartoradio*, accessible aussi en version mobile, permet en particulier « d'identifier l'emplacement d'antennes radioélectriques, d'obtenir des informations sur les services qu'elles portent, et de connaître, pour des emplacements donnés, des résultats de mesures de champ électromagnétiques synthétisés dans une fiche de mesures ».

Avec l'arrivée de la 5G, il est important de connaître l'impact de celle-ci sur le champ total en fonction de son déploiement, mais surtout en fonction de l'évolution du nombre de téléphones mobiles connectés en 5G. Fin 2020, l'ANFR a ainsi mis en place dans les villes de Bordeaux, Marseille, Nantes et Paris un dispositif de mesure grâce à des capteurs implantés dans des lieux très fréquentés, en hauteur, placés à environ 100 m d'antennes 5G non encore activées. Ce dispositif sera étendu à d'autres villes. Les capteurs large bande mesurent, une dizaine de fois par jour, le niveau de champ électrique total dans une bande s'étendant de 80 MHz à 6 GHz, incluant donc la radio FM, le Wi-Fi et toutes les technologies de téléphonie mobile.

Les résultats de mesure en temps réel sont disponibles depuis fin décembre 2020 sur le site de l'ANFR¹¹². Un exemple est donné sur la Figure 21.

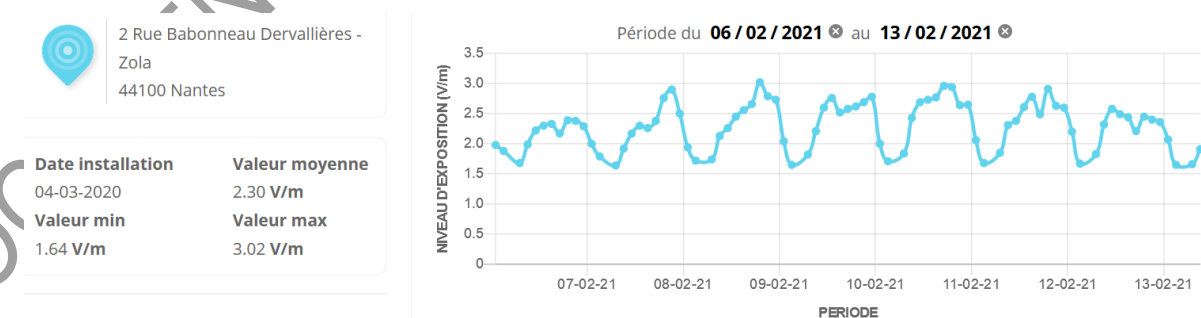


Figure 21 : Exemple d'enregistrement du champ total mesuré en un point fixe de Nantes

¹¹¹ <https://www.cartoradio.fr>.

¹¹² <https://www.anfr.fr/contrôle-des-frequences/exposition-du-public-aux-ondes/la-mesure-de-champ/observatoire-des-ondes/>.

4.3.4 Mesures de l'exposition due aux stations de base sur des réseaux 5G opérationnels (Royaume-Uni et Corée du sud) ou en cours de déploiement (France)

4.3.4.1 Mesures effectuées au Royaume-Uni

Des mesures ont été effectuées par l'organisme régulateur des services de télécommunications du Royaume-Uni (*Office of Communications* – Ofcom) sur 22 sites du pays, et notamment à Londres, Belfast et Cardiff. L'objectif était d'évaluer le niveau d'exposition au voisinage des BS, un résumé succinct en a été publié (OFCOM, 2020). Les zones sélectionnées sont celles où on peut s'attendre à un usage important de la téléphonie mobile, comme des *hubs* de transport ou des centres commerciaux. Dans ces zones, la 5G est en cours de développement et coexiste avec les réseaux 2G, 3G et 4G.

Les relevés ont été faits dans l'intervalle de fréquences 420 MHz – 6 GHz, grâce à un mesureur de champ connecté à une sonde omnidirectionnelle placée à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol, la technique de mesure étant indiquée dans le rapport de l'Ofcom (OFCOM, 2020). À partir de ces relevés, moyennés sur une période de 6 minutes, en accord avec les recommandations de l'Icnirp (Icnirp, 1998), le champ électrique moyen a été calculé, soit pour chacune des sources potentielles de rayonnement, soit sur toute la largeur de bande. Il faut noter qu'une seule période de 6 minutes a été envisagée, ce qui ne permet évidemment pas de connaître l'évolution de l'exposition au cours du temps, comme une journée.

Les résultats mentionnés dans ce rapport indiquent que la contribution principale à l'exposition du public provient de l'ensemble des réseaux des générations précédentes. L'exposition due à la totalité des émetteurs ne dépasse pas 1,5 % des valeurs limites recommandées par l'Icnirp (10 W/m²). Si on envisage la bande 5G seule, ce niveau maximum relatif n'est plus que de 0,04 %.

Il faut noter que ce rapport de mesures ne donne pas d'information sur le nombre possible d'UE dans ces zones, ni sur les caractéristiques des BS 5G. Il est indiqué que les mesures ont été faites « au voisinage » de BS, mais sans autre précision sur l'intervalle de distance entre les points de mesure et ces BS. Les valeurs qui viennent d'être mentionnées ne peuvent donc donner qu'un ordre de grandeur des champs moyens dans une zone urbaine, et uniquement en l'état actuel de déploiement de la 5G. Lorsque celui-ci aura été mené à son terme, l'Ofcom prévoit d'effectuer d'autres mesures afin d'obtenir une meilleure représentativité des résultats.

4.3.4.2 Mesures effectuées en Corée du sud

Début avril 2019, les trois opérateurs historiques KT, SKT et LGU+ ont activé leur réseau 5G en Corée du sud. Afin d'avoir une vue d'ensemble de l'exposition en ville et en zone rurale, des campagnes de mesures ont été effectuées par la société Cetim, à la demande de l'Ineris¹¹³ (Institut national de l'environnement industriel et des risques), suite à une consultation préalable de l'ANFR pour mettre au point les méthodes de mesure. Les valeurs de champ mesurées et toutes les informations qui sont indiquées ci-dessous sont extraites du rapport Cetim (Cetim, 2019).

Les fréquences d'émission de la 5G sont comprises entre 3,42 et 3,70 GHz et la bande passante allouée aux opérateurs est de 100 MHz, sauf pour LGU+, cette bande étant de

¹¹³ le Ministère de la transition écologique et solidaire a commandé à l'Ineris une étude visant à caractériser l'exposition des personnes aux rayonnements émis par les nouveaux réseaux 5G, dans un contexte d'exploitation commerciale déjà effective.

80 MHz. Le nombre de stations KT 5G déployées sur tout le territoire est de 38 999 dont 9 878 à Seoul (hors agglomération) à la date du rapport.

Des campagnes de mesures, notamment à Séoul et à Naji, ont été menées dans divers types d'environnement :

- une zone commerciale urbaine dense, comprenant entre autres une zone d'affaires et une partie souterraine ;
- une zone urbaine avec un quartier commercial, un parc et une zone résidentielle ;
- une zone rurale avec des parties commerciales, administratives et résidentielles.

De plus, d'autres enregistrements ont été effectués soit sur des voies urbaines, le trajet couvrant dans ce cas l'ensemble du centre de l'agglomération de Séoul, soit sur une voie extra urbaine, reliant le centre de Séoul à l'aéroport.

En se déplaçant au sein de ces diverses zones, les enregistrements ont été effectués durant environ 2 h, la fréquence d'échantillonnage étant de 1 point toutes les 3 ou 5 s. À cette fin, 2 exposimètres couvrant la bande 88 MHz – 5 GHz ont été utilisés et programmés pour différencier les types d'émission et mesurer le champ moyen reçu dû à chacun d'eux, de la modulation de fréquence (FM) à la 5G. Les résultats ci-dessous ont été obtenus avec l'exposimètre « *Fields at Work / ExpoM-RF* ». Le Tableau 14 résume les niveaux mesurés soit sur la 5G seule dans la bande 3,4 – 3,6 GHz, soit sur l'ensemble de la bande de fréquences prenant en compte la totalité des services : GSM, UMTS, LTE, 5G, etc. (« Niveau moyen global »). Rappelons que les niveaux maximums de champ précisés par l'Icnirp pour l'ensemble des bandes sont indiqués sur la Figure 20, ce niveau étant de 61 V/m pour la bande 3,4 – 3,6 GHz.

Tableau 14 : Valeur des champs électriques obtenus dans différentes zones ou sur les trajets concernés

	Niveau moyen 5G (V/m)	Niveau moyen global (V/m)	Niveau maximum 5G (V/m)
Zone urbaine dense	0,14	1,8	2,1
Zone urbaine	0,02	0,5	0,3
Zone rurale	0,02	0,3	0,8
Trajet urbain	0,05	0,8	1,5
Trajet extra urbain	0,02	0,3	0,5

Les zones sont définies suivant la surface bâtie et non suivant la densité de population. Source : Rapport Cetim.

Le rapport du Cetim fournit également des résultats concernant la répartition des champs mesurés en fonction des services, qui montrent que la contribution de la 5G à l'exposition totale est loin d'être majoritaire. Signalons enfin que d'autres enregistrements ont été menés sur des lignes ferroviaires ou sur des trajets en voiture et en bus. Les résultats sont du même ordre de grandeur que ceux décrits précédemment.

Il faut cependant souligner que ces résultats ne donnent qu'un ordre de grandeur des champs mesurés dans les diverses zones et ne sont pas extrapolables à d'autres sites. En effet, la puissance des émetteurs, leurs distributions, les distances relatives entre les différentes BS et les points de mesure sur le trajet suivi par le système d'enregistrement, ne sont pas précisées. De plus, le niveau moyen 5G s'avère très nettement inférieur à celui dû à la 4G et au GSM,

mais aucun commentaire ni explication, basée par exemple sur une comparaison entre les densités de trafic en 4G et en 5G, ne figurent dans le rapport.

4.3.4.3 Mesures sur des sites 5G non encore pleinement opérationnels en France

Dans le cadre des expérimentations pilotes pour le déploiement de la 5G autorisées par l'Autorité de régulation des communications et des Postes, des mesures d'exposition ont été réalisées par l'Agence nationale des fréquences (ANFR 2019b, ANFR 2020c) sur un certain nombre de sites radioélectriques avec divers opérateurs, constructeurs, et types d'antennes. Elles ont été menées dans les villes de Pau, Marseille, Lille, Douai, Bordeaux, Lyon, Nantes, Rouen, Saint-Ouen et Toulouse et dans lesquelles Orange, Bouygues Telecom et SFR effectuent les premiers déploiements pilotes dans la bande 3,4 GHz – 3,8 GHz. Les réseaux d'antennes des BS permettent souvent de réaliser 64 antennes en émission (T) et 64 en réception (R), et sont notés 64T64R. Quelques réseaux 32T32R et un seul 8T8R ont aussi été déployés.

Dans tous les cas, les niveaux de champ ont été évalués en valeur moyenne sur 6 minutes.

On envisagera successivement les configurations suivantes :

- configuration sans trafic ;
- configuration avec trafic continu dans un faisceau bloqué ;
- configuration de transfert de fichiers dans une direction donnée.

Les résultats mentionnés ci-dessous sont extraits du rapport ANFR (ANFR 2020c)¹¹⁴.

4.3.4.3.1 *Configuration sans trafic*

Il faut d'abord noter qu'avant la mise en route des antennes 5G, aucune émission dans la bande n'a été détectée : les niveaux ont en effet été mesurés à moins de 0,01 V/m, bien inférieurs à 0,05 V/m, seuil fixé dans le protocole de l'ANFR pour définir une émission significative.

Après mise en route mais sans trafic, les seuls signaux émis durant cette phase de « signalisation » correspondent aux blocs SSB envoyés périodiquement par la BS, ainsi que quelques signaux de référence. Le nombre de faisceaux générés par la BS dans cette phase préliminaire est compris entre 1 et 8, ce nombre étant variable suivant les opérateurs et les sites. Le balayage total de la zone de couverture s'effectue en moins de 2 ms et avec une périodicité de 20 ms.

Le niveau moyen de champ électrique mesuré sur 6 minutes, à des distances variant de 35 m à 200 m de la BS sur les 100 MHz de bande de fréquences des émetteurs, se situe entre 0,01 V/m et 0,6 V/m suivant les sites.

¹¹⁴ ANFR, 2020c. "Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 2 : premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 3400-3800 MHz." *Rapport ANFR disponible en ligne*

4.3.4.3.2 Configuration avec trafic continu dans un faisceau bloqué

Au moment des tests, les BS 5G n'étant pas ouvertes aux abonnés des opérateurs, le trafic a été généré grâce à l'utilisation d'un mode test de la BS et, notamment, d'un équipement mobile de test en réception (CPE pour *Customer Premises Equipment*).

Dans cette première configuration, la BS envoie un flux de données constant et de façon continue, dans une direction donnée où les mesures de champ sont effectuées. Soulignons que, pour un réseau 5G opérationnel, la probabilité d'occurrence de cette configuration est très faible car cela supposerait que toutes les ressources temps-fréquence de la BS soient utilisées en continu pour un lien descendant à débit maximum dans un seul faisceau. Ceci implique qu'il n'y ait, sur toute la zone couverte par la BS, qu'un seul utilisateur, ou qu'un groupe d'utilisateurs suffisamment près les uns des autres pour que la BS ne puisse utiliser des faisceaux différents pour communiquer avec chacun d'eux.

La liaison étant en mode TDD, il y a des intervalles de temps prévus pour la liaison montante, même si ceux-ci ne sont pas utilisés, et donc durant lesquels aucun signal n'est envoyé par la BS. Dans les différentes configurations qui ont fait l'objet de test, environ $\frac{1}{4}$ du temps est réservé pour ces liaisons.

- Champ au voisinage immédiat du terminal de réception

Sur l'ensemble des sites considérés, sauf pour une configuration où le terminal CPE était à l'intérieur d'un bâtiment, les mesures du champ électromagnétique réalisées par l'ANFR ont été menées en extérieur, à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol, la BS étant située en visibilité directe du récepteur. Tous les détails précisant la configuration géométrique des essais sont donnés dans (ANFR 2020c). À titre indicatif, mentionnons que les antennes des BS se situent à des hauteurs comprises entre 8 m et 45 m, la distance entre le CPE et la BS étant, dans la plupart des cas, de l'ordre de 120 m.

Pour les mesures ponctuelles qui ont été effectuées, les niveaux de champ électrique mesurés en extérieur et à proximité du CPE et sur différents sites sont compris entre 6 V/m et 9 V/m, pour une transmission sur 100 MHz de largeur de bande et une puissance maximale injectée dans l'ensemble des antennes d'un réseau de l'ordre de 200 W. Pour déterminer la puissance émise dans une direction particulière, il faut multiplier la puissance par le gain du réseau dans cette direction. Sur un site particulier, des niveaux plus faibles ont été obtenus et cela peut s'expliquer par les caractéristiques du faisceau de trafic, comme le gain du réseau, et dont la gestion est au libre choix de l'opérateur.

- Variation du champ autour du CPE

Le terminal CPE étant fixe, le champ a été mesuré à différentes distances de celui-ci. Des fluctuations locales du champ sont observées, dues à des réflexions sur le sol ou sur des bâtiments proches. De façon générale, le champ diminue évidemment si on s'écarte du terminal CPE sur lequel la puissance est focalisée, mais l'allure de cette décroissance qui traduit la « tache au sol » dépend fortement de l'environnement et des caractéristiques du faisceau de trafic.

- Configuration avec transfert de fichier dans une direction donnée

Dans cette configuration, le CPE ou le modem de réception déclenche un téléchargement de fichiers dont les tailles peuvent varier entre 150 Mo et 10 Go. Les essais ont été effectués sur 3 sites. À titre d'exemple, le niveau de champ moyenné sur 6 minutes à proximité du CPE de réception et lors de la réception d'un fichier unique de 1 Go est de 1,1 V/m. Le temps de chargement de ce fichier est de 15 s, ce qui correspond à un débit moyen du lien descendant

de 530 Mbits/s. Durant les 345 s restantes, aucun signal de données n'est donc envoyé par la BS.

Si on extrapolait ce résultat à un téléchargement continu, on trouverait une valeur de champ électrique estimée sur 6 minutes à 5,4 V/m. Cette dernière valeur est proche de celle qui avait été mesurée sur ce site, égale à 6,5 V/m, dans la configuration avec trafic continu dans un faisceau bloqué.

4.3.5 Introduction à la notion d'indicateur d'exposition

L'utilisation de réseaux mMIMO pour la 5G mène à une importante fluctuation spatiale et temporelle des signaux reçus en tout point de l'espace. Il en résulte que les articles ou rapports traitant des niveaux d'exposition due aux BS présentent une grande diversité dans leurs approches suivant l'objectif recherché. Comme on l'a vu précédemment, le niveau d'exposition peut correspondre, par exemple, à la valeur moyenne du champ électrique ou à sa valeur maximum lorsque le dispositif de mesure se déplace dans diverses zones d'une ville.

Lors des phases d'essai d'une BS avant son intégration au réseau, le niveau d'exposition peut aussi être mesuré, comme décrit dans le paragraphe précédent, dans le cas le plus critique menant à une valeur maximum de l'exposition, et correspondant à la configuration d'un seul utilisateur ou de plusieurs utilisateurs très proches, situé(s) en visibilité directe de la BS, toutes les ressources fréquentielles et temporelles de cette BS étant affectées à un faisceau unique. On aboutit ainsi à un indicateur déterministe associé à la mesure du champ dans une configuration extrême de « pire cas » qui a été notamment soulignée par Pawlak *et al.*, (Pawlak 2019) et Foster *et al.*, (Foster 2019).

Pour estimer l'exposition dans la situation où de nombreux utilisateurs sont connectés à la BS, et donc pour mieux caractériser les fluctuations des puissances reçues, des approches statistiques sont plus appropriées. Ces deux approches définissent deux « indicateurs d'exposition » différents, qui représentent chacun deux « réalités » de l'exposition.

Une première possibilité pour définir un indicateur approprié à la complexité des situations d'exposition engendrées par la technologie 5G est de s'appuyer, par exemple, sur l'usage prévisible de la 5G exprimé en taille de fichiers qui seraient téléchargés dans un faisceau de trafic. Cette approche, initiée par l'ANFR, sera d'abord décrite. D'autres, proposées pour la 4G et transposées pour la 5G, seront ensuite indiquées. Elles se fondent soit sur des modélisations statistiques faisant intervenir des paramètres adéquats, soit sur les fonctions de distribution des amplitudes de champ mesurées dans une zone géographique et sur une période de temps données. Ces fonctions de distribution permettent de déduire l'exposition correspondant à un percentile donné, par exemple le 95^e. Rappelons que la valeur au 95^e percentile signifie que dans 95 % des cas, le champ est inférieur à cette valeur.

4.3.6 Indicateur d'exposition fondé sur une taille estimée des fichiers à transmettre

4.3.6.1 Principe de calcul de l'indicateur proposé par l'ANFR et exemple d'application

L'indicateur proposé par l'ANFR se fonde sur un usage prévisible de la 5G qui correspondrait, pour la liaison descendante, à un envoi descendant de données de 1 Go sur une fenêtre temporelle totale de 6 minutes, dans un faisceau de trafic donné. Comme cet envoi peut s'effectuer en 15 s pour un débit moyen du lien descendant de 530 Mbits/s, la puissance

moyenne reçue dans le faisceau pendant cette fenêtre de 6 minutes est diminuée d'un facteur 22,5 (13,5 dB) par rapport au cas d'une émission permanente pendant les 6 minutes. Cela mène à un facteur de réduction de 4,7 sur l'amplitude moyenne du champ électromagnétique, la puissance étant proportionnelle au carré de ce champ.

Afin d'évaluer si cette hypothèse de taille de fichiers est représentative des usages actuels, une couverture de la zone à l'aide de 8 faisceaux est envisagée, soit un envoi par la BS de 8 Go sur une fenêtre temporelle totale de 6 minutes. Cela suppose que les utilisateurs sont, en moyenne, répartis sur toute la zone et que les flux de données à transmettre depuis la BS dans chacun des faisceaux sont de tailles voisines.

En se basant sur le nombre de cartes SIM 4G et du nombre de sites 4G sur l'étendue du territoire, l'ANFR estime, en moyenne, qu'il y a 1 000 utilisateurs, professionnels ou privés, par site. L'ANFR indique que les hypothèses précédentes mèneraient à une consommation mensuelle par utilisateur de la 5G de 28 Go par mois. Cette valeur pourrait être comparée à la consommation moyenne pour l'ensemble des mobiles 4G, qui est de 7 Go par mois, ce qui laisse donc une marge, selon l'ANFR. Il faut cependant souligner que ces niveaux de consommation évolueront certainement compte tenu des nouveaux usages qui apparaîtront au fur et à mesure du développement de la 5G, et ne représentent que des moyennes de consommations. Un suivi continu des valeurs d'exposition s'avère donc nécessaire, une première approche proposée par l'ANFR ayant été présentée dans le paragraphe 4.3.3.

Le facteur de réduction de 13,5 dB mentionné précédemment, qui pourra donc évoluer en fonction des statistiques liées au nombre de terminaux et aux nouveaux usages de la 5G, s'applique sur la valeur du champ qui pourrait être reçu sur une période de 6 minutes dans la configuration de « pire cas » et qui est déduit, soit de mesures, soit de simulations. Rappelons que cette valeur de champ électrique est celle correspondant au cas où la BS utilise toutes ses ressources spatio-temporelles pour focaliser la puissance maximum disponible dans un seul faisceau, comme décrit dans les paragraphes précédents. En pratique, ceci suppose que la BS n'assure donc aucun autre trafic dans la zone qu'elle couvre. De plus, dans cette hypothèse de pire cas, le transfert de données se faisant de façon continue pendant 6 minutes et avec un débit moyen de 530 Mb/s, la taille des fichiers téléchargés via ce faisceau dépasserait 20 Go.

Un premier exemple, donné dans le rapport ANFR (ANFR 2020c), porte sur le niveau de champ électrique, moyenné sur 6 minutes, mesuré à 100 m d'une station de base et à l'intérieur d'un bâtiment, mais juste derrière une fenêtre. Une comparaison fenêtre ouverte – fenêtre fermée montre que l'atténuation due au vitrage est de 2 dB, cette valeur pouvant cependant être beaucoup plus élevée suivant le type de vitrage (athermique par exemple), la fréquence et l'angle d'incidence du rayonnement avec celui-ci. En tenant compte notamment du facteur de réduction de 13,5 dB mentionné précédemment et pour un gain d'antenne de 24 dBi, l'indicateur d'exposition pour cette liaison 5G prendrait une valeur de 1,1 V/m et de 1,8 V/m, respectivement pour une puissance d'émission de 80 W et de 200 W.

Cette méthode de calcul d'un indicateur d'exposition a été intégrée dans les « Lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques » éditées par l'ANFR (ANFR 2019c). Il faut cependant souligner que les paramètres introduits dans ce calcul pourront être modifiés en fonction des résultats de mesures de champ effectuées sur des réseaux opérationnels et qui reflèteront notamment les probables changements des usages, compte tenu des possibilités qu'offriront les liaisons 5G.

4.3.6.2 Autre exemple d'application basée sur une simulation numérique de la propagation des ondes électromagnétiques en zone urbaine dense (Paris 14ème)

Pour évaluer l'impact du développement commercial de la 5G sur les niveaux d'exposition, diverses simulations numériques ont été menées par l'ANFR en collaboration avec le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), et sont présentées dans un rapport technique de l'ANFR (ANFR 2020a). Les analyses qui y sont décrites concernent les champs électromagnétiques créés par la téléphonie mobile dans une zone urbaine très dense, le 14^e arrondissement de Paris. Il faut noter que cette zone présente l'avantage de comporter un grand nombre d'antennes-relais, car près de 140 stations radioélectriques de téléphonie mobile y sont recensées.

Après une présentation rapide de la méthode de simulation, les différents scénarios correspondant à divers états de déploiement des réseaux seront mentionnés et les niveaux d'exposition pour chacun de ces scénarios seront ensuite comparés. Tous les résultats présentés ci-après sont extraits de ce rapport de l'ANFR.

Méthode de simulation

Un logiciel de modélisation de la propagation électromagnétique a été associé à un modèle de bâti de l'Institut géographique national (IGN) prenant en compte la structure extérieure de chaque bâtiment, y compris les pans de toit. Les données caractéristiques des émetteurs proviennent des quatre opérateurs de téléphonie mobile et concernent notamment la hauteur, le gain et le diagramme de rayonnement des antennes ainsi que la puissance maximale émise. La simulation ne prend en compte que les antennes de téléphonie mobile, à l'exclusion des autres sources de rayonnement telles que les émetteurs FM, la TV et le Wi-Fi.

Le nombre total de points de simulation sur l'ensemble de la zone de calcul est d'environ 3 200 000 (dont 2 100 000 près des façades, en extérieur ou à l'intérieur des bâtiments, et 1 100 000 à 1,5 m au-dessus du sol). C'est sur ce nombre de points qu'ont été calculées les distributions de champ présentées dans le paragraphe suivant.

Scénarios étudiés

Le 1^{er} scénario, appelé « état initial », a consisté à modéliser l'état actuel des réseaux mobiles dans l'arrondissement, qui est une combinaison des technologies 2G, 3G et 4G et dont les bandes de fréquences s'étendent de 700 MHz à 2,6 GHz.

Le 2^e scénario, « 4G optimisée », est basé sur l'hypothèse d'une optimisation ultime de la 4G, c'est-à-dire d'une conversion de la plupart des émetteurs 2G et 3G à la technologie 4G, et ceci sur toutes les bandes de fréquences actuelles, excepté sur la bande 900 MHz qui continuerait à héberger la 2G et la 3G. De plus, on suppose que, pour tous les émetteurs fonctionnant actuellement dans une bande comprise entre 1,8 et 2,4 GHz, la puissance totale est augmentée à 160 W afin d'accroître les débits disponibles.

Pour le 3^e scénario « 5G seul », on ne tient compte que de l'exposition due à la 5G dans la bande de 3,5 GHz. La puissance injectée est de 160 W dans 80 MHz de bande et le gain de l'antenne de chaque BS est de 24,3 dBi. La valeur du champ dans cette bande 5G, déduite du modèle de propagation électromagnétique, est diminuée du facteur de réduction de 13,5 dB expliqué précédemment et du facteur de réduction supplémentaire de 1,2 dB pour tenir compte du pourcentage du temps dédié à une liaison descendante en TDD (75 %). Le champ ainsi calculé correspond donc à l'indicateur d'exposition défini par l'ANFR.

Le 4^e scénario « Majorant 5G » supposerait une concomitance des 2 scénarios précédents. Cette situation est peu probable car elle suppose que les opérateurs optimisent continuellement leurs réseaux 4G tout en déployant la 5G. Ce scénario permet cependant d'obtenir un majorant de l'exposition.

Résultats synthétiques des simulations

Il faut tout d'abord souligner que les résultats numériques, même basés sur des modèles réalistes, ne peuvent permettre de retrouver avec certitude les amplitudes du champ en un point donné, compte tenu d'une part de la très grande complexité géométrique d'un environnement urbain et, d'autre part, des nombreuses possibilités offertes, notamment par la 5G, pour gérer les faisceaux générés par la BS. Ces modèles permettent cependant de tirer des informations sur l'évolution moyenne du champ dans une zone donnée.

Le Tableau 15 permet de comparer le champ dû à la 5G seule à celui de l'état initial ou de la 4G optimisée. Il précise le niveau moyen mesuré mais également le pourcentage de points dits « atypiques » pour lesquels le niveau d'exposition dépasse 6 V/m.

Tableau 15 : Comparaison des valeurs de champ, calculées au niveau de façades pour divers scénarios.

	Niveau moyen (V/m)	Pourcentage des points supérieurs à 6 V/m
État initial	1,1	0,6 %
4G optimisée	1,8	3,2 %
5G seule	1,4	1,1 %

À la différence du Tableau 15, le Tableau 16 envisage le cas du majorant 5G pour lequel la 5G cohabite avec la 4G optimisée. La colonne de droite du tableau donne la valeur du champ qui pourrait être égale ou dépassée sur 1 % des points de mesure.

Tableau 16 : Niveaux des champs calculés pour divers scénarios. Les 2 valeurs successives indiquées dans le Tableau correspondent à des points situés respectivement à une hauteur de 1,5 m au-dessus du sol et sur le devant des façades.

	Niveau médian (V/m)	Niveau moyen (V/m)	Niveau pour le 99 ^e percentile (V/m)
État initial	0,6 – 0,8	0,8 – 1,1	2,9 – 4,8
4G optimisée	1 – 1,3	1,3 – 1,8	4,8 – 8,6
Majorant 5G	1,5 – 1,8	1,7 – 2,3	5,6 – 10,4

Dans le Tableau 16, la valeur médiane prévisible en « état initial » de 0,6 V/m est comparable à la valeur de 0,52 V/m qui a été mesurée en milieu urbain sur différentes zones du territoire (ANFR 2018). On remarque de plus que les calculs effectués pour des points de réception situés sur l'ensemble des façades mènent à des valeurs supérieures de 20 à 30 % à celles calculées au voisinage du sol. Cela s'explique par la présence d'un espace plus dégagé quand on s'élève au-dessus du sol, les émetteurs étant généralement situés sur des points hauts.

Si on compare les niveaux moyens ou médians prévisibles dans les scénarios « état initial » et « 4G optimisée », on constate dans ce dernier cas une augmentation des niveaux, de l'ordre de 50 %. La technique dite « d'optimisation de la 4G » mènerait donc à un accroissement de l'exposition dans les zones denses, ce qui est évidemment étroitement lié à l'augmentation souhaitée des débits des liaisons descendantes.

Dans l'hypothèse de l'ajout des émetteurs 5G au déploiement 4G optimisée (« Majorant 5G »), le niveau d'exposition moyen dans toute la bande affectée à la téléphonie mobile augmenterait d'environ 30 % et deviendrait, au niveau du sol, égal à 1,7 V/m. Mentionnons enfin que dans ce cas, les niveaux dépassés sur 1 % des points de mesure seraient de 2,9 V/m en l'état initial et de 5,6 V/m pour le majorant 5G. Cela se traduirait par une augmentation du nombre de points dits « atypiques ».

Toutes les valeurs indiquées dans les Tableau 15 et Tableau 16 restent bien inférieures à la valeur limite d'exposition réglementaire (61 V/m), comme indiqué sur la Figure 20, mais devront être confirmées par des mesures effectuées périodiquement durant le déploiement des réseaux. Cela permettra également de définir les scénarios les plus proches possibles de la réalité. À noter qu'hormis dans le cadre de scénarios avec signaux 5G seuls, les simulations sont multi-fréquentielles. Dans ce cas, il convient de considérer la valeur limite d'exposition la plus basse dans l'ensemble de la bande de fréquences considérées, à savoir 36 V/m pour les bandes de la téléphonie mobile.

4.3.7 Indicateurs d'exposition basés sur une approche statistique

4.3.7.1 Modèle numérique statistique pour la 4G et application possible pour la 5G

Une approche statistique pour évaluer l'exposition aux champs dus aux réseaux 2G, 3G et 4G, aussi bien pour les liaisons montantes que descendantes, est décrite notamment dans les articles de Varsier (Varsier 2015) et de Huang (Huang 2017). Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet européen LEXNET¹¹⁵ (*Low EMF Exposure Networks*). Les variations statistiques des amplitudes de champ ont été calculées en introduisant un modèle stochastique des villes, puis les résultats ont été introduits dans un simulateur simplifié de trafic du réseau 4G. L'évaluation d'un indice d'exposition fait intervenir divers paramètres comme une pondération entre les usages, en fonction, par exemple, de la tranche d'âge des individus et s'ils sont consommateurs importants de données ou non. Cette approche, développée pour la 4G, pourrait être éventuellement transposée à la 5G mais est relativement complexe à mettre en œuvre, compte tenu du grand nombre de paramètres du modèle.

4.3.7.2 Indice d'exposition extrait de la fonction de distribution de la valeur du champ dans la bande envisagée. Valeur pour un percentile donné.

L'indicateur d'exposition utilisé par Thors *et al.*, (Thors 2017) et qui est également précisé dans un rapport technique de l'IEC (IEC 2018)¹¹⁶, est celui correspondant au 95^e percentile de la puissance mesurée (ou calculée) en envisageant tous les scénarios possibles. Dans son article, Thors propose un modèle statistique pour calculer l'indicateur d'exposition en des points situés dans la ligne de vue du réseau mMIMO, afin d'en déduire les périmètres de

¹¹⁵ <http://www.lexnet.fr/projet-presentation.html>

¹¹⁶ IEC 2018. "Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure." *IEC TR 62669 ED2 Technical report*.

sécurité autour des antennes. Le modèle se base sur les fonctions de probabilité associées, entre autres, au nombre d'utilisateurs, à leurs distributions spatiales et temporelles, à la puissance émise vers chacun d'eux, aux instants de connexions et à la durée de celles-ci.

Les résultats de simulation montrent que, pour la configuration de charge du réseau la plus élevée, l'indice d'exposition, comme défini dans cet article, n'atteint que 22 % de la valeur qui aurait été calculée en supposant que la puissance maximum soit transmise dans un seul faisceau durant plusieurs minutes. Ces conclusions doivent cependant être validées par des campagnes de mesures menées sur différents sites lorsque la 5G sera suffisamment déployée.

Des approches similaires, basées sur les percentiles, avaient été menées pour la 4G par Werner *et al.*, (Werner 2019) sur un système opérationnel en Australie afin de prédire également les dimensions du périmètre de sécurité autour des antennes. Les champs ont été mesurés à une distance de 6 m d'un réseau mMIMO comportant 192 éléments rayonnants. Le diagramme de rayonnement de ce réseau comporte au maximum 8 faisceaux qui peuvent être utilisés partiellement ou simultanément en fonction de la position des UE. La transmission est en mode TDD, le lien descendant occupant 75 % du temps disponible pour les liaisons. L'approche statistique montre que, pour le 95^e percentile et pour la charge maximum de trafic, le niveau d'exposition moyen varie entre 7 et 16 % du niveau calculé en supposant que toute la puissance de la BS soit concentrée dans un seul faisceau très directif (« cas pire »). Cette différence s'explique évidemment par le fait que la puissance rayonnée par la BS est répartie entre différents faisceaux dont le nombre dépend de la position relative des utilisateurs et varie donc en fonction du temps.

Ces travaux ont ensuite été repris par Colombi *et al.*, (Colombi 2020) pour la 5G. Les mesures ont été faites sur 25 BS du réseau commercial 5G « Telstra » en Australie et sur lequel plus de 100 000 utilisateurs sont connectés. La bande de fréquence s'étend de 3,3 à 3,8 GHz, la bande passante étant comprise entre 40 et 80 MHz. Si on s'intéresse au champ rayonné dans les faisceaux trafic, la solution qui a été choisie est de caractériser ces faisceaux grâce aux informations stockées par le système (Ericsson) effectuant la supervision du réseau. Les puissances moyennes dans la zone de couverture et l'évolution temporelle du gain des antennes dans les directions des différents utilisateurs permettent ainsi d'analyser, au cours du temps, la distribution spatiale de la puissance transmise par la BS. En introduisant également la notion du 95^e percentile, les résultats de l'analyse statistique montrent que l'hypothèse de l'émission constante dans un faisceau avec la puissance maximum mène, comme en 4G, à une surestimation de 8 à 10 dB des niveaux d'exposition.

4.3.7.3 Utilisation de cet indice d'exposition lors d'un calcul d'optimisation d'implantation de stations de base (Faubourg de Gand, Belgique)

Une étude théorique, pour optimiser de façon conjointe la consommation en puissance des BS et le niveau d'exposition, a été menée par Matalatala (Matalatala, 2018). Dans cette simulation, l'indice d'exposition est défini à l'aide d'une pondération entre la valeur médiane du champ et celle du 95^e percentile. La contrainte imposée par le régulateur flamand est que le champ en tout point dû à l'ensemble des BS ne doit pas dépasser 4,48 V/m.

Le réseau envisagé doit couvrir une surface d'environ 7 km² des faubourgs de Gand (Belgique) à l'aide d'antennes mMIMO dont la fréquence centrale est de 3,7 GHz, la bande transmise étant de 20 MHz. Le nombre d'antennes des BS peut varier entre 16 et 256. Une simulation au niveau système a été menée grâce à des outils de déploiement de réseaux, l'atténuation du signal en tout point étant calculée à partir de modèles statistiques classiques.

Deux scénarios sont envisagés, se rapportant soit à une zone très dense en nombre d'utilisateurs, comme un stade, et pour lequel un débit moyen de 20 Mb/s est suffisant, soit une zone urbaine de bureaux nécessitant un débit de 300 Mb/s. Les résultats obtenus montrent qu'une planification judicieuse des BS pourrait permettre de diminuer le niveau d'exposition, mais moyennant une augmentation du nombre de ces BS. Cependant, il faut noter que les diverses hypothèses faites pour aboutir à cette conclusion sont contraignantes et devraient être validées à partir de travaux expérimentaux. Une étude complémentaire plus exhaustive s'avère nécessaire. Notons qu'une étude similaire a été menée pour une émission dans la bande des 60 GHz (Matalatala, 2017).

4.3.8 Indicateur d'exposition basé sur une extrapolation des résultats de mesures effectuées sur les blocs de signalisation

Lorsque le réseau 5G est pleinement opérationnel, les seuls signaux indépendants du trafic et toujours émis à puissance et à largeur de faisceau constantes sont ceux de la signalisation (blocs SSB). Des travaux ont donc été menés pour pouvoir éventuellement extrapoler les mesures faites sur ces signaux aux valeurs d'exposition lors du trafic. Cela nécessite de prendre en compte l'importante fluctuation spatiale du champ dans la zone couverte par la station de base lorsque des « antennes reconfigurables¹¹⁷ » sont utilisées, comme illustré par Migliore (Migliore 2019). Signalons que, pour un réseau 4G, des résultats détaillés par Exposito *et al.*, (Exposito, 2018) indiquent que l'amplitude du champ augmente en fonction de la charge du réseau et ses fluctuations peuvent atteindre 10 dB. Cette influence de la charge du réseau constitue également un point critique pour la 5G, compte tenu des techniques de gestion des faisceaux et des liens entre BS et UE.

Pour la 5G, Aerts (Aerts 2019) et Keller (Keller 2019) proposent une méthodologie basée également sur cette technique d'extrapolation des mesures faites sur les SSB, et quelques exemples décrivent la mise en œuvre de l'approche proposée. Adda (Adda 2020) présente une technique similaire d'évaluation de l'exposition en soulignant qu'un facteur important est le gain de faisceau. Celui-ci traduit l'augmentation du niveau de champ au point de réception lors du trafic compte tenu de la formation du faisceau vers l'utilisateur. Son évaluation théorique à partir du diagramme de rayonnement des antennes s'avère délicate, car les spécifications techniques de la 5G ont prévu une gestion très ouverte des faisceaux par la BS. Ce point est également souligné par Franci *et al.*, (Franci 2020b).

En conclusion, les différentes techniques proposées pour calculer un indicateur d'exposition doivent encore être validées sur des réseaux opérationnels, donc sur des zones de couverture importantes desservies par un ensemble de BS.

4.3.9 Environnements particuliers : distribution du champ électromagnétique au sein d'un milieu confiné

Afin de mettre en évidence les travaux menés sur l'exposition à la 5G dans d'autres environnements, quelques résultats concernant les distributions de champ dans des milieux confinés et notamment dans un hall industriel et dans un tramway sont décrits dans ce paragraphe. Dans ces 2 cas, on ne s'intéresse pas au rayonnement d'une BS située en

¹¹⁷ Le terme générique « antennes reconfigurables » recouvre toutes les technologies, comme mMIMO, permettant d'adapter les formations de faisceaux et les traitements de signal associé pour maximiser les performances des liaisons.

extérieur et couvrant une zone importante, mais à celui provoqué par une source située dans le milieu confiné lui-même. En effet, la propagation dans un tel milieu est soumise à de nombreuses réflexions sur les parois et obstacles pouvant engendrer une augmentation locale des niveaux de champ. Dans le cas du hall, l'émission est générée par un réseau d'antennes 5G devant couvrir la surface de ce hall, et jouant en quelque sorte le rôle d'une BS locale, tandis que pour le tramway, on s'intéresse au lien montant, l'émission étant supposée provenir de l'antenne d'un téléphone mobile.

4.3.9.1 Hall industriel

La configuration traitée grâce à une simulation numérique, par Shikhantsov *et al.*, (Shikhantsov, 2019), est celle d'un hall industriel de 40 m x 20 m x 5 m dans lequel une transmission 5G mMIMO est implémentée. Des obstacles, de forme parallélépipédique, sont distribués aléatoirement dans ce hall mais à une distance maximum des murs de 3 m. La présence d'un individu occupant des positions successives dans l'allée centrale est simulée par un « fantôme » pour lequel le débit d'absorption spécifique (DAS) au niveau de la tête pour une liaison descendante est calculé. Rappelons que la notion de DAS et les restrictions de base concernant notamment l'exposition du corps entier sont précisées dans le paragraphe 4.1. Pour cela, 2 méthodes sont associées, l'une fondée sur le « lancer de rayons » et l'autre sur une méthode utilisant les « différences finies dans le domaine temporel ». Cette combinaison permet de traiter le problème de la propagation du champ émis par l'antenne en présence d'obstacles et la pénétration des ondes dans le « fantôme ». Pour une puissance d'émission normalisée à 1 W, le DAS varie de 1 à 2 mW/kg à une distance d'environ 10 m de la BS suivant l'orientation du « fantôme », si celui-ci est en visibilité directe de la BS ou non. L'article (Shikhantsov, 2020) est une prolongation de celui paru en 2019, mais introduit une technique de codage des données différente, focalisant davantage la puissance sur l'UE. Ces articles montrent donc l'intérêt de la simulation numérique pour calculer le DAS lorsque la personne et son *smartphone* se situent dans un environnement complexe, mais les valeurs du DAS données dans cet article sont difficilement extrapolables à une autre configuration.

4.3.9.2 Tramway

La distribution du champ électrique dans un tramway, l'émetteur étant un téléphone mobile situé dans la rame, a été menée par simulation numérique par Celaya-Echarri *et al.*, (Celaya-Echarri 2020). Des transmissions 2G à 5G sont étudiées successivement et, pour la 5G, les bandes 3,7 GHz et 26 GHz ont été envisagées. Le calcul des champs en tout point de l'espace a été obtenu grâce à un logiciel de simulation prenant en compte la géométrie précise de la structure de la rame ainsi que la présence de personnes, simulées par des modèles réalistes. La densité d'occupation du tramway est, soit faible avec 33 passagers, soit très importante avec 101 passagers. Des mesures ont également été effectuées pour quelques configurations dans un tramway de l'agglomération de Bilbao, de manière à valider les résultats de simulation pour des émissions actuelles, donc hors 5G.

En 5G, des antennes directives ou omnidirectionnelles sont envisagées. Le terminal est supposé tenu par un utilisateur assis au milieu de la rame. La valeur moyenne de la puissance d'émission choisie dans cet exemple est de 10 dBm (10 mW), sachant que la valeur maximum autorisée lors de l'émission d'une sous trame de données de 1 ms est de 23 dBm, soit 200 mW¹¹⁸. Les résultats excluent la zone très « proche » de l'antenne (5 longueurs d'onde,

¹¹⁸ Normes ETSI, *User Equipment (UE) radio transmission and reception*, ETSI TS 138 101-2 V15.9.1 (2020-04).

soit 8 cm à 3,7 GHz) pour laquelle les hypothèses liées à la simulation numérique ne sont pas vérifiées.

Avec une antenne d'émission omnidirectionnelle et à une fréquence de 3,7 GHz, le champ moyen calculé sur l'ensemble des points situés à une distance de l'antenne inférieure à 1,5 m, est de 1,2 V/m ou 1,1 V/m, respectivement pour une densité de passagers faible ou importante. Le champ décroît ensuite en fonction de la distance et, au-delà de 2,5 m, sa valeur moyenne ne dépasse pas 0,1 V/m. Pour l'ensemble du tramway, le champ moyen est de 0,5 V/m si l'antenne d'émission est omnidirectionnelle et, avec un faisceau directif, le champ deviendrait égal à 0,8 V/m pour des points situés dans le faisceau mais diminuerait à 0,2 V/m ailleurs. Des résultats similaires ont été obtenus à 26 GHz.

Les niveaux de champ estimés sont donc bien inférieurs aux valeurs limites d'exposition réglementaires (1 à 2 % de la limite à 61 V/m). Les niveaux de champ les plus importants sont évidemment obtenus dans une zone de l'antenne inférieure à quelques mètres, et ce point devra faire l'objet d'attention si des antennes très directives sont utilisées dans la bande des 26 GHz. Il serait important de poursuivre ces travaux grâce à des campagnes de mesure pour chiffrer, de façon statistique, l'augmentation des niveaux de champ liée à un nombre important d'utilisateurs connectés simultanément au réseau 5G.

4.3.10 Synthèse de l'analyse bibliographique et conclusion

4.3.10.1 Exposition au voisinage des téléphones mobiles

Les données d'exposition disponibles jusqu'à présent proviennent des valeurs de DAS des appareils compatibles 5G apparaissant sur le marché, fournies par les constructeurs afin d'attester de leur conformité aux valeurs limites réglementaires et qui figurent dans les caractéristiques techniques des appareils. Des DAS de 0,4 à 1 W/kg pour la tête sont mentionnés, le niveau maximum autorisé étant de 2 W/kg. Il semble que ces DAS soient un peu supérieurs à ceux des appareils 4G. Il est cependant difficile d'en tirer des conclusions sur l'augmentation du DAS due à l'implantation de la 5G car ces *smartphones* doivent couvrir toute la bande, du GSM à la 5G, et les DAS ne sont jamais précisés pour une bande particulière (seule la valeur maximale mesurée sur toutes les bandes est fournie). Quand de nombreux *smartphones* seront en service dans un réseau 5G pleinement opérationnel, il sera nécessaire de connaître les variations statistiques du niveau d'exposition en fonction des usages et de la charge du réseau.

4.3.10.2 Exposition due aux stations de base 5G mais avec réutilisation des infrastructures 4G existantes

Pour cette première étape de la 5G, les liens radio entre la BS et les UE sont établis grâce aux antennes 4G, donc sur les fréquences correspondantes, le mode de duplexage choisi étant le même que pour la 4G. La différence principale avec la 4G est liée aux techniques logicielles de traitement du signal. À niveau de puissance totale émise identique, on peut donc s'attendre à un niveau d'exposition voisin de celui qui existait avec la 4G, mais aucun résultat de mesures n'est encore disponible.

4.3.10.3 Exposition due aux stations de base 3,5 GHz

- Notion de « pire cas » et de champ maximum

Rappelons que la situation de « pire cas » correspond à une configuration telle que le champ reçu au voisinage d'une BS, moyenné sur une période de 6 minutes, prend la valeur maximale possible. Ceci suppose donc que le débit maximum possible de données envoyées par la BS soit consacré à un UE unique ou à un groupe d'UE très proches les uns des autres. Il faut donc que toutes les ressources disponibles en matière de bande passante et de puissance au niveau des antennes soient affectées à un faisceau unique et que le gain du réseau de la BS pour ce faisceau prenne sa valeur maximale.

En pratique, les mesures en situation de « pire cas » ne peuvent être réalisées que lors des phases de test d'une BS non encore connectée au réseau 5G. Rappelons que de tels essais effectués par l'ANFR mènent à un champ électrique de l'ordre de 6 à 9 V/m à une centaine de mètres de la BS et en visibilité directe de celle-ci. L'amplitude du champ mesuré dans ce « pire cas » reste bien inférieure aux valeurs limites réglementaires. Pour une durée de 6 minutes, la taille des fichiers ainsi téléchargés par l'intermédiaire de ce faisceau est de 24 Go, avec un débit de la liaison de l'ordre de 500 Mb/s.

Le groupe de travail n'a pas trouvé d'autres résultats de mesure publiés dans des articles ou rapports techniques en libre accès. Il serait donc intéressant de poursuivre ce type d'essai lors de l'implantation de nouvelles BS, et de mesurer ce champ « pire cas » sur une zone étendue.

- Notion d'indicateur d'exposition

Pour prendre en compte les fluctuations spatiales et temporelles du signal reçu, en présence d'un grand nombre d'UE connectés, donc dans une configuration où le réseau 5G est pleinement opérationnel, une approche statistique paraît adéquate. Différents auteurs ou organismes du domaine des télécommunications ont ainsi proposé d'extraire de cette approche une valeur de champ qui pourrait caractériser une exposition, appelée parfois « indicateur d'exposition ». La notion d'indicateur d'exposition, plus largement, fait référence à l'intégration d'une ou plusieurs grandeurs physiques, instantanées ou moyennées dans le temps, qui peut aussi associer des modulateurs permettant de représenter au mieux l'exposition recherchée. Les différents indicateurs définis dans la littérature pour représenter l'exposition spécifiquement à la 5G sont brièvement exposés ci-après.

1) L'indicateur proposé par l'ANFR (ANFR, 2019b) se fonde sur la mesure du champ électrique correspondant au « pire cas » mais en pondérant cette valeur par un facteur prenant notamment en compte une estimation de la taille moyenne des paquets de données envoyés par la BS vers les UE. L'ANFR considère comme hypothèse que, statistiquement, dans un intervalle de temps de 6 minutes, chacun des faisceaux formés par les antennes de la BS envoie un flux de données de 1 Go. Par rapport au « pire cas », le champ moyen sur cette durée serait diminué d'un facteur d'environ 13 dB, ce qui mène à une valeur de 1 à 2 V/m, donc similaire au cas d'une liaison 4G qui transmettrait un volume de données identique. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de puissance au sein d'un faisceau 5G étroit est compensée par un temps moindre de transfert de la BS vers l'UE. Des résultats similaires ont été obtenus par modélisation théorique de la propagation en site urbain d'une onde générée par une BS de la 5G. Cette modélisation montre également que le pourcentage de points où le champ calculé dépasse 6 V/m (points dits atypiques) serait de 1,1 % pour la 5G contre 0,6 % pour la 4G.

2) Des indicateurs basés sur une probabilité de dépassement d'un niveau de champ donné ont également été proposés. À partir de mesures intensives du champ dans une zone donnée, un indicateur d'exposition pourrait être défini comme étant la valeur du 95^e percentile de la fonction de distribution du champ, la probabilité que le champ reçu soit inférieur à cette valeur étant donc de 95 %. Cette définition a également été introduite dans quelques normes comme

celle proposée par l'IEC (IEC, 2018). Des mesures préliminaires faites sur les faisceaux de trafic au niveau d'une BS connectée au réseau montrent que le champ correspondant au percentile à 95 % est inférieur de 8 à 10 dB à celui mesuré sur un faisceau unique à pleine charge.

- Conclusion

Si on envisage tout d'abord la situation de « pire cas » dans laquelle, durant 6 minutes, toute la puissance disponible de la station de base est concentrée dans un seul faisceau le plus étroit possible, et ceci compte tenu de la taille du réseau d'antennes, le champ mesuré par l'ANFR à une distance de 70 à 100 m de différentes stations en phase de test, est compris entre 6 et 9 V/m, valeurs qui restent largement inférieures au seuil limite réglementaire de 61 V/m.

Alors que le réseau 5G n'était pas encore opérationnel en France, des modélisations théoriques ont été menées afin d'évaluer le niveau de champ moyen en divers environnements, comme en milieu urbain par exemple. Compte tenu des hypothèses introduites concernant les flux de données échangées et basées sur une extrapolation de la consommation 4G actuelle, ce champ moyen serait de l'ordre de 1,5 V/m, donc comparable à celui dû à la 4G. Des mesures effectuées dans divers pays où la 5G est déjà implémentée tendent à confirmer ce résultat, mais ces mesures sont peu nombreuses. De plus, dans ce début de déploiement, le nombre d'utilisateurs est encore restreint.

La 5G va rendre possible une grande variété d'applications innovantes telles que la réalité augmentée, l'internet des objets, les communications entre machines ou robots industriels ou les voitures autonomes, pour ne citer que quelques exemples. Ces applications peuvent mener à une augmentation de la taille des fichiers à transmettre et donc de l'exposition pour le grand public et la population professionnelle, mais qu'il est difficile de chiffrer actuellement.

Les puissances reçues en un point quelconque, pendant la durée de 6 minutes indiquée dans les lignes directrices et les normes de test, dues à toutes les sources de rayonnement, de la radio FM à la 4G puis à la 5G, se cumulent. Cette problématique n'est évidemment pas nouvelle et c'est la raison pour laquelle, suite au décret n°2013-1162 du 14 décembre 2013 relatif au dispositif de surveillance et de mesure des ondes électromagnétiques, des mesures systématiques sont effectuées par l'ANFR pour localiser les points dits « atypiques » pour lesquels, en pratique, le champ électrique est supérieur ou égal à 6 V/m¹¹⁹.

Afin d'évaluer l'impact de l'arrivée de la 5G sur le niveau d'exposition, l'ANFR prévoit, d'ici fin 2021, de mener une campagne nationale de mesure sur 4 800 points répartis sur le territoire.

De plus, il est aussi important de suivre en temps réel l'évolution du niveau d'exposition afin d'évaluer l'impact de l'augmentation de la densité de terminaux et du rôle des nouveaux usages offerts par la 5G. Un premier système de surveillance, décrit dans le paragraphe 4.3.3, a été développé, mais celui-ci pourrait évoluer pour mieux apprécier les contributions de chacun des réseaux de communication mobile.

¹¹⁹ Les points atypiques sont définis par la loi n° 2015-136 du 9 février 2015 comme les lieux dans lesquels le niveau d'exposition aux champs électromagnétiques dépasse substantiellement celui généralement observé à l'échelle nationale, conformément aux critères, y compris techniques, déterminés par l'Agence nationale des fréquences et révisés régulièrement. Dans cette démarche initiale, l'ANFR a retenu comme critère un niveau global d'exposition de 6 V/m.

4.4 Évaluation du niveau d'exposition dans la bande (24 – 60) GHz en champ lointain et en champ proche

Les données d'exposition dans la bande 26 GHz n'étant pas disponibles, le groupe de travail a souhaité entamer une réflexion sur les aspects biophysiques de l'interaction entre les ondes électromagnétiques et le vivant, permettant d'avoir une première appréciation qualitative de l'exposition dans cette bande de fréquence.

Ces aspects sont présentés dans le chapitre 5.2.

DOCUMENT EN CONSULTATION PUBLIQUE

5 Éléments de réflexion sur les interactions des ondes électromagnétiques avec le vivant dans les nouvelles bandes de fréquences des technologies 5G

5.1 Aspects biophysiques des interactions champs électromagnétiques – vivant dans la bande 3,5 GHz

5.1.1 Absorption de l'énergie électromagnétique dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz

Ce chapitre expose les différences dans les interactions entre les champs électromagnétiques et les tissus biologiques pour les expositions à des rayonnements de fréquences 0,9-2,5 GHz d'une part et 3,5 GHz d'autre part. En effet, la question suivante peut être posée : existe-t-il une différence dans l'absorption de la puissance électromagnétique (DAS) dans les tissus humains à 3,5 GHz par rapport aux bandes de fréquences utilisées précédemment dans les communications mobiles, à savoir entre 1 et 2,5 GHz environ ? Les propriétés diélectriques des tissus, comme par exemple la conductivité, dépendent de la composition des tissus et de la distribution des molécules d'eau, des ions et d'autres molécules. Ces propriétés influencent le niveau d'absorption du champ dans les différents tissus. Une conductivité élevée, due par exemple à une teneur en eau ou en sel élevée, augmente la puissance électromagnétique absorbée et accroît également l'interaction du champ avec les tissus. Les caractéristiques de l'absorption des champs électromagnétiques par les tissus biologiques, à 3,5 GHz, sont similaires à celles des fréquences entre 1 et 2,5 GHz. Même dans le cas d'une exposition à une onde plane (modèle simple d'exposition, par exemple en situation de source lointaine), un pourcentage élevé de l'énergie des radiofréquences est absorbé par la peau et les tissus superficiels. Cependant, la répartition des énergies déposées dans les tissus, en profondeur, peut être hétérogène, en raison des discontinuités entre les différentes couches tissulaires. En effet, chaque tissu d'un système biologique a une permittivité complexe¹²⁰ différente, il y aura ainsi en général des réflexions d'énergie entre les diverses interfaces tissulaires pendant l'exposition aux radiofréquences (RF Dosimetry Handbook, 5^e édition, 2009).

Dans les conditions d'exposition en champ proche (par exemple à proximité des téléphones mobiles), cette hétérogénéité peut être encore plus complexe.

D'autre part, les longueurs d'onde dans les tissus sont considérablement réduites par rapport à l'espace libre (en-dehors d'un milieu matériel), en raison des constantes diélectriques élevées des tissus. Cette réduction est assez importante, d'un facteur 6,5 à 8,5 pour les tissus ayant une forte teneur en eau (comme la peau, les muscles, le cerveau), et d'un facteur 2 à 2,5 pour les tissus ayant une faible teneur en eau (comme les os, la graisse, les cheveux). Les longueurs d'onde typiques dans les tissus ayant une forte teneur en eau sont d'environ 1,4 cm

¹²⁰ La permittivité diélectrique d'un matériau relie la réponse du milieu matériel à son exposition à un champ électromagnétique. Les structures biologiques sont des milieux le plus souvent inhomogènes, non isotropes et diélectriques à pertes (liées à une certaine conductivité). La permittivité complexe, au sens mathématique du terme (partie réelle et imaginaire), est la grandeur utilisée pour représenter ces phénomènes.

à 3,5 GHz et de 1,75 cm à 2,45 GHz (par exemple Wi-Fi), tandis que les longueurs d'onde dans l'air aux mêmes fréquences sont respectivement de 8,6 cm et 12 cm. Outre cette réduction importante des longueurs d'onde, une forte absorption d'énergie est observée dans les tissus dans ces bandes de fréquences.

En résumé, aucun argument scientifique ne vient étayer le fait que les caractéristiques principales de l'exposition des tissus biologiques aux champs électromagnétiques, à l'échelle macroscopique, dans la nouvelle bande de fréquences autour de 3,5 GHz de la technologie 5G, pourraient être différentes par rapport aux autres technologies sans-fil utilisées jusqu'à présent (2G-4G, Wi-Fi), tant dans les conditions d'exposition en champ lointain qu'en champ proche. Néanmoins, peu d'études de dosimétrie ont été publiées spécifiquement à 3,5 GHz dans différentes situations d'exposition, que ce soit en champ proche ou en champ lointain.

5.1.2 Profondeur de pénétration et coefficient de réflexion des ondes électromagnétiques

La profondeur de pénétration des ondes électromagnétiques dans les milieux matériels exposés correspond à la distance où la puissance absorbée est réduite d'un facteur $1/e^2$ par rapport à la surface, c'est-à-dire où la puissance absorbée dans les tissus a diminué pour atteindre 13 %.

La profondeur de pénétration dépend fortement de la fréquence des rayonnements (RF Dosimetry Handbook, 5^e édition, 2009). La profondeur de pénétration des ondes dans les tissus humains dépend aussi des propriétés des tissus biologiques, la pénétration est plus importante dans les tissus ayant une faible teneur en eau tels que la graisse et les os que dans ceux ayant une forte teneur en eau, tels que les muscles ou la peau. Par exemple, la profondeur de pénétration dans les tissus ayant une faible teneur en eau est jusqu'à 10 fois plus importante que dans les tissus ayant une forte teneur en eau (cf. Figure 22).

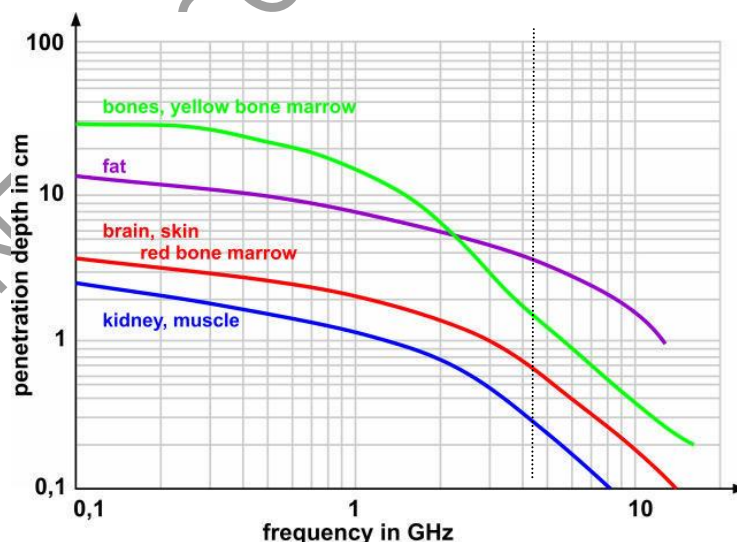


Figure 22 : Profondeur de pénétration des champs de radiofréquences dans les tissus corporels en fonction de la fréquence et du type de tissu

Échelles logarithmiques - Source : <https://www.emf-portal.org/en>

La profondeur moyenne de pénétration des champs radiofréquences est, par exemple, d'environ 1,1 à 0,4 cm dans les tissus musculaires ou cutanés dans la bande de fréquences

de 0,9 à 3,5 GHz utilisées dans les communications sans-fil ou mobiles, alors qu'au-dessus de 10 GHz elle n'est que d'environ 0,2 mm ou moins (Wu, 2015, Hirata, 2018). Cela signifie qu'à 3,5 GHz, la profondeur de pénétration est réduite d'environ 40 % par rapport à la fréquence de 900 MHz utilisée par les systèmes mobiles depuis le début de leur développement (GSM). Par conséquent, à 3,5 GHz, l'interaction entre les radiofréquences et les systèmes biologiques est limitée aux couches superficielles des tissus, jusqu'à une profondeur d'environ 0,4 cm. La physique des interactions entre les rayonnements électromagnétiques et les propriétés diélectriques des tissus biologiques implique en effet que plus la fréquence des ondes électromagnétiques est élevée, 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.

C'est pour cette raison qu'à des fréquences plus élevées, les restrictions de base qui protègent contre les risques sanitaires avérés des radiofréquences ne sont plus exprimées en débit d'absorption spécifique (DAS en W/kg) mais en densité surfacique de puissance (en W/m²). Pour l'Icnirp, la frontière entre les absorptions d'énergie en profondeur ou en surface des tissus était située aux alentours de 10 GHz dans les lignes directrices publiées en 1998 (Icnirp 1998) ; elle est passée à 6 GHz dans leur mise à jour publiée en 2020 (voir les détails au chapitre 4.1), considérant qu'au-delà d'environ 6 GHz, l'échauffement survient principalement au niveau de la peau. Cependant, aucune autre justification n'est fournie par l'Icnirp concernant cette modification.

Il est également important de prendre en compte le coefficient de réflexion de l'interface air-tissu qui dépend de la fréquence des rayonnements et de la teneur en eau des tissus. Comme la peau et les tissus musculaires ont une forte teneur en eau, le coefficient de réflexion peut être élevé (Rani, 2015). Ce coefficient est par exemple de 0,77 à 900 MHz et 0,74 à 3,5 GHz. Cela signifie que 74 à 77 % de la puissance incidente est réfléchi par la surface du corps et ne peut donc pas être absorbée par le corps humain (Christ, 2006, Johnson, 1972).

5.1.3 Rôle des caractéristiques des signaux de communication (forme temporelle, modulation) dans les interactions biophysiques

5.1.3.1 Des effets liés aux formes temporelles des signaux de communication ?

Une des questions posées dans le cadre des recherches sur les effets éventuels des radiofréquences sur la santé concerne la distinction entre d'une part des effets qui seraient liés à la quantité d'énergie véhiculée par les rayonnements, indépendamment de la répartition temporelle avec laquelle cette énergie est transmise aux structures biologiques, et d'autre part des effets qui seraient liés précisément à la structure temporelle de l'émission des rayonnements, autrement dit à la modulation dans le temps des signaux. Avec l'évolution successive des technologies de communication, des équipes de recherche se sont intéressées aux effets des signaux de type GSM, les premiers utilisés dans le domaine des communications mobiles, puis par la suite aux signaux UMTS, par exemple, dont les caractéristiques de modulations temporelles sont différentes du GSM. Les résultats des études menées par certaines équipes sont souvent disparates : des effets sur le fonctionnement biologique cellulaire peuvent être par exemple retrouvés pour des expositions à des signaux GSM, mais pas en UMTS, et réciproquement (e.g. Tillmann, Ernst *et al.* 2010 ; Danker-Hopfe *et al.*, 2011 ; Zeni *et al.*, 2012 ; Smith-Roe *et al.*, 2019).

Par ailleurs, des études spécifiques ont porté sur l'hypothèse de démodulation des signaux qui pourrait être réalisée par des structures biologiques (e.g. Sheppard *et al.*, 2008 ; Davis *et*

al., 2010 ; Kowalczyk *et al.*, 2010). Ces études n'ont pas mis en évidence de capacité des entités biologiques, à petite ou grande échelle, à démoduler les signaux, et donc à potentiellement réagir à la forme temporelle du signal plutôt qu'à l'énergie véhiculée. À l'exception de l'étude de Carrubba *et al.* (2010), dont les auteurs avancent la possibilité d'émission d'un signal électrique par le cerveau (potentiel évoqué cérébral) lié à l'exposition à un signal basse fréquence 217 Hz (fréquence fondamentale de répétition temporelle des trames GSM).

Par principe, des processus non linéaires tels que le « redressement » peuvent transposer les signaux radiofréquences modulés à basse fréquence dans la bande de fréquences où les systèmes physiologiques sont capables de fonctionner. Presque toutes les utilisations des technologies radiofréquences, y compris les systèmes de téléphonie mobile, utilisent des signaux modulés plutôt que des signaux à ondes continues (CW). La démodulation par des circuits électroniques non linéaires est bien connue et essentielle dans ces processus. Une certaine forme de démodulation peut être impliquée dans des effets biologiques, en lien avec des champs intermittents, modulés en amplitude de manière sinusoïdale ou avec une combinaison de modulations de fréquence, d'amplitude et de phase, lorsque les composantes microscopiques des tissus peuvent « suivre » par exemple les variations d'intensité des champs électromagnétiques. La question de savoir si des structures biologiques du corps humain peuvent réagir de façon non linéaire à des signaux de télécommunications a donc été étudiée dans plusieurs publications, telles que celles examinées par Sheppard *et al.* (2008). Les principaux résultats des modèles suggèrent qu'une démodulation non linéaire ou des fréquences sous-harmoniques peuvent exister au niveau cellulaire, mais que le niveau des signaux démodulés ou de l'énergie sous-harmonique est très faible dans la bande des basses fréquences où les effets biologiques pourraient être initiés. L'ordre de grandeur d'un champ électrique démodulé généré par un mécanisme non linéaire a pu être estimé et il a été montré que la démodulation de l'enveloppe d'une porteuse radiofréquence atténue l'amplitude du signal modulant (Foster et Repacholi, 2004). Pour un processus de détection hypothétique idéal, cette atténuation de puissance peut être de 90 à 100 dB. Par exemple, un champ électrique incident extrêmement basses fréquences modulé en amplitude de 100 V/m ne provoquerait pas de tension supérieure à environ 3×10^{-11} V à travers une membrane cellulaire dans la bande des basses fréquences (Sheppard, 2008). Ce signal très faible est environ 10^7 fois plus petit que le niveau de bruit du potentiel membranaire à basses fréquences, qui limite les événements physiologiquement significatifs dans les cellules excitables et serait également sensiblement inférieur au bruit du potentiel membranaire dans les cellules. Par ailleurs, l'efficacité de cette démodulation hypothétique diminue lorsque la profondeur de modulation du signal est inférieure à 100 %.

5.1.3.2 Spécificités des signaux de type 5G

Les paragraphes 4.2.1 et 4.2.2 du présent rapport rappellent les principales caractéristiques des signaux de communication utilisés par les technologies 4G et 5G, ainsi que leurs différences. La modulation du signal utilisée est la même pour ces deux technologies (OFDM). En revanche, alors que les liaisons montantes - du téléphone vers la station de base - et descendantes peuvent être opérées simultanément dans une communication en 4G (ces liaisons sont en effet séparées dans des canaux fréquentiels différents), les signaux 5G montants et descendants dans la bande de fréquences 3,5 GHz sont eux séparés dans le temps, dans des blocs temporels envoyés alternativement (pour plus de détails voir le paragraphe 4.2.4.2).

Concernant les expositions aux sources lointaines, il est possible d'estimer les caractéristiques de signaux 5G (répartition temporelle et intensités moyennes) dans un cas théorique :

- un faisceau unique, émis par une station de base, illuminant un utilisateur pendant un temps long (supérieur à 6 minutes par exemple) ;
- une situation d'exposition de type « pire cas » telle que présentée en 4.3.5 et 4.3.6.1. Rappelons que cela suppose que la station de base envoie toute l'énergie disponible dans ce faisceau unique directif pour télécharger un flux de données vers un seul utilisateur (ou un groupe d'utilisateurs très proches les uns des autres), et que cet utilisateur ne fait que recevoir (il n'émet pas ou très peu). En TDD, le téléphone mobile recevra donc un signal « intermittent » pendant une durée T_{em} quand la station de base émet dans ce faisceau, puis plus rien pendant T_{repos} (le mobile n'émet pas). L'enveloppe de ce signal est donc de forme rectangulaire et périodique (signal « on – off » ou en français « tout ou rien »).

Pendant le temps T_{em} le signal émis est un signal de modulation OFDM dont l'allure temporelle est celle d'un « bruit », situé dans une large bande de fréquences autour de 3,5 GHz (cf. paragraphe 4.2). En se plaçant dans une échelle de temps beaucoup plus grande et en supposant donc que, pendant T_{em} , les tissus sont illuminés par un champ électrique de valeur moyenne E_{moy} , de puissance moyenne P_{moy} , et en supposant pour simplifier que le signal est purement sinusoïdal à 3,5 GHz (cf. Figure 23), la question qui pourrait être posée serait donc de savoir quels sont les effets sanitaires éventuels (autres que l'élévation de température) avec un tel signal intermittent ?

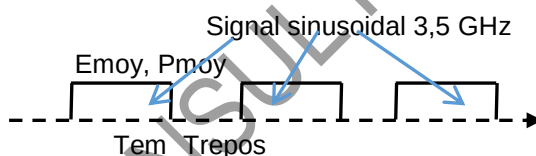


Figure 23 : forme temporelle d'un signal 5G en mode TDD

Les mesures effectuées par l'ANFR et détaillées dans le paragraphe 4.3.4.3.2 montrent que, dans cette situation fortement improbable de « pire cas », à une distance de 100 m environ de la station de base, E_{moy} est de l'ordre de 6 à 9 V/m, et donc P_{moy} de l'ordre de 0,1 à 0,2 W/m².

Les durées T_{em} et T_{repos} peuvent varier, selon les spécifications techniques de la 5G, par exemple selon des couples de valeurs comme suit : $T_{em} = 3$ ms, $T_{repos} = 1$ ms, ou/et $T_{em} = 1,5$ ms et $T_{repos} = 0,5$ ms et enfin ou/et $T_{em} = 0,75$ ms et $T_{repos} = 0,25$ ms. (cf. paragraphe 4.2.4.2.4).

5.1.4 Absorption moléculaire, effets microthermiques et « points chauds »

Du fait de l'absorption de puissance électromagnétique élevée et rapide, une diffusion thermique rapide peut augmenter de manière significative aux niveaux cellulaires, sous-cellulaires et moléculaires, par exemple lors d'une exposition aux radiofréquences, généralement modulée (par exemple en « tout ou rien »). Cette intermittence et la durée invariable de l'exposition peuvent entraîner des effets thermiques transitoires dans les tissus en raison de la chaleur qui est passivement (ou activement, par exemple par la circulation sanguine) redistribuée dans les tissus et le milieu environnant. Au niveau cellulaire, ce processus d'« échauffement/refroidissement » génère un « signal thermique » dans les tissus exposés. Le mécanisme d'absorption moléculaire souligne que toute l'énergie peut se

« thermaliser » rapidement et ne pas être stockée sélectivement dans un mode unique. Certains modèles biophysiques ont montré que des expositions thermiques excessives peuvent interagir avec les systèmes cellulaires, en fonction de leur durée, de la température spécifique et du type de tissu. Un intérêt a été porté aux gradients de température rapides et localisés qui pourraient entraîner des « effets microthermiques » et des « points chauds » (Sheppard, 2008). Ces spéculations sont apparues récemment en rapport avec certaines conditions d'exposition aux radiofréquences de type 5G en bande 3,5 GHz et aux fréquences millimétriques. Le terme « points chauds » est également utilisé dans les modèles de dosimétrie cellulaire et subcellulaire où il fait référence aux régions où une augmentation de l'absorption de l'énergie est observée, mais sans augmentation de la température. Le terme « microthermique » peut également être utilisé pour désigner les effets qui se produisent lorsque la variation de température est très faible (par exemple, 10^{-3} K). Un effet biologique observé dans certaines conditions est par ailleurs bien connu : les systèmes radar, les systèmes d'apport d'énergie radiofréquences impulsionnels ou encore l'exposition à des fréquences millimétriques de très courte durée et d'intensité très élevée, peuvent induire dans le système auditif une onde de choc thermoélastique, qui peut produire des variations de température de l'ordre de 5×10^{-6} K, dépassant le seuil de l'audition (Lin, 2007). Cet effet a parfois été appelé « clic micro-ondes ».

Foster *et al.* (2018) ont proposé un modèle décrivant les interactions avec les tissus dans le cas de formes d'onde réalistes utilisées dans les systèmes mobiles 2G. Les fluctuations transitoires de température produites par une forme d'onde de type GSM simulée ont été considérées avec un seul « créneau » occupé (durée d'impulsion de 0,57 ms, taux de répétition de 217 Hz, rapport cyclique de 0,125). Dans cette étude, la densité surfacique de puissance appliquée était de 100 W/m^2 , ce qui est plus de 10 fois supérieur aux valeurs limites réglementaires fixées à 1,9 GHz. La densité de puissance crête pendant l'impulsion était de 800 W/m^2 , ce qui est extrêmement élevé, sans rapport avec les conditions d'exposition courantes. Dans ces conditions d'exposition très élevées, les transitoires de température résultants étaient cependant extrêmement faibles (4×10^{-6} K) (Foster, 2018). La même forme d'onde aux fréquences millimétriques (cf. paragraphe suivant) pourrait cependant produire des transitoires thermiques plus importants. Mais il semble peu probable qu'une forme d'onde utilisée dans les systèmes de communication, y compris la 5G, ait des caractéristiques de modulation telle que les transitoires thermiques produits soient significatifs (Foster, 2020).

5.2 Réflexions sur les caractéristiques possibles des futures expositions dans la bande 26 GHz

5.2.1 Introduction

Au-delà des bandes de fréquences situées entre 0,7 et 2,1 GHz et de la bande autour de 3,5 GHz, le déploiement de la 5G est également prévu, à plus long terme, dans la bande dite « millimétrique » autour de 26 GHz (appelée aussi FR2 « *Frequency Range 2* » ou 5G *Ultra Wideband*, ou encore 5G mmWave), c'est-à-dire entre 24,25 et 27,5 GHz.

Cette bande a pour but, selon les promoteurs de la 5G, d'offrir *in-fine* des « ultra » hauts débits comparables à la fibre optique (jusque 10 Gbit/s) et des faibles temps de latence dans les

communications, pour des besoins particuliers : forte densité urbaine, ports connectés, usines et véhicules autonomes¹²¹ ou communication *indoor*, dans des bâtiments.

L'emploi du terme « millimétrique » vient du fait que les longueurs d'onde dans le vide autour de 26 GHz sont proches de 10 mm. En France, l'utilisation de cette bande n'est pas nouvelle puisqu'elle est déjà employée dans plusieurs applications : satellites, faisceaux hertziens entre sites fixes, par le Centre national d'études spatiales (CNES), ou encore le ministère des armées. Comme l'indique l'Arcep, « *l'intégralité de la bande 24,25 à 27,5 GHz devrait être rendue progressivement disponible, sous réserve de conditions de coexistence avec les services de radioastronomie et d'exploration de la terre, et des travaux en cours pour évaluer l'utilisation partagée du spectre à 26 GHz entre les systèmes 5G et les stations terriennes des services par satellite dans la bande 25,5 - 27 GHz de façon à éviter un impact significatif sur la couverture et le déploiement 5G dans cette bande* » .

C'est dans ce contexte de coexistence d'usages que l'Arcep a consulté les différents acteurs de ce marché (opérateurs et industriels) pour mieux évaluer la pertinence de cette nouvelle bande 5G parmi les applications déjà existantes. Il ressort de ces discussions que, pour le moment, seule la bande de fréquences 26,5 – 27,5 GHz (donc de largeur 1 GHz) sera allouée pour d'une part être en cohérence avec le premier déploiement national et européen (décision d'exécution (UE) 2019/784¹²²) et d'autre part pour être compatible avec les législations et les développements industriels américains (États-Unis et Canada) et asiatiques (Corée du Sud et Japon), qui ont plutôt fait le choix de la bande 28 GHz (26,5 - 29,5 GHz). C'est ainsi que l'Arcep a autorisé 14 sites d'expérimentation sur une période de 3 ans ; les premiers résultats associés à des protocoles de mesures sont attendus d'ici 2022.

Au niveau européen, un certain nombre de projets innovants sur la 5G dans la bande « millimétrique », regroupant des centres de recherches, équipementiers et industriels ont été financés par le programme H2020, tels que METIS¹²³ ou mmMAGIC¹²⁴. Ces projets ont participé au développement technologique de la 5G dans la bande 26 GHz, ainsi qu'aux travaux de normalisation associés. Qu'il s'agisse des stations de base ou des téléphones mobiles, le dimensionnement et le design des antennes 5G aux fréquences autour de 26 GHz sont en effet complexes, puisque ces antennes doivent être miniaturisées tout en offrant des performances de réception et d'émission optimales.

Parmi les questions spécifiques aux ondes « millimétriques », en matière d'exposition, figurent la propagation possible des rayonnements dans le conduit auditif, dont le rayon est de 3,0 à 4,5 mm mais aussi l'absorption de l'énergie principalement au niveau de la peau ou de la cornée de l'œil, et donc une augmentation potentielle de la température de ces tissus.

Concernant la première question, il a été montré par Vilagosh *et al.* que le conduit auditif se comporte comme un guide d'onde fonctionnant en-dessous de sa fréquence de coupure et donc empêchant les ondes dans la bande 18-30 GHz d'y pénétrer (Vilagosh *et al.*, 2020).

¹²¹ L'utilisation de la sous-bande 24.25-26.65 GHz pour les radars à courte portée pour l'autonomie automobile devrait progressivement disparaître d'ici le 1er janvier 2022. Ces applications migreront vers la bande de fréquences 77-81 GHz, qui est harmonisée au niveau de l'Union européenne. (UIT-R M.1452-2)

¹²² Décision d'exécution (UE) 2019/784 de la Commission du 14 mai 2019 sur l'harmonisation de la bande de fréquences 24,25-27,5 GHz pour les systèmes de Terre permettant de fournir des services de communications électroniques à haut débit sans fil dans l'Union.

¹²³ <https://metis-ii.5g-ppp.eu/>.

¹²⁴ <https://5g-mmagic.eu/>.

La seconde question est liée au fait que, pour des fréquences autour de 26 GHz, la profondeur de pénétration des rayonnements est proche de 1 mm pour la peau humaine ou la cornée de l'œil¹²⁵, ce qui conduit à une atténuation quasi-totale à environ 3 mm de profondeur. Que ce soit pour l'œil ou la peau, même rapidement atténuée en profondeur, la pénétration des ondes se traduit par une transformation de l'énergie électromagnétique en énergie thermique.

Le mécanisme qui décrit le transfert de chaleur entre le tissu exposé et le sang peut être modélisé à l'aide de l'équation de bio-diffusion de la chaleur (appelée équation de transfert de la chaleur biologique de Pennes), fondée sur l'hypothèse que tout transfert de chaleur entre un tissu et le sang se produit dans les capillaires. Pour faire le lien entre l'énergie électromagnétique concentrée et la température, le terme source S_c dans l'équation de bio-diffusion de la chaleur de Pennes est défini comme $S_c = DAS \times \rho$ (W/m³) pour un champ continu, où ρ est la densité volumique (kg/m³) (Foster *et al.*, 2016, Foster *et al.*, 2020).

L'utilisation du DAS avec sa définition standard $\sigma E^2/2\rho$ (où E est la valeur crête du champ électrique et σ la conductivité en S/m) au-delà de 6 GHz est sujet à question, puisque comme le rappellent les nouvelles lignes directrices publiées par l'Icnirp (Icnirp, 2020), pour des fréquences au-delà de 6 GHz, l'indicateur principal pour l'évaluation de l'exposition n'est plus le DAS mais la densité surfacique de puissance absorbée, car l'absorption de l'énergie par les tissus est beaucoup plus superficielle. Il est donc préférable de réécrire le DAS de la manière suivante (Gandhi *et al.*, 1986 ; Foster *et al.*, 2020) :

$$DAS = S_{inc}(t) T_r e^{-z/L} / \rho L \quad (3)$$

avec S_{inc} la densité de puissance incidente, T_r le coefficient de transmission, L la profondeur de pénétration de l'énergie et z la distance (Foster *et al.*, 2020). Il est à noter que dans le cas d'une exposition en champ lointain, la densité de puissance incidente S_{inc} peut être extraite puisque la relation entre les composantes des champs électrique et magnétique est simple. En revanche, dans le cas du champ proche, partie qui sera abordée par la suite, dans la zone dite de Rayleigh, ces composantes sont liées de façon complexe et la question de l'influence du champ réactif sur la densité de puissance absorbée S_{ab} peut se poser (Colombi *et al.*, 2018 ; Carrasco *et al.*, 2019).

Des travaux de recherche ont été engagés sur le lien entre la densité de puissance et la température chez l'Homme : on trouve ainsi un certain nombre d'études expérimentales en bande millimétrique, mais en dehors de la bande 26 GHz (Foster 2016). En revanche, du côté de la modélisation multiphysique (couplage entre la thermique et l'électromagnétisme), il existe dans la littérature un certain nombre d'études récentes (Hirata *et al.*, 2017 ; Laakso *et al.*, 2017 ; Hirata *et al.*, 2020 ; Yinliang Diao *et al.*, 2020 ; Wu *et al.*, 2015) qui mettent en évidence les variations locales de températures lorsqu'un fantôme numérique (tête et corps réalistes ou modèles homogènes ou multicouches simplifiés) est soumis à une source d'excitation électromagnétique allant de 24 à 30 GHz. Ces études s'appuient pour la plupart sur des simulations électromagnétiques réalisées avec des logiciels (commerciaux ou « maison ») utilisant des méthodes numériques rigoureuses dites « *full-waves* » c'est-à-dire qu'elles résolvent les équations de Maxwell dans leur ensemble (méthode des moments MoM, méthode des éléments finis FEM, méthode des intégrations finies FIT, méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD). Sachant que les propriétés diélectriques

¹²⁵ La profondeur de pénétration des ondes est liée à leur fréquence, mais aussi aux propriétés diélectriques des tissus. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>.

de la peau ou de la cornée de l'œil varient très peu (*cf. Niremf op. cit.*) dans la bande 24 - 30 GHz, les résultats intégrant cette bande sont inclus dans la présente analyse autour de la fréquence 26 GHz.

Dans tous les cas, lors des simulations numériques, le maillage doit être suffisamment dense, fin et petit vis-à-vis de la longueur d'onde pour tenir compte des couches de quelques millimètres (Laakso *et al.*, 2017 ; Yinliang Diao *et al.*, 2020; Poljak *et al.*, 2019). Dans le cas contraire, les niveaux de champs électromagnétiques obtenus sont soit surestimés soit sous-estimés, en raison des erreurs numériques (Laakso *et al.*, 2017). De plus, il est important aussi de noter qu'une des difficultés liées aux simulations numériques multiphysiques concerne d'une part la maîtrise des sauts de valeurs entre les propriétés diélectriques des tissus (Samaras *et al.*, 2019 ; Wu *et al.*, 2015) et d'autre part la maîtrise des propriétés thermiques des tissus (Hirata *et al.*, 2020 ; Yinliang Diao *et al.*, 2020). Sans l'utilisation d'une méthode de lissages de maillage, les moindres écarts peuvent conduire à des variabilités importantes dans les résultats (Yinliang Diao *et al.*, 2020).

La section qui suit est décomposée en deux parties. La première aborde les expositions aux champs électromagnétiques en champ lointain autour de 26 GHz, tandis que la seconde est focalisée sur les sources proches, et plus spécifiquement l'influence du champ réactif dans les résultats de simulations numériques. Les Tableau 17 et Tableau 18 suivants présentent les valeurs limites d'exposition préconisées par l'Icnirp (Icnirp, 2020) spécifiquement à 26 GHz (*cf.* 4.1).

Tableau 17 : Restrictions de base de l'Icnirp à 26 GHz

Type d'exposition (à normaliser sur une surface de 4 cm ²)	Densité de puissance absorbée maximale	Temps moyenné
Travailleurs	100 W/m ²	6 min
Public	20 W/m ²	6 min

Tableau 18 : Niveaux de référence de l'Icnirp en fonction du type d'exposition (locale ou corps entier)

Type d'exposition	Densité de puissance incidente maximale	Temps moyenné
Travailleurs sur corps entier	50 W/m ²	30 min
Public sur corps entier	10 W/m ²	30 min
Travailleurs pour une surface de 4 cm ²	$275f_G^{0.177} = 154,5 \text{ W/m}^2$ à 26 GHz *	6 min
Public pour une surface de 4 cm ²	$55f_G^{0.177} = 30,9 \text{ W/m}^2$ à 26 GHz *	6 min

* f_G est la fréquence du signal

5.2.2 Exposition en champ lointain

Dans la pratique, les capacités de transmission et les dimensionnements des stations de bases 5G dans la bande « millimétrique » (appelées généralement *small cells* – petites cellules) dépendront de leur lieu d'intégration en zone urbaine (intérieur ou extérieur d'un bâtiment), et pourront même être intégrées aux mobiliers urbains (lampadaires ou panneaux de stations de bus, par exemple). Dans ce contexte, les « petites cellules » sont réparties en trois sous catégories (cf. Tableau 19) (Despoisse, 2020) :

Tableau 19 : Caractéristiques des Femo-Pico-Micro-Cellules

	Puissance transmise (W)	Couverture-Rayon (m)	Utilisateurs	Lieux
Femto-Cellules	0,001 à 0,25	10 à 100	1 à 30	Intérieur
Pico-Cellules	0,25 à 1	100 à 200	30 à 100	Intérieur/extérieur
Micro-Cellules	1 à 10	200 à 2 000	100 à 2 000	Intérieur/extérieur

Des tests de pico et micro-cellules réalisés dans des villes américaines ont montré des débits élevés (100 Mbps sur 5 km à Janesville dans le Wisconsin (Ericsson¹²⁶) ou 2 Gbps sur une centaine de mètres au MetLife Stadium à New-York¹²⁷). Néanmoins, ils ne peuvent être généralisés car d'une part, en espace libre, les pertes s'accroissent en temps de pluie, de brouillard ou de neige et d'autre part, ils ont été pratiqués dans une plaine désertique sans aucun obstacle pour le test au Wisconsin et sans public dans le stade à New-York. Dans les deux cas, il est par ailleurs probable que le maximum de puissance autorisée entre l'émetteur et le récepteur ait été employée. En effet, de nombreuses études expérimentales montrent que les pertes par propagation et par absorption dans les espaces urbains ou forestiers, ou dans les milieux biologiques, sont importantes. Par exemple, concernant les pertes dans les lieux publics, on peut se référer à l'étude d'Edmond *et al.* qui montre une perte de pénétration d'au moins 5 dB (soit 70 % de pertes en puissance) pour des signaux à 28,8 GHz traversant un mur creux en plaques de plâtre de quelques millimètres d'épaisseur (Edmond *et al.*, 1988), ou encore à celles de Wang *et al.* et Haneda *et al.* qui confirment des niveaux de pertes d'au moins 5 dB à travers une porte en bois ou encore une vitre simple ou teintée de quelques millimètres (Wang *et al.*, 2017 ; Haneda *et al.*, 2016). Concernant le mode de propagation et de diffusion en milieu urbain (*outdoor*) ou à l'intérieur des bâtiments (*indoor*), on peut se référer à des études récentes (Kim *et al.*, 2020 ; Khalily *et al.*, 2018 ; Medbo *et al.*, 2017 ; Azpilicueta *et al.*, 2020) qui montrent à travers des modélisations numériques la complexité des cartographies des champs et leur atténuation selon l'emplacement des sources dans la zone concernée (*outdoor* ou *indoor*). Dans le cas « *indoor* » étudié dans (Kim *et al.*, 2020), les résultats qui ont pris en compte les modèles de l'affaiblissement de propagation proposés par le consortium *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) montrent qu'à 28 GHz, les pertes de transmission peuvent atteindre 73 dB selon l'agencement des pièces et des obstacles, autrement dit en configuration de propagation sans visibilité directe (*non-line-of-sight* - NLOS).

¹²⁶ <https://mb.cision.com/Main/15448/3195339/1307411.pdf>.

¹²⁷ <https://www.verizon.com/about/news/verizon-5g-ultra-wideband-service-live-13-nfl-stadium>.

Concernant l'exposition du corps humain à une source de rayonnement de type antenne cornet, distante de d , en champ lointain, on peut se référer à la surface effective d'illumination illustrée sur la Figure 24. Le rayon r de la surface circulaire est alors estimé par :

$$r = d \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

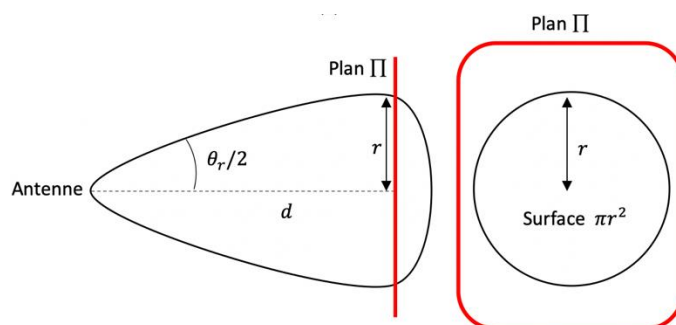
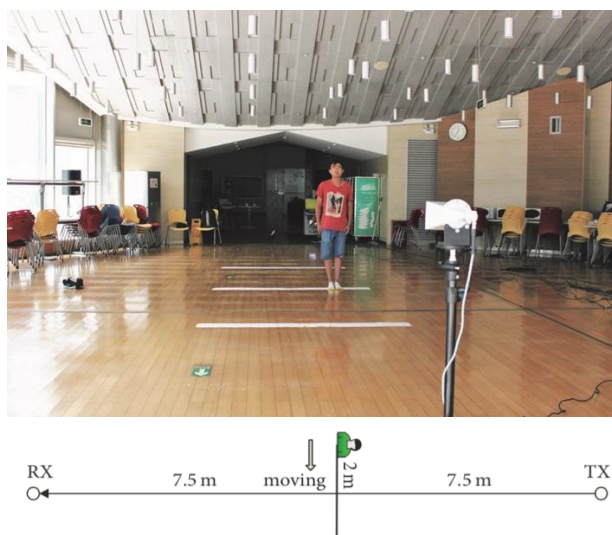


Figure 24 : Surface effective d'illumination sur un plan issu d'un rayonnement

Afin d'estimer la surface d'illumination d'une onde à 26 GHz, prenons comme exemple les données expérimentales utilisées dans l'étude de (Wang et al., 2018) indiquées dans la Figure 25 ci-dessous.



Parameter	26 GHz
Bandwidth	1 GHz
Maximum delay	1.024 us
Delay resolution	1 ns
Tx power	24 dBm
Heights of the Tx/Rx	1.3/1.3 m (human) 6.0/2.0 m (tree)
Gain of the horn antenna	24.3 dBi
Polarization of the horn antenna	Vertical
HPBW of the horn antenna	10°

Figure 25 : Mesure à 26 GHz et caractéristiques de l'antenne cornet utilisée

Source : Wang et al., 2018

La distance d entre la source et le point de mesure est de 7,5 m, et l'antenne cornet employée possède un angle θ à -3 dB (cf. paramètre HPBW dans le tableau à droite de la Figure 25) égal à 10° . Ainsi, d'après l'équation (4) on obtient un rayon r de 65 cm, soit une surface circulaire d'illumination effective πr^2 de $1,34 \text{ m}^2$. Au vu de ce résultat et sachant que la largeur d'un tronc humain est en moyenne de 50 cm, on peut conclure qu'une personne sera illuminée par l'onde plane sur une bonne partie du tronc.

On peut également, d'après ces données expérimentales, estimer le champ électrique incident (valeur crête) ainsi que la densité de puissance incidente équivalente en utilisant les formulations suivantes :

$$E = \frac{\sqrt{60GP_a}}{d} = 8,5 \text{ V/m} \quad (5)$$

$$S_{inc} = \frac{|E|^2}{Z_o} = 0,2 \text{ W/m}^2 \quad (6)$$

D'après le tableau de la Figure 25, le gain de l'antenne cornet vaut $G_{dB} = 24,3 \text{ dBi}$ (soit $G = 269,15$) et la puissance d'alimentation est de 24 dBm (c'est-à-dire $P_a = 0,25 \text{ W}$), soit la puissance maximale pour une femto-cellule.

$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_o \mu_r}{\epsilon_o \epsilon_r}}$ représente l'impédance caractéristique du milieu de propagation, soit $120\pi \text{ Ohm}$ pour l'air ($\mu_r = 1, \epsilon_r = 1, \epsilon_o = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}, \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$).

Ces résultats laissent envisager que la densité de puissance incidente S_{inc} issue d'une antenne femto-cellule, dans ces conditions expérimentales, sera très inférieure à la valeur limite d'exposition recommandée de 10 W/m^2 pour une durée d'exposition de 30 min pour le corps entier.

5.2.2.1 Estimation de l'élévation de la température de la surface de la peau

Comme indiqué précédemment, la faible profondeur de pénétration de l'onde implique que l'énergie électromagnétique est absorbée au niveau de la peau ou de la membrane de l'œil. Ainsi, en raison du mécanisme du refroidissement convectif par le flux sanguin dans la peau et de la conduction thermique, l'énergie électromagnétique transformée en énergie thermique va engendrer une élévation de la température en surface de la peau, qui peut être estimée analytiquement en utilisant la relation suivante (Foster *et al.*, 2016 ; Foster *et al.*, 2020) :

$$T_{ss} = \frac{S_{ab}L}{k(\tau_2/\tau_1 + \sqrt{\tau_2/\tau_1})} \quad (7)$$

où $\tau_1 = 1/\rho m_b$ et $\tau_2 = L^2 \rho C_p / k$ correspondent à des temps intrinsèques caractérisant le refroidissement convectif par le flux sanguin et la conduction thermique de la peau. L représente la profondeur de pénétration de l'énergie; k la conductivité thermique, ρ la densité volumique, C_p la capacité thermique et m_b le paramètre de la perfusion.

Les valeurs de tous ces paramètres sont accessibles dans (Foster *et al.*, 2020).

S_{ab} représente la densité de puissance absorbée qui est reliée à la densité de puissance incidente S_{inc} par la relation suivante :

$$S_{ab} = T_r S_{inc} \quad (8)$$

Le coefficient de transmission T_r est proche de 0,5 (Foster *et al.*, 2020 ; Sasaki *et al.*, 2017) autour de 26 GHz. Il est à noter que le textile (laine ou coton) (Sacco *et al.*, 2020) aura une influence sur la densité de puissance incidente et donc sur le niveau de la densité de puissance absorbée S_{ab} sur la peau, ce qui réduira le coefficient de transmission T_r .

Les résultats de modélisation dans (Foster *et al.*, 2020 ; Sasaki *et al.*, 2017) pour des ondes continues ou intermittentes confirment que l'élévation de température à des fréquences autour de 26 GHz, pour des densités de puissance incidentes allant de 10 W/m^2 à 50 W/m^2 , sont nettement inférieures à 1°C . Compte tenu de ces éléments, et en se fondant sur la densité de puissance incidente effective de $0,2 \text{ W/m}^2$ issue du précédent exemple d'illustration, on peut estimer que le rayonnement issu d'une antenne femto-cellule impliquera une très faible élévation de la température, proche de quelques millièmes de $^\circ\text{C}$.

Un autre point important à soulever dans les résultats de simulation en champ lointain est le fait qu'il est très difficile de réaliser l'envoi d'une onde focalisée issue d'une antenne réaliste sur un fantôme numérique. En effet, la source et la cible doivent être séparées de quelques mètres ; ce qui n'est, pour l'heure, pas envisageable en matière de ressources mémoires pour un logiciel. C'est pour cette raison que les simulations numériques en champ lointain se contentent usuellement d'utiliser des conditions limites de Dirichlet afin d'imposer une onde plane sur l'une des frontières de la boîte de calcul entourant un fantôme numérique réaliste 3D (Hirata *et al.*, 2017 ; Laakso *et al.*, 2017 ; Diao *et al.*, 2016 ; Hirata *et al.*, 2020). En revanche, comme illustré dans la Figure 26(a), l'utilisation d'un code numérique « maison » de type FDTD a permis à l'équipe de Hirata (Hirata *et al.*, 2017) d'imposer un faisceau localisé circulaire sur la surface d'un modèle simplifié multi-couches, avec différents diamètres de focalisation (de 5 à 40 mm). La Figure 26(b) montre les résultats de l'élévation de la température de surface normalisés par rapport à l'envoi d'une onde plane. Dans les deux cas (onde plane et faisceau), la puissance incidente est de 10 W/m². Les résultats montrent que la densité de la puissance absorbée pour un diamètre de 40 mm correspond à 90 % de celle d'une onde plane. Les auteurs ont conclu que l'élévation de la température pour une puissance absorbée issue d'un faisceau d'un diamètre de 50 mm, ce qui correspondrait à une surface de 20 cm² (ancienne recommandation en matière de restrictions de base de l'Icnirp, à savoir 10 W/m² pour 20 cm²), sera équivalente à celle engendrée par une onde plane.

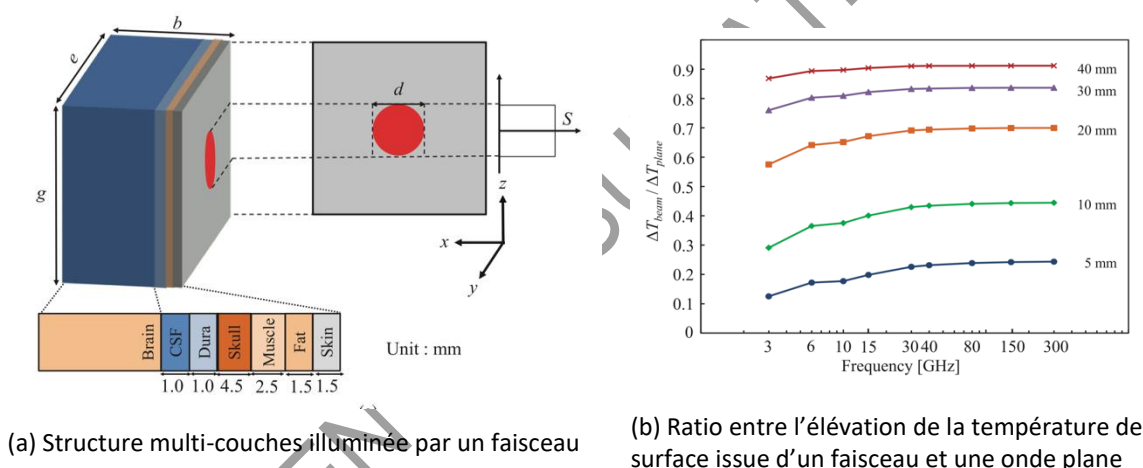


Figure 26 : Simulation d'un modèle simplifié multicouches soumis à un faisceau

Source : Hirata 2017

Considérant les nouvelles recommandations de l'Icnirp (Icnirp, 2020) qui se fondent sur une surface de 4 cm², cette situation correspondrait à 26 GHz à un faisceau de 22 mm de diamètre, soit l'équivalent de 75 % de l'élévation de la température dans le cas d'une onde plane.

5.2.2.2 Estimation de l'élévation de la température à la surface de l'œil et de la tête

Dans le cas de l'œil, et plus spécifiquement de la cornée et du cristallin, il n'est pas possible d'utiliser la formulation analytique (7) puisque le mécanisme de refroidissement convectif par le flux sanguin ne s'applique pas ici. Dans ce cas, il est nécessaire de pratiquer des simulations numériques avec l'une des méthodes rigoureuses précédemment citées. Dans la littérature, on trouve des travaux de simulations de référence sur l'œil (Diao *et al.*, 2016 ; Wessapan *et al.*, 2014 ; Poljak et Cvetkovic, 2019) mais pour des fréquences inférieures à 26 GHz. L'article de Bernardi (Bernardi *et al.*, 1998) est l'une des rares études qui ait abordé directement la question de l'élévation de la température à 30 GHz sur la cornée pour une onde d'une densité de puissance incidente S_{inc} de 10 W/m². Bien que comme le montre la Figure 27, le fantôme

numérique de l'œil basé sur une modélisation FDTD présente un maillage assez grossier, les auteurs ont conclu que, sur la base des résultats obtenus, il apparaît que l'utilisation des valeurs limites d'exposition proposées par les différents organismes de protection contre les rayonnements électromagnétiques entraînent des augmentations de température dans l'œil qui ne sont pas susceptibles d'induire une opacification du cristallin, tout au moins à court terme.

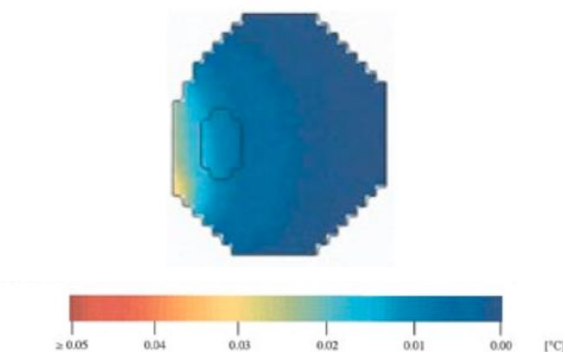


Figure 27 : Simulation de la distribution de l'élévation de la température sur l'œil pour 10 W/m² à 30 GHz (Bernardi *et al.*, 1998)

Une autre étude (Zhao *et al.*, 2006) a abordé l'exposition de l'œil par une onde plane à 30 GHz, avec une densité de puissance incidente de 10 W/m², mais faute d'un couplage avec l'équation de Pennes de bio-diffusion de la chaleur, seuls les DAS normalisés (*cf.* Figure 28) selon les masses locales ont pu être donnés (impossibilité de moyenner sur 10 g car la masse de l'œil n'est que de 7 g). Les auteurs comparent leur résultat du DAS sur l'œil entier ($17,7 \cdot 10^{-2}$ W/kg pour 7,1 g) par rapport à la valeur limite de 2 W/kg pour 10 g de tissus, alors en vigueur à l'époque de réalisation de l'étude. Or, cette comparaison se semble pas correcte, puisque la recommandation de 2 W/kg pour 10 g n'était valable que pour des fréquences en dessous de 6 GHz. En effet, l'Icnirp indique qu'au-delà de 6 GHz, le DAS n'est plus un indicateur pertinent pour évaluer le niveau d'exposition. Les auteurs notent toutefois que la concentration du DAS au niveau de la cornée est plus importante que dans les autres tissus de l'œil, ce qui traduit bien une concentration de l'énergie au niveau de la cornée.

Table 2 Average SARs of major eye tissues

Tissue	Voxel count	Mass (g)	SAR (10^{-2} W/kg)
Cornea	5518	0.0905	931
Lens cortex	3668	0.0602	0.301
Lens nucleus	3338	0.0548	0.0675
Humor	308583	4.82	3.73
Whole eye	447708	7.10	17.7

Figure 28 : Valeurs de DAS dans les tissus de l'œil à 30 GHz (exposition de 10 W/m²)

Source : Zhao *et al.*, 2006

L'étude réalisée par Laakso *et al.* a évalué l'élévation de température des tissus de la tête exposés à une source lointaine, d'intensité très élevée. La Figure 29 représente la distribution surfacique de températures obtenue par simulation sur un fantôme numérique réaliste de tête humaine (Laakso *et al.*, 2020). L'exposition à une onde plane incidente uniforme intermittente, sur une durée de 5s, à une intensité très élevée, bien au-delà des valeurs limites d'exposition, provoque une élévation de la température non uniforme. En effet, à 26 GHz, la longueur d'onde

dans les tissus est proche de 2 mm, ce qui implique que l'onde électromagnétique interagit avec les reliefs du visage. Ainsi, selon la polarisation de l'onde incidente, plusieurs points chauds de température se forment en raison de réflexions et de diffractions multiples au niveau du nez et d'autres parties du visage. Leurs emplacements correspondent aux maxima d'absorption de la puissance électromagnétique

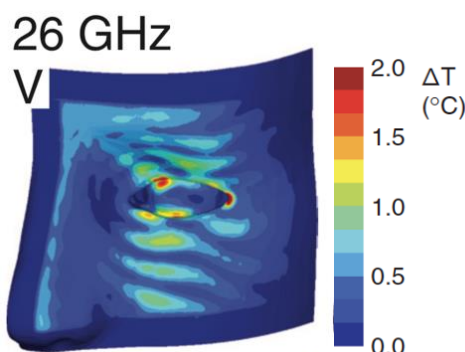


Figure 29 : Élévation de la température du visage suite à l'exposition pendant 5s à une onde plane de 1 000 W/m²

Source : Laakso et al, 2020

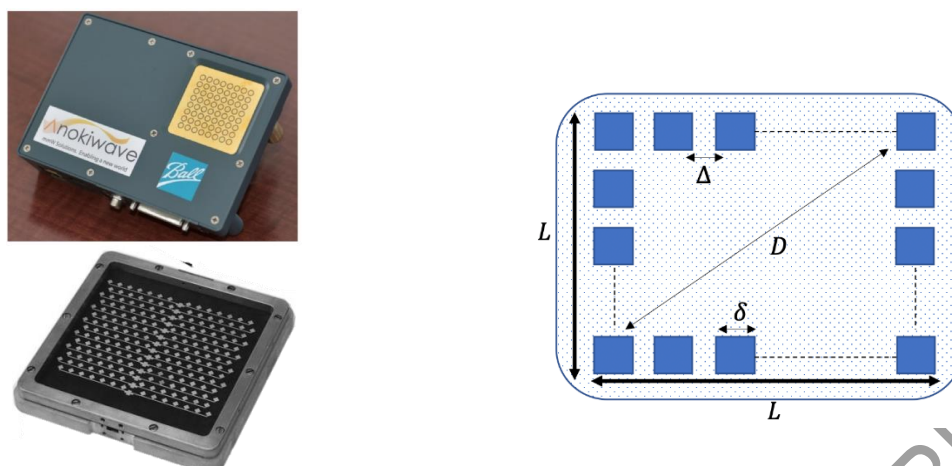
5.2.2.3 Estimation du niveau d'exposition pour un réseau d'antennes 2D

Bien que la mesure d'exposition réalisée par Wang et al. (Wang et al., 2017) a été réalisée avec une simple antenne cornet directive, elle peut aider à mieux appréhender le scénario d'un rayonnement issu par exemple d'un réseau 2D d'antennes 5G dans la bande « millimétrique », qui peut avoir des gains supérieurs à 20 dBi selon le nombre d'antennes élémentaires incorporées. Comme le montre la Figure 30(a), on trouve des réseaux composés de 64 éléments^{128,129,130} (Zhang et al., 2019 ; Raney et al., 2018) à 256 éléments (Hautcoeur et al., 2010) déposés sur un substrat du type RT-Duroïd ($2 < \epsilon_r < 4$). La Figure 30(b) illustre les caractéristiques dimensionnelles d'un réseau 2D d'antennes.

¹²⁸ <https://www.microwavejournal.com/articles/29486-element-reconfigurable-28-ghz-5g-active-antenna>.

¹²⁹ <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21131231/knowles-precision-devices-building-blocks-for-28ghz-small-cells>.

¹³⁰ <https://www.remcom.com/examples/2019/3/19/design-and-simulation-of-28-ghz-beamforming-system-and-antenna-array-for-5g-network-base-stations>.



(a) Exemple de réseaux d'antennes à 64 et 256 éléments à 28 GHz et 24 GHz

(b) Illustration d'un réseau de $N \times N$ éléments

Figure 30 : Réseaux d'antennes dans la bande « millimétrique »

En considérant qu'un réseau 2D est la superposition de deux réseaux linéaires uniformes composés de N antennes, on peut en déduire que les angles à -3 dB de réseaux 2D composés de 64 antennes ($N = 8$) et 256 antennes ($N = 16$) sont respectivement $\theta = 12,7^\circ$ et $\theta = 6,34^\circ$. (Balanis *et al.*, 2005), ce qui implique (d'après l'équation 4) des rayons effectifs d'illumination de 11 cm à 20 cm.

La taille δ de chaque antenne planaire est usuellement de l'ordre de $\lambda_g/2$ (où $\lambda_g = \lambda/\sqrt{\epsilon_r}$ est la longueur d'onde guidée) et le pas Δ du réseau (selon les directions x ou y) est choisi à $\lambda_g/2$ pour optimiser le rayonnement du lobe principal tout en minimisant les lobes secondaires (Balanis *et al.*, 2005). Ainsi, si on considère le réseau comme une surface carrée de dimension $L \times L$ avec $L = [N\delta + \Delta(N - 1)] = (2N - 1)\lambda_g/2$ (puisque $\delta = \Delta = \lambda_g/2$), la dimension la plus grande du réseau d'antennes est alors sa diagonale, à savoir $D = \sqrt{2}L$. Pour des réseaux de 64 antennes ($N = 8$) et 256 antennes ($N = 16$), on obtient respectivement $D = 15 \lambda_g/\sqrt{2}$ et $D = 31 \lambda_g/\sqrt{2}$. Les distances pour être en champ lointain se déterminent en appliquant la limite de Fraunhofer $2D^2/\lambda$, c'est-à-dire $15^2 \lambda/\epsilon_r$ et $31^2 \lambda/\epsilon_r$, ce qui donne respectivement des distances proche de 1 m et 4 m si on considère $\epsilon_r=3$.

En considérant toutes les hypothèses précédentes, le Tableau 20 présente, pour le cas d'une antenne femto-cellule (avec une puissance maximale de 0,25 W), les valeurs estimées du rayon effectif d'illumination, du champ électrique, de la densité de puissance absorbée et de la température de surface au niveau de la peau, pour des distances en champ lointain de 1 m et 4 m, selon différents critères (nombre d'éléments d'antennes, gain, angle θ à -3 dB) (Despoisse *et al.*, 2020).

Tableau 20 : Scénarios d'exposition pour une antenne femto-cellule

	Rayon effectif d'illumination	Champ électrique incident	Densité de puissance absorbée	Température de la peau
64 éléments, Gain =24 dBi, $\theta = 12,7^\circ$ (pour 1 m)	11 cm	43,40 V/m	2,5 W/m ²	45,22 m°C
256 éléments, Gain =30 dBi, $\theta = 6,34^\circ$ (pour 3,7 m)	20 cm	23,4 V/m	0,72 W/m ²	13,15 m°C

Source : Despoisse et al., 2020

5.2.2.4 Exposition à des ondes intermittentes

Quelles sont les conséquences de l'exposition à des ondes intermittentes dans les bandes de fréquences « millimétriques » sur le mécanisme du transfert de chaleur ? Dans cette situation, l'Icnirp recommande d'utiliser l'énergie absorbée à la place de la densité de puissance absorbée comme indicateur d'exposition. Foster a proposé un modèle analytique pour estimer l'élévation de la température selon la durée de l'impulsion, qui peut être plus ou moins importante en fonction du temps intrinsèque τ_2 caractérisant la conduction thermique de la peau (Foster et al., 2020). La Figure 31 montre les élévations maximales de température consécutives à des expositions à des ondes de durée limitée (10 s, 1 s, impulsion) et de densité surfacique d'énergie de 18 kJ/m² (valeur limite recommandée par l'agence américaine *Federal Communications Commission*) et à une onde continue de densité de puissance de 50 W/m². Il est à noter que bien que les impulsions engendrent des élévations de température très élevées, elles décroissent très rapidement. Les auteurs soulèvent ainsi la question de l'effet réaliste de ces pics sur l'élévation de la température de la peau. Ces résultats récents obtenus sur un modèle analytique doivent être vérifiés par des simulations numériques 3D plus approfondies.

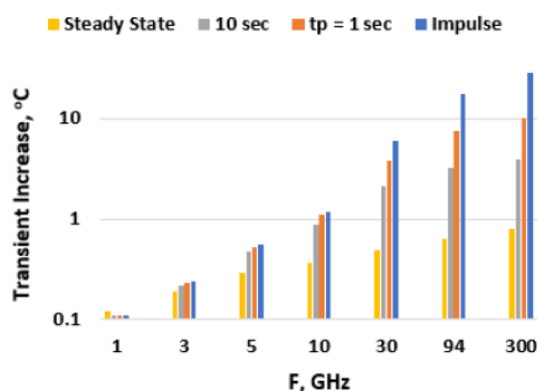


Figure 31 : Élévations de température de la peau liées à différentes formes d'onde (modèle analytique)

Source : Foster et al., 2020

5.2.3 Exposition en champ proche

L'exposition en champ proche se différencie du champ lointain par le fait que, d'une part le rayonnement ne peut plus être considéré comme une onde plane et, d'autre part, par le fait que l'environnement proche de l'antenne (main, tête, mur, etc...) crée un couplage avec la

source, ce qui modifie l'adaptation¹³¹ et le rayonnement de l'antenne. Deux limites particulières doivent être distinguées dans la zone de champ proche :

- la limite dite de Rayleigh (distance comprise entre la source et $D^2/2\lambda$) pour laquelle le champ est réactif, c'est-à-dire que l'énergie est stockée avec une contribution importante de la composante magnétique ;
- la zone dite de Fresnel (distance comprise entre $D^2/2\lambda$ et $2D^2/\lambda$) pour laquelle le champ est radiatif, c'est-à-dire que l'énergie s'épanouit pour former progressivement le rayonnement.

Pour l'exemple des antennes femto-cellules indiquées précédemment, la limite $D^2/2\lambda$ pour un réseau de 64 antennes ($N = 8$) serait de $15^2\lambda/4\epsilon_r$, soit près de 0,25 m et pour un réseau de 256 antennes ($N = 16$) elle serait de $31^2\lambda/4\epsilon_r$, soit près de 1 m.

5.2.3.1 Contribution du champ réactif

Pour des expositions issues de téléphones mobiles intégrant des antennes de petites dimensions (cf. 5.2.3.2), ces notions de distances perdent leur sens car, contrairement aux réseaux d'antennes, on ne peut pas définir ici la plus grande dimension D de l'antenne. Ainsi, pour des antennes de petites dimensions, la zone de Rayleigh est définie par le facteur $\lambda/(2\pi)$ (Balanis *et al.*, 2005 ; Colombi *et al.*, 2018 ; Carrasco *et al.*, 2021) comme dans le cas d'une antenne ponctuelle, soit près de 2 mm autour de la bande de fréquence 26 GHz. Dans cette zone très proche, les termes $1/r^2$ et $1/r^3$ d'atténuation du champ électromagnétique sont prépondérants sur ceux en $1/r$, ce qui implique que les champs électriques et magnétiques décroissent très rapidement. Ainsi, la densité de puissance rayonnée décroît très rapidement, car elle contient des termes en $1/r^5$. L'exposition de la tête ou de toute autre partie du corps à une source placée dans cette zone inférieure à $\lambda/(2\pi)$ est difficile à déterminer, en raison du couplage particulièrement complexe dans cette zone. En effet, en première approximation on pourrait penser que la partie réactive du champ va dépendre fortement de la présence de la tête (Zhao *et al.*, 2016), mais comme le soulignent Colombi *et al.*, la partie réactive du champ ne contribue en réalité que très faiblement à la puissance dissipée totale puisque le couplage entre la tête et l'antenne provoque une désadaptation de l'antenne (Colombi *et al.*, 2018). Ainsi, l'augmentation éventuelle de ce couplage va être compensée par la diminution de puissance provoquée par la désadaptation de l'antenne. La présence de la main accentue ce phénomène.

Dans les études de Colombi *et al.* et Carrasco *et al.*, les auteurs soulèvent le fait que ce couplage entre la partie réactive du champ et la tête sera en réalité très faible, car la distance entre la tête et les antennes miniatures intégrées au sein d'un smartphone est conditionnée par l'épaisseur de la coque de ce dernier, qui est supérieure à 2 mm (Colombi *et al.*, 2018 ; Carrasco *et al.*, 2021).

5.2.3.2 Estimation du niveau d'exposition

Le groupement 3GPP a proposé des spécifications pour la puissance minimale du terminal mobile en ondes millimétriques, pour que le bilan de puissance émetteur-récepteur soit satisfaisant tout en limitant les interférences. Cette puissance est exprimée en puissance rayonnée totale ou en de puissance rayonnée isotrope équivalente (EIRP).

¹³¹ L'adaptation d'une antenne représente sa capacité à transférer l'énergie électrique qui lui est communiquée en rayonnement dans l'environnement.

Des simulations du rayonnement d'un téléphone mobile disposant d'un réseau linéaire d'antennes à 4 ou 8 éléments ont été réalisées pour des fréquences de 28 et 39 GHz. Les résultats montrent que les puissances recommandées par le 3GPP pour les communications sont compatibles avec les limites d'exposition proposées par l'Icnirp (Xu *et al.*, 2019).

Le niveau d'exposition en situation de champ proche dépendra des antennes mobiles intégrées dans les futurs *smartphones*. Comme illustré sur la Figure 32, les modèles d'antennes proposés sont généralement des cellules de réseaux d'antennes planaires parfois à base de motifs à fente déposés sur un substrat du type RT-Duroïd. Étant donné que l'ensemble doit être intégré dans un environnement miniaturisé, le nombre d'antennes planaires repliées est limité à quelques éléments pour quelques centimètres de long (Curtis *et al.*, 2016). Cela permet des gains proches de 10 dBi (Navqi *et al.*, 2019 et 2020 ; Mantash *et al.*, 2020) avec des diagrammes de rayonnement proches d'une émission quasi-omnidirectionnelle, qui donne la possibilité de recevoir le maximum d'énergie provenant des stations de base selon plusieurs angles d'incidence.

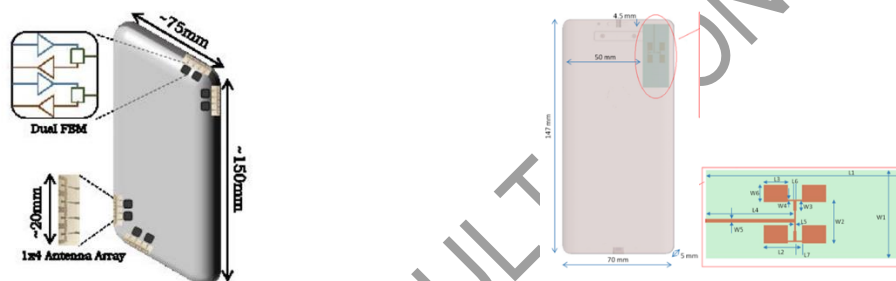


Figure 32 : Illustrations pour les emplacements des futures antennes (Curtis)(Morelli)

Un certain nombre d'études (Colombi *et al.*, 2018 ; Tooba *et al.*, 2018 ; Hirata *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2018 ; Ojaroudi *et al.*, 2019 ; Morimoto *et al.* 2016 et 2017), dont une très récente (Morelli *et al.*, 2021), ont permis de calculer la puissance absorbée en champ proche issue d'un réseau d'antennes à 26 GHz (dipôle, *patch* ou à base de motifs à fente) à quelques millimètres de distance d'un fantôme numérique multicouches (Colombi *et al.*, 2018 ; Tooba *et al.*, 2018 ; Hirata *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2018) ou plus réaliste (Ojaroudi *et al.*, 2019 ; Morimoto *et al.* 2016 et 2017 ; Morelli *et al.*, 2021). Les résultats de Morelli montrent que pour tous les scénarios d'exposition considérés, les valeurs de la densité de puissance absorbée sont très faibles. Les calculs de la profondeur de pénétration du champ électrique ont montré que l'énergie électromagnétique est rapidement absorbée dans l'épiderme et le derme. Des valeurs élevées de DAS local maximal, localisées au niveau de la peau, sont observées, ainsi que des différences faibles entre les adultes et les enfants.

5.2.4 Conclusions

L'exposition aux champs électromagnétiques liés aux applications 5G dans la bande 26 GHz se différencie de celle de la bande 3,5 GHz par le fait que la profondeur de pénétration des ondes est de l'ordre du millimètre, ce qui conduit à une exposition superficielle pour la peau ou l'œil. Les estimations issues de données expérimentales et de simulations concernant l'exposition à des sources lointaines (distances de plusieurs mètres) indiquent que les densités de puissance absorbées au niveau de la peau seront faibles et n'occasionneront que de très faibles élévations de température. Concernant l'exposition à des sources proches (par

exemple les téléphones mobiles), les simulations électromagnétiques réalisées pour étudier le couplage entre la tête ou les mains et les antennes miniatures intégrées laissent présager que les niveaux d'exposition devraient être faibles. L'ensemble de ces résultats devra être confirmé par exemple par les données expérimentales issues des 14 sites d'expérimentation que l'Arcep a autorisé sur une période de 3 ans et pour laquelle les premiers résultats sont attendus d'ici 2022.

DOCUMENT EN CONSULTATION PUBLIQUE

6 Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques émis par la technologie 5G

6.1 Méthode d'évaluation

6.1.1 Des approches différentes selon la bande de fréquences considérée

Le déploiement de la technologie 5G est prévu dans différentes bandes de fréquences. Durant ces travaux d'expertise, aux deux bandes de fréquences initialement prévues dans les plans de déploiement des opérateurs mobiles et autres acteurs industriels de la 5G, autour de 3,5 GHz et de 26 GHz, sont venues se rajouter fin 2020 les fréquences situées dans les bandes autour de 700 et 2 100 MHz (bandes 700, 800, 1 800 et 2 100 MHz), déjà utilisées pour la téléphonie mobile 3G et 4G notamment. Ce choix des opérateurs mobiles s'explique notamment par la possibilité de réutiliser des antennes déjà existantes, afin d'assurer rapidement une couverture du territoire suffisante, au détriment cependant du très haut débit annoncé avec la 5G, qui sera rendu possible en utilisant notamment les technologies d'antennes actives et des bandes de fréquences plus larges permises autour de 3,5 GHz.

Il est à noter qu'il existe très peu d'études consacrées aux nouvelles bandes de fréquences de la 5G. Le groupe de travail s'est donc intéressé à des bandes de fréquences plus larges que celles prévues pour le déploiement de la 5G.

Pour l'étude des effets sanitaires éventuels dans la bande 700-2 500 MHz, le groupe de travail s'est appuyé sur les expertises précédentes de l'Anses portant sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques radiofréquences (Anses, 2013 et 2016) et sur des rapports d'expertises internationaux récents. À noter par ailleurs qu'une expertise s'intéressant aux effets cancérogènes des radiofréquences est en cours d'instruction à l'Anses (toutes bandes de fréquences confondues).

Pour la bande 3,5 GHz spécifiquement, il n'existe qu'un très petit nombre de publications scientifiques étudiant des effets sanitaires éventuels dans cette gamme de fréquences. De ce fait, la possibilité d'utiliser les résultats d'études obtenus à des fréquences voisines a été étudiée. Une réflexion concernant l'impact de la fréquence sur les réponses physiologiques/biologiques chez l'humain et l'animal dans les bandes de fréquences proches de la téléphonie mobile (900 MHz - 2,5 GHz, pour lesquelles il existe une littérature abondante) a ainsi été menée, elle est présentée dans le paragraphe 6.3.2. Les conclusions du groupe de travail concernant les effets sanitaires éventuels des expositions aux champs électromagnétiques dans la bande autour de 3,5 GHz s'appuient ainsi sur ces deux types de données : les quelques études scientifiques disponibles (bande 3,5 GHz) et la réflexion sur l'impact de la fréquence sur des effets biologiques ou physiologiques observés (bande 900 MHz - 2,5 GHz).

Enfin, concernant la bande de fréquences situées autour de 26 GHz, le groupe de travail a considéré toutes les publications utilisant des fréquences entre 18 et 100 GHz. Les études conduites dans cette bande de fréquences sont notamment relatives à des technologies radar ou encore à des dispositifs thérapeutiques.

Le Tableau 21 ci-dessous synthétise les modalités d'expertise du groupe de travail en fonction des bandes de fréquences considérées.

Tableau 21 : Modalités d'expertise en fonction des bandes de fréquences considérées

Fréquences	Commentaires	Méthode d'évaluation
Bande 700 – 2 500 MHz	Connaissance du déploiement dans cette bande en cours d'expertise	S'appuyer sur les expertises antérieures Anses et compléter par les expertises les plus récentes à l'étranger
Bande 3,5 GHz	Très peu de publications dans la littérature scientifique	Prise de connaissance des quelques publications disponibles. Réflexion concernant l'impact de la fréquence sur les réponses physiologiques/biologiques chez l'humain et l'animal dans les bandes de fréquences proches de la téléphonie mobile (900 MHz-2,5 GHz) pour lesquelles il existe une littérature conséquente)
Bande 26 GHz	Quelques publications dans la littérature scientifique, à des fréquences et pour des applications très diverses	Tentative d'évaluation du niveau de preuve

6.1.2 Recueil de la littérature scientifique pour les bandes de fréquences autour de 3,5 GHz et 26 GHz

Pour les bandes de fréquences autour de 3,5 GHz et 26 GHz, la présente expertise s'est appuyée sur une analyse de la littérature scientifique internationale disponible recherchant les effets biologiques et sanitaires liés à une exposition aux champs électromagnétiques dans ces bandes de fréquences utilisées par les technologies 5G. Pour ce faire, une recherche bibliographique a été menée prenant en compte différentes sources de données :

- publications issues de la recherche bibliographique implémentée par le groupe de travail ;
- publications issues de la bibliographie du rapport intermédiaire du rapport de l'Anses (Anses, 2019) ;
- publications issues de la bibliographie de la revue de Mattson (Mattson, 2020) ;
- publications transmises par les membres du comité de dialogue « radiofréquences et santé ».

Les principaux effets discutés pour les bandes de fréquences autour de 3,5 GHz et 26 GHz concernent la peau, l'œil, le système nerveux, les membranes et la génotoxicité.

6.1.2.1 Période de référence

La recherche bibliographique a été réalisée sur la période qui s'étend de janvier 2012 à juillet 2020. Certaines études clés, parues de juillet 2020 à mars 2021 ont également été incluses lorsqu'elles ont été jugées pertinentes et de qualité satisfaisante. De plus, les experts ont pu

inclure dans la bibliographie toutes études parues avant 2012 si cela semblait nécessaire, notamment pour présenter un état de l'art dans les parties introductives des chapitres relatifs aux effets sanitaires.

6.1.2.2 Moteurs de recherche

Les moteurs de recherche utilisés lors de cette expertise sont Scopus (<http://www.scopus.com/home.url>) et PubMed.

Scopus est un outil permettant d'effectuer des recherches dans une base de données bibliographiques scientifiques pluridisciplinaire répertoriant notamment des publications biologiques, médicales mais aussi relatives aux sciences humaines et sociales. PubMed est un moteur de recherche centré sur les publications du domaine médical et des sciences de la vie.

6.1.2.3 Typologie des documents expertisés

Les documents pris en compte dans l'expertise sont des articles et des revues scientifiques publiés en langue anglaise ou française dans des revues à comité de lecture, sans préjuger de leur facteur d'impact.

Les revues descriptives ou narratives, qui consistent à synthétiser l'ensemble des études publiées sur un sujet donné sur une période de temps définie n'ont pas, quant à elles, été analysées.

6.1.2.4 Bibliographie

Dans un premier temps, le groupe de travail a listé, sur la base d'avis d'experts, l'ensemble des mots clef associés aux effets sanitaires possibles liés à une exposition aux technologies 5G. Ceci a permis de définir, au-delà des effets sur la santé de manière générale, plusieurs catégories d'effets sanitaires à investiguer.

6.1.3 Une analyse collective

Les experts du groupe de travail ont analysé et discuté collectivement les articles recensés.

Chaque article a été sélectionné à partir de son titre et de son résumé afin d'évaluer sa pertinence par rapport à la question traitée. Les articles retenus ont ensuite été analysés en détail par deux experts, et un troisième expert, compétent pour juger de la qualité du système d'exposition, a complété l'analyse critique de chaque article. Ces analyses ont alors été triées selon le type d'effet étudié et discutées en réunions plénières, afin d'évaluer collectivement le niveau de qualité méthodologique de la publication.

6.1.4 Critères de qualité retenus pour l'analyse des études et présentation des résultats

Lors de l'analyse des publications, les experts ont exclu celles qui présentaient des faiblesses méthodologiques majeures, comme par exemple des facteurs de confusion trop importants non pris en compte ou des systèmes d'exposition inadéquats.

Les résultats des études retenues par les experts du groupe de travail pour l'évaluation des effets sanitaires des technologies 5G sont présentés de manière succincte pour chaque effet étudié.

6.1.5 Évaluation du niveau de preuve d'un effet sanitaire ou biologique donné pour la bande 26 GHz

Il est important dans cette étape d'évaluation du niveau de preuve de bien distinguer les effets biologiques des effets sanitaires. Les études décrivant des effets biologiques participent à l'évaluation du niveau de preuve des effets sanitaires observés, par exemple en apportant une explication mécanistique. Rappelons que les effets biologiques sont des changements d'ordre biochimique ou physiologique qui sont induits dans une cellule, un tissu ou un organisme, en réponse à une stimulation extérieure. Un effet biologique se situe dans les limites de la capacité du système biologique à maintenir l'équilibre de son milieu intérieur en dépit des contraintes extérieures (appelée homéostasie) et est habituellement réversible. L'existence d'un effet biologique, *a fortiori* observé en conditions expérimentales, ne signifie pas forcément qu'un dommage s'ensuivra, et encore moins qu'il se traduira par un effet sur la santé. En effet, le corps humain est soumis en permanence à un ensemble de stimuli internes et externes et un effet biologique peut manifester simplement la réponse adaptative normale de la cellule, du tissu ou de l'organisme à cette stimulation. Un effet sanitaire n'intervient que lorsque les effets biologiques dépassent les limites d'adaptation du système biologique considéré. Il sort du cadre des réponses adaptatives physiologiques sous l'action de l'agent extérieur, l'homéostasie ne peut avoir lieu.

Pour un effet sanitaire donné, l'ensemble des études disponibles sur des modèles animaux est considéré à travers le logigramme suivant (cf. Figure 33), afin de caractériser les éléments de preuve apportés au lien entre l'exposition à la 5G et l'effet considéré.

Les études avec limites méthodologiques importantes ne sont pas utilisées pour évaluer le niveau de preuve

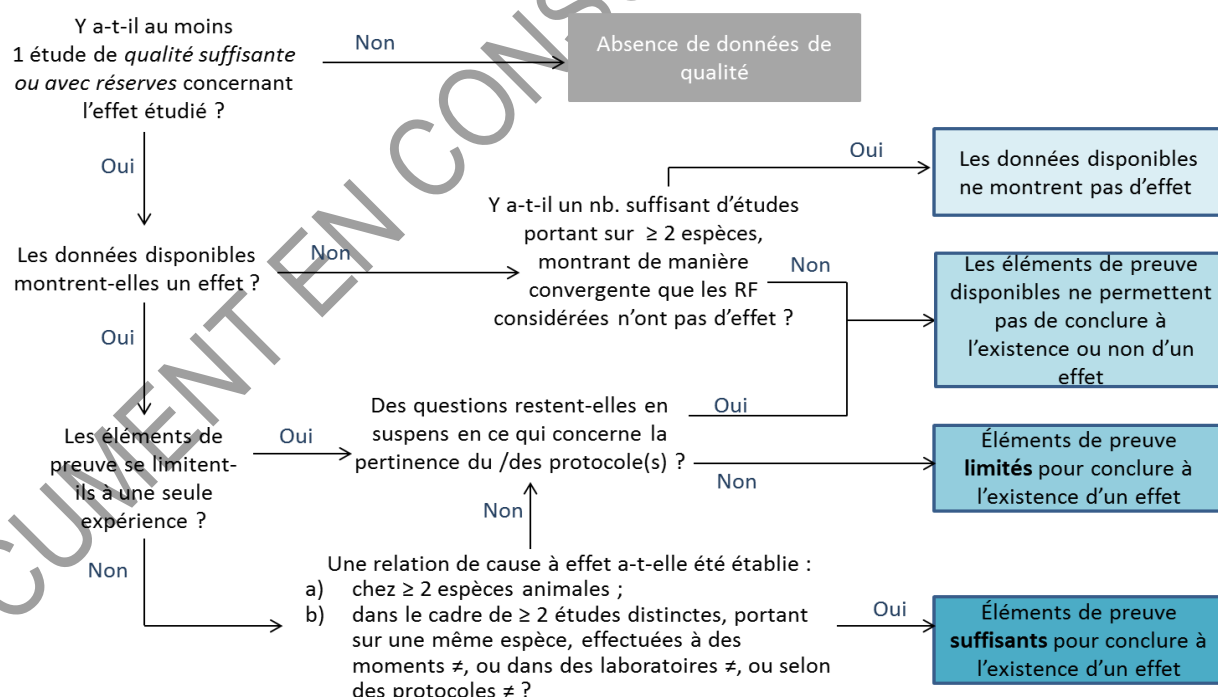


Figure 33 : Logigramme d'évaluation des éléments de preuve relatifs à un effet donné dans les études sur les modèles animaux

Les données relatives à l'effet étudié pour l'animal de laboratoire sont classées selon les catégories ci-après.

Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet : une relation de cause à effet a été établie entre l'exposition à la 5G considérée et l'effet étudié a) chez deux espèces animales ou plus ; ou b) dans le cadre de deux études distinctes ou plus, portant sur une même espèce, effectuées à des moments différents, ou dans des laboratoires différents, ou selon des protocoles différents.

Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet : les données disponibles laissent penser qu'il existe un effet, mais elles sont limitées et ne permettent pas de faire une évaluation définitive parce que : a) les éléments de preuve de l'effet se limitent à une seule expérience mais dont le protocole a été jugé de bonne qualité sans limites méthodologiques majeures ; ou b) plusieurs études de bonne qualité montrent des résultats convergents mais des questions restent en suspens en ce qui concerne la pertinence du protocole, la conduite ou l'interprétation des données ; ou l'incidence de l'effet observé peut être naturellement élevée chez certaines souches.

Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet : les études ne peuvent pas être interprétées comme prouvant la présence ou l'absence de l'effet étudié, parce que : a) il n'existe qu'une seule étude, qui ne montre pas d'effet b) plusieurs études disponibles ne montrent pas d'effet mais elles n'ont pas été effectuées chez 2 espèces animales au moins, ou bien c) elles présentent d'importantes faiblesses d'ordre qualitatif ou quantitatif.

Les données disponibles ne montrent pas d'effet : un nombre suffisant d'études sont disponibles, portant sur deux espèces au moins, qui montrent, de manière convergente et dans les limites des expériences réalisées, que la technologie 5G considérée n'a pas d'effet. Lorsque les renseignements obtenus suggèrent une « absence d'effet », cette conclusion ne peut s'appliquer qu'à l'effet étudié, aux radiofréquences considérées, aux conditions et niveaux d'exposition et à la durée d'observation pris en considération dans les études.

6.2 Effets éventuels liés à l'exposition aux champs radiofréquences dans la bande 700 – 2 500 MHz

6.2.1 Introduction

Une partie du déploiement de la 5G dans les fréquences « basses » utilisera, en plus de la bande autour de 3,5 GHz, au moins une ou plusieurs fréquences plus basses, entre 700 MHz et 2 500 MHz. Alors qu'il n'existe que très peu de littérature scientifique pour la bande spécifique autour de 3,5 GHz, et aucune, utilisant un signal de type 5G, pour les fréquences plus basses, une littérature abondante est disponible depuis environ 30 ans à la fois sur l'humain (études de provocation¹³², études épidémiologiques) et l'animal ainsi que sur des cultures cellulaires (*in vitro*, issues de cellules humaines ou animales).

L'Anses a publié un rapport sur le thème « Radiofréquences et Santé » en 2013 (Anses, 2013) et un rapport « Radiofréquences et santé des enfants » en 2016 (Anses, 2016). Ceux-ci font le point sur l'état des connaissances dans de nombreux domaines (voir ci-dessous la liste des

¹³² Les études de provocation sont souvent considérées comme le meilleur moyen de démontrer, en laboratoire, l'existence d'un lien de causalité entre les expositions aux champs électromagnétiques d'une part, et la survenue et la persistance des symptômes d'autre part.

effets étudiés, dans le paragraphe 6.2.2) à partir d'une littérature antérieure à 2013 pour les données chez l'adulte et à 2016 pour les études chez l'enfant et sur le développement.

L'objet de ce chapitre est de proposer succinctement un état des lieux des connaissances depuis 2016 à partir de rapports internationaux récents ciblant les effets des radiofréquences dans les bandes utilisées pour les techniques de l'information et de la communication (2G, 3G, 4G, Wi-Fi) en Europe et en Suisse, soit 835 – 2 500 MHz. Si la bande 700 MHz est citée dans le rapport du Conseil de la santé des Pays Bas (cf. 6.2.3), elle n'a jusqu'à maintenant fait l'objet que de rares publications et ses effets biologiques ou physiologiques et sur la santé chez l'homme ou l'animal sont peu, voire pas explorés. La question se pose également de savoir si on peut extrapoler les conclusions obtenues dans la bande 835 MHz - 2 500 MHz à la bande 700 MHz. On trouvera des éléments à ce sujet dans le paragraphe 6.3.2.

Ainsi, le présent chapitre présente les principaux éléments et conclusions apportés par trois rapports suédois publiés en 2018, 2019 et 2020, un rapport Hollandais publié en 2020, un rapport espagnol et un rapport Suisse publiés en 2019.

6.2.2 Les rapports annuels suédois « Recent research on EMF and health risk » par le SSM's scientific council on electromagnetic fields 2018, 2019, 2020

Fondés sur l'examen de la littérature scientifique de 2016 à 2020, ces 3 rapports ciblent l'ensemble des ondes électromagnétiques et sont divisés chacun en 4 parties : champs statiques (0 Hz), extrêmement basses fréquences (0 - 300 Hz), fréquences intermédiaires (300 Hz – 10 MHz) et radiofréquences. Pour le présent chapitre, seules les parties consacrées aux radiofréquences sont considérées, soit la gamme (10 MHz – 300 GHz), mais la très grande majorité des études concerne la gamme de 835 MHz à 2,5 GHz. Au sein de chaque partie sont considérées les études : i) cellulaires *in vitro*, ii) chez l'animal, iii) de provocation chez l'homme et iv) épidémiologiques.

Comme précédemment (cf. Rapports Anses 2013, 2016), les principaux effets recherchés chez l'homme sont : le cancer ; le comportement, la cognition, la mémoire ; la reproduction et la fertilité (études épidémiologiques) ; l'activité cérébrale et électroencéphalogramme (EEG, veille et sommeil) ; l'électrohypersensibilité et les symptômes décrits (études de provocation). Chez l'animal, les effets étudiés concernent principalement le cerveau (comportement, cognition, mémoire), le stress oxydant, la génotoxicité, et la cancérogenèse. Enfin, les études cellulaires sont focalisées surtout sur la mort cellulaire par apoptose, le stress oxydant et la génotoxicité à partir de cellules issues de tissus animaux, parfois humains.

Études cellulaires in vitro

Comme dans les rapports précédents, un certain nombre d'études n'ont pas été retenues pour des raisons méthodologiques. Comme précédemment également, la plupart des 25 études retenues ne rapportent pas d'effet, sauf dans quelques cas où des paramètres du stress oxydant sont affectés. Le type de cellules semble jouer un rôle dans l'apparition de ces effets. De plus, pour des valeurs de DAS élevées (4 W/kg), quelques effets cellulaires ont été mis en évidence (ex : dommages de l'ADN et formation de radicaux libres oxygénés [spermatozoïdes], morphologie des neurones corticaux). Ces nouvelles études confirment que l'exposition aux radiofréquences est capable de moduler (augmentation ou diminution) les effets induits par des agents toxiques, chimiques ou physiques (rayons ionisants [gamma, X], agents mutagènes).

Études chez l'animal

Comme précédemment, les 72 études analysées et retenues concernent de nombreux paramètres, notamment pour les études sur le cerveau. Également comme dans les rapports antérieurs, les résultats des études sur le comportement et la mémoire sont inconsistants, avec des altérations de la mémoire ou de l'exploration, ou une absence de changement pour des expositions similaires. Par exemple, une étude montre des changements indiquant des dommages dans le cerveau, une réduction de la mémoire à long-terme après 15 min d'exposition aux radiofréquences. Deux autres études ne montrent pas ce type d'effets chez le rat jeune ou âgé après 4 semaines d'exposition. Enfin, deux études montrent des effets bénéfiques des radiofréquences, la 1^{re}, sur la mémoire testée par la reconnaissance d'objets et la 2^{de} sur la cognition dans un modèle d'Alzheimer de souris transgénique. De plus, ces effets des radiofréquences sur la cognition apparaissent parfois pour des DAS très bas (14-179 mW/kg) ou très hauts (7 W/kg), tandis qu'une absence d'effet est constatée à des DAS intermédiaires (0,2-3,3 W/kg). L'anxiété augmente dans deux études sur trois. Des effets ont aussi été observés sur la neurotransmission et les voies de signalisation dans le cortex et l'hippocampe, mais là encore, le lien avec le niveau d'exposition n'est pas clair.

Pour les effets des radiofréquences sur le cancer, l'étude du *National Toxicology Program* (NTP) rapporte pour l'essentiel l'absence d'association significative avec les radiofréquences, sauf pour le schwannome cardiaque chez le rat mâle, qui apparaît aussi dans l'étude de Falcioni (Falcioni *et al.*, 2018). Ces études n'indiquent pas clairement un effet cancérigène potentiel des radiofréquences chez l'humain.

Plusieurs études montrent des altérations de l'expression de gènes cérébraux pour un DAS de 4 W/kg, posant la question des effets thermiques. L'exploration du stress oxydant et/ou de la mort cellulaire par apoptose montre fréquemment une augmentation dans le cerveau et dans d'autres tissus (œil, testicules, nerf sciatique), contrairement aux études antérieures à 2016, et ceci est constaté même à des niveaux d'exposition faibles. Dans les études exposant les animaux pour des durées variables, le stress oxydant est réduit après les expositions les plus longues.

Enfin, une exposition prénatale affecte le système reproducteur des mâles et des femelles (DAS = 0,05 W/kg). Comme dans les études précédentes, au niveau des testicules, les radiofréquences induisent une baisse du nombre de spermatozoïdes et de leur viabilité, accompagnée d'une diminution des taux de testostérone circulante.

Le SSM pointe en 2020 le besoin de revues systématiques des études sur le stress oxydant et la fertilité chez le mâle avant de conclure à un effet possible pour la santé humaine.

Études de provocation chez l'Homme

16 études et 2 revues ont été répertoriées. Aucun effet sur la cognition ou les symptômes (ex. : fatigue, douleurs, maux de tête, ...) n'est rapporté, confirmant des études précédentes. Une étude indique un effet des radiofréquences sur la macrostructure du sommeil, notamment le sommeil paradoxal, nécessitant confirmation. Pour l'EEG de veille, les résultats sont inconsistants (effet ou non sur les ondes α et β , ou encore effet sur les ondes β et δ). Une étude ne montre aucun effet des radiofréquences sur les potentiels évoqués visuels, la 2^{de} montre que la modulation du signal à 40 Hz affecte l'EEG, la 3^e étude sur un petit nombre de sujets électrohypersensibles (EHS) ne met pas en évidence d'altération du système nerveux autonome. Dans leur rapport de 2020, les 4 études recensées concernant l'EHS, le système nerveux autonome et la douleur ne montrent aucun effet des radiofréquences et confirment l'absence d'effets délétères à court-terme.

Enfin, les 2 revues publiées en 2017-2018 ciblant les fonctions cérébrales (Zhang *et al.*, 2017) d'une part, et l'attention (Curcio, 2018) d'autre part, pointent des résultats inconsistants et ne montrent donc pas d'effet délétère des radiofréquences sur la santé.

Études épidémiologiques ;

73 études et 5 méta-analyses sur le cancer (2016-2017) ont été analysées.

Selon les auteurs, les 5 méta-analyses (2016-2017) ne contribuent pas à éclaircir le débat sur le risque de tumeur et le téléphone mobile, l'incidence reste constante, des augmentations ont été rapportées pour des tumeurs spécifiques et des baisses dans d'autres, ce qui pourrait être lié à des changements de catégorisation des différents types de tumeurs et à l'amélioration du diagnostic. De plus, les résultats des études récentes ne sont pas consistants, pointant surtout l'absence d'association entre radiofréquences et cancer et, comme dans les rapports précédents sur l'utilisation du téléphone et l'apparition de tumeurs cérébrales, l'hypothèse d'une augmentation de l'incidence n'est pas confirmée. Les études d'incidence montrent des changements dans le diagnostic et la classification. Il s'agirait en fait d'un changement du codage des tumeurs avec le temps (amélioration des techniques d'imagerie). Par exemple, aux États-Unis, l'augmentation de l'incidence des glioblastomes d'une part et la baisse de celle des autres tumeurs cérébrales d'autre part, qui correspondraient donc à un effet « protecteur » ou à risque en fonction du type de tumeur, ne sont pas en faveur d'un rôle des radiofréquences émises par les téléphones mobiles. Il y a donc peu d'indications de changement de l'incidence et du risque.

Les études sur la fertilité masculine ne permettent pas d'associer les problèmes de fertilité ou de qualité du sperme aux radiofréquences, car aucune mesure de l'exposition au niveau des testicules a été faite, seul l'usage du téléphone a été considéré. D'autres facteurs causaux comme le manque d'activité physique ou le stress ne peuvent être écartés. Ce qui en fait une limitation importante des études.

Les nouvelles études sur l'usage du téléphone mobile et autres média électroniques en relation avec la qualité de vie, la santé, le sommeil, les fonctions cognitives et le comportement chez l'enfant et l'adolescent rapportent souvent des associations. Les causes sous-jacentes sont difficiles à élucider. Elles pourraient ne pas être en lien avec les radiofréquences mais plutôt avec les usages (*texting, gaming*) ou la détérioration du sommeil (anxiété, troubles respiratoires) où des associations ont été mises en évidence. Ainsi, certaines études proposent comme facteur causal la lumière bleue, les éveils nocturnes ou les comportements addictifs. Enfin, deux études montrent des effets positifs et négatifs sur le développement des enfants en lien avec l'usage du téléphone par la mère pendant la grossesse, suggérant là encore que d'autres facteurs sont en jeu. Cela pourrait être différent pour les performances cognitives (baisse des performances en mémoire verbale) où une association plus forte a été trouvée avec l'exposition aux radiofréquences par rapport aux usages (une étude), mais non confirmée par d'autres études chez l'enfant et l'adolescent. De même, une étude suisse donne des indications d'un effet des radiofréquences sur les fonctions cognitives, effet qui nécessite d'être confirmé.

En ce qui concerne l'EHS, aucune piste identifiant des caractéristiques physiologiques de l'EHS pouvant aider au diagnostic n'a abouti.

Enfin, comme toujours, les membres du conseil du SSM rappellent que la qualité des études est très hétérogène, de nombreuses études ont été exclues, l'absence de standards internationaux pouvant améliorer la qualité des études publiées et du système de *peer-review* des journaux est encore et toujours à relever. Le rapport souligne que la publication d'études de mauvaise qualité, pouvant effrayer la population, peut avoir un impact sur sa santé et son

bien-être, justifiant que seules les études de bonne qualité méthodologique devraient être financées, réalisées et publiées.

En conclusion des 3 rapports

Les études réalisées depuis 2016 sur les effets possibles des radiofréquences dans la bande 835 - 2 500 MHz semblent confirmer, chez l'Homme, une absence d'association entre radiofréquences et cancer (adulte, enfant) notamment en ce qui concerne les tumeurs cérébrales. De même, pour les effets des radiofréquences sur le comportement, la cognition, la mémoire et l'attention, en particulier chez l'enfant et l'adolescent, il n'existerait pas d'association. Par contre, les conséquences délétères de l'usage des outils de l'information et de la communication mériteraient d'être explorées plus avant. Il en est de même pour l'électrohypersensibilité et l'apparition de symptômes pour lesquels aucune association ou lien évident n'a été montré avec l'exposition aux radiofréquences.

Chez l'animal, les effets comportementaux et les effets sur la mémoire sont toujours inconsistants. Les effets sur le stress oxydant ou la génotoxicité sont également contradictoires, mais sont régulièrement rapportés et pourraient dépendre de l'organe ciblé. Enfin, une baisse de la fertilité et de certains marqueurs chez les animaux mâles a été retrouvée comme précédemment, alors que chez l'homme, les études ne permettent pas d'associer les radiofréquences à une baisse de la fertilité.

Enfin, au niveau cellulaire, les rapports pointent la mauvaise qualité de nombreuses études et le besoin de revues systématiques notamment sur les effets des radiofréquences sur la génotoxicité et le stress oxydant, pour lesquels un effet des radiofréquences est régulièrement décrit.

6.2.3 Rapport du Conseil de la santé des Pays bas 2020 « 5G et Santé » (*Background document to the advisory report 5G and health*, N° 2020/16e - La Hague, 2 septembre 2020)

La Chambre des représentants du Parlement néerlandais a demandé au Conseil de la santé des Pays-Bas une analyse sur l'exposition à la 5G. Le comité statue que le déploiement des réseaux 5G ne fait que commencer, de ce fait l'exposition est inconnue et l'évaluation du risque difficile. Par ailleurs, il signale qu'une analyse détaillée des données scientifiques est nécessaire et renvoie à l'analyse de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) prévue pour 2022. Cependant, le comité stipule que les fréquences de la 2G, 3G et 4G, ainsi que du Wi-Fi sont proches de celles utilisées par la 5G et que, dans ces fréquences, aucun risque pour la santé n'est connu.

Ainsi, dans la gamme 700 – 2 200 MHz, ce document se positionne sur les effets sanitaires sur plusieurs organes et systèmes. Il considère qu'aucun effet n'est constaté sur le système cardio-vasculaire, le système auditif, les yeux, le système nerveux autonome, les symptômes, les maladies neurodégénératives, la fertilité masculine, le système immunitaire ou les hormones.

Les effets possibles portent sur le cancer, la grossesse, les altérations du développement embryonnaire, le comportement, la cognition, le sommeil, les neurotransmetteurs, la barrière hémato-encéphalique, la neuro-dégénérescence, l'expression génique dans le cerveau et le stress oxydant.

Il est à noter que ce rapport isole clairement cette bande de fréquences mais qu'une analyse de la bibliographie utilisée montre qu'au niveau expérimental et chez l'animal, il n'y a pas

d'études à 700 MHz et que la plupart des études épidémiologiques s'intéressent à une exposition à la « téléphonie mobile » dont la fréquence de 700 MHz pourrait faire partie.

Les paragraphes suivants exposent les conclusions du Conseil concernant les différents organes et systèmes.

Le cancer

Dans des rapports précédents, la commission a conclu qu'une association entre l'utilisation fréquente et à long terme des téléphones mobiles et un risque accru de tumeurs dans la région de la tête et du cou ne pouvait pas être prouvée ni exclue. Les études récentes ne conduisent pas à une conclusion différente. Dix-neuf études épidémiologiques et 4 études expérimentales sur les animaux ont été analysées. Treize études épidémiologiques ne montrent pas d'association, cinq présentent une association défavorable et une, une association favorable. Une étude sur l'animal ne montre aucun effet sur les tumeurs cérébrales implantées, une étude montre un effet défavorable sur les schwannomes cardiaques, les tumeurs cérébrales et les tumeurs surrénales, une étude montre un effet défavorable sur les schwannomes et une étude montre un effet favorable.

Symptômes

Dans 28 études épidémiologiques, on a cherché à savoir si l'utilisation d'un téléphone mobile ou le fait de vivre à proximité d'une station de base est associé avec des symptômes signalés. Dans dix de ces études, aucune association n'a été observée et 18 études ont constaté une association entre le lieu d'habitation et l'apparition de symptômes. Dans 35 des 36 études expérimentales sur l'Homme, aucun effet de l'exposition aux radiofréquences sur leur apparition n'a été observée. En conséquence, aucune relation n'a été trouvée entre l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences et l'apparition de symptômes tels que maux de tête, insomnie, problèmes de concentration, acouphènes et éruptions cutanées.

Système auditif

Aucun effet n'a été observé dans 6 études épidémiologiques, 10 études expérimentales humaines et 7 études expérimentales sur les animaux. Dans 2 études animales, une augmentation des potentiels évoqués a été constatée chez les animaux traités.

La commission conclut que pour la gamme de fréquences de 700 à 2 200 MHz, aucun effet défavorable sur le système auditif n'a été observé.

Yeux

Aucun effet sur la vision n'a été observé dans 4 études expérimentales chez l'Homme. Dans une étude animale, une expression accrue de deux gènes impliqués dans la mort cellulaire programmée (apoptose) a été observée dans les tissus oculaires. Le comité estime que les données sur l'implication des radiofréquences dans la bande 700 – 2 200 MHz pour les dommages de l'œil ne sont pas concluantes.

Système cardio-vasculaire et système nerveux autonome

Une étude épidémiologique a révélé un risque accru de cardiopathie ischémique associé à l'utilisation quotidienne d'un téléphone mobile. Dans 20 études expérimentales humaines, aucun effet n'a été observé, 3 études montrent un effet défavorable sur les variations du rythme cardiaque, et 1 étude montre un effet qui n'est pas clairement favorable ou défavorable (une augmentation transitoire de la circulation sanguine dans la peau a été constatée). Le comité conclut qu'aucun effet de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences sur le système cardiovasculaire et le système nerveux autonome n'a été constaté dans la gamme de fréquences de 700 à 2 200 MHz.

Maladies neurodégénératives

Une étude épidémiologique a été publiée, qui a révélé un risque accru de sclérose latérale amyotrophique. En raison de la quantité limitée de données, il n'est pas possible d'établir une relation entre l'exposition à la bande 700 – 2 200 MHz et les maladies neurodégénératives.

Fertilité

Aucun effet sur la fertilité masculine n'a été observé dans 5 études sur l'animal ; dans 1 étude des effets défavorables ont été constatés, dans 2 études un effet favorable, et dans 2 études à la fois des effets favorables et défavorables. Le comité conclut, sur la base des études animales, qu'aucune relation ne peut être établie.

Pour la fertilité féminine, dans une étude épidémiologique, un effet défavorable a été observé (diminution de la durée de la grossesse). Dans 7 études sur l'animal, aucun effet n'a été constaté, et dans 1 étude, un effet défavorable a été observé (réduction du nombre de cellules nerveuses dans l'hippocampe des nouveaux-nés). Le comité conclut que des effets défavorables de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences pendant la grossesse, sur le déroulement de la grossesse, sur les malformations congénitales et sur le développement précoce sont possibles.

Comportement

Dans 3 études épidémiologiques sur 9, aucune relation n'a été observée. Dans 5 autres études épidémiologiques, des effets défavorables ont été observés et dans 1 étude, un effet favorable a été observé. Dans 16 études sur l'animal, aucun effet sur le comportement n'a été constaté, dans 8 études un effet défavorable a été observé, dans 3 études un effet favorable a été observé et dans 2 études un effet favorable et un effet défavorable ont été observés. Le comité conclut que les effets (favorables et défavorables) ne peuvent être exclus et qu'un effet est possible.

Cognition

Deux des 11 études épidémiologiques ne montrent pas d'association, 4 montrent une association défavorable, 2 une association favorable, 2 une association favorable et défavorable et 1, une association non clairement favorable ou défavorable. Dans 31 études expérimentales sur l'Homme, aucun effet n'a été constaté, dans 7 un effet défavorable et dans 8 un effet favorable. Sur les 24 études sur l'animal, 14 ne montrent aucun effet, 9 un effet défavorable et 1 un effet favorable. La commission conclut qu'un effet favorable et un effet défavorable sont tous deux possibles.

Sommeil

Sur les 21 études épidémiologiques qui ont été identifiées, 12 ne montrent aucune association entre l'exposition aux radiofréquences et le sommeil, 6 présentent une association défavorable, 2 présentent une association favorable et 1, une association qui pourrait être à la fois favorable et défavorable. Dans 12 études expérimentales sur des volontaires humains, aucun effet n'a été trouvé, tandis que dans 14 études, un effet a été constaté. Le comité conclut qu'un effet est possible.

Neurotransmission cérébrale

Dans 2 études sur l'animal, aucun effet n'a été constaté, dans 8 un effet défavorable a été constaté. Deux autres études montrent des effets qui ne sont pas clairement favorables ou défavorables. La commission conclut que les champs électromagnétiques radiofréquences peuvent avoir un effet sur la neurotransmission cérébrale.

Activité électrique du cerveau

Pour la gamme de fréquences 700 – 2 200 MHz, 23 études expérimentales sur l'Homme ont été évaluées, aucun effet sur l'activité électrique du cerveau n'a été observé, et dans 41 études on a observé des effets qui ne sont pas clairement favorables ou défavorables. Dans 4 études sur les animaux, aucun effet n'a été constaté, et dans 5 études, des effets qui ne sont pas clairement favorables ou défavorables ont été constatés. La conclusion du comité est qu'un effet est probable, mais il n'est pas clair si les effets sont favorables ou défavorables.

Barrière hémato-encéphalique

Il existe une étude épidémiologique qui n'a pas trouvé d'association entre l'exposition aux radiofréquences entre 700 et 2 200 MHz et la barrière hémato-encéphalique. Dix-huit études animales n'ont pas montré d'effets, dans 2 études un effet n'était pas clairement favorable ou défavorable, et dans 6 études un effet défavorable a été montré. Le comité conclut qu'aucun effet non équivoque n'a été constaté. La conclusion est qu'un effet est possible.

Neurodégénération

Dans 4 des 13 études animales, aucun effet n'a été constaté sur la neurodégénérescence du tissu cérébral. Dans 8 études, une augmentation de la neurodégénérescence a été constatée et dans 1 étude, des effets favorables et défavorables ont été observés. La conclusion est que des effets sont possibles.

Expression de gènes dans le cerveau

Aucun effet sur l'expression des gènes dans le tissu cérébral n'a été constaté dans 17 études animales. Dans 16 études, un effet défavorable possible a été constaté, et dans 5 études, un effet qui n'est pas clairement favorable ou défavorable a été observé (augmentation ou diminution de l'expression de gènes de la neuroinflammation, par exemple). Le comité conclut que des effets sur l'expression des gènes dans le tissu cérébral pouvant entraîner des effets défavorables sur la santé sont possibles.

Système immunitaire

Dans 3 études expérimentales sur l'Homme et 7 études sur l'animal, aucun effet sur le système immunitaire n'a été constaté. Dans 2 autres études animales, des effets défavorables sur le système immunitaire ont été observés. Malgré ces études chez l'animal, le comité conclut qu'aucun effet défavorable sur le système immunitaire n'a été constaté.

Sang

Dans 2 des 3 études animales sur les effets de l'exposition aux champs électromagnétiques sur les composants du sang, un effet défavorable a été constaté, dans la troisième un effet favorable. La conclusion est qu'un effet est possible.

Hormones

Dans 7 études expérimentales sur l'Homme, aucun effet sur les niveaux d'hormones n'a été constaté.

Stress oxydant

Dans 9 études sur l'animal, aucun effet sur le stress oxydant n'a été constaté, dans 22 études un niveau accru de stress oxydant a été observé, et dans 1 étude les marqueurs de stress oxydant présentaient des variations selon le temps d'exposition, le marqueur considéré et la structure analysée. Le comité conclut qu'un niveau accru de stress oxydant après exposition à des champs électromagnétiques radiofréquences est possible.

À partir du document détaillé ci-dessus, le conseil de la Santé des Pays Bas a publié un court rapport consultatif et un résumé exécutif¹³³. En ce qui concerne la bande 700 – 2 500 MHz, les recommandations du comité au Parlement néerlandais statuent que, étant donné que les bandes de fréquences jusqu'à 3,5 GHz sont déjà utilisées pour les télécommunications et le Wi-Fi depuis des années, la commission ne voit aucune raison d'arrêter ou de restreindre leur utilisation. Il recommande toutefois que l'exposition soit surveillée et de poursuivre les recherches sur la relation entre l'exposition aux fréquences 5G et l'incidence du cancer, la réduction de la fertilité masculine, les mauvaises issues de grossesse et les malformations congénitales.

Il est à noter que ce texte est supposé reprendre les éléments développés dans le rapport intitulé *Background document* (cf. ci-dessus).

6.2.4 Autres rapports

Deux autres rapports moins informatifs considérant la bande 700 – 2 200 MHz ont été publiés récemment :

Rapport du Comité Científico Asesor de Radiofrecuencias y Salud (Espagne), 2019

Le rapport du Comité Científico Asesor de Radiofrecuencias y Salud (CCARS) concerne plutôt la bande 3,5 GHz. La discussion se situe essentiellement au niveau de l'exposition, moins des effets sanitaires.

La discussion sur l'exposition fait référence aux valeurs limites d'exposition établies par l'InciRP et adoptées par l'Espagne en 2018. Le rapport stipule que les mesures réalisées depuis montrent que le champ électromagnétique moyen se situe entre 0,08 V/m et 1,8 V/m, avec moins de 1 % des mesures au-dessus de 6 V/m et moins de 0,1 % au-dessus de 20 V/m. En ce qui concerne les enfants, ils sont exposés à des niveaux plus élevés dans les villes, mais leur exposition totale est bien inférieure aux valeurs limites de référence. Les antennes de téléphonie mobile contribuent le plus à l'exposition totale, suivies par les antennes de radio et de télévision (principalement les fréquences FM). Le Wi-Fi et les téléphones sans fil contribuent peu. Ils considèrent que la combinaison d'un mode de transmission *massive MIMO* et TDD utilisé par la 5G rend virtuellement improbable que la puissance maximale d'une antenne puisse être produite de manière soutenue, pendant des dizaines de secondes ou de minutes, dans le même sens.

Ils suggèrent d'établir une approche statistique et décrivent des études expérimentales fondées sur ce type d'approche avec une série de simulations déjà publiées. Ainsi, l'exposition émise par un réseau sans fil 5G ultra dense de nœuds encastrés dans un plancher (*ATTOS-cell floor system*) a été calculée à 4,9 mW/kg, atteignant 7,6 mW/kg dans 5 % des cas. Une autre étude, qui simule un système 5G avec MIMO massif, observe qu'en pratique les valeurs maximales se situent entre 7 et 22 % des maximums théoriques. Les terminaux adaptent constamment la puissance au minimum indispensable pour assurer la communication et prolonger ainsi la durée de vie des batteries. En général, elle reste inférieure à 1 % de la puissance de sortie maximale disponible. Récemment, l'opérateur australien Telstra a annoncé qu'il avait réalisé une série de tests pour évaluer les niveaux d'exposition aux émissions de 5G dans des environnements réels utilisant des équipements commerciaux. Selon l'étude, les niveaux d'exposition sont environ 1 000 fois inférieurs aux limites de sécurité

¹³³ No. 2020/16, La Haye, 2 septembre 2020.

et tous les tests ont montré que les niveaux d'exposition à la 5G rejoignent ceux des technologies précédentes.

Le comité considère que les effets biologiques éventuels sont exclusivement thermiques, et que ces effets sont négligeables aux niveaux habituels d'exposition individuelle. Ils concluent que, sur la base des preuves scientifiques disponibles, il faut s'attendre à ce que les niveaux d'exposition prévisibles ne changent pas de manière significative et n'affectent donc pas la santé de la population. On ne trouve pas dans ce rapport de référence spécifique à une bande de fréquence précise.

Rapport publié par le groupe de travail Téléphonie mobile et rayonnement, Suisse, 2 novembre 2019

Ce rapport a été élaboré sur mandat du département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC). Ce rapport a été établi d'après les conclusions tirées dans le rapport Hug *et al.* (2014) en matière de santé liée à l'utilisation du téléphone mobile. Une évaluation du niveau de preuve a été faite à l'aide des nouvelles études (depuis 2014). L'analyse de la littérature scientifique parue depuis cette date tient compte des rapports d'expertise déjà publiés sur les tumeurs causées par l'utilisation du téléphone mobile et les stations émettrices, l'état de santé et les symptômes dus à une exposition quotidienne au téléphone mobile, les effets sur le comportement des enfants et des adolescents en cas d'exposition prénatale, les fonctions cognitives du fœtus en relation avec une utilisation intensive du téléphone mobile par la mère pendant la grossesse, la qualité du sperme et l'influence de l'exposition sur les ondes cérébrales. Ce rapport donne une présentation globale sans découpage par fréquence ni par protocole, il ne peut donc fournir aucune information sur les effets sanitaires sur la bande 700 – 2 200 MHz.

6.2.5 Conclusion

Les résultats des expertises précédentes conduites par l'Anses concernant les effets sanitaires de l'exposition aux radiofréquences sont pertinents pour la 5G dans la bande 700 - 2 500 MHz, bien qu'aucune étude ne concerne spécifiquement la fréquence de 700 MHz. Par ailleurs, les niveaux d'exposition dans l'environnement seront vraisemblablement comparables entre la 5G et les précédentes technologies de téléphonie mobile pour les fréquences de 700 à 2 500 MHz.

Il est nécessaire de souligner que tous les rapports publiés par d'autres organismes à l'étranger constatent le manque de données, leur dispersion et leur faible qualité. Ces rapports mentionnent également un possible biais de publication dans la production des données, car les résultats de certaines études, en particulier de celles qui montrent une absence d'effet, sont difficiles à publier. Bien que la bande 700 MHz soit citée dans plusieurs rapports, les données scientifiques concernant spécifiquement cette bande sont pratiquement inexistantes.

6.3 Effets éventuels liés à l'exposition aux champs radiofréquences dans la bande 3,5 GHz

6.3.1 Analyse des publications issues de la recherche bibliographique

Très peu d'études ont été publiées sur les effets physiologiques ou biologiques d'un signal de fréquence 3,5 GHz, que ce soit chez l'Homme, *in vivo* chez l'animal ou encore *in vitro*. Cinq

études ont été répertoriées dans des domaines très différents : une étude sur la reproduction chez le rat, plus particulièrement la spermatogenèse (Wu *et al.*, 2011), une étude sur les effets thermiques chez l'humain liés à l'exposition à des antennes intégrées à des lunettes connectées (Geyikoğlu *et al.*, 2019), une étude *in vivo* sur le développement du poisson zèbre, un modèle animal classique pour étudier le développement (Dasgupta *et al.*, 2020), et deux études *in vitro* sur des cellules humaines, l'une sur des cellules de la cornée (Miyakoshi *et al.*, 2018), et l'autre sur des cellules de peau saine, les fibroblastes, ou sur des cellules issues de mélanome (Mumtaz *et al.*, 2020).

Wu *et al.* 2011 ont étudié les mécanismes moléculaires par lesquels les radiofréquences induisent un trouble de la spermatogenèse. Ils se centrent particulièrement sur les cellules de Sertoli et les cytokines qu'elles produisent, afin de déterminer l'effet des cytokines produites par les cellules de Sertoli sous l'effet des radiofréquences sur les cellules germinales. Des cellules de Sertoli matures sont isolées à partir de rats âgés de 3 semaines et sont séparées en un groupe témoin (*Sham*) et un groupe exposé aux radiofréquences. Les cellules ont été exposées à un signal de densité de puissance moyenne 100 mW/cm² dans la bande S (2 - 4 GHz) pendant 4 min. Les cellules du groupe *sham* ont été placées dans les mêmes conditions à l'exception de l'exposition aux radiofréquences.

Après exposition, les cellules de Sertoli ont été collectées pour l'extraction d'ARN, le dosage radio-immunologique ou co-incubées avec des cellules spermatiques normales.

Pour les expériences de co-culture, après 96 h d'isolement, les cellules de Sertoli ont été traitées à la trypsine et réensemencées dans des plaques à six puits, puis exposées aux radiofréquences. Par la suite, des cellules spermatogènes normales ont été ajoutées. Après 24 h de co-culture, les cellules spermatogènes ont été collectées pour analyses (cytométrie de flux, *Western blot*, ...) ; la peroxydation des lipides a été déterminée pour les membranes des cellules germinales.

Pour examiner les taux de cytokines dans les cellules de Sertoli exposées aux radiofréquences, l'ARN total des cellules de Sertoli a été extrait après 2, 6 et 12 h d'exposition. La PCR quantitative a montré que l'ARNm correspondant au facteur de nécrose tumorale TNF α dans les cellules de Sertoli exposées aux radiofréquences pendant 2 h était environ 2,5 fois plus élevé que celui des cellules témoins. Le taux de l'interleukine IL-6 a augmenté de 2,5 et 3 fois après 2 et 6 h d'exposition. Celui de l'IL-1 β était respectivement 4 et 5 fois plus élevé, après 2 h et 6 h d'exposition. Les protéines correspondantes suivaient l'augmentation de l'ARNm. En ce qui concerne les cellules germinales co-cultivées avec des cellules de Sertoli exposées, les cellules en apoptose (mort cellulaire génétiquement programmée « physiologique »¹³⁴) étaient significativement plus élevées que dans les cellules germinales co-cultivées avec des cellules témoins, mais le nombre de cellules nécrotiques (mort cellulaire non génétiquement programmée « pathologique ») n'était pas modifié de façon significative.

Pour confirmer cette augmentation de l'apoptose, les auteurs ont mesuré l'expression des protéines Bax, Bcl-2 et caspase-3 par *Western blot*. Ils montrent une augmentation de Bax et de caspase-3 dans les cellules germinales co-cultivées avec des cellules de Sertoli exposées aux radiofréquences (3,5 et 3 fois, respectivement) tandis que l'expression de Bcl-2 a été réduite de 3,5 fois par rapport aux cellules témoins.

Les auteurs concluent que les cytokines pro-inflammatoires produites par les cellules de Sertoli après exposition aux radiofréquences peuvent perturber la spermatogenèse suite à leur

¹³⁴ Voir l'Annexe 3 pour plus de précisions sur l'apoptose et la nécrose

apoptose. L'étude montre que l'apoptose des cellules germinales est induite par la sécrétion de cytokines à partir des cellules de Sertoli, elle-même induite par l'exposition aux radiofréquences.

Ce papier est jugé de bonne qualité du point de vue biologique (étude des cytokines et de la survie cellulaire). Cependant, l'étude des mécanismes de mort cellulaire n'est pas appropriée. En effet, pour Bax et Bcl-2, c'est surtout leur localisation à la membrane mitochondriale qui importe, plus que leur expression ; pour la caspase 3, c'est le clivage de la pro-caspase 3 en caspase 3 qui est important (cf. Annexe 3 pour plus de précisions). Or, les auteurs ont étudié l'expression de la pro-caspase 3 (35 KDa) alors que l'apparition de la caspase 3 (11-17 KDa selon l'anticorps) n'est pas rapportée. Les tests statistiques avec vérification de la distribution normale des données sont pertinents. Enfin, le système d'exposition aux radiofréquences est peu décrit.

L'objectif de l'étude de Geyikoğlu *et al.* (2019) était de tester l'effet d'antennes dipôles en serpentint intégrées dans des lunettes « intelligentes » utilisant des technologies sans-fil sur la température au niveau de la tête : les antennes émettant des radiofréquences à 2,45 ; 3,6 ; 3,8 ; 4,56 et 6 GHz.

Dans une première partie expérimentale du travail, les auteurs ont utilisé un fantôme¹³⁵ de tête dont la composition et la réalisation sont décrites en détails (gel semi-liquide constitué d'eau désionisée, de sel (NaCl) pour augmenter la conductivité, de sucre, de gélatine et d'acide polylactique pour obtenir une constante diélectrique élevée). La stabilité des propriétés diélectriques du fantôme préparé, mesurées pour chaque fréquence pendant 2 semaines à température ambiante, a été vérifiée. Dans un premier temps, une simulation *in silico* a été réalisée sur un fantôme de tête (logiciel CST Microwave Studio Suite) avec deux prototypes d'antennes, pour déterminer le DAS et la température locaux, avec et sans lunettes, aux fréquences de 2,45 ; 3,8 et 6 GHz, pour une puissance d'antenne de 20 mW. L'un des deux prototypes a un DAS légèrement plus élevé, et l'élévation de température la plus importante a été de +0,7°C avec un plateau atteint en 1 h environ. Dans un second temps, des mesures de DAS ont été effectuées sur le fantôme de tête, et la variation de température (thermographie infrarouge) à 2,45 GHz, pour des expositions de 10, 20 et 30 min a été mesurée. Les résultats sont concordants avec ceux de la simulation numérique (augmentation d'environ 0,4°C à 30 minutes pour 2,45 GHz). Après 30 min d'exposition, pour le prototype 1 : DAS : 16,1 mW/kg sans lunettes et 8,1 mW/kg avec lunettes et augmentation de la température de 0,3°C sans lunettes et 0,2°C avec lunettes ; pour le prototype 2 : DAS : 14,1 mW/kg sans lunettes et 8,1 mW/kg avec lunettes et augmentation de la température de 0,2°C sans lunettes et 0,1°C avec lunettes.

Dans une seconde partie clinique du travail, 4 hommes (24-26 ans, taille de 1,50 m à 1,72 m, poids de 65 à 85 kg), ont été exposés au port de lunettes connectées (prototype 1 puis 2) dotées d'antennes émettrices à la fréquence de 2,45 GHz, et leur température cutanée a été mesurée sur l'ensemble de la tête par thermographie infrarouge à 10, 20 et 30 min d'exposition. L'augmentation de température au niveau du visage et du profil droit après 30 min d'exposition a été de 0,1 à 0,3°C (très faible variabilité entre individus), ce qui confirme

¹³⁵ Ce terme, dans le domaine de la mesure des expositions aux champs électromagnétiques, désigne un modèle numérique ou un mannequin représentant un être humain ou un animal, dont les propriétés permettent de simuler l'absorption des ondes électromagnétiques. Ces fantômes sont plus ou moins réalistes, ils peuvent être « homogènes » (un seul type de tissu représenté) ou « hétérogènes » (plusieurs tissus différents).

ce qui a été obtenu avec le fantôme de tête SAM. Par ailleurs, les élévations de température liées à l'exposition aux radiofréquences sont plus faibles avec les lunettes que sans.

S'agissant de l'augmentation de température, les résultats des simulations, des mesures sur le fantôme SAM et des mesures sur les 4 sujets sont congruents, et les auteurs concluent que l'augmentation de température due à l'exposition étant inférieure à 1°C, les antennes tri-bandes intégrées dans les lunettes « intelligentes » peuvent être utilisées sans risque.

Il est à noter que cet article a exploré uniquement les effets thermiques de lunettes connectées pour une durée d'exposition courte de 30 min, des mesures sur des durées plus longues auraient pu être effectuées. Enfin, la partie clinique a concerné 4 individus, un échantillon de taille très faible.

Dasgupta *et al.* (2020) ont étudié les effets d'une exposition aux radiofréquences sur le développement du poisson zèbre (*zebra fish*, *Danio rerio*) afin de mettre en évidence une atteinte possible du développement embryonnaire. Pour cela, des embryons aux stades de 6 à 48 h post-fécondation ont été exposés aux radiofréquences dans une chambre-cage de Faraday [3,5 GHz, DAS = 8,24 W/kg pendant 42 h], la température des 6 puits contenant les embryons (n = 50/puits) a été maintenue à 28°C. Après l'exposition aux radiofréquences ou Sham (témoins), 48 embryons (8/puits) ont été récupérés et transférés chacun dans un puits. Trois expériences ont été réalisées avec 48 embryons/expérience. Les paramètres comme la mortalité, la morphologie (17 variables, ex : longueur et axe du corps, pigmentation, œdème cardiaque, yeux, mâchoires, museau, appareil circulatoire, corne dorsale, développement du cerveau,...) ont été mesurés à 42 h (fin exposition) et 78 h post-exposition. Le comportement (réponse photomotrice, réflexe de sursaut) a été évalué à 78 h post-exposition, c'est à dire à 120 h post-fécondation. La réponse photomotrice a été testée sur 3 cycles de lumière, chaque cycle consistant en 3 min d'alternance lumière/obscurité et la distance (mm) parcourue par les larves a été mesurée. Le réflexe de sursaut consiste en un son audible (100 dB, 600 Hz) pendant 900 ms et la distance parcourue est mesurée pendant 9 s à l'aide d'un système vidéo de détection de mouvements (Technology ZebraBox et ZebraLab motion tracking, Viewpoint Life Sciences).

Les résultats montrent qu'une exposition aux radiofréquences n'affecte ni la mortalité des larves, ni l'incidence d'anomalies du développement morphologique. De même, au plan comportemental, la réponse photomotrice n'est pas altérée, que ce soit dans la phase sombre ou éclairée du test. Pour la réponse de sursaut consécutive à un stimulus sonore, les embryons exposés présentent une réduction modérée de 16,5 % de la distance parcourue en réponse à la stimulation, par rapport aux embryons du groupe témoin. Ce test, qui mesure une réponse sensorimotrice à un stimulus sonore, est classiquement utilisé pour détecter des altérations des capacités d'apprentissage chez l'humain et pour le *screening* des substances neuroactives pouvant affecter le fonctionnement du système nerveux central. Enfin, la température du milieu a été mesurée (28-29°C) et n'a pas montré d'élévation pendant l'exposition.

Les auteurs concluent que l'exposition à un signal radiofréquences à 3,5 GHz pendant 42 h n'impacte pas le développement et la survie des embryons mais induit une baisse modérée des fonctions sensorimotrices.

Cette étude est sérieuse et bien conduite de la part d'un groupe spécialiste du développement du poisson zèbre, incluant la cognition dans le contexte de la toxicité de divers agents chimiques, notamment. Cependant, il aurait été intéressant notamment de tester au moins une

autre fréquence acoustique et une autre intensité pour mesurer le réflexe de sursaut. Le système d'exposition aux radiofréquences est bien décrit et illustré.

L'objectif de l'article de Miyakoshi *et al.* (2018) était de tester l'effet génotoxique et l'expression des protéines de choc thermique après exposition aux radiofréquences de cellules épithéliales de cornée humaine (*HCE-T*, *Riken cell bank*) dans des conditions de maintien de la température (effets non-thermiques).

Les cellules ont été cultivées sous une atmosphère contenant 5 % de CO₂ à 37°C, dans du DMEM, etensemencées dans des puits de 10 cm à une densité de 10⁶ cellules/mL sur une couche de milieu de culture de 2 mm d'épaisseur et dans un volume milieu de 11,6 mL. Après exposition aux radiofréquences, les cellules ont été traitées avec de la cytochalasin B, un inhibiteur de la formation des filaments d'actine et par conséquent de la division cellulaire. Les micronoyaux de 1 000 cellules binucléées ont été comptés : la formation des micronoyaux dans les cellules en interphase est un test validé de génotoxicité (étude de lésions chromosomiques potentielles), qui accompagne souvent un test des comètes. Ainsi, des tests des comètes ont été réalisés en utilisant le kit *Trevigen Comet Assay*. Cent comètes minimum ont été analysées pour chaque gel d'agarose. Un contrôle positif a été inclus et obtenu par traitement des cellules à la bléomycine, qui induit des cassures de l'ADN. Pour l'analyse des protéines de choc thermique, les protéines ont été préparées en présence d'inhibiteurs de protéases, soumises à une électrophorèse en gel d'acrylamide et transférées sur une membrane. L'ensemble des expériences a été réalisé 3 fois indépendamment. Les données ont été soumises à des tests statistiques de comparaisons multiples (test de Tuckey) et les différences considérées significatives à $p < 0,01$. La température n'augmentant pas après l'exposition, les effets recherchés sont donc des effets non-thermiques.

Les résultats montrent que la fréquence des micronoyaux augmente significativement après traitement à la bléomycine mais ne varie pas après 24 h d'exposition (comparaison des témoins non exposés, des témoins *sham* (dans le système d'exposition sans radiofréquences), et des exposés aux radiofréquences). Concernant les tests des comètes, le moment de la queue augmente significativement après traitement à la bléomycine, mais ne varie pas après exposition aux radiofréquences. Enfin, alors que la température induit une augmentation significative de l'expression des protéines de choc thermique Hsp27, Hsp70 et Hsp90 α , les ondes radiofréquences à 5,8 GHz ne modifient pas leur expression.

Compte tenu des éléments méthodologiques disponibles, cette étude a été évaluée de bonne qualité par le groupe de travail.

Mumtaz *et al.* (2020) ont étudié les effets des radiofréquences sur la peau, et plus précisément sur les fonctions cellulaires dans un modèle *in vitro* de culture de cellules saines (fibroblastes de derme humain) ou de cellules de mélanome (souche G361 et SK-Mel-31). Les cellules ont été exposées à un signal intermittent à 3,5 GHz (5 ou 45 « shots », énergie électromagnétique de 0,6J par « shot », pulsation 60 ns, 1 min entre 2 « shots ». La température du milieu de culture a été mesurée (thermal imager FLUKE Ti90) avant et après l'exposition (5 shots de 5 min et 45 shots de 45 min) et n'a pas varié par rapport aux cultures témoins (sans radiofréquences). La viabilité cellulaire a été mesurée à 5, 24, 48 et 72 h post-exposition, et l'apoptose à 24 h post-exposition dans les 3 types cellulaires. La prolifération, l'activité métabolique et la production de radicaux libres oxygénés ont été évaluées à 24 h post-exposition dans les cellules G361, seuls les taux d'ATP ont été mesurés dans les 3 types cellulaires. Enfin, une analyse moléculaire (qPCR, expression des ARNm) de gènes impliqués

dans la prolifération (Ki67, c-Myc), l'apoptose (Caspase 3, Caspase 9), la division cellulaire (CDC, CENPF) et la mitochondrie (ATP5A1, ATP2B1) a été réalisée sur les cellules de mélanome G-361. Le délai post-exposition n'est pas précisé, possiblement 24 h.

Les résultats montrent : i) viabilité cellulaire : une légère augmentation significative de la viabilité 5 h post-exposition pour les fibroblastes (45 *shots*), et une augmentation significative de la viabilité à 5 h et 24 h post-exposition pour les cellules de mélanome ont été observées, avec un effet plus marqué pour les cellules G361 et pour la dose élevée (45 *shots*). À partir de 48 h post-exposition, aucun effet n'est observé sauf pour les cellules SK-Met-31 à la dose élevée (45 *shots*, 48 h). ii) Mort cellulaire : aucun effet des RF n'a été observé (5 et 45 *shots*) quel que soit le type cellulaire. iii) Prolifération, métabolisme énergétique et stress oxydant : dans les cellules de mélanome G361 aux 2 doses (5 et 45 *shots*), une augmentation significative de la prolifération, de la libération d'ATP cellulaire et mitochondrial a été observée. Par contre, aucun effet des radiofréquences n'a été observé sur l'apoptose et sur l'activité superoxyde dismutase (SOD, indicateur de la réponse anti-oxydante). Il est à noter que les taux d'ATP cellulaires augmentent également dans les cellules SK-Mel-31, mais pas dans les fibroblastes. iv) Marqueurs moléculaires : dans les cellules de mélanome G361, une augmentation significative de l'expression des ARNm des 2 gènes de prolifération (Ki67, c-Myc) a été observée aux 2 doses (Ki67) et à la dose élevée (c-Myc). De même, une augmentation de l'expression des 2 gènes apoptotiques (CASP3, CASP9) a été mise en évidence, mais uniquement à la dose faible (5 *shots*). Pour les gènes de la division cellulaire, seule une augmentation du gène CENPF a été mesurée à la dose élevée (45 *shots*). Enfin, pour les gènes mitochondriaux et pour les 2 doses, une augmentation (ATP5A1) et une diminution (ATP2B1) ont été observées. Pour les auteurs, ces résultats montrent que les radiofréquences à 3,5 GHz affectent la croissance et la prolifération des cellules de mélanome après 24 h, ce qu'ils attribuent à une augmentation de l'activité mitochondriale via l'augmentation des taux d'ATP. Une telle exposition aux radiofréquences n'affecte pas les fibroblastes.

Cette étude pose un problème majeur quant à la validité des résultats au regard des analyses statistiques réalisées (test t de Student pour comparaison de 2 groupes), non adaptées à des comparaisons multiples (3 groupes minimum). Une grande partie de l'étude n'a concerné qu'un type de cellules de mélanome, la comparaison avec les fibroblastes aurait été intéressante, d'autant plus que les effets des radiofréquences pourraient être dépendants du type de cellule (exemple de la viabilité). Cependant, elle a le mérite d'être une des rares études ayant utilisé un signal à 3,5 GHz.

En conclusion, les 5 études répertoriées dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz ont chacune exploré un domaine de recherche spécifique : les effets thermiques des radiofréquences dans un dispositif de lunettes connectées chez l'humain, le développement morphologique et comportemental du poisson zèbre, la réponse des fibroblastes et des cellules cancéreuses de la peau ou des cellules de la cornée humaine et, enfin, le système reproducteur chez le rat mâle. Ainsi, dans cette gamme de fréquences, les données sont insuffisantes pour conclure à l'existence ou non d'un effet biologique, physiologique voire pathologique qui pourrait avoir un impact sur la santé humaine.

6.3.2 Réflexions sur l'impact de la fréquence des champs électromagnétiques sur les effets biologiques ou sanitaires observés

6.3.2.1 Contexte de la réflexion

Les bandes de fréquences 700 MHz et 3,5 GHz sont les premières « nouvelles » fréquences destinées à la 5G déployées en France et pour lesquelles les opérateurs disposent déjà des autorisations.

Les données relatives aux effets de ces 2 bandes étant rares, le groupe de travail s'est interrogé sur la possibilité d'appliquer les données disponibles à des fréquences proches à ces nouvelles fréquences. Une approche adoptée pour évaluer ce point a été de vérifier si un effet de la fréquence pouvait être mis en évidence dans les données disponibles. L'idée étant que si un effet est détecté par exemple à 900 MHz, à 1 800 MHz ou encore 2 100 MHz, on pourrait émettre l'hypothèse qu'il soit également présent à 700 MHz ou 3,5 GHz. La validité dans une large gamme de fréquences (entre 700 MHz et 3,5 GHz) des effets observés à une fréquence particulière est, au moins implicitement, soutenue dans la plupart des rapports internationaux publiés à ce jour. Cependant, les études scientifiques qui ont recherché les effets de l'exposition aux radiofréquences de la téléphonie mobile (2G, 3G, 4G) depuis plus de 20 ans n'ont pas étudié spécifiquement l'impact de la fréquence sur ces effets. Ainsi, si des fréquences différentes produisent des effets variables sur les paramètres observés, la généralisation à la bande 700 MHz ou à 3,5 GHz des conclusions sur les effets déjà établies dans les autres bandes (entre 840 MHz et 2,85 GHz environ) ne serait pas justifiée, et donc impossible. Par contre, à l'inverse, s'il apparaît que lorsque des effets sont observés à une fréquence donnée, ils sont systématiquement retrouvés à une autre fréquence, cela permettrait d'estimer, en attendant des études sur les signaux spécifiques de la 5G, que les données déjà disponibles dans la bande de fréquences entre 840 MHz et 2,85 GHz pourraient être transposées aux « nouvelles » fréquences de la 5G, à savoir 700 MHz et 3,5 GHz.

Les études analysant différentes fréquences ont donc été recherchées dans la littérature. Ceci devrait permettre d'apprécier comment un même paramètre, évalué par la même équipe, et dans des conditions expérimentales similaires, pourrait ou non dépendre de la fréquence utilisée.

Le groupe de travail a recensé les articles présentant cette caractéristique, c'est-à-dire étudiant le même phénomène à des fréquences différentes. Une recherche bibliographique a permis de sélectionner 39 articles étudiant des effets moléculaires, physiologiques ou comportementaux chez l'animal et l'humain.

Les études obtenues ont été classées en 3 catégories : celles faisant référence à des phénomènes tissulaires ou moléculaires chez l'animal (25 études), celles ayant trait aux effets comportementaux sur l'animal (6 études), et celles ayant pour sujet d'étude l'homme (18 études).

La sélection des articles originaux s'est faite d'une part à partir de 3 revues sur la neurophysiologie et la cognition chez l'homme (Kwon and Hämäläinen, 2011 ; Regel et Achermann, 2011 ; Wallace et Selmaoui, 2019), 2 revues sur la cognition animale (Naranayan *et al.*, 2019 ; Sienkiewicz et Von Rongen, 2019) et 1 revue sur le stress oxydant cellulaire (Yakymenko *et al.*, 2016), et d'autre part à partir de la bibliographie issue des rapports de l'Anses « Radiofréquences et Santé » 2013 et « Radiofréquences et santé des enfants » 2016. Le critère d'inclusion des publications a été l'étude d'au moins 2 bandes de fréquences.

6.3.2.2 Études moléculaires et tissulaires chez l'animal

Vingt-cinq études réalisées à des fréquences différentes sur le même paramètre chez l'animal ont été identifiées (Shirai *et al.*, 2005, Ferreira *et al.*, 2006, Shirai *et al.*, 2007, Smith *et al.*, 2007, Lee *et al.*, 2009, Mailankot *et al.*, 2009, Sirav and Seyhan, 2009, Ziemann *et al.*, 2009, Franzellitti *et al.*, 2010, Markova *et al.*, 2010, Lee *et al.*, 2011, Paulraj and Behari, 2011, Sirav and Seyhan, 2011, Lee *et al.*, 2012, Ozorak *et al.*, 2013, Cetin *et al.*, 2014, Nisbet *et al.*, 2016, Ertlav *et al.*, 2018, Alkis *et al.*, 2019, Kumar *et al.*, 2019, Wang *et al.*, 2019, Yinhui *et al.*, 2019, Furman *et al.*, 2020, Lameth *et al.*, 2020)

Parmi elles, 4 ont été écartées car elles analysaient en réalité une seule fréquence (Ferreira *et al.*, 2006, Franzellitti *et al.*, 2010, Furman *et al.*, 2020, Lameth *et al.*, 2020). Trois autres ont été écartées car elles utilisaient plusieurs fréquences, mais simultanément (Lee *et al.*, 2009, Lee *et al.*, 2011, Lee *et al.*, 2012). Quatre autres n'ont pas été retenues car les auteurs n'avaient constaté aucun effet à aucune des fréquences étudiées (Shirai *et al.*, 2005, Shirai *et al.*, 2007, Smith *et al.*, 2007, Ziemann *et al.*, 2009). Finalement, 2 études ont été considérées de qualité insuffisante pour l'évaluation, en raison de systèmes d'exposition mal caractérisés (Mailankot *et al.*, 2009, Yinhui *et al.*, 2019). Les publications restantes ont fait l'objet d'une analyse approfondie.

L'objectif de l'étude de Alkis et de ses collaborateurs (Alkis *et al.*, 2019) était d'explorer si l'exposition à long terme à différentes fréquences induit des lésions de l'ADN, en examinant les paramètres oxydants-antioxydants dans le sang et les tissus cérébraux des rats. Trois fréquences ont été analysées : 900 MHz, 1 800 MHz et 2 100 MHz. Un effet des fréquences, avec une augmentation des valeurs des paramètres mesurés (queue des comètes, stress oxydatif) liée à l'augmentation de la fréquence d'exposition, est constaté.

L'étude de Cetin et de ses collaborateurs (Cetin *et al.*, 2014) a évalué les effets de l'exposition aux téléphones mobiles (900 et 1 800 MHz) sur le stress oxydatif dans le cerveau chez les rats, de la gestation à l'âge de 6 semaines : les fréquences 900 MHz et 1 800 MHz ont été étudiées. Une augmentation de la peroxydation lipidique avec l'augmentation de la fréquence est constatée.

Ertlav et ses collaborateurs (Ertlav *et al.*, 2018) ont étudié la contribution du récepteur TRPV1 au stress oxydatif mitochondrial et à l'apoptose dans des noyaux dorsaux et lombaires, ainsi que de l'hippocampe, à la suite d'une exposition à long terme à 900 et 1 800 MHz dans un modèle de rat. Les augmentations de tous les paramètres étudiés sont plus importantes dans le groupe à 1 800 MHz que dans le groupe à 900 MHz.

L'étude de Kumar et de ses collaborateurs (Kumar *et al.*, 2019) a été conçue pour explorer les effets des radiofréquences de faible intensité sur le stress du réticulum endoplasmique et l'UPR (*unfolded protein response*). Les expériences ont été réalisées sur des rats Wistar mâles exposés aux fréquences de 900 MHz, 1 800 MHz et 2 450 MHz. Les expressions de l'ARNm ont été estimées. Un effet de la fréquence a été constaté avec une augmentation du stress du réticulum avec l'augmentation de la fréquence.

Markova et ses collaborateurs (Markova *et al.*, 2010) ont étudié si les radiofréquences des téléphones mobiles GSM (à 905 ou 915 MHz) et UMTS (1 947,4 MHz) induisent des cassures d'ADN double brins ou affectent la réparation de ces cassures dans les cellules souches et les fibroblastes. Ils ont analysé les foyers de la protéine 53BP1 du suppresseur de tumeur TP53 qui sont localisés dans les foyers de réparation de l'ADN. Les effets sont en général plus importants dans les cellules souches que dans les fibroblastes, mais l'effet de la fréquence

n'est pas clairement établi, car les méthodes statistiques utilisées pour établir la signification de la différence entre fréquences sont peu adaptées.

Nisbet et ses collaborateurs (Nisbet *et al.*, 2016) ont eu pour but de déterminer les effets de l'exposition du corps entier aux champs électromagnétiques sur les cartilages de conjugaison des rats mâles en croissance. Ils concluent que les radiofréquences de 1 800 MHz et 900 MHz peuvent prolonger la phase de croissance chez les rats en développement, mais ils n'observent pas d'effet spécifique de la fréquence.

Le but de l'étude d'Ozorak et de ses collaborateurs (Ozorak *et al.*, 2013) a été de déterminer les effets de signaux Wi-Fi (2,45 GHz) et d'un téléphone mobile (900 et 1 800 MHz) sur le stress oxydatif et le niveaux d'oligo-éléments dans les reins et les testicules de rats en pleine croissance, de la gestation à l'âge de 6 semaines. Les animaux exposés ont présenté une augmentation du stress oxydatif, mais pas de variation avec la fréquence.

Sirav et Seyhan (Sirav et Seyhan, 2009) ont évalué les effets des radiofréquences à 900 et 1 800 MHz en onde continue sur la perméabilité de la barrière hémato-encéphalique (BHE) des rats. Il n'y a pas eu de changement chez les rats femelles. Mais chez les mâles, la perméabilité est augmentée, mais sans effet de la fréquence. Dans leur article de 2011 (Sirav et Seyhan, 2011), les auteurs ont réalisé exactement les mêmes expériences, mais à une puissance plus élevée. Les résultats sont les mêmes.

En 2019, Wang et ses collaborateurs (Wang *et al.*, 2019) ont étudié l'expression différentielle des protéines du cerveau par iTRAQ. Des rats Wistar ont été exposés à 1,5 GHz et 2,856 GHz. Les résultats de l'analyse protéomique iTRAQ ont été validés par *Western blot*. L'exposition cumulée aux radiofréquences induit l'expression différentielle de 391 protéines, à 1,5 GHz de 295 protéines et à 2,856 GHz de 311 protéines. L'impact de la fréquence est possible dans ce cas.

Au final, cinq articles montrent un impact clair de la fréquence sur les paramètres étudiés et quatre autres indiquent un effet moins marqué, voire inexistant. Étant donné que les phénomènes biologiques étudiés sont assez disparates, il se peut que certains soient plus sensibles que d'autres et donc plus à même de présenter une variation claire en fonction de la fréquence. Les données analysées amènent à conclure que des effets au niveau moléculaire dans un système biologique puissent dépendre de la fréquence des rayonnements.

6.3.2.3 Études sur la mémoire et l'anxiété chez le rat

Six études ont été analysées (Schneider et Stangassinger, 2014, Deshmukh *et al.*, 2015, Deshmukh *et al.*, 2016, Tan *et al.*, 2017, Gupta *et al.*, 2019, Li *et al.*, 2020). Elles ciblent l'anxiété, la mémoire sociale et la mémoire spatiale. Une étude n'a pas été retenue car elle a testé les effets de 8 fréquences combinées (2 bandes à 800 MHz, 2 bandes à 2 GHz, une à 2,4 GHz, 2 bandes à 2,5 GHz et une bande à 5,2 GHz, Shirai *et al.*, 2017).

Schneider et Stangassinger (2014) ont étudié les effets d'une exposition « vie entière » à un signal radiofréquences de type GSM 900 MHz ou UMTS 1 966 MHz chez des rats mâles et femelles. À l'aide d'une tâche de reconnaissance sociale, ils montrent, pour le signal GSM, que la mémoire sociale est altérée chez les rats mâles aux âges de 3 et 6 mois, mais pas chez les femelles de 6 mois (non testée à 3 mois). Dans ce test, un rat adulte mâle résidant dans sa cage est confronté à un rat juvénile inconnu (pendant 4 min), le temps passé à inspecter ce jeune rat est enregistré. Après un délai de 30 min, le rat résident est à nouveau mis en présence du même rat juvénile ainsi que d'un nouveau rat juvénile. Le temps passé à

inspecter/renifler chacun des 2 jeunes rats est enregistré. Si le rat adulte se souvient du rat juvénile déjà rencontré, il passera plus de temps à inspecter/renifler le rat juvénile nouveau, s'il passe autant de temps avec chacun des 2 jeunes rats, il présente une altération de la mémoire de reconnaissance sociale. Par contre, pour le signal UMTS, la mémoire est altérée chez les mâles de 3 mois, mais pas pour les 2 sexes à 6 mois. Ceci montre donc un effet des radiofréquences, en fonction de la fréquence, uniquement chez les mâles, alors qu'aucun effet n'est observé chez les femelles (ni des radiofréquences, et *a fortiori* en fonction de la fréquence).

Desmukh *et al.* (2015, 2016) ont étudié, chez le rat, les effets de signaux à 3 fréquences (900, 1800 et 2 450 MHz), en exposition corps entier, pendant 180 ou 90 jours, pour un DAS très faible (~0,6 mW/kg), sur la mémoire spatiale et l'anxiété. Les radiofréquences induisent une baisse des performances de mémoire en piscine de Morris observée pour les 3 fréquences. De même, dans le labyrinthe en croix surélevé, une augmentation similaire de la latence à entrer dans les bras fermés est observée après l'exposition aux 3 fréquences. Cependant, le protocole utilisé pour ce dernier test ne permet pas d'estimer clairement ce qui a été évalué. Ainsi, ces 2 premières études ne montrent pas d'effet spécifiquement lié à la fréquence des signaux.

Tan *et al.* (2017) ont évalué, chez le rat mâle, les effets de 2 fréquences (1,5 GHz et 2,856 GHz) seules ou combinées, avec une puissance de 5 ou 10 mW/cm² (soit un DAS de 1,7-1,8 W/kg ou 3,3-3,7 W/kg). La mémoire spatiale en piscine de Morris est altérée pour la puissance la plus élevée (10 mW/cm²) et de manière plus marquée quand les 2 signaux sont combinés, mais sans effet spécifique de la fréquence des signaux. Pour l'activité électrique cérébrale (EEG, ondes alpha, bêta, thêta et delta), des altérations de la puissance des ondes cérébrales (sauf delta) sont observées à 10 mW/cm² et, comme pour la mémoire, celles-ci sont plus marquées quand les 2 signaux sont combinés, mais sans effet spécifique de la fréquence.

Gupta *et al.* (2019) ont mesuré l'anxiété et les taux de corticostérone plasmatique chez des rats mâles après une exposition à des signaux radiofréquences à 900, 1 800 et 2 450 MHz pendant 28 jours. Les tests ont été réalisés après 1, 14, 21 et 28 jours d'exposition. Les résultats montrent une augmentation de l'anxiété accompagnée par celle des taux de corticostérone, uniquement à la fréquence de 2 450 MHz, alors que peu ou pas d'effets sont observés à 900 et 1 800 MHz. Cet article atteste de l'observation d'effets différents en fonction de la fréquence des rayonnements.

Li *et al.* (2020) ont étudié le développement, la mémoire spatiale (âge 3 semaines, labyrinthe en Y) et l'activité exploratoire et l'anxiété (âge 7 semaines, test du champ ouvert) chez des jeunes rats mâles et femelles après une exposition prénatale à un signal 1 800 MHz, 2,4 GHz (Wi-Fi) ou combiné. La combinaison des 2 signaux affecte les performances de mémoire (dégradation), le signal Wi-Fi a un effet plutôt bénéfique, alors que le signal à 1 800 MHz a peu d'effet. Pour l'activité et l'anxiété, seule la combinaison des 2 signaux affecte les capacités à explorer (baisse) et augmente la peur et l'anxiété. Enfin, une diminution du poids corporel est observée après une exposition prénatale au Wi-Fi seul ou combiné avec le signal 1 800 MHz. Ainsi, des effets différents en fonction de la fréquence sont observés pour la mémoire, mais pas pour l'activité et l'anxiété : les effets les plus marqués étant observés avec la combinaison des 2 signaux.

Ainsi, 3 articles montrent que différentes fréquences de rayonnement pourraient avoir des effets différents sur l'anxiété ou la mémoire sociale (Gupta *et al.*, 2019) et 3 autres publications, dont 2 d'un même groupe, ne montrent pas d'effet dépendant de la fréquence sur la mémoire

spatiale (Deshmukh *et al.*, 2015, Deshmukh *et al.*, 2016, Tan *et al.*, 2017). De plus, Schneider et Stangassinger *et al.* montrent un effet différentiel chez les mâles par rapport aux femelles sur la mémoire de reconnaissance sociale : il faut noter que les études abordant le rôle du sexe sont plutôt rares.

6.3.2.4 Des effets dépendants de la fréquence chez l'Homme ?

Dix-huit études ont été répertoriées concernant les effets de champs électromagnétiques à différentes fréquences appliquée avec le même protocole expérimental chez l'Homme (Hietanen *et al.*, 2000, Hietanen *et al.*, 2002, Eltiti *et al.*, 2007, Hountala *et al.*, 2008, Kleinlogel *et al.*, 2008b, a, Eltiti *et al.*, 2009, Croft *et al.*, 2010, Maganioti *et al.*, 2010, Danker-Hopfe *et al.*, 2011, Sauter *et al.*, 2011, Vecsei *et al.*, 2013, Leung *et al.*, 2015, Malek *et al.*, 2015, Vecsei *et al.*, 2018a, Vecsei *et al.*, 2018b, Danker-Hopfe *et al.*, 2020, Eggert *et al.*, 2020). Les points étudiés étaient l'activité électrique (EEG) de la veille et du sommeil, la cognition, la douleur, le bien-être et les symptômes en rapport avec l'électrohypersensibilité. Parmi ces études, certaines ne montrent pas d'effet des radiofréquences (Hietanen *et al.*, 2000, Kleinlogel *et al.*, 2008b, a, Eltiti *et al.*, 2009, Danker-Hopfe *et al.*, 2011, Sauter *et al.*, 2011, Malek *et al.*, 2015) et ne sont pas développées ici.

Parmi les 11 études montrant un effet des radiofréquences, celui-ci ne variait pas lorsque la fréquence du signal changeait dans 6 études (Hietanen *et al.*, 2002, Eltiti *et al.*, 2007, Maganioti *et al.*, 2010, Vecsei *et al.*, 2018a, Danker-Hopfe *et al.*, 2020, Eggert *et al.*, 2020), tandis que 4 (Hountala *et al.*, 2008, Croft *et al.*, 2010, Vecsei *et al.*, 2013 et 2018b, Leung *et al.*, 2015) montrent un impact de la fréquence sur les effets étudiés.

Hietanen *et al.* (2002) ont étudié chez des sujets EHS (7 hommes et 13 femmes), les effets d'expositions de 30 min (3-4 sessions) à un téléphone 900 MHz (NMT¹³⁶), un téléphone GSM 900 MHz ou GSM 1 800 MHz sur leurs symptômes ressentis (ex : maux de tête, anxiété, symptômes cardiaques, sensations au niveau des yeux, du cou, des oreilles, du visage, de la gorge, des pieds...) et la physiologie (rythme cardiaque, pression artérielle, fréquence respiratoire). L'étude a été menée en double aveugle. Les résultats montrent que les sujets présentent plus de symptômes avec l'exposition contrôle *sham* que lors des expositions aux signaux radiofréquences. Aucun impact spécifique de la fréquence des signaux utilisés n'est observé. Peu d'effets physiologiques significatifs sont observés, le nombre de sujets étant faible pour les auteurs. Enfin, les sujets ne détectent pas les phases d'exposition aux radiofréquences, comme cela a déjà été montré précédemment.

Eltiti *et al.* (2007) ont étudié le bien-être et les symptômes ressentis chez des sujets EHS (n = 44) et des sujets non EHS (n = 114), sexe et âge non précisés, après une exposition de 50 min à des signaux GSM (900 MHz et 1 800 MHz, 5 mW/m² chacun) ou UMTS (2020 MHz, 10 mW/m²). Dans une 1^{re} expérience de provocation ouverte, ils montrent que les EHS ont un sentiment de bien-être inférieur en situation d'exposition aux signaux GSM et UMTS, par rapport à la condition contrôle *sham*. Les sujets non EHS ont plus de symptômes ressentis avec le signal UMTS que pendant la condition contrôle *sham*. Dans une 2^{de} expérience en double aveugle, pour le GSM, aucun effet n'est observé, quel que soit le groupe. Après exposition au signal UMTS, les sujets EHS rapportent un niveau d'éveil plus élevé mais pas d'augmentation des symptômes : les auteurs proposent que cet effet serait plutôt lié à l'ordre de passage plutôt qu'à un effet propre des radiofréquences. Pour les paramètres physiologiques (rythme cardiaque, conductance cutanée et BVP (*blood volume pulse*)), aucun

¹³⁶ NMT : *Nordic Mobile Telephone*, norme de téléphonie mobile des pays nordiques, de type analogique.

effet des radiofréquences, quels que soient le signal ou le groupe de sujet, n'est observé. Ainsi, cette étude ne met pas en évidence d'impact clair de la fréquence des signaux sur les effets observés.

Hountala *et al.* (Hountala *et al.*, 2008) ont étudié l'EEG et la cohérence spectrale¹³⁷ dans les bandes alpha, beta, delta et thêta pendant une tâche de mémoire de travail chez des jeunes hommes (n = 19) et femmes (n = 20) sains (22-23 ans), exposés à un signal continu à 900 ou 1 800 MHz (téléphone placé à 20 cm de l'oreille). Ils ont montré : 1. un effet du sexe sur la cohérence spectrale : les hommes ont une cohérence interne plus élevée que les femmes ; 2. le signal à 900 MHz annule la différence entre les sexes (augmentation de la cohérence chez les femmes seulement) alors que le signal à 1 800 MHz diminue la cohérence chez les hommes seulement, pour atteindre celle des femmes en condition basale sans exposition aux radiofréquences. Cette étude montre donc un impact de la fréquence sur les effets chez les hommes seulement (pas d'effet du 900 MHz, et baisse de la cohérence avec le signal à 1 800 MHz), alors que chez les femmes, les 2 signaux ont le même effet, une augmentation de la cohérence).

Maganioti *et al.* (2010), comme Hountala *et al.*, ont mesuré les effets d'un signal continu à 900 MHz (téléphone situé à 20 cm de l'oreille) ou 1 800 MHz chez 20 femmes et 19 hommes sains (âge : 22-23 ans) sur le potentiel évoqué P600 en réponse à une tâche de mémoire de travail. Comme pour Hountala *et al.*, un effet du sexe est observé sur l'amplitude et la latence du P600 (plus faibles chez les femmes). Cet effet disparaît avec l'exposition aux radiofréquences et, contrairement à l'étude précédente, aucun impact de la fréquence n'est observé. Ainsi, un effet des radiofréquences est observé chez les femmes, sans que la fréquence des signaux ne joue un rôle, alors que chez les hommes, aucun effet des radiofréquences n'est observé.

L'étude de Croft *et al.* (Croft *et al.*, 2010) a mesuré l'activité électrique cérébrale pendant 5 ou 10 min avant et après une exposition aux radiofréquences de 50 min. Ils ont analysé la puissance du rythme alpha (8-12 Hz) au niveau des lobes frontal et postérieur chez des adolescents (13-15 ans, n = 41, dont 21 hommes), adultes (19-40 ans, n = 42, dont 21 hommes) ainsi que des personnes âgées (55-70 ans, n = 20, dont 10 hommes). Les signaux utilisés sont : GSM (849 MHz) provenant d'un téléphone Nokia 6110 (DAS = 0,7 W/kg) et WCDMA (1 900 MHz) (téléphone mobile, DAS = 1,7 W/kg). L'un est positionné à droite et l'autre à gauche de la tête au niveau du lobe temporal. Les auteurs constatent une augmentation de la puissance de l'onde alpha chez l'adulte exposé au téléphone GSM en lien avec une activation psychologique - mais pas d'effet du GSM chez les sujets jeunes et âgés. Pour l'exposition au signal WCDMA, aucun effet n'est observé quel que soit le groupe d'âge. Ils montrent donc un impact de la fréquence sur les effets seulement chez l'adulte.

En 2011, Leung *et al.* (Leung *et al.*, 2011) ont publié une étude similaire à celle de Croft *et al.* Ils ont exposé des adolescents (13-15 ans, n = 41, dont 21 hommes), des adultes (19-40 ans, n = 42, dont 21 hommes) et des sujets âgés (55-70 ans, n = 20, dont 10 hommes) soit à un téléphone 2G GSM (849 MHz, Nokia 6110, DAS = 0,7 W/kg), soit à un téléphone 3G WCDMA (1 900 MHz, DAS = 1,7 W/kg) pendant 50 min, l'un à droite et l'autre à gauche (lobe temporal). Des tests cognitifs ont été réalisés : le test *auditory 3-stimulus oddball* ajusté au seuil de discrimination individuelle (mesure la réponse à la nouveauté, les processus attentionnels) et des tests *N-back* (mémoire de travail). L'EEG a été enregistré, avec évaluation des potentiels

¹³⁷ La cohérence de l'EEG est une méthode qui renseigne sur la synchronisation dans le temps entre paires de signaux électriques enregistrés à des sites néocorticaux distincts. C'est une mesure de la connectivité fonctionnelle entre régions corticales.

évoqués N1 et ERD/ERS (*event-related desynchronization/event-related synchronization*). Pour le test *3-stimulus oddball*, aucun effet des radiofréquences sur le temps de réaction et la précision n'est observé. L'EEG montre une augmentation du potentiel N1 avec l'exposition au signal 2G GSM, quel que soit l'âge. Le test *N-back* montre une diminution des performances chez les adolescents avec le signal RF 3G WCDMA (par rapport au *sham*) et des réponses retardées ERD/ERS de la puissance alpha avec les signaux 2G et 3G (par rapport au *sham*), quel que soit l'âge. Ils montrent donc un impact de la fréquence sur les effets observés qui dépend de l'âge, uniquement chez les adolescents (GSM 2G : EEG, test *auditory 3-stimulus oddball* et WCDMA 3G : *N-back* test performance).

Vecsei *et al.* (2018a) ont mesuré l'activité électrique cérébrale et la cognition (test de Stroop, fonctions exécutives, vitesse et attention sélective) chez 34 sujets sains (dont 20 femmes, 20 ± 3 ans) exposés à signal UMTS (1 947 MHz, téléphone Nokia 6650, DAS < 2 W/kg) et 26 sujets sains (dont 13 femmes, 21 ± 3 ans) exposés à un signal LTE (1 750 MHz, générateur, DAS < 1,8 W/kg) pendant 20 min. Les mesures ont été réalisées avant, pendant et après la fin de l'exposition. Les résultats montrent une baisse notable de la puissance du rythme alpha sur l'EEG avec les radiofréquences, qui persiste après l'arrêt de l'exposition, sans impact de la fréquence sur cet effet. Aucun effet des radiofréquences n'est observé pour le test cognitif.

Vecsei *et al.* ont également publié 2 études séparées dont l'objectif était le même, seul le signal radiofréquences changeait (Vecsei *et al.*, 2013, Vecsei *et al.*, 2018b). Dans la publication de 2013, ils ont utilisé un signal 3G UMTS à 1 947 MHz (DAS = 1,75 W/kg – 30 min) et dans celle de 2018 un signal 4G LTE à 1 750 MHz (DAS < 1,8 W/kg – 30 min). Dans celle de 2013, l'effectif est constitué de 10 femmes et 12 hommes (20-29 ans), tandis que celle de 2018 étudie 12 femmes et 6 hommes (16-26 ans). Sur ces sujets, ils mesurent (études en double aveugle et randomisées) le seuil de douleur thermique avant, pendant et après l'exposition aux radiofréquences (indiqué par un mouvement du doigt posé sur un coussin chauffant) ainsi que la perception subjective de la douleur par le sujet. La publication de 2013 ne montre pas d'effet des radiofréquences sur le seuil de douleur dans la bande UMTS, mais un effet sur l'échelle subjective de la douleur perçue (*visual analogue rating scale*, VAS) avec une atténuation avec les radiofréquences de la sensibilisation générale au 2^e bloc de 6 essais par rapport au 1^{er} bloc de 6 essais en condition contrôle *sham* (augmentation de la sensation de douleur). Celui de 2018 ne montre aucun effet des radiofréquences de type LTE sur le seuil de perception de la douleur (pré-, post- et pendant l'exposition aux radiofréquences) ainsi que sur la douleur subjective (échelle VAS). En somme, ils montrent un impact de la fréquence sur la perception subjective de la douleur mais pas sur le seuil de douleur. Il faut noter que les 2 études ont été publiées à 5 ans d'écart.

Enfin, Danker Hopfe *et al.* (2020) ont comparé les effets d'un signal de type TETRA (385 MHz, DAS = 6 W/kg) et d'un signal de type GSM (900 MHz, DAS = 2 W/kg) chez 60 sujets âgés (dont 30 femmes, âge 60-80 ans) sur la macrostructure du sommeil (30 variables). Les expositions ont été de 8 h par nuit sur 9 nuits. Les résultats sont très nombreux au vu de la quantité de variables : ils montrent des effets des radiofréquences, mais surtout un effet du sexe important. Par exemple, une réduction des éveils, de la latence du sommeil lent profond (N3) et temps d'éveil auto rapporté après sommeil plus court pour les 2 sexes avec l'exposition aux radiofréquences. Par contre, plusieurs effets des radiofréquences sont liés au sexe, comme la latence pour le stade REM (*rapid eye movement*) qui est plus court chez les femmes et tend à être plus long chez les hommes exposés (2 signaux). Ou encore, le temps éveillé pendant le sommeil est plus court chez les femmes sous TETRA et légèrement plus long chez les hommes. Alors que sous exposition au GSM, le temps total de sommeil rapporté tend à être plus long chez les femmes et plus court chez les hommes. Les auteurs concluent que les

effets des radiofréquences sur le sommeil dépendent du sexe : ils sont plus marqués chez les femmes. Cependant, quel que soit le sexe, les effets des radiofréquences (2 fréquences) sont plutôt marginaux et n'indiquent pas d'altération du sommeil.

6.3.2.5 Conclusion sur les impacts de la fréquence

Cette approche vise à répondre à une question précise : étant donné que très peu d'études concernant les bandes 700 MHz et 3,5 GHz spécifiquement sont disponibles, est-il possible d'utiliser les résultats des études antérieures obtenus à des fréquences proches ?

Pour évaluer cette possibilité, la question suivante a été examinée : existe-t-il un impact de la fréquence sur les effets biologiques, physiologiques voire sanitaires ? Si la réponse est positive, il sera difficile d'extrapoler les résultats obtenus à certaines fréquences à d'autres, sinon, les effets pourraient dépendre uniquement de l'énergie déposée et de sa profondeur de pénétration.

L'analyse des publications qui ont étudié des effets d'expositions à différentes fréquences montre que lorsque des phénomènes moléculaires sont analysés, l'augmentation de la fréquence semble entraîner, souvent, une augmentation de l'effet. Lorsque des effets physiologiques ou comportementaux chez l'animal sont analysés, 3 papiers sur 6 montrent un effet de la fréquence, 4 sur 10 chez l'Homme, notamment les effets sur le comportement ou l'EEG. Ainsi, qu'il s'agisse d'études *in vivo* ou chez l'Homme, il n'existe pas d'argument solide pour conclure quant à l'existence ou non d'un impact de la fréquence sur des effets observés. On peut cependant noter que, lorsque des effets sont observés chez l'Homme à des fréquences entre 0,9 et 2,4 GHz, ils semblent faibles et, le plus souvent, aucun impact de la fréquence n'est mis en évidence, ce qui laisse penser que pour des signaux proches (700 MHz ou 3,5 GHz) non encore étudiés, ils pourraient être comparables. Enfin, il est à noter qu'il a été montré chez l'Homme un effet des radiofréquences en fonction du sexe, mais qui tend le plus souvent à être plus faible que l'effet du sexe seul.

Ces conclusions ne concernent pas les tissus superficiels (peau, œil), pour lesquels les effets de la variation de la pénétration en fonction de la fréquence ne se posent pas. Ils n'ont pas ou peu été étudiés dans ces bandes de fréquences (y compris études avec au moins 2 fréquences) et ce sont des tissus dans lesquels les effets moléculaires pourraient être plus marqués (en raison de leur localisation superficielle).

6.3.3 Conclusion

La littérature scientifique ne fournit pas suffisamment d'études dans des fréquences proches de 3,5 GHz (seulement 5 études et dans des domaines très disparates) pour pouvoir procéder à une évaluation du niveau de preuve d'effets sanitaires éventuels. Le groupe de travail a tenté de répondre à la question de savoir si dans la gamme des fréquences les plus étudiées, entre 840 MHz et 2,85 GHz environ (c'est-à-dire proche de 3,5 GHz, mais aussi de 700 MHz), il existait un lien entre la fréquence et l'intensité des effets biologiques étudiés. À partir d'une bibliographie regroupant des articles ayant étudié au moins 2 fréquences et montrant un effet des radiofréquences, l'analyse suggère que les études ciblant des effets cellulaires et moléculaires tendent souvent à montrer que les effets biologiques augmentent avec la fréquence. Ces résultats ne sont pas confirmés pour les effets comportementaux et neurophysiologiques chez l'animal ou chez l'Homme. Il existe donc une incertitude quant à savoir si lorsque des effets des radiofréquences sont observés, la fréquence joue un rôle sur les modifications et/ou altérations observées chez l'Homme. Ainsi, la 1^{re} conclusion est qu'il

ne paraît pas possible, à l'heure actuelle, d'extrapoler des résultats d'études scientifiques à des fréquences différentes, même proches, pour en tirer des conclusions sur les effets biologiques, physiologiques et *a fortiori* sanitaires éventuels dans la bande 3,5 GHz voire 700 MHz, très peu étudiée également. Au final, il n'est pas attendu d'effets biologiques, physiologiques ou sanitaire des signaux à 700 MHz ou 3,5 GHz qui différeraient grandement de ceux observés précédemment à des fréquences proches.

6.4 Effets éventuels liés à l'exposition aux champs radiofréquences dans la bande (24 – 60) GHz

6.4.1 Effets sur la peau

6.4.1.1 Structure de la peau

La peau humaine est un des organes les plus volumineux de l'organisme, avec un poids de l'ordre de 2 à 3 kg et une surface de 1,5 à 2 m² chez l'adulte. Elle a une structure complexe, et comporte trois couches principales : l'épiderme, le derme et le tissu sous-cutané, constitués de différents types cellulaires assurant différentes fonctions.

L'épiderme est la couche la plus superficielle de la peau. Son épaisseur varie de 50 µm (paupières) à 1,5 mm (sole plantaire). Il est presque exclusivement constitué d'un seul type cellulaire, les kératinocytes, organisés en quatre couches. La couche basale comporte une seule couche de kératinocytes qui se divisent activement, adhérents à une membrane basale. Cette couche basale comporte également des mélanocytes (1 à 5 %, selon les localisations anatomiques) qui produisent des pigments et émettent des dendrites vers les couches supérieures de kératinocytes. Les kératinocytes de la couche basale se différencient progressivement et migrent pour former les couches supérieures de l'épiderme. Le stratum spinosum, fait de 5 à 15 couches de grands kératinocytes, contient aussi des cellules de Langerhans (cellules dendritiques impliquées dans le traitement de l'antigène). Le stratum granulosum est fait de 1 à 4 couches de kératinocytes aplatis, au noyau en dégénérescence, contenant des granules de kératohyaline. La couche la plus externe de l'épiderme, le stratum cornéum, est constituée de 10 à 30 couches de cornéocytes (kératinocytes morts) remplis de fibrilles de kératine.

Le derme est un tissu conjonctif, d'environ 1 mm d'épaisseur, dont la partie supérieure, le derme papillaire, est en contact avec la membrane basale de l'épiderme et forme des papilles qui augmentent les surfaces de contact avec l'épiderme (*rete ridges*). Il est fortement vascularisé et contient des neurofibrilles et des récepteurs sensoriels (corpuscules de Pacini). La plus importante partie du derme, le derme réticulaire, est formé de réseaux protéiques (collagène et élastine) produits par des fibroblastes, et est vascularisé dans sa partie supérieure. Le derme contient aussi des annexes : glandes sudoripares, follicules pileux (invagination de l'épiderme) et leurs muscles érecteurs et glandes sébacées.

Le tissu sous-cutané est essentiellement constitué de graisse et est vascularisé.

À ces structures s'ajoutent les nombreuses bactéries commensales constituant le microbiote cutané dont la composition varie selon les localisations anatomiques (zones grasses, humides et sèches). Ce microbiote est présent dans l'épiderme, mais aussi dans le derme et les annexes. Il participe aux mécanismes de défense anti-infectieuse de la peau.

La peau est une interface avec le milieu extérieur. S'agissant des interactions avec les rayonnements électromagnétiques radiofréquences, la profondeur de pénétration dans les tissus diminue avec l'augmentation de la fréquence, et pour des fréquences élevées (plusieurs GHz), la pénétration est limitée aux couches superficielles de la peau (propriété exploitée par exemple par les scanners d'aéroports fonctionnant à une fréquence de 24 GHz), et peut produire un échauffement cutané (effet thermique exploité par exemple par les systèmes d'armes non létales utilisant une fréquence de 95 GHz).

Il faut noter, concernant les études sur les effets des radiofréquences sur la peau, que les modèles de peau humaine reconstruite en culture tridimensionnelle *in vitro* sont beaucoup plus simples et imparfaits.

6.4.1.2 Effet sur le transcriptome cutané

6.4.1.2.1 Présentation

L'effet des ondes millimétriques sur l'expression de gènes candidats a été étudié par différentes méthodes :

- par l'analyse de l'expression de gènes candidats par *Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction quantitative* (RT-qPCR) en partant des ARN totaux extraits d'un tissu exposé ou non ;
- par la recherche de gènes dérégulés par hybridation des ARN totaux à des *microarrays* de sondes correspondant à un ensemble donné de gènes ;
- ou enfin par le séquençage exhaustif des ARN (*high throughput RNA sequencing* ou RNA-seq).

Dans tous les cas, les expériences sont répliquées au minimum 3 fois et les résultats soumis à des tests statistiques classiques, par exemple tests t ou Mann-Whitney, suivis de tests pour comparaison multiples, par exemple correction de Benjamini-Hochberg¹³⁸, dans le cas des analyses à grande échelle (microarrays et RNA-seq).

6.4.1.2.2 Analyse du corpus bibliographique

Six publications issues du même laboratoire ont été jugées de qualité suffisante pour être intégrées à l'évaluation du niveau de preuve. Trois d'entre elles, Le Quément *et al.*, (2012), Habauzit *et al.*, (2014) et Martin *et al.*, (2020) ont analysé l'effet d'une exposition de cultures primaires ou de lignées cellulaires de kératinocytes et de mélanocytes humains à des ondes à 60,4 GHz sur l'expression des gènes. Deux publications, Le Quément *et al.*, (2014) et Soubere Mahamoud *et al.*, (2016) ont analysé l'effet d'une exposition de primocultures et de lignées cellulaires de kératinocytes et de mélanocytes humains à des ondes à 60,4 GHz sur la réponse à un stress métabolique. La dernière (Habauzit *et al.*, 2020) a suivi l'expression des gènes dans la peau de rats soumis à une exposition à 94 GHz.

L'objectif de l'étude de Le Quément *et al.* (2012) était de suivre les variations de l'expression globale des gènes dans des primocultures de kératinocytes humains exposées à des ondes électromagnétiques à 60,4 GHz. Les cultures ont été établies à partir de prépuces de 3 nouveaux-nés et cultivées à 37°C sous 5 % de CO₂ à une densité de 16 000 cellules/cm². Les

¹³⁸ Il s'agit d'éliminer les faux positifs en faisant une analyse statistique de l'ensemble des mesures d'ARNm (contrairement au t test qui compare les valeurs des différents réplicats pour un ARNm donné obtenues dans les conditions testées (ici exposition) et dans les conditions témoin).

cultures ont ensuite été exposées pendant 1, 6 ou 24 h aux ondes électromagnétiques à 60,4 GHz à une densité de puissance de 1,8 mW/cm² et un débit d'absorption spécifique moyen de 42,4 W/kg, ou non exposées (*sham*). Les ARNm ont été extraits et le niveau d'expression des gènes a été évalué par hybridation des transcrits sur des puces à ADN contenant les sondes correspondant à 41 000 gènes (*Whole Human Genome kit*, Agilent) en 4 réplicats. Les résultats ont été soumis à une analyse statistique classique (tests t suivis ou non de correction de Benjamini-Hochberg¹³⁹).

L'exposition est accompagnée d'une élévation de température de 0,8 à 0,9°C. Les travaux précédents des auteurs ont montré qu'une telle élévation de température n'induit pas l'expression des protéines de choc thermique Hsp27 et Hsp70. De plus, après 6 h d'exposition, les gènes DNAJB1, DNAJB6, et HSPA1A, fortement surexprimés lors d'un choc thermique, sont peu surexprimés ici. L'exposition ne semble pas induire un choc thermique en soi. L'analyse statistique complète (tests t suivis de correction de Benjamini-Hochberg) ne révèle aucun gène exprimé de façon différentielle entre les témoins *sham* et les échantillons exposés. Cependant, avant correction de Benjamini-Hochberg, 130 gènes potentiellement dérégulés sont détectés : 111 gènes régulés négativement et 19 gènes régulés positivement après 6 h d'exposition. Les 24 gènes dont le facteur de changement est le plus élevé et la significativité statistique (*p-value*) la plus faible ont été choisis pour effectuer des validations par RT-qPCR. La diminution de l'expression de 5 d'entre eux après 6 h d'exposition a été confirmée. Il s'agit de CRIP2 (*Cysteine-Rich Protein 2*, codant une protéine impliquée dans la régulation transcriptionnelle, la signalisation cellulaire, l'hématopoïèse et la prolifération cellulaire), PLXND1 (*Plexin D1*, codant un récepteur transmembranaire impliqué dans le développement), PTX3 (*Pentraxin-related gene*, codant une protéine impliquée dans l'immunité innée et la réponse inflammatoire), SERPINF1 (*Serpin peptidase inhibitor*, codant un inhibiteur d'endopeptidase anti-prolifératif et anti-angiogénique) et TRPV2 (*Transient Receptor Potential cation channel*, codant un canal cationique mécano et thermo-sensible, perméable au calcium, impliqué dans la perception sensorielle de la chaleur). La diminution de l'expression de ces 5 gènes est transitoire, observée après une exposition de 6 h et, excepté pour TRPV2, ne persiste pas après une exposition de 24 h.

L'étude est bien décrite et rigoureuse. L'analyse statistique classique des données par tests t et comparaison multiple suggère que les ondes électromagnétiques continues de fréquence 60,4 GHz n'ont pas d'impact sur le transcriptome de kératinocytes humains. Quelques rares gènes (130 sur 41 000) ont une expression significativement différente après exposition en absence de comparaison multiple mais, au moins pour ceux qui ont été testés par RT-qPCR, la dérégulation n'est que transitoire.

L'objectif de l'étude de Le Quément et ses collaborateurs (2014) était d'étudier l'effet des ondes millimétriques sur le stress du réticulum endoplasmique (RE). Les auteurs ont exposé des cellules de lignées cellulaires de peau humaine (HaCaT, kératinocytes humains spontanément immortalisés, et A375, mélanome humain) pendant 20 min., 1 h, 6 h, 16 h ou 24 h, à une exposition à 60,4 GHz, à des densités de puissance surfaciques allant de 1 à 20 mW/cm² (la valeur la plus élevée correspond à la valeur limite d'exposition préconisée par l'Icnirp. Des expositions factices (*sham*) ont été réalisées. L'expression de 2 gènes résidents

¹³⁹ La correction de Benjamini-Hochberg a pour objectif d'éliminer les faux positifs en faisant une analyse statistique de l'ensemble des mesures d'ARNm (contrairement au t.test qui compare les valeurs des différents réplicats pour un ARNm donné obtenues dans les conditions testées (ici exposition) et dans les conditions témoin.

du RE, *BIP* et *ORP150*, a été examinée par RT-qPCR. Les résultats ont montré que l'exposition aux ondes millimétriques ne changeait pas les niveaux de base des ARNm *BIP* ou *ORP150*, quelle que soit la lignée cellulaire, la durée d'exposition ou le niveau de puissance. L'exposition aux ondes millimétriques induisant une augmentation de température proportionnelle au niveau de puissance (42,98 °C pour 20 mW/cm²), des témoins thermiques ont été réalisés en mesurant l'expression des gènes de choc thermique *HSP27* et *HSP70* par RT-qPCR. L'exposition des cellules pendant 24 h à des niveaux de puissance de 0 à 10 mW/cm² n'a pas modifié l'expression de *HSP27* et *HSP70*, mais une exposition de 24 h à 20 mW/cm² a induit une augmentation significative de *HSP27* et *HSP70*. Comme témoins positifs d'induction de stress du RE, les cellules ont été cultivées pendant 16 h en présence de thapsigargine (TG, un composé qui déclenche le stress du RE en inhibant sélectivement la pompe Ca⁺⁺-ATPase du RE), et il a été vérifié que la TG induit une surexpression de *BIP*. Des essais de co-exposition TG-ondes millimétriques ont été réalisés. Les résultats ont montré que l'exposition aux ondes millimétriques à 20 mW/cm² inhibe la surexpression TG-induite de *BIP* et *ORP150*. Les témoins expérimentaux ont montré que cette inhibition est liée à l'effet thermique résultant de l'exposition aux ondes millimétriques. Ces résultats indiquent que l'exposition à des ondes millimétriques ne modifie pas l'expression de gènes de réponse au stress du RE, mais inhibe à forte puissance la réponse à un agent de stress du RE.

L'objectif de l'étude de Habauzit et ses collaborateurs (2014) était d'évaluer les effets de l'exposition à des ondes millimétriques dans la bande 60 GHz sur l'expression du génome. Les essais ont été réalisés en utilisant un *pool* de 3 primocultures (pour limiter les variations individuelles) de kératinocytes humains. Les essais ont été menés à 20 mW/cm² (valeur limite d'exposition préconisée par l'Inirp pour le public). À ce niveau de densité de puissance, l'exposition induit une augmentation de la température du milieu de culture. Des « contrôles thermiques » ont donc été introduits, en plus d'un contrôle « sham », afin de pouvoir dissocier les effets liés aux champs électromagnétiques des effets thermiques engendrés par les radiofréquences : un contrôle HSC (*Heat Shock Control*) où les cellules ont été cultivées à la température atteinte dans les cultures lors de l'exposition, et un contrôle CompT_Expo où l'augmentation de température due à l'exposition a été compensée par une diminution de la température de l'incubateur. Deux séries d'essais ont été réalisés.

Dans une première série, les cellules ont été exposées pendant 3 heures, les transcrits analysés par *microarrays*, et les résultats vérifiés par RT-qPCR. L'exposition aux ondes millimétriques a induit une augmentation de température (+6,7°C) et une importante modification de l'expression de 665 gènes dans les cellules exposées par rapport aux cellules témoins. La plupart des gènes dont l'expression a été modifiée correspondent à des protéines chaperones et de choc thermique. Mais, lorsque la température a été maintenue constante, l'exposition aux ondes millimétriques n'a pas induit de modification de l'expression génique. Cependant, les témoins HSC ne reproduisent pas exactement l'effet de l'exposition, suggérant un léger effet électromagnétique spécifique dans des conditions d'hyperthermie : 34 gènes sont différenciellement exprimés. Vingt-deux gènes ont été sélectionnés sur la base de l'amplitude de leur modification (> 1,5 ou > 2) et sa significativité pour une vérification par RT-qPCR : l'expression différentielle de 21 de ces gènes a été confirmée. Pour vérifier la reproductibilité de l'effet des ondes millimétriques observé, une seconde série d'expositions a été réalisée, et la dynamique de l'expression de ces 22 gènes a été étudiée au cours du temps (1, 2 et 3 h). Après cette seconde série d'exposition et d'analyse par RT-qPCR, seuls 7 gènes ont été confirmés comme exprimés différenciellement. Parmi ces gènes, 3 (*ADAMTS6*, *NOG* et *IL7R*), codant pour des facteurs de sécrétion impliqués dans la communication cellulaire,

ont montré une augmentation d'expression lors de l'exposition aux ondes millimétriques et une légère diminution en conditions HSC, ce qui semble indiquer un effet des ondes millimétriques sur l'expression des gènes, différent des conditions *sham* et HSC, et une expression spécifique de certains gènes due aux radiofréquences.

Soubere Mahamoud et ses collaborateurs (2016) avaient pour objectif d'évaluer l'effet d'une exposition à des ondes millimétriques sur des kératinocytes humains (primoculture et lignée cellulaire HaCaT), et d'observer les effets biologiques de ces ondes millimétriques lorsque les cellules étaient exposées à un stress métabolique imitant l'effet Warburg. En utilisant une approche *microarrays*/génomique entier, les auteurs ont analysé les modifications d'expression du génome de kératinocytes en primoculture exposés à 60,4 GHz à une densité de puissance de 20 mW/cm² pendant 3 heures dans des conditions athermiques (compensation de l'élévation de température par diminution du réglage de la température de l'étuve de culture). Dans ces conditions, aucune modification du transcriptome des kératinocytes n'a été observée. Les auteurs ont ensuite analysé les effets des ondes millimétriques sur le métabolisme cellulaire en cotraitant les cellules exposées aux ondes par un inhibiteur de la glycolyse, le 2-désoxyglucose (2dG, 20 mM pendant 3 heures), en évaluant l'expression du génome entier ainsi que (pour les cellules HaCaT) la concentration intracellulaire d'ATP. L'exposition aux ondes millimétriques n'a pas modifié la concentration en ATP, par contre l'exposition au 2dG a induit une diminution significative (2 fois) de la concentration intracellulaire en ATP des cellules exposées ou non. Cela indique que les ondes millimétriques n'ont pas potentialisé le stress énergétique déclenché par le 2dG. Contrairement à l'exposition aux ondes millimétriques, l'exposition des cellules au 2dG a induit une forte modification du transcriptome (632 gènes codants), les gènes affectés étant associés à la répression transcriptionnelle, la communication cellulaire et l'homéostasie du réticulum endoplasmique. L'exposition combinée aux ondes millimétriques et au 2dG a modifié légèrement la réponse induite par le 2dG, reflétant la capacité des ondes millimétriques à interférer avec la réponse au stress bioénergétique. Une validation par RT-qPCR a confirmé que 6 gènes sont différentiellement exprimés lorsque la réponse au choc métabolique est associée à une exposition aiguë aux ondes millimétriques : SOCS3, SPRY2, TRIB1, FAM46A, CSRN1 et PPP1R15A. Ces 6 gènes codent pour des facteurs de transcription ou des inhibiteurs des voies des cytokines, ce qui, pour les auteurs, soulève un questionnement sur l'impact potentiel de l'exposition chronique ou à long terme aux ondes millimétriques sur des cellules métaboliquement stressées.

L'objectif de l'étude de Martin *et al.*, (2020) était de tester la généralisation d'un effet modeste des ondes millimétriques sur l'expression de certains gènes déjà étudiés dans une étude précédente du même groupe (Habauzit *et al.*, 2014), en utilisant les mêmes conditions d'exposition. L'étude porte sur 3 modèles de cultures primaires de kératinocytes humains (HEK_3N, NHEK_3N et HEK_1N provenant de cellules de prépuces de nouveaux-nés) et une lignée de kératinocytes humains spontanément immortalisée et aneuploïde qui provient de peau d'adulte, la lignée HaCaT. L'expression des 3 gènes ADAMTS6, IL7R, et NOG a été suivie par RT-qPCR (gènes utilisés pour la normalisation, TBP et GAPDH, analyse par la méthode du $\Delta\Delta C_t^{140}$) après une exposition de 3 h à des ondes continues de fréquence 60,4 GHz, avec une densité de puissance de 20 mW/cm², et un débit d'absorption spécifique

¹⁴⁰ méthode d'analyse des données de PCR quantitative.

maximum de 1,233 W/kg et moyen de 0,594 W/kg. Les expériences ont été reproduites de 3 à 6 fois et les résultats soumis à des tests Mann-Whitney *one-tailed*.

Le traitement des cellules par des facteurs de croissance (interleukine-1 et *Epidermal Growth Factor*) augmente l'abondance des ARNm correspondant aux trois gènes ADAMTS6, IL7R, et NOG, comme attendu, ce qui constitue un témoin positif de l'expérience. Par contre, l'abondance de ces ARNm codant pour ADAMTS6, IL7R et NOG n'est pas significativement différente après l'exposition. Cependant, trois tendances (augmentation, diminution, pas de variation) sont observées selon la lignée cellulaire, bien que l'exposition soit identique, ce qui témoigne d'une certaine variabilité dont l'origine reste à identifier. Martin *et al.* concluent que les cellules des 4 lignées pourraient présenter des sensibilités différentes aux ondes électromagnétiques.

La portée de cette étude, qui ne concerne que trois gènes, est très limitée. L'absence de groupe témoin « température », alors que selon Habauzit *et al.* la température dans ce système augmente de 7 à 8°C, est une grande faiblesse.

L'étude d'Habauzit *et al.*, (2020) vise à analyser les changements de l'expression des gènes dans la peau de rat *Hairless* lors d'une exposition à des ondes à 94 GHz.

Les rats sont soumis à un rayonnement à 94 GHz en utilisant un générateur EIK (Communications & Power industries, UK). Pour cela, ils sont placés dans une chambre anéchoïque à 20°C ± 1°C et exposés par l'intermédiaire d'une antenne cornet, 3 h par jour, 3 jours par semaine, pendant 5 mois. La distance entre les rats et l'antenne est de 71 cm, ce qui crée un faisceau homogène de 10 mW/cm² sur une aire d'un mètre. La température est enregistrée avant et après l'exposition avec une caméra infrarouge FLIR A320. Deux expériences ont été réalisées. La première expérience (E1) porte sur 14 rats mâles adultes âgés (14 semaines ; poids moyen 521 g), 6 rats sont exposés et 8 rats (témoins) subissent le même traitement mais sans exposition. La seconde expérience (E2) porte sur 17 rats mâles jeunes (6 semaines ; poids moyen 301 g), 9 rats sont exposés et 8 rats subissent le même traitement mais sans exposition. L'exposition n'affecte pas le poids des rats mais elle induit une augmentation de la température de la surface de la peau (1,0 ± 0,5°C pour les adultes et 0,5 ± 0,5°C pour les jeunes) sans modifier la température interne. Les ARNm de la peau des rats ont été extraits et hybridés avec des micropuces à ADN permettant de suivre l'expression de 14 721 gènes (logiciel GeneSpring, Agilent technologies). Les données sont publiques (déposées sur GEO : GSE132816, GSE132817 and GSE132818). Les gènes dont la variation de l'abondance des ARNm est supérieure à un facteur 1,5 ont été conservés, la *p-value* calculée (test Mann-Whitney *two-tailed*) et ajustée (Benjamini-Hochberg). La variation de l'abondance des ARNm a été considérée significative quand la *p-value* est inférieure à 0,05.

Globalement, 1 % des gènes (156 pour E1 et 120 pour E2) présentent une variation de l'abondance des ARNm supérieure à 1,5. Après correction de Benjamini-Hochberg, seulement 14 gènes présentent une variation de l'abondance des ARNm après exposition pour E1 et 4 pour E2, aucun n'est commun à E1 et E2, ce sont probablement des faux positifs. L'expression des gènes codant les protéines de *heat-shock*, de l'inflammation ou de la réparation de l'ADN n'est pas modifiée après exposition.

Cette analyse du transcriptome à grande échelle est réalisée rigoureusement. Elle permet de conclure qu'une exposition sur le long terme à des ondes à 94 GHz ne modifie pas l'expression des gènes de la peau des rats, même si une faible augmentation de la température de la peau est enregistrée.

6.4.1.2.3 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

En conclusion, ces analyses de transcriptomes, réalisées dans le même laboratoire, et, pour deux d'entre elles, sur le même système de kératinocytes, montrent que peu de gènes montrent une variation de l'expression de l'abondance des ARNm sous l'effet des ondes millimétriques. Les rares variations sont très modestes et le plus souvent transitoires. Il serait souhaitable de réaliser des études similaires sur d'autres modèles de cellules de peau afin de confirmer ou infirmer cet effet marginal des ondes millimétriques sur le transcriptome. Par ailleurs, le séquençage à haut débit des ARN (RNA-seq), exhaustif et plus précis, serait un apport intéressant, notamment parce qu'il permettrait d'analyser les variations des micro ARN ou d'ARN non codants. Ainsi, les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet des ondes millimétriques sur l'expression du génome.

6.4.1.3 Autres effets sur des cellules cutanées

6.4.1.3.1 Analyse du corpus bibliographique

La recherche bibliographique a permis d'identifier trois autres publications traitant des effets des radiofréquences de la 5G sur la peau ou sur des cellules cutanées et jugées de qualité suffisante pour être incluses dans une évaluation du niveau de preuve.

Se fondant sur des résultats antérieurs qui avaient suggéré que les ondes millimétriques pouvaient augmenter les pics de calcium intracellulaire dans des cellules neuronales, Sun et al. (2012) ont étudié la modulation de la dynamique du calcium par des ondes millimétriques (94 GHz, 30 ou 60 mW) dans un système *in vitro* de co-culture de cellules murines P19 induites à se différencier en cellules neuronales et de kératinocytes épidermiques humains HEKn. Dans ce système, les cellules n'étaient pas en contact direct, mais en couches unicellulaires opposées et séparées de 200 µm (la pénétration des ondes dans le milieu n'étant que d'environ 115 µm). Les essais ont été conduits à température ambiante (env. 22°C), sans refroidissement forcé. Au repos, les kératinocytes montraient une fréquence des pics de calcium de $8,2 \pm 0,8$ par heure. L'exposition pendant 60 min aux ondes millimétriques (60 mW) a induit une augmentation significative de la fréquence des pics de calcium ($17,7 \pm 1,5$ pics / 60 min; $p < 0,05$). En comparaison, à une température de 32°C, le nombre de pics de calcium augmentait à $11,8 \pm 1,7$, et à environ 15 pour 42°C. En co-culture avec des cellules neuronales, l'exposition des kératinocytes (à cause de la distance entre les deux cultures, il est peu vraisemblable que l'exposition puisse affecter la dynamique du calcium des cellules neuronales) modifiait le nombre de pics de calcium dans les cellules neuronales non exposées. À une puissance de 30 mW, l'exposition augmentait significativement le nombre de pics de calcium des cellules neuronales, mais à une puissance de 60 mW, l'exposition diminuait le nombre de pics par rapport au témoin non exposé. L'ATP étant un facteur majeur de modulation de la formation de pics de calcium dans les cellules neuronales, les auteurs ont mesuré l'ATP dans le milieu en réponse à l'exposition à 94 GHz et montré que cette sécrétion était augmentée d'un facteur 5 pour une puissance de 30 mW et d'un facteur 10 pour 60 mW. Pour confirmer le rôle de l'ATP dans l'induction de pics de calcium dans les cellules neuronales consécutive à l'exposition des kératinocytes, les auteurs ont conduit des essais en présence d'un bloqueur des canaux ATP et observé que l'activité des pics de calcium était complètement inhibée. En outre, l'addition de 0,1 µM d'ATP dans le milieu stimulait la production de pics de calcium alors qu'une concentration de 10 µM l'inhibait. Ce qui suggérerait un mécanisme dans lequel l'exposition à 94 GHz des kératinocytes induirait la production d'ATP qui modulerait la dynamique du calcium des cellules neuronales non exposées, un excès d'ATP pouvant inhiber

et non stimuler la production de pics de calcium. Ce mécanisme impliquerait la participation de récepteurs purinergiques (P2X2 et P2Y2), dont les auteurs ont vérifié l'expression abondante dans les cellules souches P19 indifférenciées et différenciées en cellules neuronales. Une simulation utilisant un modèle mécanistique mathématique développé pour étudier la dynamique du calcium ATP-dépendante et médiée par des récepteurs purinergiques, est en accord avec les résultats expérimentaux et suggère la participation de récepteurs purinergiques sensibles à l'ATP. Les auteurs concluent que, dans ce modèle de co-culture, la dynamique intracellulaire du calcium est régulée par des interactions cellules-ondes millimétriques et cellules-cellules. Les mesures effectuées par caméra thermique indiquent qu'en réponse à une exposition à 60 mW, la température dans la chambre de culture augmente rapidement et atteint un équilibre en 10 secondes, une augmentation maximum de +8°C a été observée. Les expositions ayant été effectuées pour des durées de 60 minutes, il n'est pas possible d'éliminer totalement un effet thermique, bien que les auteurs aient effectué des essais en augmentant la température à 32 et 42°C. Dans ces conditions, le témoin non exposé est resté à la température ambiante de 22°C.

Franchini *et al.* (2018) ont exposé pendant 20 min des fibroblastes humains fœtaux (lignée cellulaire HFFF2 de fibroblastes de prépuce) ou adultes (lignée cellulaire HDF de fibroblastes dermiques) à des ondes intermittentes dans une large bande de fréquences comprises entre 100 et 150 GHz (hors du champ de la présente analyse) et à une exposition à des ondes continues à une fréquence de 25 GHz à une puissance de 20 mW, et évalué les effets potentiels de ces expositions sur l'intégrité du génome, le cycle cellulaire, l'ultrastructure cytologique et l'expression des protéines. Au cours de l'exposition, les échantillons exposés et « sham » ont approché la température ambiante, la variation de température étant de l'ordre de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ pour l'exposition à 100-150 GHz, et de $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ pour l'exposition à 25 GHz (dans ce dernier cas, la source de l'augmentation de température provenant de la chaleur dissipée par le système d'exposition).

Les résultats des analyses effectuées sur les fibroblastes fœtaux et adultes exposés aux fréquences de 100-150 et 25 GHz suggéraient que ces fréquences n'induisaient pas de lésions directes de l'ADN (évaluées par test de comètes, foyers $\gamma\text{-H2AX}$, et micronoyaux CREST-négatifs correspondant à la présence de fragments de chromosome), mais des effets indirects conduisant à une aneuploidie (augmentation significative des micronoyaux CREST-positifs correspondant à la présence d'un chromosome entier ; résultats confirmés par l'augmentation de l'incidence des non disjonctions de chromosomes dans les échantillons exposés). L'analyse de la longueur des télomères n'a pas montré de modulation significative après l'exposition, suggérant que cette structure n'est pas impliquée dans la mauvaise ségrégation des chromosomes.

L'analyse en cytométrie de flux du cycle cellulaire des cellules fœtales et adultes a montré que l'exposition à 100-150 GHz ou à 25 GHz n'affectait pas la progression dans le cycle. Aucune modification de l'expression des protéines de choc thermique et des protéines de signalisation pro-survie (NF- κB , ERK1/2, AKT) n'a été observée pour les deux fréquences d'exposition. Les marqueurs d'activation d'apoptose (clivage de PARP-1, protéines pro-apoptotiques) n'ont pas été modifiés par l'exposition à 100-150 GHz, et il n'y a pas eu de différences d'expression des protéines du cytosquelette, actine et tubuline, dans les deux types cellulaires (résultats non mentionnés pour l'exposition 25 GHz).

Pour les cellules exposées à 100-150 GHz, l'analyse morphologique en microscopie optique n'a pas montré de différence entre les cellules exposées et les témoins, pour les cellules fœtales et adultes.

L'analyse ultrastructurale a montré, 1 h après l'exposition à 100-150 GHz et dans les deux types cellulaires, une augmentation substantielle de la polymérisation des filaments fins et intermédiaires, sous la membrane plasmique et dans le cytoplasme, ainsi qu'une légère augmentation des lysosomes et la présence de vésicules pinocytaires. Ces modifications apparaissent cependant transitoires, l'analyse 48 h après l'exposition ne montrant pas de différence, si ce n'est une légère augmentation de la polymérisation des filaments du cytosquelette. Par contre, l'exposition à 25 GHz n'a pas montré de différence entre les cellules exposées et les cellules « sham », et la polymérisation des filaments du cytosquelette était normale.

Au vu des différences observées dans la polymérisation des filaments du cytosquelette à la suite des expositions à 100-150 et à 25 GHz, les auteurs suggèrent que l'aneuploidie obtenue par ces deux fréquences d'exposition pourrait résulter de mécanismes différents. La densité de puissance des expositions à 100-150 GHz n'est pas clairement mentionnée, il est juste sous-entendu qu'elle aurait été faible.

Une étude de Le Pogam *et al.* (2019) a étudié l'effet de l'exposition à 60,4 GHz pendant 24 h à une densité de puissance de 20 mW/cm² sur les lipides et les métabolites de cellules de passages précoces de la lignée HaCaT cultivées à température maintenue constante en diminuant la température de l'étuve pour contrecarrer l'augmentation de température induite par l'exposition aux ondes millimétriques. Après exposition, les profils lipidomique et métabolomique dans les deux fractions intra-cellulaire et extra-cellulaire (aliquot de milieu de culture), à des polarités positive et négative, ont été déterminés.

Les résultats montrent un nombre limité de caractéristiques modifiées dans les profils lipidomiques et dans les analyses métabolomiques intracellulaires, quel que soit le mode d'ionisation (moins de 6 caractéristiques modifiées). Par contre, des dérégulations importantes ont été observées dans les profils métabolomiques extracellulaires, avec 111 et 99 modifications après l'exposition sur des adduits positifs et négatifs respectivement.

Les auteurs pensent que cette ampleur inattendue de modifications peut difficilement provenir des modifications légères rapportées par les études du transcriptome, et émettent l'hypothèse selon laquelle les ondes millimétriques pourraient altérer la perméabilité des membranes cellulaires, comme cela a été rapporté par d'autres études sur des modèles phospholipidiques de membranes cellulaires.

D'autres articles concernant des effets sur des cellules cutanées ont été analysés dans d'autres sections du rapport : Franchini *et al.*, 2018, dans la section « Génotoxicité » (*cf.* chapitre 6.4.5), ainsi que Geyikoğlu *et al.*, 2014 et Mumtaz *et al.*, 2020, analysés dans la section consacrée à la fréquence 3,5 GHz (*cf.* chapitre 6.3).

L'article de Hamed *et al.*, 2018, analysé, n'a pas été retenu pour l'évaluation du niveau de preuve. Cet article est consacré uniquement à des calculs théoriques de DAS et d'élévation de température à différentes fréquences sur deux modèles (fantômes cylindriques) de tissus humains (peau en monocouche et en triple couche –peau, tissus adipeux, muscle) basés sur les propriétés diélectriques des organes humains. Les calculs sont effectués pour une antenne plane placée à 3 distances différentes 0,5, 3 et 5,5 mm, sans analyse d'effets biologiques.

6.4.1.3.2 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

Pour un signal continu de fréquence 25 GHz, une étude (Franchini *et al.*, 2018) n'a pas montré d'effet génotoxique direct sur des fibroblastes humains fœtaux et adultes, mais la possibilité d'un effet indirect d'aneuploidie résultant de non disjonction de chromosomes.

Pour une fréquence de 60,4 GHz, et à une forte puissance, cinq études d'un même groupe (Le Quément *et al.*, 2012 et 2014, Habauzit *et al.*, 2014, Soubere Mahamoud *et al.*, 2016 et Martin *et al.*, 2020) sur des kératinocytes humains, n'ont pas montré de modifications du transcriptome en conditions athermiques. Par contre, ces études ont suggéré la possibilité de l'induction de l'expression de quelques gènes dans des conditions d'élévation de la température. Cependant, différents types cellulaires pourraient présenter des sensibilités différentes aux ondes électromagnétiques. Ces études ont aussi suggéré que l'exposition à un rayonnement pouvait interférer avec la réponse cellulaire à un stress. Une autre étude du même groupe (Le Pogam *et al.*, 2019) a montré une modification des profils lipidomique et métabolomique extracellulaires et suggéré que cette modification pouvait résulter d'une altération de la perméabilité des membranes cellulaires.

Pour une fréquence de 94 GHz, une étude *in vitro* (Sun *et al.*, 2012) a montré l'augmentation de la fréquence des pics intracellulaires de calcium de kératinocytes humains et l'augmentation de leur production d'ATP, pouvant moduler la dynamique du calcium de cellules neuronales non exposées mais en co-culture avec les kératinocytes exposés. *In vivo*, Habauzit *et al.* (2020) ont montré qu'une exposition sur le long terme à des ondes à 94 GHz ne modifie pas l'expression des gènes de la peau des rats, même si une faible augmentation de la température de la peau est enregistrée.

Ces études sont trop diverses et trop peu nombreuses pour conclure à l'existence ou non d'un effet de la gamme de fréquences 24 – 60 GHz sur la peau humaine. Ces études ne montrent pas d'effet génotoxique direct, mais peuvent indiquer la possibilité d'un effet indirect (aneuploïdie). Aucun effet sur le transcriptome n'a été détecté, mis à part des effets transitoires sur l'expression de quelques rares gènes impliqués dans la réponse des cellules au stress.

Par ailleurs, la quasi-totalité des références citées concerne le travail d'une seule équipe de recherche.

6.4.2 Effets sur l'œil

6.4.2.1 Présentation de l'œil

L'œil est l'organe des sens permettant de traduire en influx nerveux les radiations lumineuses. Il est constitué de trois couches superposées (*cf.* Figure 34).

La couche externe est constituée de la cornée et de la sclère. La cornée, transparente, permet l'entrée de la lumière dans l'œil. Elle contribue à la convergence de l'image vers la rétine et protège l'œil contre les infections et les agressions extérieures. La sclère forme une couche de tissu conjonctif qui protège les tissus profonds et maintient la forme de l'œil. La partie visible de la sclère (le blanc de l'œil) est recouverte d'une muqueuse transparente, la conjonctive. La couche moyenne de l'œil est composée de l'iris, du corps ciliaire et de la choroïde. L'iris contrôle la taille de la pupille, le corps ciliaire contrôle la forme, et donc la puissance réfractive, du cristallin. Le corps ciliaire produit aussi l'humeur aqueuse. La choroïde est une couche hautement vascularisée qui fournit de l'oxygène et des nutriments aux couches externes de la rétine.

La couche la plus interne de l'œil est la rétine ; il s'agit d'une structure nerveuse stratifiée de neurones qui capte la lumière et assure le traitement primaire du signal nerveux qui en résulte. À l'intérieur de cette structure trilaminaire se trouve l'humeur aqueuse, le cristallin et l'humeur vitrée.

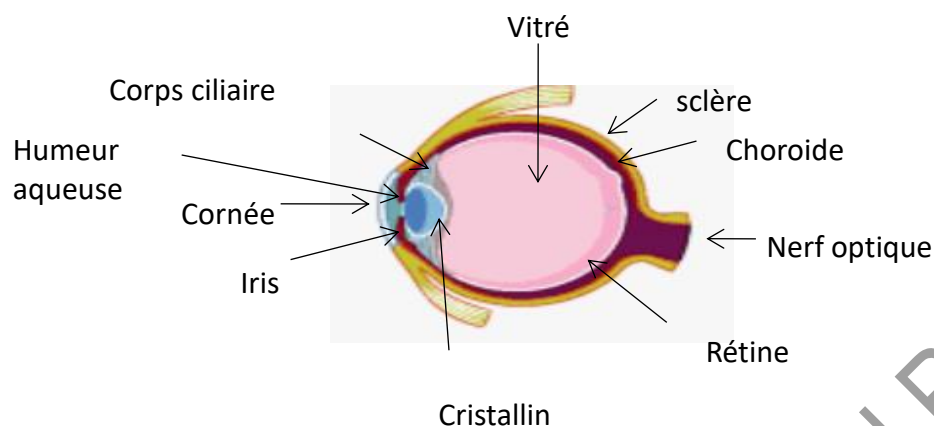


Figure 34 :Schéma de la structure de l'œil

Comme mentionné plus haut, il faut distinguer pour l'œil les effets thermiques des effets non thermiques des radiofréquences. Du point de vue thermique, le segment antérieur n'a pas une dissipation efficace de la température, contrairement au segment postérieur où la circulation choroïdienne est très efficace. Par ailleurs, le segment antérieur est plus proche de la température ambiante, contrairement au segment postérieur où l'intensité de la circulation choroïdienne et le processus de phototransduction augmentent la température qui se trouve être un peu plus élevée que la température corporelle (essentiellement au niveau de l'épithélium pigmentaire de la rétine).

6.4.2.2 Résultats antérieurs à 2012 sur les effets des radiofréquences sur l'œil

Chez des modèles animaux, il a été montré qu'une exposition aiguë à 60 GHz à 1 mW/cm² pendant 6 min pouvait générer des lésions oculaires chez le lapin (Kojima *et al.*, 2009). Ces résultats confirment un rapport antérieur sur les rats montrant des changements induits dans le cristallin prédisposant au développement de la cataracte (Prost *et al.*, 1994). Cependant, d'autres observations ont montré qu'une exposition unique (8 h) ou répétée (cinq jours consécutifs pendant 8 h) à 60 GHz (10 mW/cm²) ne provoquait pas de lésions chez les lapins et les primates non humains (Kues *et al.*, 1999).

Un des effets le plus relevé dans la littérature est l'apparition de cataractes. Lipman et ses collaborateurs (Lipman *et al.*, 1988) ont noté que les ondes dans la gamme du MHz provoquent le plus souvent des opacités sous-capsulaires, que ce soit chez les animaux de laboratoire ou dans les études épidémiologiques. Cutz et ses collaborateurs (Cutz *et al.*, 1989) montrent que les opacifications nécessitent une puissance relativement élevée (supérieure à 100 mW/cm²). Kues et Monhan (Kues et Monhan, 1992), ont étudié les effets du rayonnement micro-ondes de faible intensité sur l'œil des primates en utilisant des fréquences de 1,25 et 2,45 GHz 4 h par jour pendant 3 jours consécutifs. Ils ont identifié des lésions cornéennes, une augmentation de la perméabilité vasculaire et une dégénérescence des photorécepteurs de la rétine. Sasaki et ses collaborateurs (Sasaki *et al.*, 2014) ont fait état de leurs expériences *in vivo* sur des lapins pour des fréquences allant de 24,5 à 95 GHz, mesurant l'élévation de la

température. Leurs études suggèrent que des dommages cornéens se sont produits à une densité de puissance incidente de 300 mW/cm².

6.4.2.3 Analyse du corpus bibliographique

La recherche bibliographique a mis en évidence 3 publications étudiant les effets sur l'œil jugées de bonne qualité. Une publication montre des effets sur la cornée du lapin, et deux publications montrent une absence d'effets genotoxiques ou d'expression de protéines de chocs thermiques sur des cellules en culture. À ce corpus de publications issues de la recherche bibliographique ont été ajoutées deux publications fournies par le comité de dialogue « Radiofréquences et santé » de l'Anses (Parker *et al.*, 2020) et (Kojima *et al.*, 2019).

Parmi ces publications, les travaux de Kojima et ses collaborateurs (Kojima *et al.*, 2018) avaient pour objectif de développer des modèles de lésions oculaires chez le lapin permettant d'évaluer leur évolution clinique. Les lésions oculaires sont induites par l'exposition aux ondes dans la bande de fréquences 40-100 GHz. Ils ont également évalué la dépendance des dommages oculaires en fonction de la densité de puissance incidente.

Cent trente lapins ont été utilisés. Les yeux, maintenus ouverts pendant l'exposition, ont été hydratés par une solution saline afin d'éviter leur dessèchement. L'œil droit est exposé, l'œil gauche non exposé sert de témoin.

Cent-cinq lapins ont été exposés pendant 6 minutes à des radiofréquences selon le schéma suivant :

- 10–600 mW/cm² (40 GHz) ;
- 50–300 mW/cm² (75 GHz) ;
- 50–300 mW/cm² (95 GHz).

Vingt-et-un lapins sont exposés pendant 30 min à 75 GHz (10–300 mW/cm²).

Un contrôle thermique positif c'est-à-dire un groupe pour lequel la température de la surface oculaire a été augmentée à 38 °C, a été réalisé sur les 4 derniers lapins, par exposition à une lampe de bureau de 60 W.

La température est mesurée par une caméra thermique. L'examen des dommages oculaires est réalisé par marquage à la fluorescéine, qui se fixe à la surface cornéenne lorsque l'épithélium est endommagé. Ce marquage s'interprète grâce à la mesure de l'épaisseur (variations possibles de l'épaisseur en fonction des dommages cornéens) et de l'opacité de la cornée. Les effets sont évalués 10 minutes après exposition, puis après 1, 2 ou 3 jours.

Les résultats montrent que :

- à fréquence et puissance identiques les altérations cornéennes sont plus importantes si le temps d'exposition est augmenté ;
- à densité de puissance identique, l'augmentation de température de la cornée dépend de la fréquence ; elle est nettement plus élevée à 75 GHz qu'à 95 GHz ;
- les lésions sont très faibles à 100 mW/cm², mais sont observées pour la totalité des animaux pour les 3 fréquences lorsque la densité de puissance incidente est élevée (500-600 mW/cm² pour 40 GHz, 300 mW/cm² pour 75 GHz) ;
- 1 jour après exposition, les dommages présents au niveau du stroma et de l'épithélium sont les plus importants. À 3 jours, ces effets tendent à disparaître ;
- la probabilité de 50 % de dommages oculaires est calculée (DD50) : 40 GHz (206 mW/cm²) > 95 GHz (146 mW/cm²) ≈ 75 GHz (143 mW/cm²) ;
- ces effets ne dépendent pas de la température

Ce travail présente un modèle animal qui permet d'étudier différents effets des radiofréquences sur la cornée. Ceci dit, le nombre d'expériences et d'animaux par conditions est très variable et parfois faible. Dans leur discussion, les auteurs indiquent que comme les humains clignent des yeux plus fréquemment que les lapins, l'exposition à ces rayonnements ne devrait pas induire de dommages de l'épithélium de la cornée chez l'Homme. En revanche, ils omettent de dire que la cicatrisation cornéenne chez le lapin est meilleure que chez l'Homme.

Dans un travail ultérieur (Kojima *et al.*, 2019), le même groupe a examiné l'influence de l'humidité sur les dommages de la surface oculaire induits par les radiofréquences. Ils ont étudié la différence entre l'augmentation de la température induite en conditions d'humidité relative élevée (70 %) et faible (30 %). Les yeux de lapins pigmentés (néerlandais, 11-15 semaines) ont été exposés unilatéralement à 40 GHz avec une puissance de 200 mW/cm² pendant 5 ou 30 min avec une antenne focalisée au centre de la zone pupillaire, à une distance de 135 mm de l'ouverture de l'antenne. La thermographie infrarouge a été utilisée pour mesurer la température de la surface de la cornée pendant l'exposition. La température du stroma cornéen et du noyau du cristallin ont été mesurées à l'aide d'un thermomètre fluoroptique (liquide thermochromique micro-encapsulé injecté dans la chambre antérieure). Les différences de température ont été évaluées par un t test apparié. La distribution normale des données et leur homocédasticité ont été testées par le test de Kolmogorov-Smirnov et F respectivement. Après 4 min d'exposition, la température était augmentée dans toute la chambre antérieure dans les deux conditions d'exposition. Les températures de la surface de la cornée, du stroma cornéen et du cristallin étaient toutes plus élevées dans un environnement à fort taux d'humidité (70 %) que dans un environnement faiblement (30 %) humide. À taux d'humidité faible, la température de la surface de la cornée a atteint 35,5 °C, alors qu'en forte humidité elle a atteint 37,3 °C. Concernant le stroma, elle était respectivement de 36,6 °C et 38,3 °C. La température du noyau du cristallin a été mesurée à 35,6 °C et 37,3 °C. Les mesures étaient beaucoup plus élevées en situation d'humidité élevée qu'en humidité faible.

Toujours sur l'étude de la cornée *in vivo*, la publication de Parker et ses collaborateurs (Parker *et al.*, 2020) a été analysée. Il s'agit plutôt d'une publication qui concerne l'exposition. Comme dans les publications précédentes, les effets thermiques sur la cornée des primates causés par des ondes de 35 et 94 GHz ont été rapportés. Cette étude a examiné les vitesses d'échauffement de la cornée et les a comparées à un modèle thermique multicouche intégrant la convection. Seize singes rhésus mâles, âgés de 2 à 15 ans et pesant de 8 à 12 kg ont été exposés aux ondes (pas plus de 2 W.cm⁻² et 3 J.cm⁻²). Les changements de température qui se sont produits pendant l'exposition des cornées aux radiofréquences ont été mesurés à l'aide d'une caméra infrarouge.

Chaque membre d'un groupe a été exposé à deux des trois densités de puissance possibles (0,5, 1,0 ou 2,0 W.cm⁻²), une dans chaque œil. Chaque exposition a été réglée pour une fluence de 3 J/cm², de sorte que la durée de chaque exposition était de 6,0, 3,0 et 1,5 s respectivement. Comme les structures centrales antérieures de l'œil n'ont pas de vaisseaux sanguins, un modèle d'exposition 1D impliquant les propriétés thermodynamiques et électrodynamiques des tissus a été utilisé pour comparer avec les données d'observation. Les données thermiques sont en accord avec un modèle thermodynamique à trois couches, utile pour l'évaluation et la simulation de la montée de température dans la cornée.

Les autres publications évaluées sont celles de Koyama en 2016 (Koyama *et al.*, 2016) et en 2019 (Koyama *et al.*, 2019). Elles portent sur les 2 mêmes lignées de cellules humaines, des cellules épithéliales de la cornée, HCE-T, et des cellules épithéliales du cristallin, SRA01/04.

La seule différence entre ces publications est la fréquence du signal., 40 GHz pour celle de 2019, 60 GHz dans l'étude de 2016.

L'objectif de l'étude de 2016 (Koyama, Narita *et al.*, 2016) était d'étudier les effets non thermiques des ondes à 60 GHz sur la génotoxicité et l'expression des protéines de choc thermique (HSP). Pour cela, la formation de micronoyaux, le test des comètes et l'expression de protéines de choc thermique (HSP 27, HSP 70, HSP 90α) ont été évalués après une exposition à un signal à 60 GHz pendant 24 h (1 mW/cm²) avec contrôle de la température (élévation de moins de 0,1 °C). Deux contrôles positifs ont été inclus : 1 h d'exposition à la bléomycine, agent génotoxique, ou 2 h à 43 °C suivi de 1 h à 37 °C. Les résultats ne montrent aucun effet génotoxique de l'exposition aux radiofréquences, au contraire des effets évidents et attendus de la bléomycine ou de l'augmentation de la température (43 °C, 2 h). Aucune réponse de choc thermique n'est constatée non plus.

Cette étude est issue d'un groupe spécialiste du domaine. Elle est claire, bien présentée et illustrée. Elle est réalisée en aveugle avec des témoins positifs permettant de valider l'absence d'effets non thermiques observés avec les radiofréquences sur 2 types cellulaires de l'œil humain. Les tests statistiques sont adaptés.

Le même groupe a publié en 2019 une étude similaire à 40 GHz (Koyama, Narita *et al.*, 2019). Ils ont utilisé la même démarche expérimentale et les mêmes marqueurs de stress cellulaire. Les résultats sont identiques à ceux de l'étude précédente.

6.4.2.4 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

En conclusion, les travaux effectués sur des lignées cellulaires ne montrent pas d'effets des ondes à 40 et 60 GHz sur les cellules issues de la cornée ou le cristallin humains. Il faut cependant remarquer que les cellules en culture, et en particulier les lignées, présentent très souvent une résistance accrue aux stress de toute nature par rapport aux cellules d'origine. Cet aspect n'a pas été évalué dans les travaux analysés.

Le travail effectué chez le lapin montre un effet seulement à des très fortes densités de puissance. Il faut noter deux éléments importants : 1) les études concernant les effets sur l'œil sont centrées sur les effets thermiques et 2) celles portant sur les tissus plus profonds, notamment le cristallin, semblent être abandonnées ces dernières années. Ceci peut se comprendre du fait que les ondes de fréquence plus élevées pénètrent moins dans les tissus. Néanmoins, le cristallin présente une structure particulière avec une tendance à l'accumulation et des altérations au fil du temps. La face antérieure du cristallin est en contact avec l'humeur aqueuse, dont il dépend pour son homéostasie. La composition de l'humeur aqueuse dépend de structures relativement superficielles (telles que le canal de Schlemm et le trabeculum, situées dans la région scléro-cornéenne). Il serait donc important de continuer les études sur cet organe.

Les éléments de preuve ne permettent donc pas de conclure à l'existence ou non d'un effet.

6.4.3 Effets sur le système nerveux central

6.4.3.1 Présentation du système nerveux central

Le système nerveux central (SNC) commande et contrôle l'ensemble du corps. Son rôle est de recevoir, enregistrer, interpréter les signaux qui parviennent de la périphérie et ceux d'origine internes, et ainsi organiser la réponse appropriée. Le SNC est composé i) de l'encéphale comprenant le cerveau, le tronc cérébral et le cervelet, ii) de la moelle épinière et iii) des nerfs optiques. L'encéphale constitue l'organe principal du système nerveux central. Situé à l'intérieur de la boîte crânienne, il est responsable de l'envoi des influx nerveux (voir définition ci-dessous) moteurs, du traitement des données transmises par les influx nerveux sensitifs ou sensoriels (audition, odorat, ...), et des fonctions supérieures comme le langage et les processus cognitifs complexes (mémoire, attention, planification, raisonnement, ...).

Le cerveau est constitué de 2 hémisphères (droit et gauche) qui communiquent par un faisceau de fibres, le corps calleux. Il est divisé en 4 lobes (cf. Figure 35) :

- le lobe frontal (avant) est impliqué dans l'initiation et la coordination des mouvements, dans les tâches cognitives supérieures comme la résolution de problèmes, la pensée, la planification, bien d'autres aspects de la personnalité et de la formation des émotions ;
- le lobe pariétal (milieu) intervient dans les processus sensoriels, l'attention et le langage ;
- le lobe temporal (milieu) joue un rôle dans l'encodage des informations auditives et dans l'intégration des informations provenant des autres modalités sensorielles. Il intervient dans la mémoire grâce à l'hippocampe, et dans la mémoire émotionnelle grâce à l'amygdale ;
- le lobe occipital (arrière) a un rôle dans l'information visuelle y compris dans la reconnaissance des formes et des couleurs.

Parmi les structures du cerveau étudiées dans la littérature, l'hippocampe est la plus représentée pour son implication dans la mémoire chez l'Homme ou l'animal. De plus, cette structure est située dans le lobe temporal, au niveau des 2 oreilles et donc proche d'un téléphone mobile au cours d'une conversation téléphonique.

Les éléments cellulaires composant le SNC sont le neurone (composé d'un corps cellulaire ou soma, de dendrites, d'un axone, et de synapses, cf. Figure 35) et les cellules gliales (astrocytes, oligodendrocytes, microglie et épendyme). La substance grise est formée par les cellules et la substance blanche par les fibres (axones des neurones).

- Les neurones sont des cellules spécialisées dans la réception, l'intégration et la transmission d'informations, ils sont intégrés dans des réseaux multiples ordonnés et hiérarchisés, chargés de recevoir, de transmettre un signal ou de coordonner une fonction complexe. La transmission des informations (influx nerveux) entre les neurones ou entre un neurone et un effecteur (muscle, cellule sécrétrice d'une glande) se fait au niveau des synapses, zones de contacts spécialisées assurant le transfert des signaux entre les cellules. Les synapses sont soit de nature électrique (présentes dans de nombreux tissus), soit, le plus souvent, de nature chimique (neurotransmetteurs, uniquement dans le système nerveux). Ce sont les neurones qui véhiculent l'influx nerveux, c'est-à-dire le potentiel électrique se déplaçant sur l'axone après stimulation du corps cellulaire du neurone. Le potentiel d'action est une variation transitoire du potentiel membranaire déclenchée suite à une stimulation. Celle-ci peut

provenir d'un autre neurone, ou de la stimulation d'un récepteur sensitif (ex : à la surface de l'organisme [peau], dans l'organisme [organes]). Le potentiel d'action se fait en différentes étapes : la dépolarisation, la repolarisation et l'hyperpolarisation (cf. Figure 35).

Les propriétés électriques des neurones sont à la base des études électrophysiologiques *in vivo* ou *in vitro* chez l'animal ou cliniques chez l'humain (électroencéphalographie ou EEG, exploration de l'activité électrique cérébrale de veille et de sommeil, potentiels évoqués somato-sensoriels, moteurs ou cognitifs).

- Les cellules gliales constituent le tissu de soutien du système nerveux, assurent le lien avec les vaisseaux sanguins et apportent les nutriments essentiels au fonctionnement métabolique du SNC. Ces cellules, contrairement aux neurones, peuvent se multiplier, voire proliférer et devenir cancéreuses. Les astrocytes sont les plus nombreux et représentent le tissu de soutien, assurent le support métabolique et la synthèse des constituants du système nerveux, ils sont aussi les constituants de la barrière hématoencéphalique. Les oligodendrocytes élaborent la myéline qui entoure les axones, et les cellules microgliales sont des macrophages avec des propriétés de phagocytose et qui assurent le rôle de défense immunitaire.

Les astrocytes et la microglie, ainsi que leurs marqueurs spécifiques (ex : GFAP, OX-42, ED1, cytokines...), sont étudiés chez l'animal pour la recherche d'une inflammation en réponse à divers stimuli de l'environnement, dont les radiofréquences.

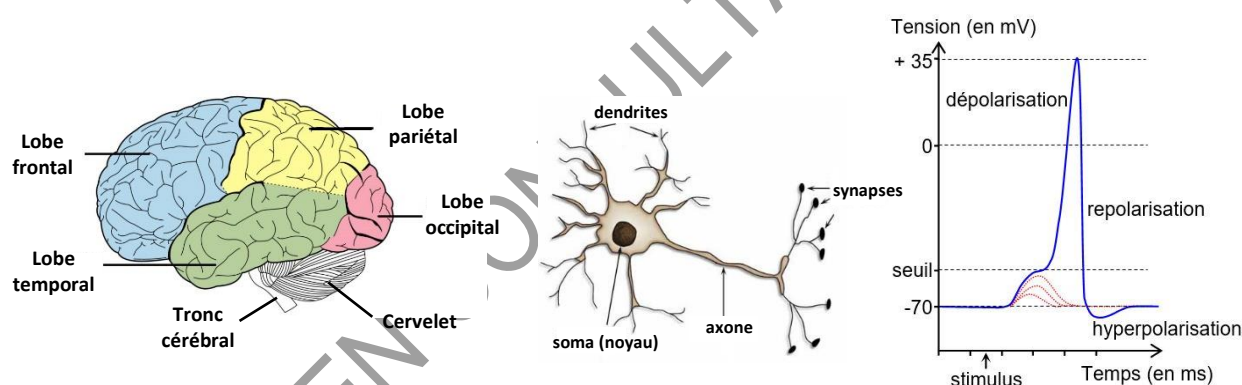


Figure 35 : Présentation du système nerveux central (à gauche), d'un neurone (au milieu) et d'un potentiel d'action (à droite)

6.4.3.2 Analyse du corpus bibliographique

Sept publications ont été analysées et évaluées de qualité suffisante pour être intégrées à l'évaluation du niveau de preuve. Une étude a été réalisée chez l'humain (Partyla *et al.*, 2017) et 6 études *in vitro* sur plusieurs modèles de neurones en culture (Haas *et al.*, 2016a, 2016b, 2017; Romaneko *et al.*, 2014, 2019 : Samsonov et Popov, 2013). L'étude de Partyla *et al.* a concerné les effets anti-douleurs. Les études *in vitro* se sont focalisées sur la réponse électrophysiologique, la croissance des neurites, le métabolisme de la dopamine et les mécanismes possibles des effets potentiels sur la douleur (nociception/anti-nociception ou analgésique/antalgiques) des radiofréquences. Les effets anti-nociceptifs ou analgésiques des radiofréquences dans la gamme des ondes dites « millimétriques » sont investigués depuis de

nombreuses années, tant chez l'Homme que chez l'animal, avec des résultats contradictoires. En effet, les fréquences dans la gamme 40 - 60 GHz (voire 30-70 GHz), à des densités de puissance de 1 à 10 mW/cm², sont utilisées en thérapeutique depuis plus de 30 ans, notamment en Russie pour leurs propriétés analgésiques revendiquées (ex : maux de tête, douleurs articulaires, douleurs post-opératoires et douleurs neuropathiques¹⁴¹ (Usichenko *et al.*, 2006)). Ceci explique que l'essentiel des études se sont focalisées sur ces aspects pour en comprendre les mécanismes cellulaires et moléculaires au niveau cérébral. Trois études n'ont pas été retenues (Shiina *et al.*, 2014 ; Degoyan *et al.*, 2012 ; Sivachenko *et al.*, 2016) et sont décrites succinctement.

Étude chez l'Homme

L'étude chez l'Homme de Partyla *et al.* (2017) s'est intéressée aux effets hypoalgésiques (anti-douleur) des radiofréquences. Elle a porté sur une cohorte de 20 jeunes hommes volontaires, sains. Ceux-ci ont été exposés à un signal radiofréquence (42,24 GHz, intensité < 17,2 mW/cm², condition appelée « générateur-RF ») à l'aide d'un générateur et d'une antenne située à moins de 1 cm de la peau, au niveau du sternum. Les sujets ont subi 4 séances de 30 min à 24 h d'intervalle. Ils ont également été exposés à deux situations témoins : placebo d'une part (appelée « condition générateur - sans RF ») et « bruit » d'autre part (condition appelée « générateur, 50-70 Hz »), cette dernière correspondant au bruit émis par le générateur. Une condition basale a également été incluse (sans exposition aux radiofréquences, sans générateur). L'ensemble des expositions ont été réalisées selon un protocole randomisé, en double aveugle et croisées. Le seuil de douleur a été évalué par le test CPT (*cold pressure test*) : le sujet place sa main dans l'eau glacée (1°C) et le temps de latence jusqu'au ressenti de douleur est mesuré. Le test CPT a été réalisé 6 fois (à 24 h d'intervalle minimum). Les autres paramètres évalués ont été la pression artérielle, le rythme cardiaque, l'incidence d'une sensation subjective (ex : paresthésie) pendant l'exposition. Les résultats montrent que si certains paramètres, comme le seuil de douleur, la latence de sensation douloureuse (différence entre tolérance à la douleur et seuil douloureux en secondes) ou encore la pression diastolique, augmentent significativement avec l'exposition aux radiofréquences par rapport aux conditions basale et « bruit », aucune différence n'est observée par rapport à la condition placebo. Ces résultats ne valident donc pas l'hypothèse initiale des auteurs d'un effet hypoalgésique des radiofréquences, en tout cas dans les conditions de l'étude. Cette étude est de bonne qualité, une légère réserve est à émettre sur le choix de certains tests statistiques.

Études in vitro

Les 2 études de Romanenko *et al.* se sont intéressées à l'activité électrique neuronale en réponse à une exposition aux radiofréquences. En 2014, Romanenko *et al.* ont mesuré les effets physiologiques d'un signal radiofréquence (60 GHz, signal continu, densité de

¹⁴¹ Plusieurs types de maladies peuvent être à l'origine d'une douleur neuropathique : maladies neurologiques (Parkinson, sclérose en plaques, accident vasculaire cérébral), maladies métaboliques (diabète), maladies infectieuses (zona), sida ou cancer, et chimiothérapies. Il en résulte des lésions du système nerveux central ou périphérique dans des zones intervenant dans la transmission et le contrôle de la douleur.

Les douleurs neuropathiques possèdent deux composantes : une douleur permanente de type brûlure ou étai à laquelle peuvent s'ajouter des épisodes douloureux transitoires. Ces derniers, appelés accès paroxystiques douloureux, se caractérisent par une intensification spontanée et de courte durée de la douleur pouvant être aiguë, voire insupportable, avec sensation de décharge électrique ou coup de poignard. D'autres sensations, non douloureuses, transitoires, peuvent aussi être perçues (fourmillements, engourdissements, picotements). Ce type de douleur résiste souvent aux traitements conventionnels de la douleur (antalgiques).

puissance = 1, 2 et 4 mW/cm²) pendant 1 min sur des neurones de ganglion de sangsue en culture. L'objectif était l'identification, la quantification et la visualisation de la forme des potentiels d'action sous l'effet des radiofréquences, en comparaison avec ceux induits par une augmentation similaire et progressive de la température du milieu d'incubation (0,4 °C/s, soit 2,4 °C/min). La température des ganglions a été enregistrée à l'aide d'un système par fibre optique et spectrophotométrie (résolution 0,05 °C, temps de réponse < 100 ms), et celle du milieu par une sonde Thermistor, (précision 0,01 °C). Les potentiels d'action au repos de chaque cellule étudiée ont été enregistrés au moyen d'une microélectrode intracellulaire. Les résultats montrent que pour les 2 conditions (exposition aux radiofréquences et température), une augmentation dose-dépendante et similaire de l'hyperpolarisation des neurones (le potentiel de membrane devient plus négatif [efflux d'ions K⁺ ou afflux d'ions Cl⁻]) et une baisse de l'amplitude des potentiels d'action ont été observées. Cependant, le rétrécissement de la forme du potentiel d'action (phases ascendante et descendante) est 5 fois plus marqué avec l'exposition aux radiofréquences (4 mW/cm²) comparativement à celui observé après l'augmentation de 0,6 °C de la température. De plus, le taux de décharge des neurones est supprimé par les radiofréquences aux 3 densités de puissance (persistant pendant la durée de l'exposition pour 1 mW/cm², transitoire pour 2 et 4 mW/cm²), alors qu'il augmente de manière dose-dépendante avec l'augmentation graduelle de la température. Ces effets directs des radiofréquences disparaissent 5 s après la fin de l'exposition. Les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle le mécanisme associé aux effets non thermiques des radiofréquences impliquerait une interaction spécifique de l'énergie des ondes avec la membrane du neurone. Les auteurs proposent que l'effet inhibiteur des radiofréquences pourrait être utilisé pour supprimer (moduler à la baisse) la douleur comme déjà montré chez l'animal et l'Homme (ex : Radiesky *et al.*, 2008 ; Usichenko *et al.*, 2006). Cette étude est de grande qualité, présentant de nombreux résultats, avec une analyse statistique solide.

La 2^{de} étude réalisée par cette équipe, dans la suite des travaux de 2014, s'est focalisée sur la nociception, c'est-à-dire les mécanismes cellulaires traitant les signaux douloureux (Romanenko *et al.*, 2019). Pour cela, les auteurs ont étudié la réponse de neurones sensoriels primaires ou nocicepteurs (NI) issus de ganglions de la sangsue médicinale : ceux-ci sont actifs lorsqu'ils sont exposés à un stimulus douloureux (pression, agent chimique ou osmotique, changements de température). La sensibilité à la température est attribuée à la présence d'un récepteur, le *transient receptor potential vanilloid-1 (TRPV1)-like capsaicin receptor* activé par des températures de 42 à 45°C, mais ce récepteur est aussi sensible à des variations de l'osmolarité. Les enregistrements électrophysiologiques ont été réalisés à l'aide d'une micro-électrode de verre positionnée dans le neurone choisi, sous contrôle au microscope. La préparation a été exposée à un signal radiofréquences (60 GHz, signal continu, densité de puissance 170 mW/cm²) pendant 3 à 5 min. Un témoin de température a été systématiquement inclus. La 1^{ère} expérience a montré que l'exposition aux radiofréquences modifie le seuil d'activation des neurones (déclenchement des potentiels d'action ou PA) qui est d'environ 50 % inférieur à celui observé chez le témoin température. L'exposition ne modifie ni l'excitabilité des neurones NI, ni la résistance membranaire, ni les conductances voltage-dépendantes. De plus, la réponse aux radiofréquences des neurones NI est annulée en présence d'un antagoniste des récepteurs TRPV1, montrant que ces effets pourraient résulter de l'activation de ces récepteurs. Afin de tester le rôle possible de changement de l'osmolarité plutôt que de celui de la température - les TRPV1 étant sensibles à ces deux paramètres - l'enregistrement d'un autre type de neurones (sensibles à des stimulations mécaniques), les neurones N-médial., Nm) ne possédant pas de récepteurs TRPV1 mais des

récepteurs TRPV4 (sensibles à l'osmolarité) a été réalisé. Les auteurs ne montrent aucune altération par les radiofréquences de l'activité des neurones Nm. Ces données confirment que la sensibilité des neurones NI serait due à l'activation des TRPV1. Ce récepteur étant sensible aux teneurs en calcium extracellulaire, l'expérience suivante a consisté à tester les effets des radiofréquences sur les neurones NI en présence d'une teneur élevée en calcium : celle-ci annule les effets des radiofréquences sur le seuil de déclenchement des potentiels d'action. Enfin, dans la dernière expérience, un modèle *in silico*, soit une modélisation et des simulations informatiques, a été développé. Il a permis de confirmer les données expérimentales et de proposer que parmi les mécanismes potentiels d'effets des radiofréquences, le plus efficace est la sensibilisation des TRPV1 *via* leur thermo- et osmo-sensibilité. Les auteurs concluent sur l'intérêt de l'utilisation de ce type de signaux radiofréquences dans le cadre de la neurostimulation et du traitement des douleurs chroniques. Cette étude de bonne qualité, bien construite et rigoureuse, propose un mécanisme potentiel d'effets non thermiques des radiofréquences sur des nocicepteurs.

La publication de Haas *et al.* (2016a) concerne également la douleur et ses mécanismes, avec l'étude de l'expression de protéines spécifiques (TRPV1 et TRPV2), des récepteurs-canaux cationiques voltage-dépendants (voir Romanenko *et al.*, 2019 ci-dessus) et P2X3, un purino-récepteur fonctionnant aussi comme un canal cationique. Pour cela, les auteurs ont étudié les effets des radiofréquences (60,4 GHz, signal continu, 10 mW/cm²) pendant 24 h sur des cellules PC12 (clone NS-1) en culture. Les cellules PC12 dérivent de tumeurs des glandes surrénales de rat. Elles se différencient et présentent un phénotype neuronal en présence du facteur de croissance NGF (*Nerve Growth Factor*) et sont alors considérées comme un modèle de neurones en culture. L'expression de la protéine de choc thermique HSP70 a été mesurée, comme marqueur de stress cellulaire. Deux groupes contrôles ont été inclus : *sham* (sans exposition aux radiofréquences, 37°C) et température (*heat control* ou HC, 38,6 °C, similaire à la température observée avec les radiofréquences [38,8 °C]). De plus, un contrôle positif MG132 (inhibiteur du protéasome, induisant un stress protéotoxique) a été inclus pour l'étude de l'expression de HSP70. Une approche originale a été l'utilisation du « *cellomics array scan* » qui permet de visualiser la fluorescence de cellules individuelles. Les résultats ne montrent aucun effet propre des radiofréquences sur l'expression des 3 protéines d'intérêt. Les auteurs concluent que les effets hypoalgésiques des radiofréquences ne seraient pas liés à une modulation de l'expression de ces protéines, et que la mesure de l'activité de ces canaux ioniques mériterait d'être investiguée.

Les résultats de cette étude ne montrant pas d'implication de récepteurs spécifiques à la douleur comme TRPV1 diffèrent de ceux de Romanenko *et al.* 2019, qui proposent un rôle possible de ces mêmes récepteurs TRPV1 dans les effets analgésiques des radiofréquences. Cependant, les approches diffèrent, l'étude de Haas propose une mesure à un temps donné de l'expression de protéines dans une lignée cellulaire de type neuronal, alors que Romanenko *et al.* ont mesuré l'activité électrique de neurones spécifiques de la douleur, les nocicepteurs. Les conditions d'exposition diffèrent également, à très court terme pour Romanenko *et al.* (3-5 min), à plus long-terme pour Haas *et al.* (24 h).

La 2^e étude de Haas *et al.* (2016b) avait pour objectif d'étudier les effets des radiofréquences sur la différenciation neuronale dans un modèle de cellules PC12 en culture traitées au NGF. Les paramètres étudiés ont été les caractéristiques des neurites (longueur, angle, nombre/cellule) ainsi que l'expression de la β 3-tubuline, une protéine du cytosquelette

spécifique des neurones. Trois groupes ont été inclus : radiofréquences (60,4 GHz, signal continu, 10 mW/cm²), *sham* et témoin de température (HC - *heat control*). Les résultats montrent qu'une exposition aux radiofréquences pendant 24 h n'a pas d'effet sur la croissance neuritique, ni sur la différenciation neuronale (expression de la protéine β 3-tubuline et taux de présence de neurites sur les cellules). Les auteurs discutent ce résultat négatif au regard du type de signal (continu) et de la fréquence élevée du signal radiofréquence utilisé. Des données de la littérature semblent montrer notamment l'importance de la modulation du signal sur la croissance neuritique des cellules PC12 (Zhang Y *et al.*, 2005, BEMS). Ces auteurs ont montré une inhibition de la formation des neurites de cellules PC12 (+NGF) après exposition à un signal RF intermittent (50 Hz, 10 % d'occupation du cycle), phénomène non observé lorsque le signal radiofréquences est continu (pas de différence avec la condition témoin sans exposition). En augmentant le temps de présence du signal (*percentage pulse duty*, 30 %, 50 %, 80 %...), le nombre de cellules formant des neurites augmente progressivement pour atteindre un maximum avec un signal continu. Par contre, si on mesure la longueur des neurites, l'effet inverse est observé, à savoir une diminution de leur longueur avec l'augmentation du pourcentage d'occupation du signal, pour atteindre un minimum lorsqu'il est continu. Ces données montrent la complexité des interactions des ondes radiofréquences avec les cellules en culture et le rôle de leurs caractéristiques (signaux continus vs intermittents).

La 3^e étude de Haas *et al.* (2017) a été réalisée également avec le modèle de cellules PC12 en culture traitées au NGF. L'objectif était l'étude de l'impact d'une exposition aux radiofréquences pendant 24 h (60,4 GHz, signal continu, densité de puissance 5 mW/cm²) sur le métabolisme de la dopamine. En effet, les cellules PC12 possèdent toute la machinerie métabolique (synthèse, libération, transport et catabolisme) de la dopamine, considérée comme un indicateur de l'activité neuronale globale et du métabolisme. Les paramètres étudiés ont été : i) le *turnover* de la dopamine (DA) et de son métabolite (DOPAC) intra- et extra-cellulaire, ainsi que la cinétique d'accumulation du DOPAC extracellulaire, mesurés par HPLC, et ii) l'expression de la protéine DAT (transporteur de la dopamine) et de la β -actine (protéine de contrôle) par immunohistochimie. Trois groupes ont été inclus : *sham*, exposé aux radiofréquences et contrôle température (HC - *heat control*). Les résultats montrent que l'exposition aux radiofréquences induit une augmentation modérée (non significative) du contenu en dopamine et DOPAC extracellulaire ; cette augmentation qui apparaît aussi dans la condition témoin chaleur (HC), suggère un effet lié à l'augmentation de la température (1-2 °C) du milieu suite à l'exposition aux radiofréquences. Par contre, cette exposition n'a pas d'impact sur l'expression du transporteur de la dopamine (ni de la β -actine) en condition avec ou sans NGF (cellules différenciées ou non).

Il est à noter que le nombre de cultures ou expériences (n = 4 ou 5) pour certaines mesures (contenu en DA et DOPAC intracellulaire, expression de la protéine DAT) est faible et pourrait expliquer les écarts-types élevés et l'absence de conclusion ferme quant aux effets possibles des radiofréquences sur le métabolisme cellulaire de la dopamine. Enfin, l'approche en immunohistochimie de l'expression de protéines ne permet pas une véritable quantification, au contraire de la technique du *western blot*.

Samsonov et Popov (2013) ont étudié les effets thermiques et non thermiques des radiofréquences (94 GHz, densité de puissance 31 mW/cm²) sur des neurones en culture (modèle d'embryon de Xénopes) sur le taux d'assemblage des microtubules, composants du

cytosquelette assurant différentes formes de transports antérogrades et rétrogrades, essentiels à la fonction neuronale. Leur approche visait à comprendre les mécanismes de la nociception thermique impliquant plusieurs sous-types de canaux, comme les TRPV1, sachant que tout changement des microtubules affecte l'activité fonctionnelle de ces canaux. Ce modèle *in vitro* de culture d'embryons de Xénope a été au préalable validé par les auteurs. De même, la mise au point de la méthode de mesure et de contrôle des variations de la température des cultures (technique du microfilm) au niveau des neurones individuellement a été validée. Enfin, les méthodes de visualisation de la dynamique des microtubules par fluorescence (étude de la protéine associée aux microtubules, EB1 couplée à la GFP [*green fluorescent protein*]) ont, elles aussi, été mise au point au préalable. Des cultures témoin température ont été incluses (1. effet température [30 °C], 2. Exposition aux radiofréquences sans augmentation de la température [22 °C]). Les résultats montrent que : i) l'exposition aux ondes à 94 GHz augmente rapidement le taux de croissance (assemblage) des microtubules neuronaux, et ceci de manière réversible (retour à la normale à l'arrêt de l'exposition), et ii) cette augmentation est liée uniquement à l'élévation de la température. Ces résultats apportent des arguments plutôt fiables de l'absence d'effet cellulaire sur des neurones en culture d'une exposition aiguë aux ondes millimétriques, en dehors d'un effet thermique attendu. Les expériences, bien présentées et de bonne qualité, reposent sur une solide méthodologie, malgré le traitement statistique faible. Le système d'exposition paraît être lui aussi de qualité adapté à la fréquence d'émission.

Articles non retenus pour l'évaluation du niveau de preuve

L'étude *in vitro* de Shiina *et al.* (2014) s'est intéressée à l'effet des radiofréquences (60 GHz, signal continu avec 2 polarisations, linéaire ou circulaire, 1 mW/cm²) sur la croissance des neurites dans un modèle de cellules PC12VG (phéochromocytome de rat) en culture en présence de NGF (*Nerve growth factor*). C'est un article court qui présente essentiellement des méthodes d'exposition aux radiofréquences, et très peu de résultats/discussion sur la partie biologique. Parmi les limites majeures de l'article : les résultats présentés concernant les effets des radiofréquences sur les neurites sont très succincts, les 2 figures sans légende ne sont pas explicites et les conclusions des auteurs ne sont pas soutenues par leurs résultats.

L'étude *in vivo* chez l'animal de Sivachenko *et al.* (2016) s'est intéressée aux effets antimigraineux des ondes radiofréquences dans la gamme millimétrique comme outil thérapeutique (physiothérapie). Elle avait pour objectif d'en analyser les mécanismes neurophysiologiques, dans un modèle de nociception au niveau du nerf trijumeau-système vasculaire de la dure-mère, avec l'enregistrement extracellulaire de l'activité des neurones du noyau trigéminal. La limite majeure de cet article concerne le système d'exposition, peu décrit, qui consiste à envoyer une onde sur le museau du rat. De plus, la description des méthodes et résultats électrophysiologiques manquent de détails ; par exemple, l'échantillonnage ou le niveau d'amplification du signal ne sont pas précisés, ni les critères de détection des décharges de pointes (« *spikes* ») ou encore le type de neurones enregistrés dans la structure cérébrale d'intérêt, sont-ils du même type ? Le nombre de neurones enregistré est très faible (1 neurone par rat pour 13 rats ; 5 témoins et 8 exposés). Enfin, le système d'exposition est très peu décrit et, apparemment, les paramètres ne sont pas contrôlés.

L'article de Degoyan *et al.* (2012) avait pour objectif d'étudier le rôle de l'hydratation cellulaire comme un marqueur possible des effets non thermiques de l'exposition aux radiofréquences dans la gamme des ondes « millimétriques » à l'aide d'un appareil thérapeutique (90-160 GHz, DAS = 1,49 W/kg, signal modulé à 4 Hz) sur : i) le contenu en eau de tissu cérébral, ii) le

contenu en eau de la peau prélevée au niveau de la tête de rats et, iii) le volume des neurones isolés d'escargot. Les principales limites concernent i) la méthodologie (imprécisions avec des informations souvent confuses, ex : temps d'exposition, conditions, mesure du volume des neurones qui n'en est pas une), ii) les résultats (pas de quantification du volume, pas de graphe, pas de valeur, une seule photo). L'interprétation des résultats n'est pas toujours en rapport avec les données obtenues et iii) le système d'exposition est décrit très succinctement. La fréquence utilisée dans l'étude provenant du dispositif thérapeutique (90-160 GHz) n'est pas précisée dans l'étude. L'article indique une modulation d'amplitude à 4 Hz, s'agit-il donc d'impulsions ou d'une modulation par un signal sinusoïdal à 4 Hz ? La puissance incidente n'est pas indiquée, d'autant plus que la distance du rat à l'antenne varie entre 1 et 50 cm pour certaines expériences.

6.4.3.3 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

La seule étude réalisée chez l'humain ne montre pas d'effet hypoalgésique (anti-douleur) d'un signal radiofréquences à 42,24 GHz. Parmi les 5 études *in vitro* qui ont évalué les effets d'un signal à 60 GHz, 2 études (Romanenko *et al.*, 2014, 2019) montrent qu'une exposition très courte (1 et 3 à 5 min) affecte les neurones (y compris les nocicepteurs) de sangsue, possiblement au niveau des membranes, avec l'implication des récepteurs TRPV1 à la douleur (TRPV1). Ces effets non thermiques conforteraient l'hypothèse selon laquelle les radiofréquences exercent des effets antidouleurs dans cette gamme de fréquences. Cependant, la sangsue est un animal poïkilotherme, les mécanismes de régulation et la sensibilité thermique de ces cellules pourraient différer de celles issues de cellules de mammifères. Les 3 études de Haas *et al.* (2016a, b, 2017) dans un modèle de culture de neurones de rat ne montrent pas ou peu d'effet d'une exposition d'une durée de 24 h aux radiofréquences (60 GHz) sur l'expression de protéines liées à la douleur ou au stress thermique, la croissance cellulaire ou encore le métabolisme de la dopamine. Enfin, concernant les effets thermiques ou non thermiques des radiofréquences dans la gamme des ondes « millimétriques », 1 étude *in vitro* portant sur des neurones embryonnaires de xénope exposés en aigu à un signal à 94 GHz (Samsonov and Popov, 2013) montre que les effets cellulaires observés sont uniquement liés à l'augmentation de la température.

Sur la base des études orientées pour l'essentiel sur les effets antidouleurs potentiels des radiofréquences dans la gamme « millimétrique » et leurs mécanismes, les données disponibles, soit 1 étude chez l'Homme, ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet sur la nociception ou l'analgésie. Les données *in vitro* sur des neurones en culture de plusieurs espèces animales ne permettent pas de conclure quant à un mécanisme particulier. Cependant, les auteurs de 2 études d'une même équipe, *in vitro* et *in silico*, proposent que l'interaction entre l'énergie des radiofréquences et la membrane neuronale, ainsi que la sensibilisation de récepteurs sensibles à la douleur, seraient impliquées dans les mécanismes pouvant expliquer les effets analgésiques des radiofréquences.

6.4.4 Effets sur les membranes cellulaires

6.4.4.1 Les membranes biologiques

Les membranes biologiques, ou biomembranes, sont des assemblages complexes de molécules de lipides, de protéines et de sucres en interaction. Leurs constituants clés, les phospholipides, sont organisés en un double feuillet dans lequel les têtes hydrophiles sont orientées vers l'extérieur et les chaînes hydrophobes vers l'intérieur de la bicouche (*cf.* Figure

36). Ils sont également caractérisés par une température de transition de phase entre un état liquide et un état gel. Ainsi, les membranes sont des édifices dynamiques dans lesquels phospholipides et protéines sont animés de mouvements de diffusion latérale, et forment des microdomaines dont la composition et la taille varient dans l'espace et le temps. Grâce à leur structure et dynamique, elles délimitent le cytoplasme cellulaire et les organites à l'intérieur de celui-ci et jouent le rôle de barrière sélective permettant de réguler les échanges entre la cellule et le milieu extracellulaire. La grande complexité des membranes cellulaires est à l'origine du développement de modèles membranaires artificiels comme les vésicules lipidiques. Ces vésicules constituent des modèles d'étude très utilisés pour de nombreux travaux de recherche visant en particulier à la compréhension des mécanismes d'interaction entre ondes électromagnétiques et membranes cellulaires. Différents types de vésicules (SUV, LUV, MLV, GUV) dont la taille varie de quelques centaines de nm à plusieurs μm permettent ainsi d'étudier divers effets sur un modèle simplifié mais pertinent de membrane cellulaire¹⁴².

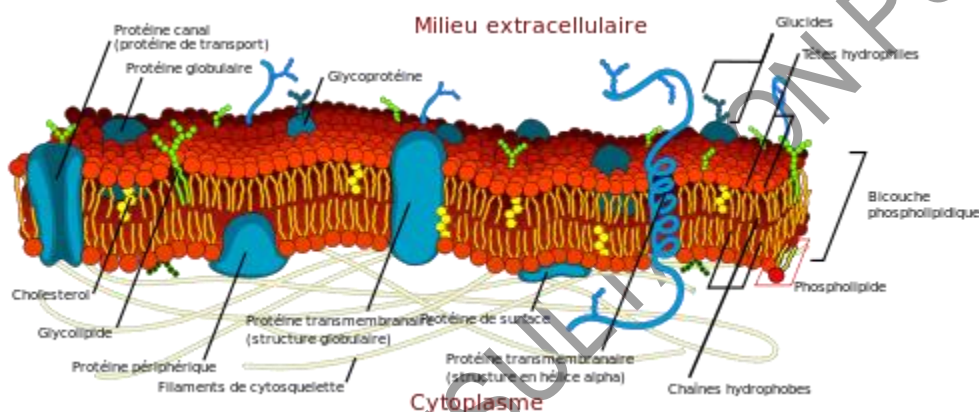


Figure 36 : Représentation schématique d'une membrane

source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Membrane_\(biologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Membrane_(biologie)) - LadyofHats Mariana Ruiz, traduction NicolasGrandjean

6.4.4.2 Analyse du corpus bibliographique

La recherche bibliographique a mis en évidence 17 publications jugées de qualité suffisante pour être intégrées à l'évaluation du niveau de preuve

Parmi ces publications, 7 concernant des études réalisées sur membranes artificielles et 7 sur membranes cellulaires reportent l'existence d'effets, qu'ils soient purement structuraux dans le cas des membranes modèles, ou fonctionnels dans le cas des cellules pour lesquelles des effets potentiellement bénéfiques pour la santé (éradication de cellules tumorales, diminution de l'arthrose) ont surtout été recherchés. Une étude (Franchini *et al.*, 2016) est analysée dans le chapitre « effets sur la peau » (cf. § 6.4.1). Une autre étude (Gadja *et al.*, 2019) est analysée dans le chapitre « Interactions des ondes avec le vivant » (cf. § 5). Une troisième étude (Samsonov et Popov 2013) est présentée dans la partie « système nerveux » (cf. § 6.4.3).

Trois études n'ont pas été retenues (Forster *et al.*, 2017, Sirvo *et al.*, 2018, Satayandeh *et al.*, 2015) en raison de l'absence de données expérimentales portant sur des effets biologiques et sont citées à la fin du chapitre.

¹⁴² SUV : *small unilamellar vesicles*, MLV : *multilamellar vesicles*, LUV : *large unilamellar vesicles* ; GUV : *giant unilamellar vesicles*.

6.4.4.2.1 Membranes artificielles

Dans leur publication de 2014, Albini et ses collaborateurs avaient pour objectif de comprendre comment des rayonnements de faible intensité pouvaient induire la migration de vésicules lipidiques géantes, observations déjà reportées dans leurs travaux antérieurs (Ramondo-Orlando, 2009 ; Di Donato *et al.*, 2012). Ces vésicules géantes de 14 à 30 µm de diamètre, de taille comparable à celle des cellules, sont visibles sous microscope et permettent une analyse en temps réel de la réponse des membranes aux ondes. Elles sont formées à partir de deux phospholipides majoritaires des membranes cellulaires : la L- α -Phosphatidylcholine et le Phosphatidylglycérol. Les vésicules sont placées dans une chambre d'exposition sous le microscope. Les expositions sont réalisées au moyen d'une antenne dotée d'une puissance de sortie de 39 mW. Des images sont prises par l'intermédiaire d'une caméra rapide puis analysées par traitement d'images afin de déterminer les trajectoires des vésicules. Le DAS, plus élevé au-dessus, en-dessous et sur les côtés, est uniforme au centre. Sa valeur moyenne de 0,2 W/kg est inférieure à la valeur limite réglementaire chez l'Homme. L'augmentation de température lors de l'exposition de 20 minutes (5 minutes *off*, 5 minutes *on*, 5 minutes *off*, 5 minutes *on*) est égale à 0,15 +/- 0,05 °C. Le résultat principal de l'étude est que l'exposition de 20 minutes à 53,37 GHz induit une réorientation collective du mouvement des vésicules, mouvement non observé dans le cas du témoin pour lequel le mouvement est régi par des forces mécaniques telles la gravité et la diffusion. Ce changement d'orientation des vésicules sous exposition est déclenché par l'exposition (*switch-on*). Il persiste à l'arrêt de l'exposition. Ce phénomène, athermique, dont les mécanismes restent à élucider, est expliqué par les auteurs par l'action des ondes millimétriques sur l'interface membrane-eau, en particulier par un couplage direct entre les rayonnements et les résidus chargés. À noter que les méthodes et résultats sont clairs, bien détaillés et illustrés. Treize préparations de vésicules sont utilisées et les données obtenues sur 2 à 6 préparations par expérience sont observationnelles et ne font pas l'objet d'une analyse statistique. Le générateur n'est pas cité mais l'homogénéité d'exposition aux échantillons observés est satisfaisante.

Di Donato *et al.* (2012) ont étudié l'effet d'une exposition à une fréquence millimétrique sur la perméabilité d'une membrane lipidique en utilisant des liposomes cationiques constitués de dipalmitoylphosphatidylcholine, cholestérol et stéarylamine. Les liposomes sont formés à partir de deux méthodes permettant d'obtenir des vésicules de tailles centrées sur deux dimensions (29 et 135 nm de diamètre). Ces vésicules chargées d'anhydrase carbonique, ont été exposées pendant 1 ou 2 minutes à une fréquence continue de 53,37 GHz, à une densité de puissance de 0,1 mW/cm². La perméabilité des membranes a été évaluée par la libération de l'enzyme dans le milieu contenant le substrat (p-nitrophenyleacetate). Une augmentation très significative ($p < 0,0001$) de la libération d'anhydrase carbonique a été observée, moindre pour les liposomes de plus grand diamètre, ce que les auteurs attribuent à la plus faible courbure de la bicouche lipidique. Par ailleurs, l'augmentation de température au cours de l'exposition étant négligeable, les effets observés ne peuvent être attribués à un réchauffement des échantillons. Il est à noter que la dimension des liposomes est inférieure à celle des organelles intracellulaires, seules les vésicules synaptiques (50 nm) correspondent aux dimensions des liposomes utilisés.

Beneduci et ses collaborateurs ont utilisé quant à eux un autre modèle biomimétique des membranes, les vésicules multi-lamellaires (MLV). Ces vésicules sont obtenues par hydratation de phospholipides. En fonction du rapport eau/lipide, phospholipide et température, différentes phases peuvent être générées comme la phase fluide naturellement présente dans les membranes des cellules et des organelles. La transition de la phase fluide

vers une phase gel plus ordonnée peut-être déterminée grâce à la spectroscopie RMN¹⁴³ du deutérium (²H-RMN). Cette transition de phase T_m des membranes est obtenue grâce à la mesure de l'éclatement quadrupolaire des molécules d'eau à l'interface, paramètre particulièrement sensible aux modifications de la structure de la bicouche lipidique. Dans leurs travaux, Beneduci et ses collaborateurs ont utilisé des MLV composées de DMPC (1,2-Dimyristoyl-sn-glycero-3-phosphatidylcholine) et de ²H₂O (eau deutérée ou eau lourde). Le système d'exposition a été décrit dans des travaux antérieurs (Zhadobov, 2006). Il provient d'une source générant des ondes électromagnétiques dans la gamme 53,57 - 78,33 GHz, avec un débit d'absorption spécifique (DAS) inférieur à 12 mW/kg. Les vésicules sont exposées pendant des durées longues, de 4 à 26 heures et les vésicules non exposées servent de témoin non exposé (*sham*).

Dans l'article de Beneduci de 2012, l'exposition des MLV induit une diminution du paramètre ordre des molécules d'eau à l'interface et un déplacement de la température de transition de phase qui varie de 1,5 °C, ce qui suggère l'extrême sensibilité des membranes biologiques à des longues durées d'expositions. À noter que les protocoles de préparation des vésicules et des expériences menées en RMN du deutérium sont quant à eux clairs et de qualité satisfaisante. Les cartographies des champs sont montrées à 74 GHz et non aux autres fréquences. L'acquisition des spectres RMN des MLV est réalisée pendant l'exposition. Une limite de ce travail est due à l'absence de barres d'erreurs sur certaines figures ainsi que d'indication du nombre d'expériences réalisées.

Dans leur article de 2013, Beneduci et ses collaborateurs montrent que l'exposition des MLV aux ondes millimétriques dans la bande 53 – 78 GHz, à une température physiologique de 37 °C, induit une diminution du déplacement quadratique moyen de 25 % après 4 h d'exposition. Cet effet ne dépend pas de la température, mais dépend du rapport molécules d'eau/lipides, suggérant un effet sur l'hydratation. Il dépend également de la fréquence : observé à 62,1 GHz, il n'est pas détecté à 53,37 ou 65,0 GHz en condition d'exposition bande unique. Ces résultats proviennent de 3 expériences indépendantes. Enfin, les ondes changent la distribution des molécules d'eau liées à l'interface, augmentant ainsi la rigidité de la membrane. La conclusion de l'article est, qu'au niveau moléculaire, les effets peuvent s'expliquer par des modifications de l'interface eau/membrane. Une des limites de ce travail est l'absence de statistiques, la mesure du DAS qui ne serait pas adaptée pour ce type de fréquence et l'absence d'explication sur le fait que les effets soient observés à 62,1 GHz mais pas aux bandes voisines (53,37 et 65,0 GHz).

En lien direct avec les précédentes publications, l'objectif de la publication de Beneduci et ses collaborateurs de 2014 est de proposer une hypothèse mécanistique d'interaction entre les ondes millimétriques et les membranes biologiques. Les résultats de simulation permettent de calculer le DAS qui, dans les conditions maximums de 20 µW, reste inférieur aux limites définies par l'Icnirp. La distribution du champ ne paraît cependant pas très uniforme (typiquement un facteur 3 au centre, normal pour ce type d'antenne). Trois expériences indépendantes montrent qu'une exposition de 4 heures induit une diminution de l'éclatement quadrupolaire des molécules d'eau dans la phase fluide et une augmentation dans la phase gel. La température de transition de phase augmente de 1,5 °C. Les résultats de cette étude montrent que les rayonnements produisent des effets non thermiques et portent la membrane dans un état excité associé à un réarrangement structural de la bicouche lipidique (changement structural des têtes polaires des phospholipides et

¹⁴³ La spectroscopie RMN (résonance magnétique nucléaire) utilise les propriétés magnétiques de certains noyaux atomiques, notamment pour l'imagerie médicale.

redistribution des molécules d'eau liées à l'interface). Ces modifications peuvent avoir des conséquences directes sur les propriétés des membranes biologiques dont la déshydratation peut affecter les fonctions essentielles.

Dans leurs travaux de 2013, Cosentino et ses collaborateurs se sont intéressés aux effets des ondes millimétriques sur les membranes cellulaires. En guise de modèle biologique, ils utilisent des membranes artificielles en forme de vésicules de différentes tailles, les LUV et GUV, composées de DLPC (1,2-dilauroyl-sn-glycero-3-phosphatidylcholine). Les LUV permettent d'étudier la stabilité physique des membranes par mesure de diffraction dynamique de la lumière et les GUV d'étudier la perméabilité membranaire à l'eau sous stress osmotique par microscopie à contraste de phase. Les LUV sont formés par extrusion et les GUV par électroformation, leurs tailles moyennes étant respectivement égales à 100 nm et supérieure à 20 µm. L'exposition est provoquée par une antenne conique générant des fréquences comprises entre 52 et 72 GHz avec une puissance incidente de 0,0035 - 0,010 mW/cm². Le temps d'exposition est de 4 heures. Trois expériences indépendantes sont conduites. Les auteurs observent une diminution de la contraction du volume des GUV, donc une diminution de la perméabilité des membranes à l'eau, en condition de stress osmotique des vésicules exposées par rapport à la condition *sham*. Ils concluent que l'exposition aux ondes induit une diminution de la fluidité de la membrane. Les expériences réalisées sur les LUV ne montrent pas de différence de taille des vésicules exposées pendant 4 h par rapport au *sham*. Par contre, au bout de 18 heures, le diamètre des LUV exposées est plus faible que celui des témoins (82/133 nm). Ces résultats sont interprétés comme des modifications des propriétés physiques des membranes : stabilité thermodynamique accrue de la bicouche lipidique et augmentation de sa rigidité suite à sa déshydratation partielle due au changement de polarisation des molécules d'eau. L'article est clair, bien écrit. Les méthodes et les résultats sont bien détaillés, justifiés et illustrés. Sa principale limite provient du faible nombre de préparations indépendantes et d'expériences rendant les méthodes statistiques peu adaptées. Le diamètre des vésicules présente une grande variabilité pouvant atteindre un facteur 10 dans le cas des GUV (5 à 50 µm). Des tests paramétriques sont utilisés pour 3 expériences, ce qui est source de biais en raison de la mauvaise utilisation des outils statistiques et conduit à une surinterprétation des résultats.

Les LUV ont également été utilisées par le même groupe de recherche dans la publication de D'Agostino de 2018 sur la propagation d'une impulsion électrique dans un modèle original très simplifié d'axones artificiels composé de circuits électriques de type RC¹⁴⁴ contenant une solution aqueuse de vésicules lipidiques encapsulant des ions potassium K⁺. Les neurones peuvent être considérés comme un circuit électrique classique de transmission d'informations de l'un à l'autre. Les LUV sont formées de L-α-Phosphatidylcholine. L'article est plutôt clair et assez bien détaillé dans sa partie méthodologique. Quatre à six préparations vésiculaires sont utilisées. L'exposition est réalisée par le biais d'une antenne cornet conique placée à 8 cm au-dessus de la cible. L'exposition est assez homogène en champ proche comme en champ lointain. Le résultat principal est qu'une exposition de 30 minutes à un signal 53,37 GHz continu facilite l'efflux de potassium à travers la membrane des LUV. Cet effet est amplifié en présence d'un facilitateur du transporteur des ions K⁺, la valinomycine. Ces effets sont athermiques. Les auteurs concluent que les radiofréquences altèrent la structure membranaire sans pouvoir proposer de mode d'action (moléculaire, supramoléculaire). En raison de l'extrême simplification de ce modèle d'axones artificiels, réduit à un système électrique et des vésicules lipidiques contenant du potassium, le tout dans un milieu aqueux, et de l'absence de

¹⁴⁴ Un circuit électrique « RC » est composé d'une résistance et d'un condensateur.

statistiques, seul un t-test de Student a été utilisé, alors qu'une ANOVA à 2 facteurs eut été appropriée ; on peut s'interroger quant à sa pertinence pour une évaluation des effets biologiques. À noter également que, comme pour les autres publications de ces auteurs, les mêmes antennes, fréquence et puissance à la sortie de l'antenne sont utilisées, mais aucune information n'est donnée sur le générateur et les formes d'onde.

En conclusion, ces travaux sur membranes artificielles réalisés sur vésicules lipidiques de tailles et compositions variées mettent en évidence l'existence d'effets non thermiques conduisant à des modifications à la fois structurales et fonctionnelles. Par modification de l'interface membrane-eau, les rayonnements portent la membrane dans un état excité associé à un réarrangement de la bicouche lipidique (changement structural des têtes polaires des phospholipides, redistribution et diminution de l'ordre des molécules d'eau liées à l'interface, déplacement de la température de transition de phase). Ces modifications peuvent avoir des conséquences directes sur les propriétés des membranes biologiques dont la déshydratation peut affecter les fonctions essentielles, notamment la perméabilité (se référer au chapitre 6.4.1 « effets sur la peau »).

6.4.4.2.2 Membranes cellulaires

Dans leurs travaux de 2012, Li et ses collaborateurs se sont intéressés aux effets bénéfiques que peuvent avoir les ondes millimétriques pour la santé. Des études antérieures ayant montré l'intérêt de ce type d'onde pour le traitement de tumeurs malignes, l'objectif est ici de déterminer le mécanisme moléculaire responsable de la mort des cellules tumorales. Pour cela, ils utilisent des cellules tumorales humaines de la lignée SW 1353 (chondrosarcome) qu'ils exposent en continu pendant des durées variables de 15, 30, 60, 90 et 120 min à une densité de puissance de 4 mW/cm². Les résultats montrent que l'exposition provoque la mort des cellules tumorales (la moitié de la population n'est plus viable après 120 minutes d'exposition). Des changements morphologiques sont visibles dès 30 minutes, avec l'apparition de cellules rétrécies ou se détachant de leur support, ou encore des altérations de l'organisation des membranes (passage de la phosphatidylsérine du feuillet interne vers le feuillet externe de la bicouche). La perte de viabilité, due au phénomène d'apoptose, est corrélée à la durée de l'exposition et s'accompagne d'importants changements ultra-structuraux, en particulier au niveau du noyau et des mitochondries dont le potentiel transmembranaire chute. Même si des études biochimiques complémentaires seront nécessaires pour déterminer le mécanisme exact impliqué dans la mort des cellules tumorales sous exposition, ces résultats pourraient présenter un intérêt de par ses applications potentielles en clinique. Les protocoles de détermination des effets des ondes sur la viabilité cellulaire sont clairement détaillés et pertinents pour ce genre d'étude, mais il est cependant à noter qu'elle n'a porté que sur une seule lignée de cellules tumorales et qu'elle ne comporte pas de témoin réalisé sur cellules normales. Aucune indication quant à une éventuelle augmentation de température n'est donnée. À ce stade, il reste donc indispensable de la reproduire sur d'autres lignées et cultures primaires afin notamment de pouvoir généraliser ces effets bénéfiques potentiels, de déterminer leur nature thermique ou athermique et de montrer la spécificité d'action entre cellules saines et cellules tumorales.

Un autre groupe de recherche s'est également intéressé aux effets des ondes millimétriques sur la mort des cellules cancéreuses. Dans leur article de 2019, Orlacchio et ses collaborateurs ont évalué les réponses apoptotiques et au choc thermique de cellules A375 (lignée issue du mélanome malin humain) exposées à 58,4 GHz. Des ondes millimétriques à modulation d'amplitude continue ou pulsée sont appliquées avec la même hausse de température moyenne. Les effets étudiés sont l'activation de la Caspase-3 et la phosphorylation de la

protéine de choc thermique HSP27. L'exposition conduit à une hyperthermie qui active la phosphorylation de HSP27. Le résultat le plus marquant est que l'activation de la caspase-3 est 5 fois plus élevée après l'exposition en mode pulsé qu'en mode continu. La relation entre la réponse cellulaire induite et l'élévation de température n'est pas linéaire. La phosphorylation de HSP27 est également plus élevée de 58 % en exposition pulsée par rapport à l'exposition continue. Le protocole expérimental ne permet pas la bonne appréciation du système d'exposition, le nombre d'expériences réalisées est relativement faible (3) et les méthodes statistiques sont peu décrites et ne permettent pas de bien comprendre les comparaisons effectuées. Cette étude qui, à ce stade, reste à confirmer et à étendre à d'autres paramètres d'ondes (notamment leur durée et forme) pourrait présenter néanmoins elle aussi un intérêt pour le développement de traitements des cancers cutanés par hyperthermie pulsée induite par ondes millimétriques.

Dans leur article de 2018, Perera et ses collaborateurs ont exposé des cellules PC 12 à des champs électromagnétiques à 18 GHz, dans le but de déterminer si ces rayonnements peuvent affecter la physiologie des cellules ou leurs systèmes de transport membranaire. Cette lignée cellulaire, issue d'un phéochromocytome (tumeur neuro-endocrinienne) de médullosurrénale de rat, constitue une alternative aux cultures des cellules chromaffines surrénales primaires. La fréquence de 18 GHz a été choisie en raison de travaux antérieurs ayant montré des effets d'augmentation réversible de la perméabilité membranaire de bactéries Gram positifs et négatifs et de levures. Les cellules PC 12 sont soumises à 3 cycles de 30 s à une puissance de 17 W et un DAS de 1,17 kW/kg. Le résultat principal est une augmentation significative transitoire de la perméabilité membranaire, déterminée par l'internalisation de nanosphères de silice de 23 nm de diamètre ou d'agrégats de celles-ci. Cette augmentation de perméabilité est observée jusqu'à 10 min suivant l'exposition aux radiofréquences dans 90 % des cellules. Elle ne s'accompagne pas de modification de la morphologie, viabilité et activité métabolique. Ces résultats sont en accord avec les travaux menés sur les cellules procaryotes. La perméabilisation des membranes serait différente d'une simple formation de pores et pourrait s'expliquer, d'après les auteurs et comme dans le cas des membranes modèles, par une interaction directe entre les ondes électromagnétiques et les phospholipides membranaires. Les protocoles de détermination des effets des ondes sur les cellules sont clairement détaillés et pertinents pour ce genre d'étude. Cette augmentation de la perméabilité membranaire, à la fois transitoire et sans effets dommageables sur les cellules, reste à approfondir et étendre à d'autres lignées en raison de ses perspectives dans le domaine de la vectorisation.

En conclusion, les travaux réalisés sur cellules et membranes cellulaires sont peu nombreux et disparates. Leur objectif principal est de mettre en évidence des effets bénéfiques potentiels pour la santé, que ce soit pour l'éradication de cellules cancéreuses ou le traitement de l'arthrose. Les effets membranaires, qu'ils soient structuraux ou fonctionnels (activation de canaux thermosensibles, augmentation de la perméabilité) restent à approfondir.

Les articles suivants ont été analysés mais non retenus pour l'évaluation du niveau de preuve de l'effet sur les membranes.

La publication de Foster *et al.* (2017) est un commentaire sur la modélisation thermique et non un article contenant des résultats expérimentaux ; sans analyse d'effets biologiques il ne peut pas être utilisé pour contribuer à la détermination de niveaux de preuve.

L'article de Siervo *et al.* (2018) décrit une méthode numérique d'évaluation du DAS produit par une antenne patch WiMax, généralement employée dans les ordinateurs portables, sur une

population virtuelle de 4 individus. Sans étude d'effets biologiques, il ne peut pas être utilisé pour contribuer à la détermination de niveaux de preuve.

Dans un article de modélisation, Setayandeh et Lohrasebi (2015) décrivent des modifications de propriétés mécaniques de dimères de tubuline, l'un des constituants du cytosquelette que sont les microtubules. Les fréquences de 2, 5 et 7 GHz induisent une augmentation de rigidité de la protéine, alors que les fréquences de 1 et 6 GHz la rendent plus flexible. Malgré son intérêt, ce travail de pure modélisation ne peut pas être utilisé pour contribuer à la détermination de niveaux de preuve.

6.4.4.3 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

Les travaux sur membranes artificielles mettent en évidence l'existence d'effets. Les modifications à la fois structurales et fonctionnelles qui en résultent peuvent avoir des conséquences directes sur les propriétés des membranes biologiques. Ainsi, si l'ensemble de ces travaux ne permet pas d'évaluer les risques sanitaires, ils démontrent néanmoins l'existence d'effets non thermiques et donnent une idée des effets éventuels des ondes millimétriques sur les membranes cellulaires.

Les études menées sur les membranes cellulaires et analysées dans ce chapitre sont trop diverses et trop peu nombreuses pour conclure quant à l'existence d'un effet biologique délétère. Trop peu de groupes de recherche se sont intéressés aux effets des ondes millimétriques, en particulier dans les gammes de fréquences utilisées par les technologies de la 5G, ce qui est parfaitement compréhensible puisque celles-ci n'étaient pas encore déployées. Les rares effets reportés sont, à ce stade des recherches, des effets essentiellement thermiques avec leurs conséquences notables aussi bien au niveau membranaire sur l'activation de canaux thermosensibles, qu'au niveau intracellulaire. Elles ne permettent pas de montrer l'existence d'effets négatifs directs des ondes sur la santé. De nombreuses études restent donc nécessaires pour s'assurer de l'absence réelle d'effets négatifs. En ce qui concerne des effets bénéfiques éventuels, il s'agira de démontrer l'innocuité sur des cellules saines et d'en élucider les mécanismes avant d'envisager la possibilité d'applications thérapeutiques.

Les études menées à ce jour sur membranes cellulaires sont principalement orientées vers des effets éventuellement bénéfiques des radiofréquences. Elles ne permettent pas de conclure quant à l'existence ou non d'un effet sur les membranes. Etant donné les éléments de preuve validés sur membranes artificielles, l'augmentation de perméabilité membranaire observée dans le cas des cellules de la lignée PC12 et sur cellules procaryotes (notamment du microbiote) et l'importance des membranes dans les fonctions cellulaires, il est très important que la recherche soit encouragée sur le sujet.

6.4.5 Effets génotoxiques

6.4.5.1 Méthodes permettant de questionner la génotoxicité

Différentes techniques sont couramment utilisées pour détecter les effets génotoxiques des ondes millimétriques. Le test des comètes (cf. Figure 37) a pour objet d'identifier les substances causant des dommages à l'ADN. En conditions alcalines, ce test des comètes permet de détecter les cassures simple et double-brin. Le nom de la méthode dérive de la similarité visuelle entre les profils électrophorétiques obtenus et les comètes. Des cellules uniques sont soumises à une électrophorèse en gel d'agarose, leur ADN migre en formant

une tête de comète et une queue de comète, constituée de l'ADN qui a subi des cassures. Les quantités d'ADN dans la tête et la queue de la comète sont mesurées et le pourcentage d'ADN endommagé est ainsi déterminé.

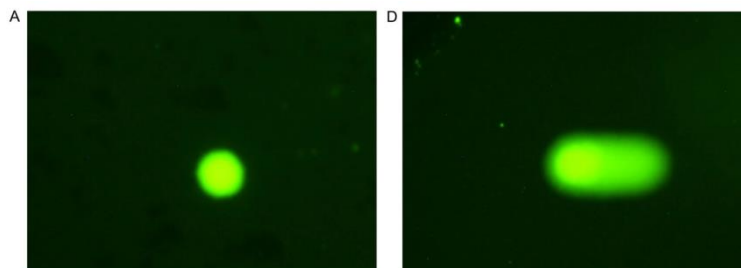


Figure 37 : Photos de cellules contrôle (A), ou traitées à la bléomycine (D)

Source : Koyama *et al.*, 2019.

Une seconde méthode pour détecter les dommages de l'ADN consiste à observer la formation de micronoyaux (MN) dans des cellules en division dont la cytokinèse a été bloquée chimiquement, et qui sont donc bi-nucléées. Les MN sont de minuscules corps extra-nucléaires provenant de chromatides acentriques (fragments de chromosomes) ou de chromatides entières avec un centrosome (chromosomes entiers) qui tardent à remonter aux pôles du fuseau à l'anaphase et ne sont pas incluses dans le noyau lors de la télophase. Les cellules sont marquées avec un anticorps CREST qui marque les kinétochores (site d'attachement, dans le centrosome, des microtubules composants le fuseau mitotique). Deux types de MN peuvent être détectés : des MN CREST négatifs qui correspondent à des fragments de chromosomes acentriques issus de cassures de l'ADN, et des MN CREST positifs qui correspondent à des chromosomes entiers qui seront perdus, perte à l'origine d'une aneuploïdie.

D'autres méthodes sont également couramment utilisées pour détecter les dommages de l'ADN. Les cellules peuvent être marquées avec un anticorps dirigé contre l'histone gamma-H2AX, une forme phosphorylée sur la sérine 139 de l'histone H2A qui est incorporée au niveau des coupures double-brin de l'ADN. L'hybridation *in situ* de sondes fluorescentes (FISH) sur les chromosomes avec des sondes centromériques permet de détecter la non-disjonction des chromosomes. La FISH utilisant des sondes télomériques permet de mesurer la longueur des télomères, les extrémités des chromosomes, et d'estimer ainsi leur intégrité. Enfin, des modifications de l'ultrastructure cellulaire peuvent être détectées en microscopie électronique à transmission.

6.4.5.2 Analyse du corpus bibliographique

Quatre publications ont été jugées de qualité suffisante pour être intégrées à l'évaluation du niveau de preuve.

Franchini *et al.*, (2018) ont recherché les effets génotoxiques associés à une exposition à des ondes millimétriques de fréquence 25 GHz sur des fibroblastes humains. Pour cela, les auteurs ont réalisé des tests comètes en milieu alcalin, recherché des MN en couplant à des marquages CREST, et réalisé des immuno-marquages pour l'histone gamma-H2AX. De plus, ils ont recherché d'éventuelles non-disjonction des chromosomes lors de la mitose par FISH en marquant spécifiquement les chromosomes 4, 10 et 17 qui sont impliqués dans certaines pathologies, notamment des cancers. L'intégrité des télomères a été analysée en quantifiant

leur taille après un marquage FISH. Le cycle cellulaire a été suivi par cytométrie en flux (FACS), et l'ultrastructure des cellules observée par microscopie électronique à transmission. Enfin, l'expression de plusieurs protéines a été suivie par *western blot* (les protéines pro et anti-apoptotiques Bax et Bcl2, le suppresseur de tumeur P53, PARP-1, une protéine impliquée dans la réparation de l'ADN, les protéines du cytosquelette actine et tubuline, les MAP kinases ERK1 et ERK2, phosphorylées ou non, qui sont impliquées dans la croissance cellulaire, le facteur de transcription NFκB impliqué dans la réponse au stress, la kinase Akt phosphorylée, un signal de survie cellulaire).

Des fibroblastes humains de la peau, d'origine fœtale et adulte (respectivement HFFF2 et HDF, collection ECACC), ont été soumis à une exposition continue de 20 minutes à 20 °C à des ondes millimétriques de fréquence 25 GHz à une densité de puissance moyenne de 0,8 mW/cm². Des témoins négatifs *sham* et *sham-thermal* (boîte de culture de cellules *sham* placée dans une seconde boîte contenant de l'eau et absorbant 99 % de la puissance reçue) ont été réalisés.

Comparant les cellules témoins *sham* et *sham-thermal* avec les cellules exposées, les auteurs n'ont pas observé d'impact de l'exposition pour la majorité des tests. Toutefois, dans les deux lignées cellulaires, ils ont observé après exposition une augmentation du nombre total de MN due à une augmentation des micronoyaux CREST-positifs dans les cellules exposées, indiquant une aneuploïdie due à des pertes de chromosomes. Ceci est corroboré par l'observation d'une augmentation significative de la non-disjonction du chromosome 10 pour les cellules HFFF2 et de celle du chromosome 17 pour les cellules HDF. L'analyse de l'ultrastructure ne révèle aucun effet de l'exposition mis à part une augmentation des lysosomes primaires et secondaires. Les résultats ont été soumis à des tests statistiques appropriés (t-test, test binomial ou Mann-Whitney selon le type de données). Franchini *et al.* concluent que l'exposition n'a pas d'effet direct sur l'ADN dans les fibroblastes issus de tissus fœtaux ou adultes. Les effets observés sont indirects. Notamment, les aneuploïdies pourraient provenir de défauts dans la voie d'assemblage des fuseaux mitotiques.

Les protocoles expérimentaux sont soigneusement décrits et les caractéristiques de l'exposition ont été déterminées et analysées avec précision. L'utilisation de témoins négatifs *sham* et *sham-thermal* permet d'exclure l'origine thermique des effets éventuels. De nombreux tests ont été effectués pour détecter un impact sur le génome ou, plus globalement, sur la santé des cellules, et l'ensemble de ces tests est négatif. À noter cependant qu'il serait intéressant de compléter l'analyse de l'expression des protéines *in vivo* pour déterminer leur localisation avant ou après exposition. Enfin, des recherches devraient être poursuivies pour déterminer l'origine des aneuploïdies observées.

La littérature montre qu'il existe souvent un effet protecteur de l'ADN par les ondes électromagnétiques vis-à-vis des radiations ionisantes ou de certains agents chimiques mutagènes. Gapeyev *et al.* (2015) ont exploré cette hypothèse en combinant le traitement de leucocytes de souris par divers agents mutagènes physiques (rayons X) ou chimiques (un inducteur de stress oxydant comme le peroxyde d'oxygène, ou un agent alkylant, le méthanesulfonate de méthyle), et l'exposition à des ondes électromagnétiques de fréquence 42,2 GHz, et en testant l'intégrité de l'ADN après ces doubles traitements.

Le sang de souris mâles adultes de la lignée Kv:SHKa été collecté à partir de la veine de la queue et dilué pour obtenir 0,5 millions de leucocytes/mL. Les leucocytes ont ensuite été déposés sur une lame recouverte d'agarose à bas point de fusion à 0,5 % et recouverts d'une couche du même agarose. L'intégrité de l'ADN a été estimée par des tests comètes en milieu alcalin sur 9 expériences indépendantes réalisées en aveugle. La normalité de la distribution

a été vérifiée par des tests de Kolmogorov-Smirnov, les variances sont analysées par ANOVA et comparées par des tests de Dunnett. Les leucocytes ont été exposés pendant 20 minutes (densité de puissance incidente $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) avec une source en cornet pyramidal qui émet un signal sinusoïdal continu ou pulsé (période de 1 ou 16 Hz). Pour les doubles traitements, les leucocytes ont été traités avant la fin de l'exposition aux ondes électromagnétiques, soit pendant 5 minutes aux rayons X (4 Gy, 1 Gy/minute), soit durant 10 minutes à 37°C en présence de peroxyde d'hydrogène H_2O_2 20 μM ou de méthyl-sulfonate 2,5 mM. L'exposition des leucocytes aux ondes électromagnétiques continues ou discontinues n'a pas d'effet sur l'intégrité de l'ADN. L'exposition aux rayons X induit des cassures de l'ADN et le taux de cassures n'est pas différent si les leucocytes sont au préalable traités avec des ondes électromagnétiques continues. Par contre, l'exposition préalable par les ondes électromagnétiques discontinues résulte en une réduction significative des cassures de l'ADN, et ceci est vrai également pour d'autres traitements génotoxiques (peroxyde d'oxygène, méthyl-sulfonate). Ainsi, les ondes pulsées (intermittentes) réduisent les dommages de l'ADN de 20 à 45 % selon l'agent génotoxique.

Les expériences sont très soigneusement décrites et les données soumises à des tests statistiques appropriés. Les auteurs proposent que les ondes intermittentes, en induisant des espèces réactives de l'oxygène (ROS) à une très faible concentration, pourraient déclencher un mécanisme d'adaptation. Tester cette hypothèse pourrait permettre de révéler des effets plus subtils des ondes électromagnétiques.

Les deux autres publications sont celles de Koyama (Koyama *et al.*, 2016 ; Koyama *et al.*, 2019). Elles portent sur les deux mêmes lignées de cellules humaines, une lignée de cellules épithéliales de cornée, HCE-T, et une lignée de cellules épithéliales de cristallin, SRA01/04 (Riken Cell Bank). La seule différence entre ces publications est la fréquence du signal, 40 GHz pour celle de 2019, 60 GHz dans l'étude de 2016. Leur objectif était d'étudier les effets non thermiques des ondes millimétriques, en particulier leur génotoxicité et leur capacité à induire un stress dans les cellules de l'œil humain.

Ces cellules adhérentes ont été cultivées en boîte de Pétri de 10 cm de diamètre. Les boîtes ont été déposées sur un applicateur planaire en forme de disque dans un incubateur dont l'atmosphère est contrôlée (37°C , CO_2 5 %, humidité > 95 %). Les cellules ont été collectées 24 h après l'exposition, et la génotoxicité des traitements évaluée par l'analyse de la formation de MN et des cassures de l'ADN par des tests comètes en milieu alcalin. L'induction d'un stress a été estimée par l'analyse de l'expression des protéines de choc thermique Hsp27, Hsp70 et Hsp90 α , 6 h par *western blot*. Jusqu'à 6 expériences indépendantes ont été réalisées pour les tests de micronoyaux et comètes. Des contrôles négatifs (cellules placées dans l'incubateur ou soumises à une exposition *sham*) et positifs (traitement à la bléomycine, un agent génotoxique, 1 h à 37°C ou 2 h à 43°C suivi d'1 h à 37°C) ont été inclus dans l'expérience. Les analyses ont été réalisées en aveugle. Les résultats, nombre de micronoyaux et pourcentages d'ADN dans les queues de comètes, ont été soumis à des tests de Dunnett pour comparaisons multiples (différences significatives si *p-value* < 0,05). Les cellules ont été exposées à des ondes électromagnétiques de fréquence 40 ou 60 GHz, pendant 24 h. La densité de puissance était de $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$. Une simulation numérique a permis d'estimer l'homogénéité de la puissance sur la surface de l'applicateur. L'élévation de température est inférieure à $0,1^\circ\text{C}$.

Les résultats ne montrent aucun effet génotoxique des ondes millimétriques, au contraire des effets évidents et attendus de la bléomycine ou de l'augmentation de la température (43°C , 2 h). De même, l'exposition n'augmente pas le niveau d'expression des protéines de choc

thermique. Ainsi, Koyama *et al.* concluent que les ondes électromagnétiques n'ont pas d'effet génotoxique ou inducteur de stress sur deux types cellulaires de l'œil humain.

Ces deux études sont issues d'un groupe spécialiste du domaine. Elles sont claires et rigoureuses, réalisées en aveugle avec des témoins positifs et négatifs, et les tests statistiques sont adaptés. Elles permettent de valider l'absence d'effets génotoxiques observé avec les ondes électromagnétiques sur deux types cellulaires de l'œil humain.

Les articles suivants ont été analysés mais non retenus pour l'évaluation du niveau de preuve de la génotoxicité : De Luca *et al.*, 2016 ; Fan *et al.*, 2019 ; Gallerano *et al.*, 2015 ; Wu *et al.*, 2012 ; Hintzsche *et al.*, 2012.

6.4.5.3 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

En conclusion, les 4 études *ex vivo* présentées ci-dessus ont étudié l'exposition à des ondes millimétriques entre 25 et 60 GHz de lignées cellulaires humaines (fibroblastes, cellules du cristallin, cellules de la cornée) et de cellules sanguines de rat (leucocytes). Ces études n'ont pas permis de détecter d'effet génotoxique à proprement parler. Néanmoins, des aneuploïdies résultant de défauts de disjonction des chromosomes lors de la mitose ont été détectées dans les fibroblastes exposés. L'étude d'un tel effet, même s'il est indirect, mériterait d'être approfondie. En conclusion, les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet génotoxique.

6.4.6 Autres effets

6.4.6.1 Effet sur le système vasculaire

6.4.6.1.1 *Analyse du corpus bibliographique*

Un article s'intéressant aux effets des ondes électromagnétiques sur le système cardio-vasculaire a été jugé de qualité suffisante pour participer à l'évaluation du niveau de preuve.

Les terminaisons sensorielles sont constituées de fibres qui transmettent les signaux sensoriels et maintiennent les réflexes vasculaires végétatifs, ainsi que de 10 à 30 % de fibres peptidergiques qui assurent la conduction rétrograde de l'influx nerveux. Ces terminaisons sensorielles peuvent être activées par différents stimuli comme l'acidose, les changements de température ou les agents inflammatoires induits lors d'une lésion des tissus. Des ondes électromagnétiques millimétriques sont utilisées comme thérapie pour leur effet anti-inflammatoire dans les troubles de la microcirculation. Afin de mieux comprendre l'effet d'expositions multiples sur la transmission des signaux rétrogrades, Chuyan et Tribat (2016) ont étudié l'effet d'une exposition répétée à des ondes de fréquence 42,4 GHz sur la microcirculation au niveau du poignet chez 30 jeunes femmes volontaires âgées de 20 à 25 ans.

Une stimulation électrique a été effectuée grâce à une électrode placée sur la face palmaire du poignet droit (fréquence de 2 Hz ; impulsions de 0,5 ms ; intensité augmentée de 0,5 mA en 0,5 mA jusqu'à ce que le sujet ressente une douleur, puis fixée à 0,5 mA en dessous du seuil de douleur ; durée 1 mn). La microcirculation a été mesurée par débitmétrie laser à effet Doppler avec une sonde placée à 1 cm de l'électrode, et exprimée par l'index de microcirculation cutanée (MI). ΔMI représente l'augmentation de l'index de microcirculation durant la stimulation électrique, et T1 le temps de latence (temps passé avant le début de l'augmentation de MI). Les données sont soumises à un test non paramétrique (test de Wilcoxon).

Le système d'exposition est un dispositif médical approuvé, en usage en Russie (RAMED EKSPERT-04 à 6 canaux) dont les caractéristiques sont les suivantes : longueur d'ondes 7,1 mm, fréquence 42,4 GHz, densité de puissance 0,1 mW/cm². Il est placé symétriquement par rapport à trois points biologiquement actifs définis en médecine chinoise (E-36, MC-6 et GI-4) (points d'acupuncture). L'exposition, d'une durée de 30 minutes, est répétée chaque jour (une session, 5 sessions ou 10 sessions d'exposition).

Les résultats montrent une augmentation significative de ΔMI (augmentation de 3,08 fois après 10 sessions) et une diminution du temps de latence sous l'effet de l'exposition. Par conséquent, l'exposition aux ondes millimétriques augmente l'effet de la stimulation électrique sur la microcirculation.

Cette étude de physiologie expérimentale chez des volontaires est bien conçue et bien conduite. Le protocole expérimental est soigneusement décrit et l'analyse des résultats fait appel à des tests statistiques appropriés. Cependant, l'effet de l'exposition sur la microcirculation en absence de stimulation électrique n'est pas mesuré. Le système d'exposition semble être un dispositif médical approuvé, en usage en Russie. On note cependant une imprécision sur la localisation anatomique des expositions.

Les articles suivants ont été analysés mais non retenus pour l'évaluation du niveau de preuve de l'effet sur le système cardio-vasculaire : Jauchem, *et al.* 2016 et Narinyan & S. Ayrapetyan, 2017.

Dans le premier, l'exposition de rats à des ondes de densité de puissance 75 mW/cm² provoque une augmentation de température des animaux jusqu'à 46°C. L'augmentation de la pression artérielle dans certains cas jusqu'au décès paraît non éthique, bien que les auteurs disent avoir suivi les lignes directrices sur l'expérimentation animale. Pour cette raison, cette étude a été rejetée par le groupe de travail.

6.4.6.1.2 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

En conclusion, une étude unique s'est intéressée à l'effet des ondes électromagnétiques millimétriques sur le système vasculaire. Les éléments de preuve sont insuffisants pour conclure ou non à l'existence d'un effet sur le système vasculaire.

6.4.6.2 Effet sur le système reproducteur

6.4.6.2.1 Introduction

Les études identifiées pour les effets concernant le système reproducteur se concentrent sur le testicule. Le testicule humain présente une capsule à partir de laquelle des septa fibreux divisent l'organe en quelques 250 lobules. Chaque lobule contient jusqu'à 4 tubes séminifères composés de cellules germinales en différents stades de différenciation et des cellules de Sertoli.

Les cellules germinales sont à l'origine des spermatozoïdes, processus de différenciation cellulaire appelé la spermatogénèse, schématisé en Figure 38.

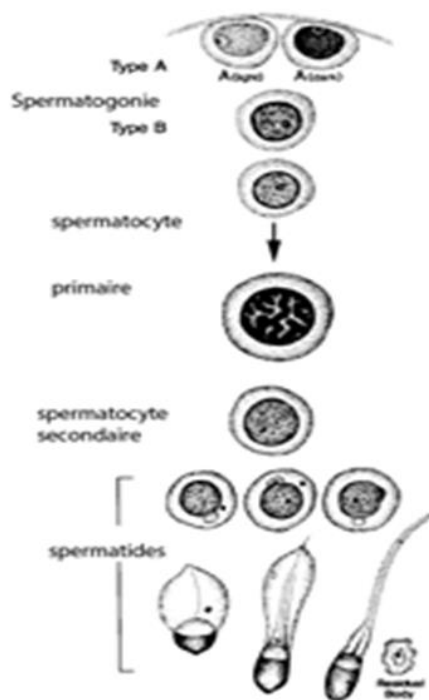


Figure 38 : Spermatogénèse

Source : modifié de Trainer 1987 (Trainer, 1987)

Les cellules de Sertoli, quant à elles, représentent un peu plus de 10 % de cellules du tube séminifère. Elles s'étendent de la couche basale jusqu'à la lumière du tube séminifère. Elles forment entre elles un réseau étanche qui constitue la barrière hémato-testiculaire. Elles régulent le passage de substances vers les cellules germinales, régulent la spermatogénèse par leur activité phagocytaire, la régulation de la production de FSH et le transport de testostérone (cf. Figure 39).

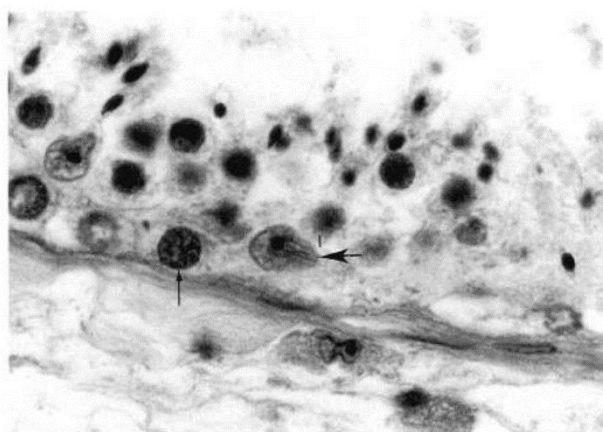


Figure 39 : Section de tube séminifère

Petite flèche : spermatogonie, grande flèche cellule de Sertoli (Trainer 1987)

En outre les cellules de Sertoli produisent des cytokines pro et anti-inflammatoires qui, dans des conditions normales, participent au fonctionnement du testicule mais qui, dans des

conditions inflammatoires, peuvent agir comme un facteur pro-apoptotique sur les cellules germinales (Kaur *et al.*, 2014).

Le tissu situé entre les tubes séminifères contient des amas de cellules interstitielles, aussi appelées cellules de Leydig, productrices de testostérone.

Des études antérieures avaient montré que l'exposition à des ondes radiofréquences (2 – 4 GHz) entraînait une dégénérescence des cellules germinales à différents stades (Subbotina *et al.*, 2006) ainsi qu'une réduction du nombre de spermatozoïdes et de leur mobilité (Bonisoli-Alquati *et al.*, 2011).

6.4.6.2.2 Analyse du corpus bibliographique

L'équation de recherche a fourni 1 publication qui a été retenue pour cette analyse.

L'étude de Volkova et ses collaborateurs (Volkova *et al.*, 2014) évalue l'exposition de spermatozoïdes humains cryopréservés en normozoospermie (motilité normale) ou en asthénozoospermie (spermatozoïdes lents) soumis à des ondes de 42,25 GHz.

Des éjaculats (n = 30) provenant d'hommes âgés de 30 à 40 ans atteints de normo- et d'asthénozoospermie ont été exposés pendant 5, 10 et 15 min à l'aide d'un générateur G4-141 ($\lambda = 7,1$ mm) à une fréquence de 42,25 GHz, $P = 0,3$ mW, densité surfacique de puissance de $0,03$ mW/cm². Les spermatozoïdes témoins n'ont pas été exposés. Les spermatozoïdes ayant des mouvements rectilignes rapides ou des mouvements lents ont été comptés. La viabilité des spermatozoïdes a été évaluée dans des frottis colorés à l'éosine-nigrosine. La décondensation de la chromatine dans les spermatozoïdes et le taux d'apoptose ont été évalués par FACS. La décondensation de la chromatine nucléaire dans les spermatozoïdes a été détectée avec la 7-aminoactinomycine D (7AAD), l'apoptose avec l'annexine V. Toutes les expériences ont été répétées au moins 3 fois. Les données ont été traitées statistiquement par ANOVA unidirectionnelle et par le test de Student. La vérification de la normalité et de l'homocédestacité des échantillons n'a pas été rapportée.

Une exposition de 5 minutes des spermatozoïdes en normozoospermie a stimulé la mobilité des spermatozoïdes de 1,2 fois. En revanche, l'allongement de l'exposition à 10 et 15 minutes a entraîné une diminution du nombre de spermatozoïdes mobiles. Dans le cas de l'asthénozoospermie, une augmentation significative - 1,5 fois par rapport au témoin - du pourcentage de spermatozoïdes mobiles a été détectée après 15 min.

Le niveau de spermatozoïdes à membrane altérée a augmenté après 15 min d'exposition des échantillons dans la normozoospermie et n'a pas changé dans l'asthénozoospermie par rapport aux échantillons témoins. Le niveau de spermatozoïdes viables est resté inchangé pendant toute l'étude. Cependant, une exposition de 15 minutes a entraîné une augmentation significative (1,5 fois par rapport au témoin) du niveau de spermatozoïdes 7AAD+.

L'étude est assez simple, mais les conclusions des auteurs paraissent hâtives et la discussion des résultats est peu argumentée, les effets observés ne sont pas expliqués. Les évaluations statistiques ne sont pas claires (on ne sait pas quel test précisément a été appliqué à chaque fois) et les méthodes d'exposition ne sont pas bien décrites. Les experts ont jugé cette étude limitée méthodologiquement.

6.4.6.2.3 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

En conclusion, cette étude montre une augmentation de la mobilité des spermatozoïdes exposés aux radiofréquences, mais la faiblesse des tests statistiques ne permet pas de bien apprécier cet effet. Il s'agit d'une seule étude, de qualité moyenne. De ce fait, il n'est pas

possible de conclure sur les effets des radiofréquences dans la bande de 26 GHz du système reproducteur mâle. Aucune donnée n'est disponible sur le système reproducteur femelle. Des études sont nécessaires aussi bien *in vitro* que *in vivo* pour évaluer le risque pour le système reproducteur de l'exposition aux ondes dans la bande 26 GHz.

6.4.6.3 Effet sur le système immunitaire

6.4.6.3.1 Analyse du corpus bibliographique

Deux articles s'intéressant à l'effet des ondes millimétriques sur le système immunitaire ont été jugés de qualité suffisante pour participer à l'évaluation du niveau de preuve.

Les ondes millimétriques sont souvent utilisées à des fins thérapeutiques, seules ou combinées à d'autres traitements. L'objectif de l'article de Logani *et al.* (2012) était de tester l'effet d'ondes de fréquence 42 GHz sur la restauration de la réponse immunitaire lors d'un traitement anti-cancéreux. Les lymphocytes T-helper (lymphocytes CD4+), produisent des cytokines qui jouent un rôle primordial dans la réponse immunitaire adaptative. Les lymphocytes CD4+ Th1 produisent les cytokines IL-2, IFN- γ et TNF- α , et les lymphocytes CD4+ Th2 produisent les cytokines IL-4, IL-5 et IL-10. Les traitements anti-cancéreux, comme le cyclophosphamide (CPA), perturbent la production de cytokines et notamment l'équilibre Th1/Th2. Des travaux plus anciens de la même équipe ont montré que l'exposition à des ondes millimétriques restaure l'équilibre Th1/Th2, et également qu'elle induit la libération d'opioïdes endogènes. L'objet du présent article était de déterminer si la production d'opioïdes endogènes est impliquée dans l'effet des ondes millimétriques sur la restauration de l'équilibre Th1/Th2 lors du traitement au CPA, et, le cas échéant, d'identifier le récepteur aux opioïdes impliqué.

Des souris BALB/C âgées de 7 semaines et pesant environ 25 g ont été exposées à des ondes à $42 \pm 0,2$ GHz durant 30 minutes pendant 3 jours consécutifs. Neuf groupes de 8 animaux ont été testés en aveugle : groupe 1, naïf sans traitement ; groupe 2, traité au CPA et exposé pendant 3 jours (injection intrapéritonéale de CPA au jour 2), groupe témoin positif ; groupe 3, traité au CPA et non exposé mais soumis au même protocole (témoin *sham*) ; groupes 4 à 6 traitements combinés CPA, exposition, *Opioid Receptor Antagonist* (ORA), des antagonistes des récepteurs opioïdes μ , δ et κ ont été utilisés ; groupes 7 à 9 traitements combinés CPA, *sham*, ORA, les 3 antagonistes ont été utilisés. Les ORA ont été injectés en intrapéritonéale la veille du jour 1. Les souris ont été sacrifiées après 7 jours et les cellules de la rate (splénocytes) isolées. Les cytokines Th1 et Th2 ont été mesurées en utilisant un kit BD Biosciences. Les résultats ont été soumis à des tests statistiques d'analyse de variance : test de la normalité (Kolmogorov-Smirnov), ANOVA paramétrique si la distribution est normale, ANOVA non-paramétrique dans le cas contraire, et tests post-analyses si les différences sont significatives, calcul de la *p-value* ajustée par la méthode de Holm-Sidak.

Un générateur YAV-1 (Istok, Fryazino, Russie) spécifiquement conçu dans les années 80 pour des applications médicales a été utilisé. Il délivre des ondes de fréquence $42 \pm 0,2$ GHz grâce à une antenne en cornet rectangulaire placée à 5 mm du museau des souris. La puissance incidente est de 38 mW/cm². Le DAS, mesuré par thermographie, est de 681 W/kg¹⁴⁵.

Les résultats montrent que l'exposition restaure la production des cytokines Th1 et Th2 supprimées par le CPA et que les 3 ORA potentialisent l'effet de l'exposition sur la production

¹⁴⁵ Le DAS aux fréquences supérieures à 6-10 GHz n'est plus pertinent, la valeur crête très élevée donnée ici ne peut être comparée aux DAS observés lorsque les rayonnements pénètrent plus profondément dans les tissus

de Th1 et Th2. Le traitement combiné CPA, exposition et ORA μ ou δ augmente le déséquilibre de la production de cytokines vers les Th2 alors que le traitement combiné CPA, exposition, ORA κ annule la suppression des cytokines par le CPA et restaure la production de cytokines Th1.

Les résultats montrent que les opioïdes endogènes sont impliqués dans l'immunomodulation par les ondes millimétriques et suggèrent que leur effet thérapeutique pourrait être lié au blocage du canal κ . Les protocoles expérimentaux ainsi que les traitements statistiques sont bien décrits. Les expériences sont réalisées rigoureusement. Cette étude est de bonne qualité.

L'objectif de l'article de Vlasova *et al.* (2018) était d'étudier l'influence d'ondes millimétriques de 32,9 à 39,6 GHz sur l'activation des neutrophiles par des agonistes particuliers dans des échantillons de sang totaux. Chez l'Homme, les neutrophiles représentent 50 à 75 % des leucocytes circulants. Ce sont les premières cellules recrutées et activées en réponse à une infection. L'activation des neutrophiles est marquée par la libération de myélo-peroxydase (MPO), la protéine majoritaire des neutrophiles, et d'espèces réactives de l'oxygène (ROS). Ces ROS produisent de l' H_2O_2 transformée par le MPO en acide hypochloreux (HOCl), un oxydant puissant qui contribue à la défense contre les infections.

Le sang veineux a été prélevé chez des individus volontaires en bonne santé. Leur taux de neutrophiles est de 2 à 5 millions/mL. Du zymosan opsonisé ou des bactéries *E. coli* ont été ajoutés aux échantillons de sang pour stimuler la réponse immunitaire. Un échantillon témoin a été incubé sans aucun traitement, à température ambiante. Un échantillon a été soumis à une exposition. La production de ROS a été estimée par mesure de la chemiluminescence en présence de luminol (luminol-dependent chemiluminescence ou CL). Une analyse morphométrique des neutrophiles a été faite à partir de frottis colorés avec du Romanovsky-Giemsa et observés par microscopie optique (comptage de 500 neutrophiles par lame). Alternativement, les neutrophiles ont été purifiés par centrifugation dans un gradient de densité, repris dans du plasma, puis incubés avec du zymosan opsonisé ou des bactéries et les mêmes tests ont été réalisés. Les données présentées correspondent à la moyenne de 3 réplicats. Les échantillons ont été comparés par des tests de Student ou de Wilcoxon et considérés significativement différents si $p \leq 0,05$. L'activité oxydative du MPO a été mesurée par deux tests indépendants (oxydation de l'o-dianisidine dihydrochloride (OD) et déplétion des groupements SH libres). Les données de 5 expériences indépendantes ont été comparées par des tests de Wilcoxon et considérées significativement différentes si $p \leq 0,05$.

Les échantillons ont été exposés pendant 5, 15 ou 30 minutes à des ondes de 32,9 à 39,6 GHz délivrées par un générateur sur mesure (puissance sortante 70 mW ; puissance incidente $100 W/m^2$) et une antenne cornet. La température a été mesurée grâce à un thermomètre à fibre optique et le DAS estimé à $145 \pm 20 W/kg$.

Dans les échantillons de sang, en présence de zymosan opsonisé ou d'*E. coli*, la production de ROS augmente après exposition pendant 15 minutes aux ondes millimétriques. De même, l'analyse morphométrique des neutrophiles montre une augmentation du nombre et de la taille des vacuoles après l'exposition. Pour déterminer la contribution de la chaleur dans cette réponse des neutrophiles, des échantillons de sang ont également été chauffés. La quantification des ROS (CL) montre que leur augmentation est similaire à celle qui est observée lors de l'exposition. Ainsi, l'élévation de température pourrait être à l'origine de l'augmentation de la production d'oxydants. Les expériences ont été reproduites sur des neutrophiles isolés et resuspendus dans du plasma. Elles montrent une augmentation des

ROS après traitement par le zymosan opsonisé ou les bactéries. Enfin, dans le même système *ex vivo*, l'exposition augmente l'activité oxydative de la MPO.

En conclusion, l'activation des neutrophiles par le zymosan opsonisé ou les bactéries est intensifiée par l'exposition à des ondes millimétriques de fréquence 32,9 - 39,6 GHz. Les expériences sont bien décrites et réalisées rigoureusement. Les données sont analysées avec des tests statistiques appropriés. Cependant, le nombre de réplicats des dosages de ROS ou de l'activité MPO est faible (3 à 5). Par conséquent, cette étude *ex vivo* présente des limites méthodologiques mineures.

6.4.6.3.2 Conclusion et évaluation du niveau de preuve

En conclusion, ces deux articles, qui analysent deux types cellulaires différents (lymphocytes T-helper ou neutrophiles), suggèrent que les ondes millimétriques potentialisent la réponse immunitaire adaptative. Cependant, il serait souhaitable d'augmenter la taille des échantillons de la seconde étude. Le groupe de travail conclut que les éléments de preuve ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet sur le système immunitaire.

6.4.6.4 Effet sur le système locomoteur

Une seule étude a été identifiée, décrite ci-dessous, mais dont aucune conclusion ne peut être tirée quant aux effets sanitaires éventuels liés à l'exposition à des ondes millimétriques.

L'objectif de l'étude publiée en 2012 par Xia et ses collaborateurs était de tester l'effet thérapeutique des ondes millimétriques sur l'arthrose. L'arthrose est caractérisée par une perte du cartilage articulaire. Un modèle d'arthrose chez le lapin est obtenu par section du ligament croisé antérieur du genou (ACLT). En effet, il a été montré que les ondes millimétriques peuvent diminuer l'inflammation et l'apoptose (mort cellulaire) des chondrocytes (cellules du cartilage) (Sinotova *et al.*, 2004 ; Wu *et al.*, 2010). L'état du cartilage est suivi après l'opération avec ou sans traitement par des ondes millimétriques. Le traitement consiste en l'application d'un rayonnement (37,5 GHz, 10 mW/m², appliqué à 5 mm de la peau pendant 20 ou 40 minutes, 5 fois par semaine pendant 2 semaines, avec une antenne. Six semaines après le traitement, les animaux sont sacrifiés et l'état du cartilage est analysé par trois tests différents : (1) l'observation des tissus, qui permet de définir un score histopathologique (score de Mankin), (2) des marquages immunohistochimiques du cartilage articulaire pour la caspase-3, la caspase-8 et la MMP-13 (*Matrix Metallo Proteinase*), ainsi qu'un marquage TUNEL, ces 4 marquages permettent de définir un index apoptotique et donc de quantifier les cellules en train de mourir, (3) l'analyse moléculaire des protéines extraites du cartilage pour la présence de caspase-3, caspase-8 et MMP-13 (*western blots*). Les résultats de cette étude, menée de façon rigoureuse au niveau biologique, sont soumis à des tests statistiques appropriés (One-way ANOVA et chi-square, Kruskal-Wallis si les variances sont hétérogènes). L'ensemble des trois tests converge vers un effet bénéfique de l'application du traitement le plus long (40 minutes). Ces travaux montrent que les ondes millimétriques permettent de limiter la mort cellulaire et donc la dégradation du cartilage articulaire. Cependant, aucun effet « délétère » n'a été recherché, ni aucune évaluation des risques réalisée. L'effet des ondes sur la prolifération cellulaire reste quant à lui à déterminer, ainsi que leur nature thermique ou athermique. À noter également l'absence d'indication sur la façon de mesurer le DAS et de précision sur le type de signal.

7 Conclusions et recommandations du groupe de travail

7.1 Conclusions

7.1.1 Déploiement

La Corée du Sud est le premier pays au monde à avoir déployé la 5G, en avril 2019. Les autres pays ont emboîté le pas à des rythmes différents et souvent avec des stratégies propres.

Le plan d'action de la Commission européenne prévoyait un lancement commercial coordonné en 2020. Les tensions internationales, notamment entre la Chine et les États-Unis, ainsi que les demandes de report d'une partie de la population et du monde politique (pétitions, demandes de moratoire, recours, etc.) ont pu contribuer à ralentir la mise en place des réseaux.

En France, des recours avaient été déposés au Conseil d'État en opposition à l'attribution des fréquences pour la 5G. Ceux-ci ont été rejetés en décembre 2020. Les enchères se sont déroulées en octobre 2020 et les premières offres commerciales à destination du public ont été proposées en novembre de la même année. Au 31 janvier 2021, les bandes concernées sont 700 MHz (Free Mobile), 2 100 MHz (Bouygues Telecom, Orange et SFR) et 3,5 GHz (les 4 opérateurs).

7.1.2 Valeurs limites d'exposition

Concernant l'exposition du public à la téléphonie mobile (antennes-relais et téléphones mobiles), de nombreux pays du monde et notamment la plupart des pays de l'Union européenne, dont la France, appliquent les limites des lignes directrices de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp) datant de 1998. Toutefois, un certain nombre de pays de l'Europe appliquent des limites plus basses par rapport aux limites recommandées par le Conseil de l'UE (Belgique, Bulgarie, Croatie, Grand-Duché de Luxembourg, Grèce, Italie, Lituanie, Pologne et Slovaquie). Les réglementations diffèrent par les valeurs limites proprement dites, en fonction de la fréquence, les lieux où celles-ci s'appliquent, les procédures de contrôle et éventuellement les puissances ou les PIRE (puissance isotrope rayonnée équivalente) minimales en-dessous desquelles les limites ne s'appliquent pas.

L'Icnirp a publié une mise à jour de ses lignes directrices pour les radiofréquences en 2020.

7.1.3 Controverse publique liée au déploiement de la 5G

La 5G n'est pas une technologie comme les autres. C'est un assemblage d'évolutions techniques et d'évolutions d'usages qui se prêtent à controverse. Ces évolutions sont en effet présentées dans les discours des promoteurs comme autant d'avancées sur le plan technique, économique et sociétal, alors qu'elles se chargent de nouvelles significations lorsqu'elles investissent la scène publique. Ici, elles prennent place dans les débats comme des sources de préoccupation sur le plan sanitaire, environnemental et politique.

La 5G fait peur et suscite une mobilisation contre elle inédite. L'absence de littérature scientifique sur le sujet, du fait sans doute du peu de recul sur une situation récente et évolutive, a introduit la nécessité de s'appuyer sur l'étude de corpus médiatiques (presse, réseaux sociaux, vulgarisation scientifique) pour en rendre compte.

L'analyse de ces corpus fait ressortir quelques spécificités majeures de cette controverse sur la 5G. Tout d'abord le caractère pluridimensionnel de la contestation publique. Trois dimensions sont visées par la critique : (1) le système technique lui-même dont les propriétés intrinsèques font l'objet de controverse en tant que sources de risques éventuels ; (2) le processus de prise de décision, avec la dénonciation d'un déploiement lancé en l'absence de consultation citoyenne et d'évaluation experte des risques ; (3) la dimension sociétale du programme, vis-à-vis de laquelle les opposants manifestent leur scepticisme, aussi bien sur le plan des usages que de l'efficacité énergétique.

Si la controverse sur la 5G s'inscrit dans la méta-controverse sur les champs électromagnétiques, dont elle ne représenterait qu'une ultérieure étape après celles des antennes-relais, du Wi-Fi et des compteurs Linky, elle s'en écarte néanmoins par l'irruption de la cause écologique. Celle-ci est centrée sur la problématique de la consommation d'énergie, portée à l'unanimité par l'ensemble des acteurs de la critique, en association avec la question des risques sanitaires.

Cette controverse a aussi un caractère éminemment public. Celui-ci est soutenu aussi bien par la couverture médiatique du sujet 5G que par des formes de mobilisation collective qui se développent dans l'espace public numérique et qui engagent une multitude d'acteurs, dont certains sont des personnages publics.

Mais surtout, l'analyse de diverses arènes médiatiques donne à voir la dimension politique de cette controverse. À la question des risques, pour la santé et pour l'environnement, la contestation y associe celle de la possibilité de choisir – ou de refuser – le déploiement de la technologie en question.

Cette question du libre choix ne peut par ailleurs être réduite au seul déploiement de la 5G, dans la mesure où cette technologie est souvent présentée – autant par ses défenseurs que par ses détracteurs – comme une étape vers un programme plus vaste de numérisation généralisée de la société, qui à son tour impliquerait, entre autres choses, l'emplissage des espaces de vie par un cumul d'expositions aux champs électromagnétiques. La source de la conflictualité en matière de 5G, tient donc probablement au fait que de nombreux publics ont le sentiment de se voir imposer tous ces changements sans possibilité de choix ou de participation à leur construction.

7.1.4 Évaluation des effets sanitaires éventuels liés au déploiement de la 5G

Les conclusions des travaux d'expertise sont présentées ci-dessous, en considérant séparément les questions spécifiques à chacune des trois bandes de fréquences concernées par le déploiement de la technologie 5G en France : d'une part les fréquences déjà utilisées par les technologies de téléphonie mobile 3G et 4G (bandes 700, 800, 1 800 et 2 100 MHz), et d'autre part les nouvelles bandes exploitées spécifiquement pour la 5G : les fréquences autour de 3,5 GHz (3,4 GHz à 3,8 GHz) et celles autour de 26 GHz.

Aucun résultat d'étude scientifique s'intéressant aux effets éventuels sur la santé de l'exposition aux champs électromagnétiques, spécifiquement dans ces nouvelles bandes de fréquences prévues pour la 5G, n'est actuellement disponible. Le groupe de travail s'est donc

appuyé, pour cette expertise, sur les données bibliographiques existantes dans des bandes de fréquences plus larges.

Les expertises menées par l'Anses au cours des précédentes années sur les effets éventuels liés à l'exposition aux radiofréquences (notamment dans la bande de fréquences 8,3 kHz – 2,5 GHz) indiquent que les seuls effets avérés (lien de cause à effet démontré) des radiofréquences sont des effets thermiques, c'est-à-dire liés à l'échauffement des tissus biologiques.

■ Effets sur la santé du déploiement de la 5G dans les bandes comprises entre 700 et 2 100 MHz

Quelles sources de données ?

En France, le déploiement de réseaux mobiles utilisant les technologies 5G dans les bandes de fréquences comprises de 700 à 2 100 MHz s'est concrétisé¹⁴⁶ à l'automne 2020, donc après le début des travaux de la présente expertise. L'Anses ayant déjà produit, à plusieurs reprises, des travaux d'expertise concernant les effets sanitaires des champs électromagnétiques couvrant ces fréquences, le groupe de travail s'est appuyé sur les expertises précédentes de l'Anses publiées récemment (Anses, 2013 et 2016), ainsi que sur des rapports d'expertises récents par des organismes étrangers et internationaux.

Quels types d'effets sanitaires éventuels ont été étudiés ?

Les principaux effets éventuellement liés à l'exposition aux champs électromagnétiques recherchés chez l'Homme dans cette bande de fréquences sont : la cancérogenèse, le fonctionnement cérébral (cognition, mémoire, activité électrique), la fertilité ou encore l'électrohypersensibilité.

Chez l'animal, les effets étudiés concernent principalement le cerveau (comportement, cognition, mémoire), le stress oxydant, la génotoxicité et la cancérogenèse. Enfin, les études *in vitro* sur des cellules issues de tissus animaux, parfois humains, sont focalisées surtout sur la mort cellulaire par apoptose, le stress oxydant et la génotoxicité.

Les rapports institutionnels étrangers publiés depuis les dernières expertises de l'Anses concernant ces fréquences ne mettent pas en évidence de lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les technologies mobiles et l'apparition d'effets. Par ailleurs, on peut noter que pour la fréquence de 700 MHz, aucune étude spécifique n'a été identifiée par le groupe de travail.

Que peut-on dire de l'exposition à la 5G à ces fréquences ?

A priori, compte tenu des données techniques dont le groupe de travail a eu connaissance, concernant les infrastructures et le fonctionnement des réseaux mobiles 5G, les niveaux d'exposition dans l'environnement liés aux émissions des antennes relais, dans des conditions identiques (densité d'utilisateurs, trafic, etc.) devraient peu varier, que les antennes émettent des signaux 3G, 4G ou 5G.

¹⁴⁶De nombreuses demandes d'installation ou modification d'antennes ont été déposées à cette période auprès de l'ANFR, pour des émissions 5G dans les bandes de fréquences 700 ou 2 100 MHz.

Le déploiement de la 5G à ces fréquences présente-t-il un risque pour la santé ?

Les résultats des expertises précédentes conduites par l'Anses concernant les effets sanitaires de l'exposition aux radiofréquences (bande 8,3 kHz– 2,5 GHz) sont pertinents pour la 5G déployée dans la bande 700 - 2 100 MHz, bien qu'aucune étude ne concerne spécifiquement la fréquence de 700 MHz. Par ailleurs, les niveaux d'exposition dans l'environnement seront vraisemblablement comparables entre la 5G et les précédentes technologies de téléphonie mobile pour les fréquences de 700 à 2 100 MHz.

■ Effets sur la santé du déploiement de la 5G dans la bande 3,5 GHz***Existe-t-il des données d'exposition à la 5G dans cette bande de fréquences ?***

Le réseau de téléphonie mobile 5G dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz est ouvert commercialement depuis peu en France (1 594 sites au 31 janvier 2021¹⁴⁷), l'exposition aux champs électromagnétiques qui en résulte n'est donc pas représentative aujourd'hui de ce qu'elle sera lorsque de nombreux utilisateurs seront connectés.

Des simulations ont cependant été menées (ANFR, 2020) afin d'évaluer le niveau de champ moyen en divers environnements, comme en milieu urbain par exemple. Compte tenu de l'hypothèse émise concernant l'évolution des flux de données échangées, fondée sur une extrapolation de la consommation 4G actuelle, le niveau d'exposition moyen, en champ électrique, serait de l'ordre de 1,5 V/m (ANFR, 2020). Ce niveau est comparable à celui du réseau 4G actuel, en particulier en raison d'un meilleur débit de la 5G (notamment grâce à des faisceaux directifs). Néanmoins, ces simulations montrent que le nombre de points atypiques (exposition aux champs électromagnétiques supérieure à 6 V/m) pourrait augmenter par rapport à la 4G (de 0,6 à 1,1 %).

Des mesures effectuées dans divers pays où la 5G est déjà implémentée tendent à confirmer les valeurs de ces simulations, mais ces mesures sont encore peu nombreuses. Par exemple, en Corée du Sud, où la 5G est déployée depuis plusieurs mois, en zone urbaine dense, le champ électrique le plus élevé a été mesuré à 2,1 V/m, bien en-dessous de la valeur limite d'exposition réglementaire fixée à cette fréquence à 61 V/m.

Pour ce qui concerne le cumul des expositions aux différentes technologies 3G, 4G et 5G en France, des résultats de simulations (ANFR, 2020) dans différents scénarios de déploiement de la 5G montrent que l'introduction de la 5G ne provoque qu'une faible augmentation de l'exposition moyenne aux champs électromagnétiques.

Quelles données sur d'éventuels effets sanitaires sont disponibles dans cette gamme de fréquences dans la littérature scientifique ?

La littérature scientifique ne fournit pas suffisamment d'études à 3,5 GHz ou dans des fréquences voisines (seulement 5 études et dans des domaines très disparates) pour pouvoir procéder à une évaluation du niveau de preuve d'effets sanitaires éventuels à cette fréquence spécifique.

¹⁴⁷<https://www.arcep.fr/cartes-et-donnees/nos-cartes/deploiement-5g/observatoire-du-deploiement-5g-fevrier-2021.html>.

En matière d'effets sanitaires, peut-on adapter à la fréquence de 3,5 GHz les connaissances disponibles aux fréquences inférieures à 2,5 GHz ?

Existe-t-il une différence notable concernant l'absorption d'énergie électromagnétique (notamment en ce qui concerne la profondeur de pénétration) à 3,5 GHz par rapport aux systèmes mobiles sans fil de générations précédentes (par exemple 2G-4G) ?

La profondeur de pénétration d'un champ électromagnétique dans le corps est plus faible à 3,5 GHz qu'aux fréquences inférieures utilisées par les technologies mobiles actuelles. À titre d'exemple, à 3,5 GHz, la profondeur de pénétration est réduite d'environ 40 % par rapport à 900 MHz. Par ailleurs, en raison des longueurs d'onde dans les tissus plus courtes à 3,5 GHz, l'hétérogénéité de la répartition de la puissance absorbée pourrait être plus importante.

Cependant, dans le cas d'une exposition locale du corps (par exemple par un téléphone mobile), la variabilité de l'absorption due aux différentes situations d'exposition (modèles de téléphones, distance d'utilisation, à la tête, près du tronc ou des membres, contrôle adaptatif de la puissance du téléphone, etc.) est *a priori* plus importante que celle liée à la différence entre les fréquences.

Peu d'études dosimétriques proposant une analyse fine de l'exposition des différents tissus aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz sont cependant disponibles à ce jour.

Existe-t-il des différences concernant les signaux radiofréquences des systèmes 5G à 3,5 GHz par rapport aux précédents systèmes mobiles sans fil (par exemple 2G-4G) qui pourraient avoir une conséquence sur les interactions avec le corps ?

Les caractéristiques des signaux radiofréquences utilisés par la technologie 5G sont complexes, mais similaires à celles des signaux de la technologie 4G. Cependant, le rôle éventuel de l'intermittence des signaux radiofréquences utilisés par les communications mobiles sur les interactions biophysiques mériterait d'être mieux étudié.

L'existence d'effets biologiques parfois observés est-elle liée à la fréquence des champs électromagnétiques ?

Le groupe de travail a tenté de répondre à la question de savoir si, dans la gamme de fréquences proches de 3,5 GHz (845 à 2 450 MHz), il pourrait exister un lien entre la fréquence des champs électromagnétiques et l'apparition d'effets biologiques. À partir d'une bibliographie regroupant des articles ayant étudié au moins deux fréquences et montrant un effet biologique des radiofréquences, les études ciblant des effets cellulaires et moléculaires tendent souvent à montrer que l'intensité des effets biologiques augmente avec la fréquence des signaux étudiés. Par contre, les études sur les effets comportementaux et neurophysiologiques chez l'animal ou chez l'Homme ne montrent pas de lien entre la fréquence des signaux et l'existence des effets étudiés. Il existe donc une incertitude quant au rôle de la fréquence sur l'apparition d'effets biologiques et physiologiques chez l'Homme.

Est-ce que le déploiement de la 5G dans la bande 3,5 GHz présente un risque pour la santé ?

À ce jour, les données disponibles n'ont pas permis de conclure quant à l'existence d'effets sanitaires associés à des fréquences utilisées par les technologies mobiles actuelles. Il paraît difficile d'extrapoler les résultats d'études scientifiques obtenus à des fréquences différentes,

même proches, pour en tirer des conclusions sur les effets biologiques, physiologiques et *a fortiori* sanitaires potentiels dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz.

Néanmoins,

- compte tenu des données disponibles sur les effets sanitaires dans des bandes de fréquences pour lesquelles la profondeur de pénétration est du même ordre de grandeur que dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz,
- et des premières données d'exposition disponibles dans les pays où la 5G est déjà déployée dans la bande 3,5 GHz qui ne montrent pas, à l'heure actuelle, d'augmentation importante de l'exposition moyenne de la population liée au grand nombre de sources de champs électromagnétiques,

le groupe de travail considère qu'il est peu vraisemblable, à ce stade, que le déploiement de la 5G dans la bande de fréquences autour de 3,5 GHz constitue un nouveau risque pour la santé.

Cependant, l'intermittence des signaux des technologies sans fil pourrait influencer l'ensemble des réponses biologiques. Ceci n'a été jusqu'à présent que peu investigué, et reste un questionnement dans l'évaluation des risques sanitaires.

■ Effets sur la santé du déploiement de la 5G dans la bande de fréquences autour de 26 GHz

Existe-t-il des données d'exposition dans la bande de fréquences autour de 26 GHz ?

Aucune donnée d'exposition dans la bande de fréquences spécifique autour de 26 GHz n'est aujourd'hui disponible, le déploiement d'applications 5G étant encore à l'état de projet. Le groupe de travail a cependant souhaité entamer une réflexion sur les aspects biophysiques permettant de formuler une première appréciation qualitative de l'exposition probable dans cette bande de fréquences.

Quelles sont les caractéristiques possibles des futures expositions aux systèmes 5G dans la bande de fréquences autour de 26 GHz ?

L'exposition aux champs électromagnétiques liés aux applications 5G dans la bande 26 GHz se différencie de celle de la bande 3,5 GHz par une profondeur de pénétration des ondes de l'ordre du millimètre, ce qui conduit à une exposition des couches superficielles de la peau ou de l'œil. Les prédictions issues des données expérimentales et de simulations concernant l'exposition à des sources lointaines (distances de plusieurs mètres entre la source et la personne) montrent que les densités de puissance absorbées au niveau de la peau ou de l'œil seront faibles et n'occasionneront que de très faibles élévations de température. Concernant l'exposition à des sources proches (par exemple les téléphones mobiles), les simulations électromagnétiques réalisées sur le couplage entre la tête ou les mains et les antennes miniatures intégrées laissent présager que les niveaux d'exposition en champ proche seront inférieurs à ceux des technologies 3G/4G. L'ensemble de ces résultats devra être confirmé par exemple par les données expérimentales issues des 14 sites d'expérimentation que l'Arcep a autorisé sur une période de 3 ans et dont les premiers retours sont attendus d'ici 2022.

Des études conçues spécifiquement pour étudier les effets sanitaires de la technologie 5G dans cette bande de fréquences ont-elles été publiées ?

Il n'existe pas à ce jour de travaux publiés visant à examiner les effets spécifiques de la 5G dans la bande 26 GHz. C'est pour cette raison que le groupe de travail a considéré une bande de fréquences élargie allant de 18 à 100 GHz. Les données recueillies sont ainsi très disparates en matière de fréquences, de technologies et de types d'effets étudiés.

Quels sont les effets sanitaires étudiés dans la bande de fréquences autour de 26 GHz (18 à 100 GHz) ?

La littérature scientifique disponible a principalement étudié les effets sur la peau, l'œil, les membranes, le système nerveux central et les cellules issues de divers tissus humains ou animaux (peau, neurones, cornée...).

Peau

Les études sont trop diverses et trop peu nombreuses pour conclure à un effet sanitaire de la gamme de fréquences 18 – 100 GHz sur la peau humaine. Ces études ne montrent pas d'effet génotoxique direct, mais l'une d'elles suggère qu'il pourrait y avoir un effet indirect (aneuploïdie). Aucun effet global sur le transcriptome n'a été détecté, mis à part un effet transitoire sur l'expression de quelques rares gènes impliqués dans la réponse des cellules au stress.

Œil

Les travaux effectués sur des lignées cellulaires de cornée et de cristallin ne montrent pas d'effet de l'exposition aux radiofréquences à 40 et 60 GHz. Une étude *in vivo* sur les lapins montre des effets thermiques sur l'œil lors d'une exposition, mais à une très forte puissance (10 à 600 mW/cm²¹⁴⁸).

Système nerveux central

Sur la base d'études orientées pour l'essentiel sur les effets antidouleurs éventuels des radiofréquences (42, 60 et 94 GHz) et leurs mécanismes, les données disponibles (une étude chez l'Homme) ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet sur la nociception ou l'analgésie. De plus, les données *in vitro* sur des neurones en culture de plusieurs espèces animales ne permettent pas de conclure quant à un mécanisme particulier.

Effets génotoxiques

Quatre études *ex vivo* ont étudié l'exposition à des champs électromagnétiques avec des fréquences entre 25 et 60 GHz de lignées cellulaires humaines (fibroblastes, cellules du cristallin, cellules de la cornée) et de leucocytes de rat. Ces études n'ont pas permis de détecter d'effet génotoxique. Néanmoins, une étude déjà citée dans la section « Peau » a détecté des aneuploïdies dans les fibroblastes exposés aux radiofréquences. Les éléments de preuve disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non d'un effet.

Effets sur les membranes

Les études menées sur les membranes cellulaires sont trop peu nombreuses et trop hétérogènes pour conclure quant à l'existence ou non d'un effet biologique. Cependant, les

¹⁴⁸à comparer à la valeur limite de 1 mW/cm².

travaux sur membranes artificielles¹⁴⁹ dans des bandes de fréquences entre 52 et 78 GHz mettent en évidence des modifications à la fois structurales et fonctionnelles.

Etant donné les éléments de preuve existants sur les membranes artificielles, l'augmentation de la perméabilité membranaire observée sur une lignée cellulaire et l'importance des membranes dans les fonctions cellulaires, le groupe de travail considère que les effets des champs électromagnétiques sur les membranes présentent un niveau de preuve limité.

Le déploiement de la 5G dans la bande 26 GHz présente-t-il un risque pour la santé ?

À l'heure actuelle, les données ne sont pas suffisantes pour conclure à l'existence ou non d'effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques dans la bande de fréquences autour de 26 GHz.

7.2 Recommandations du groupe de travail

Le groupe de travail a souhaité formuler sans attendre des recommandations en matière d'études et de recherche.

Études visant à améliorer la caractérisation des expositions

Considérant que :

- il existe très peu de données d'exposition liées aux antennes relais et aux téléphones mobiles en situation réelle ;
- seuls des indicateurs d'exposition fondés sur des simulations numériques sont actuellement disponibles ;
- ces indicateurs n'ont pas été jusqu'à présent validés ou infirmés par des mesures sur le terrain faute de déploiement du réseau 5G ;

le groupe de travail recommande :

- de procéder à des mesures d'exposition due au téléphone mobile en situation d'usage réel dans les différentes bandes prévues pour le déploiement de la 5G ;
- évaluer des situations d'exposition maximale en particulier lors de l'implantation de nouvelles stations de base ;
- de réaliser des campagnes de mesure pour chiffrer l'augmentation des niveaux de champ électromagnétique liée à un nombre important d'utilisateurs connectés simultanément au réseau 5G ;
- mettre en place un programme de surveillance de l'exposition aux champs électromagnétiques afin de suivre les niveaux d'exposition actuels et futurs notamment dans des situations où la 5G se superposera aux signaux 3G/4G pré-existants.

¹⁴⁹ Membranes artificielles vs membranes cellulaires : les membranes artificielles sont des modèles simplifiés de membranes

Études expérimentales chez l'Homme et chez l'animal**S'agissant des bandes 700 MHz, 2,1 GHz et 3,5 GHz :**

Considérant que :

- il n'existe que très peu de publications qui ont examiné les effets biologiques ou sanitaires éventuels des ondes électromagnétiques dans ces bandes de fréquences dans des modèles cellulaires *in vitro*, chez l'animal ou chez l'Homme ;
- les ondes de fréquence 3,5 GHz ont une plus faible pénétration dans les tissus que celles de fréquences plus basses ;

Le groupe de travail recommande :

- de réaliser des études ciblant les effets biologiques, physiologiques ou comportementaux notamment dans les domaines de la cancérogenèse, du fonctionnement cérébral (cognition, mémoire, activité électrique), de la fertilité ou encore de l'électrohypersensibilité en particulier dans la bande 3,5 GHz ;
- de promouvoir des études sur des cellules en culture afin de mesurer des paramètres tels que la viabilité cellulaire et la génotoxicité. Il serait intéressant d'utiliser des approches « omiques » globales sans *a priori* (transcriptome, protéome, métabolome, ...).

S'agissant de la bande de fréquences autour de 26 GHz :

Considérant que peu d'études se sont intéressées à la bande 26 GHz, le groupe de travail recommande :

- de réaliser de nouvelles études dans la bande de fréquences 26 GHz dans des situations d'exposition chronique ou aiguë ;
- de promouvoir les études sur les effets des ondes sur la flore cutanée, qui fait partie du système immunitaire et contribue à la bonne santé de la peau et de l'organisme en formant une barrière protectrice contre les germes pathogènes ; d'étudier la réponse immunitaire adaptative ; d'étudier le micro-environnement cellulaire ;
- d'analyser les effets biologiques et sanitaires chez l'animal en ciblant les organes les plus exposés, par exemple la peau ou l'œil ;
- de réaliser des études approfondies sur des membranes artificielles et cellulaires ;
- de promouvoir des études sur des cellules en culture afin de mesurer des paramètres tels que la viabilité cellulaire et la génotoxicité ; il serait intéressant d'utiliser des approches « omiques » globales sans *a priori* (transcriptome, protéome, métabolome, ...) ;
- d'analyser chez l'Homme ou l'animal les effets des radiofréquences sur le système nerveux (comportement, neurophysiologie, nociception) ;
- d'explorer si les ondes électromagnétiques dans la bande 26 GHz peuvent avoir des effets antidouleurs comme observé à des fréquences plus élevées.

De plus, pour l'ensemble des bandes de fréquences considérées, la question des éventuels effets biologiques de l'intermittence des signaux de certaines technologies sans fil requiert davantage d'études avec des méthodes de qualité rigoureuse.

Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail : 10 mars 2021.

DOCUMENT EN CONSULTATION PUBLIQUE

8 Bibliographie

3GPP. 2016. « TR 38.900 V14.1.0 "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Channel Model for Frequency Spectrum above 6 GHz (Release 14) ». *Tech. Rep.*

Adda, S., T. Aureli, S. D'eli, D. Franci, E. Grillo, M.D. Migliore, S. Pavoncello, F. Schettino, et R.A. Suman. 2020. « Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations ». *IEEE Access* 6: 101448–101463. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998448>.

Aerts, S., L. Verloock, M. Van Den Bossche, D. Colombi, L. Martens, C. Törnevik, et W. Joseph. 2019. « In-Situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies ». *IEEE Access* 7: 184658–184667. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961225>.

Afsset. 2009. « Rapport d'expertise collective, « Les Radiofréquences » », 2009.

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 ». *Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes* 1838 (7): 1710-18. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2014.03.021>.

Alekseev, S. I., M. V. Zhadobov, E. E. Fesenko Jr., et E. E. Fesenko. 2017. « Millimeter Wave Dosimetry at Exposure of Cell Monolayers ». *Biophysics (Russian Federation)* 62 (2): 261-64. <https://doi.org/10.1134/S0006350917020038>.

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. <https://doi.org/10.1134/S0006350912010046>.

Alkis, M. E., H. M. Bilgin, V. Akpolat, S. Dasdag, K. Yegin, M. C. Yavas, et M. Z. Akdag. 2019. « Effect of 900-, 1800-, and 2100-MHz Radiofrequency Radiation on DNA and Oxidative Stress in Brain ». *Electromagn Biol Med* 38 (1): 32-47. <https://doi.org/10.1080/15368378.2019.1567526>.

Aminzadeh, R., A. Thielens, A. Bamba, L. Kone, D. P. Gaillot, M. Lienard, L. Martens, et W. Joseph. 2016. « On-Body Calibration and Measurements Using Personal Radiofrequency Exposimeters in Indoor Diffuse and Specular Environments ». *Bioelectromagnetics* 37 (5): 298-309. <https://doi.org/10.1002/bem.21975>.

ANFR. 2018. « Etude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques : Analyse des résultats de mesures d'exposition du public aux ondes électromagnétiques réalisées en 2017 dans le cadre du dispositif national de surveillance ». In *Rapport ANFR disponible en ligne*.

———. 2019a. « Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 1 : présentation générale de la 5G ». In *Rapport ANFR disponible en ligne*.

———. 2019b. « Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 2 intermédiaire : premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G ». In *Rapport ANFR disponible en ligne*.

———. 2019c. « Lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques ». In *Rapport ANFR disponible en ligne*.

———. 2020a. « Evaluation de l'exposition du public aux ondes électromagnétiques 5G. Volet 2 : premiers résultats de mesures sur les pilotes 5G dans la bande 3400-3800 MHz ». In *Rapport ANFR disponible en ligne*.

———. 2020b. « Rapport sur le recensement des « points atypiques » ». In *Rapport ANFR disponible en ligne*.

ANFR et CSTB. 2020. « Etude de l'exposition du public aux ondes radioélectriques. Simulation de l'évolution de l'exposition du public créée par la téléphonie mobile en zone urbaine très dense (Paris XIV) ». In *Rapport ANFR-CSTB disponible en ligne*.

Anses. 2013. « Rapport d'expertise collective, « Radiofréquences et santé », mise à jour de l'expertise », 2013.

———. 2016. « Rapport d'expertise collective, « Exposition aux radiofréquences et santé des enfants » », 2016.

———. 2019. « Rapport d'expertise collective, « Effets sanitaires liés à l'exposition aux champs électromagnétiques basses fréquences » », 2019.

Anton, E., S. Aurel, S. Gabriela, A. Ciobica, S. Bruma, et C. R. Anton. 2014. « The Involvement of Cutaneous Receptors in the Biological Effects of Electromagnetic Millimeter Waves ». *Archives of Biological Sciences* 66 (4): 1575-80. <https://doi.org/10.2298/ABS1404575A>.

Anton, E., A. Rotaru, D. Covatariu, A. Ciobica, D. Timofte, R. Popescu, et C. Anton. 2015. « Links between Extremely High Frequency Electromagnetic Waves and Their Biological Manifestations ». *Archives of Biological Sciences* 67 (3): 895-97. <https://doi.org/10.2298/ABS140228049A>.

Ashraf, F. B., T. Alam, S. Kibria, et M. T. Islam. 2018. « A Compact Meander Line Elliptic Split Ring Resonator Based Metamaterial for Electromagnetic Shielding ». *Materials Express* 8 (2): 133-40. <https://doi.org/10.1166/mex.2018.1419>.

Balanis, C. 2005. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley-Interscience, USA.

Beneduci, A., K. Cosentino, et G. Chidichimo. 2013. « Millimeter Wave Radiations Affect Membrane Hydration in Phosphatidylcholine Vesicles ». *Materials* 6 (7): 2701-12. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1039/c4sm00551a>.

Beneduci, Amerigo, Luigi Filippelli, Katia Cosentino, Maria L. Calabrese, Rita Massa, et Giuseppe Chidichimo. 2012. « Microwave Induced Shift of the Main Phase Transition in Phosphatidylcholine Membranes ». *Bioelectrochemistry* 84 (avril): 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2011.10.003>.

Bernardi, P., M. Cavagnaro, S. Pisa, et E. Piuze. 1998. « SAR Distribution and Temperature Increase in an Anatomical Model of the Human Eye Exposed to the Field Radiated by the User Antenna in a Wireless LAN ». *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 46 (12): 2074–2082. <https://doi.org/10.1109/22.739285>.

Betzalel, N., P. Ben Ishai, et Y. Feldman. 2018. « The Human Skin as a Sub-THz Receiver – Does 5G Pose a Danger to It or Not? » *Environmental Research* 163: 208-16. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.032>.

Bharti, P. K., H. S. Singh, G. K. Pandey, et M. K. Meshram. 2015. « Thin Profile Wideband Printed Monopole Antenna for Slim Mobile Handsets Applications ». *Progress In Electromagnetics Research C* 57: 149-58. <https://doi.org/10.2528/PIERC15041507>.

Bienkowski, P., M. Zmyslony, J. Karpowicz, P. Poltanski, A. Bortkiewicz, J. Kieliszek, et K. Rydzynski. 2019. « Conditionings of population exposure to electromagnetic fields associated with the rational use of 5G radiocommunication networks in Poland ». *Med Pr*, novembre. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00920>.

Bonisoli-Alquati, Andrea, Anders Pape Møller, Geir Rudolfson, Nicola Saino, Manuela Caprioli, Shanna Ostermiller, et Timothy A. Mousseau. 2011. « The Effects of Radiation on Sperm Swimming Behavior Depend on Plasma Oxidative Status in the Barn Swallow (*Hirundo Rustica*) ». *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A, Molecular & Integrative Physiology* 159 (2): 105-12. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2011.01.018>.

Borraz, O. 2008. *Les politiques du risque*, Les Presses de Sciences Po. Paris.

Carrasco, E., D. Colombi, K.R. Foster, M. Ziskin, et Q. Balzano. s. d. *Exposure assessment of portable wireless devices above 6 GHz*.

Carvalho, C. J. S. de, M. M. Melo, A. F. R. M. Michell, B. B. J. Torres, F. Riet-Correa, R. M. C. Guedes, V. P. Ferraz, B. Soto-Blanco, et S. M. M. S. Silva. 2018. « Different Leaf Extracts from *Brunfelsia Uniflora* in Mice ». *Ciencia Rural* 48 (1). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170246>.

CCARS. 2020. « Comité Científico Asesor en Radiofrecuencias y Salud - Informe sobre Radiofrecuencias y Salud 2016 - 2019 », 2020. <https://ccars.org.es/publicaciones/documentos-elaborados-por-el-ccars/264-informe-sobre-radiofrecuencias-y-salud-2016-2019>.

Celaya-Echarri, M., L. Azpilicueta, J. Karpowicz, V. Ramos, P. Lopez-Iturri, et F. Falcone. 2020. « From 2G to 5G Spatial Modeling of Personal RF EMF Exposure within Urban Public Trams ». *IEEE Access* 8: 100930–100947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997254>.

Cetim. 2019. « Mesure de l'exposition au rayonnement radiofréquence de la téléphonie 5G-Nr en Corée du sud ». In *Rapport d'expertise disponible en ligne*.

Cetin, H., M. Naziroglu, O. Celik, M. Yuksel, N. Pastaci, et M. O. Ozkaya. 2014. « Liver Antioxidant Stores Protect the Brain from Electromagnetic Radiation (900 and 1800 MHz)-Induced Oxidative Stress in Rats during Pregnancy and the Development of Offspring ». *J Matern Fetal Neonatal Med* 27 (18): 1915-21. <https://doi.org/10.3109/14767058.2014.898056>.

Chateauraynaud, et Debaz. 2010. « Le partage de l'hypersensible : le surgissement des électrohypersensibles dans l'espace public ». *Sciences Sociales et Santé* 28, 3: 5–33.

Chen, J., Z. Sun, S. Lv, et W. Yu. 2013. « Effects of Bushen-HuoxueTonglin formula on bFGF in benign prostatic hyperplasia rats ». *Chinese Journal of Andrology* 27 (3): 19-22. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0848.2013.03.004>.

Chiselita, N., A. Usatîi, L. Bejenaru, E. Tofan, et N. Efremova. 2016. « Biosynthetic Potential of *Saccharomyces* Yeasts at the Treatment with Extremely High Frequency Millimeter Waves ». *Analele Universitatii Din Oradea, Fascicula Biologie* 23 (1): 12-16.

Christ, A., A. Klingenberg, T. Samaras, C. Goiceanu, et N. Kuster. 2006. « The dependence of electromagnetic far-field absorption on body tissue composition in the frequency range from 300 MHz to 6 GHz ». *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 54 (5): 2188 – 2195.

Chuyan, E. N., et N. S. Tribrat. 2016. « Changes in Effector Function of Sensory Peptidergic Pervascular Fibers after Multiple Exposures to Low-Intensity Millimeter Radiation ». *Human Physiology* 42 (4): 438-43. <https://doi.org/10.1134/S0362119716010072>.

- Colombi, D., P. Joshi, F. Ghasemifard, V. Narasaraaju, et C. Tornevik. 2020. « Analysis of the Actual Power and EMF Exposure from Base Stations in ACommercial 5G Network ». *Applied Science* 10: 5280. <https://doi.org/10.3390/app10155280>.
- Colombi, D., B. Thors, C. TöRnevik, et Q. Balzano. 2018. « RF Energy Absorption by Biological Tissues in Close Proximity to Millimeter-Wave 5G Wireless Equipment ». *IEEE Access* 6: 4974–4981,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2790038>.
- Corrigan, F., Y. Wu, J. Tuke, J. K. Collier, K. C. Rice, K. R. Diener, J. D. Hayball, L. R. Watkins, A. A. Somogyi, et M. R. Hutchinson. 2015. « Alcohol-Induced Sedation and Synergistic Interactions between Alcohol and Morphine: A Key Mechanistic Role for Toll-like Receptors and MyD88-Dependent Signaling ». *Brain Behav Immun* 45 (mars): 245-52. <https://doi.org/10.1016/j.bbi.2014.12.019>.
- Croft, R. J., S. Leung, R. J. McKenzie, S. P. Loughran, S. Iskra, D. L. Hamblin, et N. R. Cooper. 2010. « Effects of 2G and 3G Mobile Phones on Human Alpha Rhythms: Resting EEG in Adolescents, Young Adults, and the Elderly ». *Bioelectromagnetics* 31 (6): 434-44. <https://doi.org/10.1002/bem.20583>.
- Curtis, J., Hongyu Zhou, et F. Aryanfar. 2016. « A Fully Integrated Ka-Band Front End for 5G Transceiver ». In *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 1–3,. San Francisco, CA. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2016.7540314>.
- Cutz, A. 1989. « Effects of Microwave Radiation on the Eye: The Occupational Health Perspective ». *Lens Eye Toxic Res* 6 (1-2): 379-86.
- D'Agostino, Simona, Chiara Della Monica, Eleonora Palizzi, Fabio Di Pietrantonio, Massimiliano Benetti, Domenico Cannatà, Marta Cavagnaro, Dariush Sardari, Pasquale Stano, et Alfonsina Ramundo-Orlando. 2018. « Extremely High Frequency Electromagnetic Fields Facilitate Electrical Signal Propagation by Increasing Transmembrane Potassium Efflux in an Artificial Axon Model ». *Scientific Reports* 8 (1): 9299. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27630-8>.
- Dancila, D., R. Augustine, F. Topfer, S. Dudorov, X. Hu, L. Emtestam, L. Tenerz, J. Oberhammer, et A. Rydberg. 2014. « Millimeter Wave Silicon Micromachined Waveguide Probe as an Aid for Skin Diagnosis--Results of Measurements on Phantom Material with Varied Water Content ». *Skin Res Technol* 20 (1): 116-23. <https://doi.org/10.1111/srt.12093>.
- Daniel, M., A. Adamowicz-Salach, et H. Szymanik-Grzelak. 2017. « Diagnostic Difficulties in a Patient with Paroxysmal Cold Haemoglobinuria and Acute Kidney Injury ». *Central European Journal of Immunology* 42 (4): 404-6. <https://doi.org/10.5114/ceji.2017.72816>.
- Danker-Hopfe, H., H. Dorn, A. Bahr, P. Anderer, et C. Sauter. 2011. « Effects of Electromagnetic Fields Emitted by Mobile Phones (GSM 900 and WCDMA/UMTS) on the Macrostructure of Sleep ». *J Sleep Res* 20 (1 Pt 1): 73-81. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2010.00850.x>.
- Danker-Hopfe, H., H. Dorn, C. Sauter, G. Schmid, et T. Eggert. 2020. « An Experimental Study on Effects of Radiofrequency Electromagnetic Fields on Sleep in Healthy Elderly Males and Females: Gender Matters! ». *Environ Res* 183 (avril): 109181. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109181>.
- Darapaneni, P., N. S. Moura, D. Harry, D. A. Cullen, K. M. Dooley, et J. A. Dorman. 2019. « Effect of Moisture on Dopant Segregation in Solid Hosts ». *Journal of Physical Chemistry C* 123 (19): 12234-41. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b01067>.

Dasgupta, Subham, Guangxin Wang, Michael T. Simonich, Tingwei Zhang, Lisa Truong, Huaping Liu, et Robyn L. Tanguay. 2020. « Impacts of High Dose 3.5 GHz Cellphone Radiofrequency on Zebrafish Embryonic Development ». *PLOS ONE* 15 (7): e0235869. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235869>.

De Luca, S., R. Fonti, L. Camera, B. Salvatore, A. Faggiano, A. Ciarmiello, S. Segreto, A. Colao, M. Salvatore, et S. Del Vecchio. 2016. « Multimodal Imaging with 18F-FDG-PET/CT and 111In-Octreotide SPECT in Patients with Metastatic Medullary Thyroid Carcinoma ». *Annals of Nuclear Medicine* 30 (3): 234-41. <https://doi.org/10.1007/s12149-015-1056-5>.

Deghoyan, A., A. Heqimyan, A. Nikoghosyan, E. Dadasyan, et S. Ayrapetyan. 2012. « Cell Bathing Medium as a Target for Non Thermal Effect of Millimeter Waves ». *Electromagnetic Biology and Medicine* 31 (2): 132-42. <https://doi.org/10.3109/15368378.2011.624659>.

Demortain, D. 2021. « La couverture médiatique du problème de la 5G en France ». *Une analyse quantitative, Rapport de recherche, LISIS*.

Demortain, et Féron. 2020. *Les risques du déploiement. L'émergence de la controverse sur la 5G en France, Rapport de recherche, LISIS*.

Deruelle, F. 2020. « The Different Sources of Electromagnetic Fields: Dangers Are Not Limited to Physical Health ». *Electromagnetic Biology and Medicine*. <https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1737811>.

Deshmukh, P. S., K. Megha, N. Nasare, B. D. Banerjee, R. S. Ahmed, M. P. Abegaonkar, A. K. Tripathi, et P. K. Mediratta. 2016. « Effect of Low Level Subchronic Microwave Radiation on Rat Brain ». *Biomed Environ Sci* 29 (12): 858-67. <https://doi.org/10.3967/bes2016.115>.

Deshmukh, P. S., N. Nasare, K. Megha, B. D. Banerjee, R. S. Ahmed, D. Singh, M. P. Abegaonkar, A. K. Tripathi, et P. K. Mediratta. 2015. « Cognitive Impairment and Neurogenotoxic Effects in Rats Exposed to Low-Intensity Microwave Radiation ». *Int J Toxicol* 34 (3): 284-90. <https://doi.org/10.1177/1091581815574348>.

Despoisse. s. d. *Thèse de doctorat 2020 Bordeaux, 5G 28 GHz high efficiency integrated phased array transceivers*. Université de Bordeaux.

DGE (Direction générale des entreprises. 2016. « Technologies clés 2020. Préparer l'industrie du futur, Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique ».

Di Ciaula, A. 2018. « Towards 5G Communication Systems: Are There Health Implications? » *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221 (3): 367-75. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1667/rr2949.1>.

Diao. 2020. « Assessment of Absorbed Power Density and Temperature Rise for Nonplanar Body Model under Electromagnetic Exposure above 6 GHz ». *Phys. Med. Biol* 65: 224001.

Diao et al. 2016. « Detailed modeling of palpebral fissure and its influence on SAR and temperature rise in human eye under GHz exposures ». *Bioelectromagnetics* 37: 256–263. <https://doi.org/10.1002/bem.21973>.

Dieudonné, M. 2019. « Controverses autour des champs électromagnétiques et de l'électrohypersensibilité. La construction de problèmes publics 'à bas bruit' » ». *Sante Publique* 31, 1: 43–51.

Donati-Martin, Catherine, Frédéric Percevault, Kate Ryder, Etiam Sani, Jean-Christophe Le Cun, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau, Yves Le Dréan, et Denis Habauzit. 2020. « Effects of

Radiofrequency Radiation on Gene Expression: A Study of Gene Expressions of Human Keratinocytes From Different Origins ». *Bioelectromagnetics* 41 (7): 552-57. <https://doi.org/10.1002/bem.22287>.

Dornuf, F., P. Martín-Mateos, B. Duarte, B. Hils, O. E. Bonilla-Manrique, F. Larcher, P. Acedo, et V. Krozer. 2017. « Classification of Skin Phenotypes Caused by Diabetes Mellitus Using Complex Scattering Parameters in the Millimeter-Wave Frequency Range ». *Scientific Reports* 7 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06034-0>.

Draetta, et Tavner. 2019. « De la 'fronde anti-Linky' à la justification écologique du smart metering : retour sur la genèse d'un projet controversé » ». *Lien social et Politiques* 82: 52-77.

Eggert, T., H. Dorn, C. Sauter, G. Schmid, et H. Danker-Hopfe. 2020. « RF-EMF Exposure Effects on Sleep - Age Doesn't Matter in Men! » *Environ Res* 191 (décembre): 110173. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110173>.

El Halaoui, M., A. Kaabal, H. Asselman, S. Ahyoud, et A. Asselman. 2015. « Dual-Band Planar Inverted-F Antenna with Enhanced Bandwidth by Adding a T-Shaped Slot and a Two Elements for Mobile Phone Applications ». *Progress In Electromagnetics Research C* 59: 149-58. <https://doi.org/10.2528/PIERC15081805>.

Eltiti, S., D. Wallace, A. Ridgewell, K. Zougkou, R. Russo, F. Sepulveda, et E. Fox. 2009. « Short-Term Exposure to Mobile Phone Base Station Signals Does Not Affect Cognitive Functioning or Physiological Measures in Individuals Who Report Sensitivity to Electromagnetic Fields and Controls ». *Bioelectromagnetics* 30 (7): 556-63. <https://doi.org/10.1002/bem.20504>.

Eltiti, S., D. Wallace, A. Ridgewell, K. Zougkou, R. Russo, F. Sepulveda, D. Mirshekar-Syahkal, P. Rasor, R. Deeble, et E. Fox. 2007. « Does Short-Term Exposure to Mobile Phone Base Station Signals Increase Symptoms in Individuals Who Report Sensitivity to Electromagnetic Fields? A Double-Blind Randomized Provocation Study ». *Environ Health Perspect* 115 (11): 1603-8. <https://doi.org/10.1289/ehp.10286>.

Elwood, J Mark. 2012. « Microwaves in the cold war: the Moscow embassy study and its interpretation. Review of a retrospective cohort study ». *Environmental Health* 11 (novembre): 85. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-85>.

EN 62232. 2017. « Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure », 2017.

Ergen, M. 2009. *Principles of OFDM". Chapitre du livre" Mobile Broadband"*. Springer Ed. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68192-4_4.

Ertlav, K., F. Uslusoy, S. Ataizi, et M. Naziroglu. 2018. « Long Term Exposure to Cell Phone Frequencies (900 and 1800 MHz) Induces Apoptosis, Mitochondrial Oxidative Stress and TRPV1 Channel Activation in the Hippocampus and Dorsal Root Ganglion of Rats ». *Metab Brain Dis* 33 (3): 753-63. <https://doi.org/10.1007/s11011-017-0180-4>.

Exposito, I., M.G. Sanchez, et I. Cuinas. 2018. « Uncertainty in Field-Level Measurements of LTE Signals Associated With User Load ». *IEEE Antennas and Wireless Mpropag. Letters* 17 (4): 596-599,. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2805461>.

Falcioni L, Bua L, Tibaldi E, Lauriola M, De Angelis L, Gnudi F, Mandrioli D, Manservigi M, Manservigi F, Manzoli I, Menghetti I, Montella R, Panzacchi S, Sgargi D, Strollo V, Vornoli A, Belpoggi F. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field

- representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environ Res.* 2018 Aug;165:496-503
- Fan, Q. Y., Y. Zhou, M. Zhang, B. Ma, T. Yang, H. Long, Z. Yu, et Z. Li. 2019. « Microwave Ablation of Primary Malignant Pelvic Bone Tumors ». *Frontiers in Surgery* 6. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2019.00005>.
- Ferreira, A. R., F. Bonatto, M. A. de Bittencourt Pasquali, M. Polydoro, F. Dal-Pizzol, C. Fernandez, A. A. de Salles, et J. C. Moreira. 2006. « Oxidative Stress Effects on the Central Nervous System of Rats after Acute Exposure to Ultra High Frequency Electromagnetic Fields ». *Bioelectromagnetics* 27 (6): 487-93. <https://doi.org/10.1002/bem.20233>.
- 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): 528-41. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000571>.
- . 2017. « Thermal Modeling for the next Generation of Radiofrequency Exposure Limits: Commentary ». *Health Physics* 113 (1): 41-53. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000671>.
- Foster, K., M. Ziskin, Q. Balzano, et A. Hirata. 2018. « Thermal Analysis of Averaging Times in Radio-Frequency Exposure Limits Above 1 GHz ». *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2883175>.
- Foster, K.R., et A. Hirata. 2019. « 5G Communications Systems and Radiofrequency Exposure Limits ». *IEEE Future Networks Tech. Focus* 3 (2).
- Foster, K.R., M.C. Ziskin, Q. Balzano, et A. Hirata. 2020. « Transient Thermal Responses of Skin to Pulsed Millimeter Waves ». *IEEE Access* 8: 130239–130251,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008322>.
- Franchini, Valeria, Silvio Ceccuzzi, Andrea Doria, Gian Piero Gallerano, Emilio Giovenale, Gian Luca Ravera, Andrea De Amicis, et al. 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. <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0514-2>.
- Franchini, Valeria, Elisa Regalbuto, Andrea De Amicis, Stefania De Sanctis, Sara Di Cristofaro, Elisa Coluzzi, Jessica Marinaccio, et al. 2018. « Genotoxic Effects in Human Fibroblasts Exposed to Microwave Radiation ». *Health Physics* 115 (1): 126-39. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000871>.
- Franci, D., S. Coltenacci, E. Grillo, S. Pavoncello, T. Aureli, R. Cintoli, et M.D. Migliore. 2020. « An Experimental Investigation on the Impact of Duplexing and Beamforming Techniques in Field Measurements of 5G Signals ». *Electronics* 9: 223. <https://doi.org/10.3390/electronics9020223>.
- . s. d. « 2020b."Experimental Procedure for Fifth Generation (5G) Electromagnetic Field (EMF ». *Measurement and Maximum Power Extrapolation for Human Exposure Assessment."* *Environments* 7 (22). <https://doi.org/10.3390/environments7030022>.
- Franzellitti, S., P. Valbonesi, N. Ciancaglini, C. Biondi, A. Contin, F. Bersani, et E. Fabbri. 2010. « Transient DNA Damage Induced by High-Frequency Electromagnetic Fields (GSM 1.8 GHz) in the Human Trophoblast HTR-8/SVneo Cell Line Evaluated with the Alkaline Comet Assay ». *Mutat Res* 683 (1-2): 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2009.10.004>.
- Furman, Olga, Konstantin Komoshvili, Jakob Levitan, Asher Yahalom, Harry Marks, Dmitri Borodin, et Stella Liberman-Aronov. 2020. « The Lack of Toxic Effect of High-Power Short-

Pulse 101 GHz Millimeter Waves on Healthy Mice ». *Bioelectromagnetics* 41 (3): 188-99. <https://doi.org/10.1002/bem.22247>.

Gajda, Gregory B., Eric Lemay, et Jonathan Paradis. 2019. « Model of Steady-State Temperature Rise in Multilayer Tissues Due to Narrow-Beam Millimeter-Wave Radiofrequency Field Exposure ». *Health Physics* 117 (3): 254-66. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001036>.

Gallerano, G. P., A. Doria, E. Giovenale, A. De Amicis, S. De Sanctis, S. Di Cristofaro, V. Franchini, et al. 2015. « Effects of mm-waves on human fibroblasts in-vitro ». In *2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, 1-2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327476>.

Gandhi, O.P., et A. Riaz. 1986. « Absorption of Millimeter Waves by Human Beings and its Biological Implications ». *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 34 (2): 228–235. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1986.1133316>.

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): 732-38. <https://doi.org/10.1134/S0006350915050061>.

Geyikoğlu, M. D., F. Kaburcuk, et B. Çavuşoğlu. 2019. « Experimental and Computational Analysis of the Effects of Tri-Band Antennas of Wearable Smart Glasses ». *Progress In Electromagnetics Research C* 95: 91-105. <https://doi.org/10.2528/pierc19070403>.

Gibbons, J. A. 2017. « Localized Heat Urticaria from 95-GHz Millimeter Waves ». *Aerospace Medicine and Human Performance* 88 (6): 586-88. <https://doi.org/10.3357/AMHP.4707.2017>.

Groupe de travail Téléphonie mobile et rayonnement. 2019. « Rapport Téléphonie mobile et rayonnement. Publié par le groupe de travail Téléphonie mobile et rayonnement sur mandat du DETEC », 2019.

Gupta, S. K., S. K. Patel, M. S. Tomar, S. K. Singh, M. K. Mesharam, et S. Krishnamurthy. 2019. « Long-Term Exposure of 2450MHz Electromagnetic Radiation Induces Stress and Anxiety like Behavior in Rats ». *Neurochem Int* 128 (septembre): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2019.04.001>.

Guy A.W, Johnson C.C. 1972. « Non-ionizing Electromagnetic Wave Effects in Biological Materials and Systems ». *Proceedings of the IEEE* 60 (6): 692–718.

Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, A. Boriskin, R. Sauleau, et Y. Le Dréan. 2016. « Impact of 60-GHz Millimeter Waves on Stress and Pain-Related Protein Expression in Differentiating Neuron-like Cells ». *Bioelectromagnetics* 37 (7): 444-54. <https://doi.org/10.1002/bem.21995>.

Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, R. Sauleau, Y. L. Drean, et C. Saligaut. 2017. « Effect of Acute Millimeter Wave Exposure on Dopamine Metabolism of NGF-Treated PC12 Cells ». *J Radiat Res* 58 (4): 439-45. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrx004>.

Haas, A. J., Y. Le Page, M. Zhadobov, R. Sauleau, et Y. Le Dréan. 2016. « Effects of 60-GHz Millimeter Waves on Neurite Outgrowth in PC12 Cells Using High-Content Screening ». *Neuroscience Letters* 618: 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.02.038>.

Habauzit D, Le Quément C, Zhabodov M, Martin C, Aubry M, Sauleau R and Le Dréan Y. (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.

Habauzit, Denis, Guillaume Nugue, Frédéric Bourbon, Catherine Martin, Flavia Del Vecchio, Séverine Maunoir-Regimbal, Thomas Poyot, et al. 2020. « Evaluation of the Effect of Chronic 94 GHz Exposure on Gene Expression in the Skin of Hairless Rats In Vivo ». *Radiation Research* 193 (4): 351-58. <https://doi.org/10.1667/RR15470.1>.

Hamed, 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.

Haneda, K. 2016. « Indoor 5G 3GPP-like Channel Models for Office and Shopping Mall Environments ». In *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 694–699,. Kuala Lumpur. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2016.7503868>.

Hardell, L., et R. Nyberg. 2020. « Appeals That Matter or Not on a Moratorium on the Deployment of the Fifth Generation, 5G, for Microwave Radiation » ». *Mol Clin Oncol* 12 (3): 247–257. <https://doi.org/10.3892/mco.2020.1984>.

Hashimoto, Y., A. Hirata, R. Morimoto, S. Aonuma, I. Laakso, K. Jokela, et K. R. Foster. 2017. « On the Averaging Area for Incident Power Density for Human Exposure Limits at Frequencies over 6 GHz ». *Physics in Medicine and Biology* 62 (8): 3124-38. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa5f21>.

Hautcoeur, J., E.Motta Cruz, J. Bartholomew, J. Sarrazin, Y. Mahé, et S. Toutain. 2010. « Low-Cost Printed Antenna Array Built with Hybrid Feed for Urban Microwave Links » ». *IET Microwaves Antenna and Propagation* 4 (9): 1320–1326,.

He, W., B. Xu, M. Gustafsson, Z. Ying, et S. He. 2018. « RF Compliance Study of Temperature Elevation in Human Head Model Around 28 GHz for 5G User Equipment Application: Simulation Analysis ». *IEEE Access* 6: 830–838,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2776145>.

Health Council of Netherlands. 2020a. « 5G and health », 2020.

———. 2020b. « 5G and health - Executive summary », 2020.

———. 2020c. « Background document to the advisory report 5G and health », 2020.

Hietanen, M., A. M. Hamalainen, et T. Husman. 2002. « Hypersensitivity Symptoms Associated with Exposure to Cellular Telephones: No Causal Link ». *Bioelectromagnetics* 23 (4): 264-70. <https://doi.org/10.1002/bem.10016>.

Hietanen, M., T. Kovalä, et A. M. Hamalainen. 2000. « Human Brain Activity during Exposure to Radiofrequency Fields Emitted by Cellular Phones ». *Scand J Work Environ Health* 26 (2): 87-92. <https://doi.org/10.5271/sjweh.516>.

Hintzsche, H., C. Jastrow, T. Kleine-Ostmann, U. Kärst, T. Schrader, et H. Stopper. 2012. « Terahertz Electromagnetic Fields (0.106 THz) Do Not Induce Manifest Genomic Damage In Vitro ». *PLoS ONE* 7 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046397>.

Hirata, A. s. d. *Human Exposure to Radiofrequency Energy above 6 GHz: Review of Computational Dosimetry Studies*.

Hountala, C. D., A. E. Maganioti, C. C. Papageorgiou, E. D. Nanou, M. A. Kyrianiou, V. G. Tsiafakis, A. D. Rabavilas, et C. N. Capsalis. 2008. « The Spectral Power Coherence of the EEG under Different EMF Conditions ». *Neurosci Lett* 441 (2): 188-92. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2008.06.035>.

Hu, S. X., C. L. Fan, L. Yang, et F. R. Sun. 2012. « Local heating of murine skin by millimeter waves based on HBHE ». *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi* 32 (7): 1909-12.

Huang, Y., et J. Wiart. 2017. « Simplified Assessment Method for Population RF Exposure Induced by a 4G Network ». *IEEE J. of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology* 1 (1): 34–40. <https://doi.org/10.1109/JERM.2017.2751751>.

ICNIRP. 1998. « Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ». *Health Physics* 74 (4): 494-522.

———. 2020. « Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 KHz to 300 GHz) ». *Health Physics* 118 (5): 483-524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>.

IEC. 2018. « Methods for the Assessment of Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields Associated with Human Exposure ». *IEC TR*.

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. <https://doi.org/10.1515/jbcpp-2015-0011>.

Jayasanka, S. M. D. H., et T. Asaeda. 2014. « The Significance of Microwaves in the Environment and Its Effect on Plants ». *Environmental Reviews* 22 (3): 220-28. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0061>.

Kaburcuk, F. 2019. « Effects of a Brain Tumor in a Dispersive Human Head on SAR and Temperature Rise Distributions Due to RF Sources at 4G and 5G Frequencies ». *Electromagnetic Biology and Medicine* 38 (2): 168-76. <https://doi.org/10.1080/15368378.2019.1591441>.

Kaur, G., L. A. Thompson, et J. M. Dufour. 2014. « Sertoli Cells--Immunological Sentinels of Spermatogenesis ». *Semin Cell Dev Biol* 30 (juin): 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2014.02.011>.

Keller, H. 2019. « On the Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations ». *Health Physics* 117 (5): 541-45. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001089>.

Khalily, M. 2018. « Indoor wideband directional millimeter wave channel measurements and analysis at 26 GHz, 32 GHz, and 39 GHz ». *Trans. Emerg. Telecommun. Technol* 29.

Kim et al. 2020. « Coverage Extension of Indoor 5G Network Using RoF-Based Distributed Antenna System ». *IEEE Access* 8: 194992–194999,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033592>.

Kleinlogel, H., T. Dierks, T. Koenig, H. Lehmann, A. Minder, et R. Berz. 2008. « Effects of Weak Mobile Phone - Electromagnetic Fields (GSM, UMTS) on Well-Being and Resting EEG ». *Bioelectromagnetics* 29 (6): 479-87. <https://doi.org/10.1002/bem.20419>.

Kojima, M., M. Hanazawa, Y. Yamashiro, H. Sasaki, S. Watanabe, M. Taki, Y. Suzuki, A. Hirata, Y. Kamimura, et K. Sasaki. 2009. « Acute Ocular Injuries Caused by 60-GHz Millimeter-Wave Exposure ». *Health Phys* 97 (3): 212-18. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181abaa57>.

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): 912-25. <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0497-z>.

———. 2019. « Correction to: Ocular Effects of Exposure to 40, 75, and 95 GHz Millimeter Waves (Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, (2018), 39, 9, (912-925),

10.1007/s10762-018-0497-z) ». *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 40 (11-12): 1168-69. <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00641-w>.

Kojima, Masami, Yukihiisa Suzuki, Cheng-Yu Tsai, Kensuke Sasaki, Kanako Wake, Soichi Watanabe, Masao Taki, et al. 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): 390-99. <https://doi.org/10.1007/s10762-014-0142-4>.

Kostoff, R.N., P. Heroux, M. Aschner, et A. Tsatsakis. 2020. « Adverse Health Effects of 5G Mobile Networking Technology under Real-Life Conditions ». *Toxicology Letters* 323: 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.020>.

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). <https://doi.org/10.3390/ijerph13080802>.

Koyama, Shin, Eijiro Narita, Yukihiisa Suzuki, Takeo Shiina, Masao Taki, Naoki Shinohara, et Junji Miyakoshi. 2019. « Long-Term Exposure to a 40-GHz Electromagnetic Field Does Not Affect Genotoxicity or Heat Shock Protein Expression in HCE-T or SRA01/04 Cells ». *Journal of Radiation Research* 60 (4): 417-23. <https://doi.org/10.1093/jrr/rz017>.

Kues, H. A., S. A. D'Anna, R. Osiander, W. R. Green, et J. C. 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. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(199912\)20:8<463::AID-BEM1>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(199912)20:8<463::AID-BEM1>3.0.CO;2-T).

Kues, H. A., J. C. Monahan, S. A. D'Anna, D. S. McLeod, G. A. Luty, et S. Koslov. 1992. « Increased Sensitivity of the Non-Human Primate Eye to Microwave Radiation Following Ophthalmic Drug Pretreatment ». *Bioelectromagnetics* 13 (5): 379-93. <https://doi.org/10.1002/bem.2250130505>.

Kumar, R., P. S. Deshmukh, S. Sharma, et B. Banerjee. 2019. « Activation of Endoplasmic Reticulum Stress in Rat Brain Following Low-Intensity Microwave Exposure ». *Environ Sci Pollut Res Int* 26 (9): 9314-21. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04377-x>.

Laakso, I., R. Morimoto, J. Heinonen, K. Jokela, et A. Hirata. 2017. « Human Exposure to Pulsed Fields in the Frequency Range from 6 to 100 GHz ». *Physics in Medicine and Biology* 62 (17): 6980-92. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa81fe>.

Lahham, A., et H. Ayyad. 2019. « Personal Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields among Palestinian Adults ». *Health Physics* 117 (4): 396-402. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001077>.

Lameth, J., D. Arnaud-Cormos, P. Leveque, S. Boillee, J. M. Edeline, et M. Mallat. 2020. « Effects of a Single Head Exposure to GSM-1800 MHz Signals on the Transcriptome Profile in the Rat Cerebral Cortex: Enhanced Gene Responses Under Proinflammatory Conditions ». *Neurotox Res* 38 (1): 105-23. <https://doi.org/10.1007/s12640-020-00191-3>.

Le Pogam, P., Y. Le Page, D. Habauzit, M. Doué, M. Zhadobov, R. Sauleau, Y. Le Dréan, et D. Rondeau. 2019. « Untargeted Metabolomics Unveils Alterations of Biomembranes Permeability in Human HaCaT Keratinocytes upon 60 GHz Millimeter-Wave Exposure ». *Scientific Reports* 9 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45662-6>.

Le Quément, C., C. Nicolas Nicolaz, M. Zhadobov, F. Desmots, R. Sauleau, M. Aubry, D. Michel, et Y. Le Dréan. 2012. « Whole-Genome Expression Analysis in Primary Human

- Keratinocyte Cell Cultures Exposed to 60GHz Radiation ». *Bioelectromagnetics* 33 (2): 147-58. <https://doi.org/10.1002/bem.20693>.
- Le Quément, C., C. N. Nicolaz, D. Habauzit, M. Zhadobov, R. Sauleau, et Y. Le Dréan. 2014. « Impact of 60-GHz Millimeter Waves and Corresponding Heat Effect on Endoplasmic Reticulum Stress Sensor Gene Expression ». *Bioelectromagnetics* 35 (6): 444-51. <https://doi.org/10.1002/bem.21864>.
- Lee, H. J., Y. B. Jin, T. H. Kim, J. K. Pack, N. Kim, H. D. Choi, J. S. Lee, et Y. S. Lee. 2012. « The Effects of Simultaneous Combined Exposure to CDMA and WCDMA Electromagnetic Fields on Rat Testicular Function ». *Bioelectromagnetics* 33 (4): 356-64. <https://doi.org/10.1002/bem.20715>.
- Lee, H. J., Y. B. Jin, J. S. Lee, S. Y. Choi, T. H. Kim, J. K. Pack, H. D. Choi, N. Kim, et Y. S. Lee. 2011. « Lymphoma Development of Simultaneously Combined Exposure to Two Radiofrequency Signals in AKR/J Mice ». *Bioelectromagnetics* 32 (6): 485-92. <https://doi.org/10.1002/bem.20655>.
- Lee, H. J., J. S. Lee, J. K. Pack, H. D. Choi, N. Kim, S. H. Kim, et Y. S. Lee. 2009. « Lack of Teratogenicity after Combined Exposure of Pregnant Mice to CDMA and WCDMA Radiofrequency Electromagnetic Fields ». *Radiat Res* 172 (5): 648-52. <https://doi.org/10.1667/RR1771.1>.
- Leung, H., C. X. Zhu, D. T. Chan, W. S. Poon, L. Shi, V. C. Mok, et L. K. Wong. 2015. « Ictal High-Frequency Oscillations and Hyperexcitability in Refractory Epilepsy ». *Clin Neurophysiol* 126 (11): 2049-57. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.01.009>.
- 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 and Biology* 64 (6): 065016. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab057a>.
- Li, Xihai, Chao Liu, Wenna Liang, Hongzhi Ye, Wenlie Chen, Ruhui Lin, Zuanfang Li, Xianxiang Liu, et Mingxia Wu. 2014. « Millimeter Wave Promotes the Synthesis of Extracellular Matrix and the Proliferation of Chondrocyte by Regulating the Voltage-Gated K⁺ Channel ». *Journal of Bone and Mineral Metabolism* 32 (4): 367-77. <https://doi.org/10.1007/s00774-013-0513-2>.
- Li, Xihai, Hongzhi Ye, Liangliang Cai, Fangrong Yu, Wenlie Chen, Ruhui Lin, Chunsong Zheng, et al. 2012. « Millimeter Wave Radiation Induces Apoptosis via Affecting the Ratio of Bax/Bcl-2 in SW1353 Human Chondrosarcoma Cells ». *Oncology Reports* 27 (3): 664-72. <https://doi.org/10.3892/or.2011.1558>.
- Li, Z. Q., Y. Zhang, Y. M. Wan, Q. Zhou, C. Liu, H. X. Wu, Y. Z. Mu, Y. F. He, R. Rauniyar, et X. N. Wu. 2020. « Testing of Behavioral and Cognitive Development in Rats after Prenatal Exposure to 1800 and 2400 MHz Radiofrequency Fields ». *J Radiat Res* 61 (2): 197-206. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrz097>.
- Lipman, R. M., B. J. Tripathi, et R. C. Tripathi. 1988. « Cataracts Induced by Microwave and Ionizing Radiation ». *Surv Ophthalmol* 33 (3): 200-210. [https://doi.org/10.1016/0039-6257\(88\)90088-4](https://doi.org/10.1016/0039-6257(88)90088-4).
- 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): 107-12. <https://doi.org/10.3109/08923973.2011.583252>.

Maganioti, A. E., C. D. Hountala, C. C. Papageorgiou, M. A. Kyprianou, A. D. Rabavilas, et C. N. Capsalis. 2010. « Principal Component Analysis of the P600 Waveform: RF and Gender Effects ». *Neurosci Lett* 478 (1): 19-23. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.04.058>.

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). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160810>.

Mailankot, Maneesh, Anil P Kunnath, H Jayalekshmi, Bhargav Koduru, et Rohith Valsalan. 2009. « Radio frequency electromagnetic radiation (RF-EMR) from GSM (0.9/1.8 GHz) mobile phones induces oxidative stress and reduces sperm motility in rats ». *Clinics* 64 (6): 561-65.

Malek, F., K. A. Rani, H. A. Rahim, et M. H. Omar. 2015. « Effect of Short-Term Mobile Phone Base Station Exposure on Cognitive Performance, Body Temperature, Heart Rate and Blood Pressure of Malaysians ». *Sci Rep* 5 (août): 13206. <https://doi.org/10.1038/srep13206>.

Mantash, M. s. d. « Antenne ultra-large bande avec polarisation circulaire pour des applications 5G ». In *Conférence URSI 2020*. Telecom Paris: Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau.

Maqsood, Tooba Hamed and Moazam. 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. <https://doi.org/10.2528/PIERM18061102>.

Markova, E., L. O. Malmgren, et I. Y. Belyaev. 2010. « Microwaves from Mobile Phones Inhibit 53BP1 Focus Formation in Human Stem Cells More Strongly Than in Differentiated Cells: Possible Mechanistic Link to Cancer Risk ». *Environ Health Perspect* 118 (3): 394-99. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900781>.

Martin, Catherine, Frederic Percevault, Kate Ryder, Etiam Sani, Jean-Christophe Le Cun, Maxim Zhadobov, Ronan Sauleau, Yves Le Dréan, et Denis Habauzit. 2020. « Effects of Radiofrequency Radiation on Gene Expression: A Study of Gene Expressions of Human Keratinocytes From Different Origins ». *Bioelectromagnetics* 41 (7): 552-57. <https://doi.org/10.1002/bem.22287>.

Matalatala, M., M. Deruyck, E. Tanghe, S. Goudos, L. Martens, et W. Joseph. 2018. « Joint Optimization towards Power Consumption and Electromagnetic Exposure for Massive MIMO 5G Networks ». In *Proc. of the 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*: 1208-1214.

Mazloun, T., S. Aerts, W. Joseph, et J. Wiart. 2019. « RF-EMF Exposure Induced by Mobile Phones Operating in LTE Small Cells in Two Different Urban Cities" ». *Annales Telecomm* 74: 35-42.

Medbo, J. 2017. *Wireless Urban Propagation Measurements at 2.44*. Édité par G.A.S.S. URSI. Montreal.

Michael H. Repacholi, Kenneth R. Foster. 2004. *Biological Effects of Radiofrequency Fields: Does Modulation Matter? Radiation Research*, 162(2):219-25.

Migliore, M.D. 2019. « Some Notes on the Verification of the Exposure Limits in 5G Systems ». *Proc. of IEEE Int. Symp. on Measurements & Networking*.

Mikayelyan, Y. R., N. S. Baghdasaryan, A. K. Nikoghosyan, S. V. Barseghyan, et S. N. Ayrapetyan. 2012. « The EMF-induced changes in aqua medium's properties depend on

background ionizing radiation, illumination and temperature ». *Environment Systems and Decisions* 32 (2): 179-87.

Miligi, Lucia. 2019. « Radiofrequency electromagnetic fields, mobile phones, and health effects: where are we now? » *Epidemiologia E Prevenzione* 43 (5-6): 374-79. <https://doi.org/10.19191/EP19.5-6.P374.107>.

Miyakoshi, Junji, Hiroshi Tonomura, Shin Koyama, Eijiro Narita, et Naoki Shinohara. 2019. « Effects of Exposure to 5.8 GHz Electromagnetic Field on Micronucleus Formation, DNA Strand Breaks, and Heat Shock Protein Expressions in Cells Derived From Human Eye ». *IEEE Transactions on Nanobioscience* 18 (2): 257-60. <https://doi.org/10.1109/TNB.2019.2905491>.

Morelli, M.S., S. Gallucci, B. Siervo, et V. Hartwig. 2021. « Numerical Analysis of Electromagnetic Field Exposure from 5G Mobile Communications at 28 GHz in Adults and Children Users for Real-World Exposure Scenarios ». *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18: 1073. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031073>.

Moretti, Daniela, André Garenne, Emmanuelle Haro, Florence Poulletier de Gannes, Isabelle Lagroye, Philippe Lévêque, Bernard Veyret, et Noëlle Lewis. 2013. « In-Vitro Exposure of Neuronal Networks to the GSM-1800 Signal ». *Bioelectromagnetics* 34 (8): 571-78. <https://doi.org/10.1002/bem.21805>.

Morimoto, R., A. Hirata, I. Laakso, M.C. Ziskin, et K.R. Foster. 2017. « Time Constants for Temperature Elevation in Human Models Exposed to Dipole Antennas and Beams in the Frequency Range from 1 to 30 GHz ». *Phys Med Biol* 7;62(5):1676-1699. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa5251>.

Morimoto, R., I. Laakso, V. De Santis, et A. Hirata. 2016. « Relationship between Peak Spatial-Averaged Specific Absorption Rate and Peak Temperature Elevation in Human Head in Frequency Range of 1-30 GHz ». *Phys Med Biol* 21;61(14):5406-5425 (juillet). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/14/5406>.

Moulder, J. E. 2012. « Risks of Exposure to Ionizing and Millimeter-Wave Radiation from Airport Whole-Body Scanners ». *Radiat Res* 177 (6): 723-26. <https://doi.org/10.1667/rr2897.1>.

Mumtaz, Sohail, Pradeep Bhartiya, Neha Kaushik, Manish Adhikari, Pradeep Lamichhane, Su-Jae Lee, Nagendra Kumar Kaushik, et Eun Ha Choi. 2020. « Pulsed High-Power Microwaves Do Not Impair the Functions of Skin Normal and Cancer Cells in Vitro: A Short-Term Biological Evaluation ». *Journal of Advanced Research* 22 (mars): 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.11.007>.

Naqvi, S., N. Hussain, et A. Iqbal. 2020. « Integrated LTE and Millimeter-Wave 5G MIMO Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals ». *Sensors (Basel)* 20(14):3926 (juillet). <https://doi.org/10.3390/s20143926>.

Naqvi, S.I. 2019. « An Integrated Antenna System for 4G and Millimeter-Wave 5G Future Handheld Devices ». *IEEE Access* 7: 116555–116566. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936513>.

Narayanan, Sareesh Naduvil, Raghu Jetti, Kavindra Kumar Kesari, Raju Suresh Kumar, Satheesha B. Nayak, et P. Gopalakrishna Bhat. 2019. « Radiofrequency Electromagnetic Radiation-Induced Behavioral Changes and Their Possible Basis ». *Environmental Science and Pollution Research International* 26 (30): 30693-710. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06278-5>.

Narinyan, Lilia, et Sinerik Ayrapetyan. 2017. « Cyclic AMP-Dependent Signaling System Is a Primary Metabolic Target for Non-Thermal Effect of Microwaves on Heart Muscle Hydration ». *Electromagnetic Biology and Medicine* 36 (2): 182-91. <https://doi.org/10.1080/15368378.2016.1241803>.

Nau, J. Y. 2019. « When will we know the possible health effects of “5G”? » *Revue Medicale Suisse* 15 (669): 2010-11.

Nelson, David A., Silas J. Leavesley, Carmen D. Zirlott, Xi-Ming Yang, et James M. Downey. 2018. « Feasibility of Using Thermal Response to Ka Band Millimeter Wave Heating to Assess Skin Blood Flow ». *Physiological Measurement* 39 (4): 045001. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aab4d4>.

Neresini, et Lorenzet. 2016. « Can Media Monitoring Be a Proxy for Public Opinion about Technoscientific Controversies? The Case of the Italian Public Debate on Nuclear Power » *Public Understanding of Science* 25 (ue 2): 171–185.

Neufeld, Esra, Eduardo Carrasco, Manuel Murbach, Quirino Balzano, Andreas Christ, et Niels Kuster. 2018. « Theoretical and Numerical Assessment of Maximally Allowable Power-Density Averaging Area for Conservative Electromagnetic Exposure Assessment above 6 GHz ». *Bioelectromagnetics* 39 (8): 617-30. <https://doi.org/10.1002/bem.22147>.

Neufeld, Esra, et Niels Kuster. 2018. « Systematic Derivation of Safety Limits for Time-Varying 5G Radiofrequency Exposure Based on Analytical Models and Thermal Dose ». *Health Physics* 115 (6): 705-11. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000930>.

Nguyen, Phong Thanh, Amin Abbosh, et Stuart Crozier. 2017. « Three-Dimensional Microwave Hyperthermia for Breast Cancer Treatment in a Realistic Environment Using Particle Swarm Optimization ». *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering* 64 (6): 1335-44. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2602233>.

Nisbet, H. O., A. Akar, C. Nisbet, M. Y. Gulbahar, A. Ozak, C. Yardimci, et S. Comlekci. 2016. « Effects of Electromagnetic Field (1.8/0.9 GHz) Exposure on Growth Plate in Growing Rats ». *Res Vet Sci* 104 (février): 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2015.11.002>.

Nonato, Dayanne Terra Tenório, Silvânia Maria Mendes Vasconcelos, Mário Rogério Lima Mota, Paulo Góberlânio de Barros Silva, Arcelina Pacheco Cunha, Nágila Maria Pontes Silva Ricardo, Maria Gonçalves Pereira, Ana Maria Sampaio Assreuy, et Edna Maria Camelo Chaves. 2018. « The Anticonvulsant Effect of a Polysaccharide-Rich Extract from Genipa Americana Leaves Is Mediated by GABA Receptor ». *Biomedicine & Pharmacotherapy = Biomedecine & Pharmacotherapie* 101 (mai): 181-87. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.02.074>.

OFCOM. 2020. « Electromagnetic field measurements near 5G mobile phone base stations: Summary of results ». In *Rapport disponible en ligne*. https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf_file/0015/190005/emf-test-summary.pdf.

Ojaroudi Parchin, N., M. Alibakhshikenari, H. Jahanbakhsh Basherlou, A. Abd-Alhameed, Rodriguez R., Limiti J., et E. 2019. « MM-Wave Phased Array Quasi-Yagi Antenna for the Upcoming 5G ». *Cellular Communications. Appl. Sci* 9: 978. <https://doi.org/10.3390/app9050978>.

Ojaroudi Parchin, Naser, Haleh Jahanbakhsh Basherlou, Yasir I. A. Al-Yasir, Atta Ullah, Raed A. Abd-Alhameed, et James M. Noras. 2019. « Multi-Band MIMO Antenna Design with User-Impact Investigation for 4G and 5G Mobile Terminals ». *Sensors (Basel, Switzerland)* 19 (3). <https://doi.org/10.3390/s19030456>.

Ollitrault, S. 2014. « Les mobilisations contre les antennes de téléphonie mobile : les profanes dans l'espace public » ». *Revue Juridique de l'Ouest* 27, 1: 15–28.

Orlacchio, Rosa, Yann Le Page, Yves Le Dréan, Rémy Le Guével, Ronan Sauleau, Stanislav Alekseev, et Maxim Zhadobov. 2019. « Millimeter-Wave Pulsed Heating in Vitro: Cell Mortality and Heat Shock Response ». *Scientific Reports* 9 (1): 15249. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51731-7>.

Orlacchio, Rosa, Maxim Zhadobov, Stanislav I. Alekseev, Denys Nikolayev, Ronan Sauleau, Yann Le Page, et Yves Le Dréan. 2019. « Millimeter-Wave Heating in In Vitro Studies: Effect of Convection in Continuous and Pulse-Modulated Regimes ». *Bioelectromagnetics* 40 (8): 553-68. <https://doi.org/10.1002/bem.22223>.

Owda, Amani Yousef, Majdi Owda, et Nacer-Ddine Rezgui. 2020. « Synthetic Aperture Radar Imaging for Burn Wounds Diagnostics ». *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (3). <https://doi.org/10.3390/s20030847>.

Owda, Amani Yousef, Neil Salmon, Alexander J. Casson, et Majdi Owda. 2020. « The Reflectance of Human Skin in the Millimeter-Wave Band ». *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (5). <https://doi.org/10.3390/s20051480>.

Owda, Amani Yousef, Neil Salmon, Stuart William Harmer, Sergiy Shylo, Nicholas John Bowring, Nacer Ddine Rezgui, et Mamta Shah. 2017. « Millimeter-Wave Emissivity as a Metric for the Non-Contact Diagnosis of Human Skin Conditions ». *Bioelectromagnetics* 38 (7): 559-69. <https://doi.org/10.1002/bem.22074>.

Ozorak, A., M. Naziroglu, O. Celik, M. Yuksel, D. Ozcelik, M. O. Ozkaya, H. Cetin, M. C. Kahya, et S. A. Kose. 2013. « Wi-Fi (2.45 GHz)- and Mobile Phone (900 and 1800 MHz)-Induced Risks on Oxidative Stress and Elements in Kidney and Testis of Rats during Pregnancy and the Development of Offspring ». *Biol Trace Elem Res* 156 (1-3): 221-29. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9836-z>.

Parsa, A., N. Ibrahim, B. Hassan, A. Motroni, P. van der Stelt, et D. Wismeijer. 2013. « Influence of Cone Beam CT Scanning Parameters on Grey Value Measurements at an Implant Site ». *Dento Maxillo Facial Radiology* 42 (3): 79884780. <https://doi.org/10.1259/dmfr/79884780>.

Partyla, Tomasz, Henriette Hacker, Hardy Edinger, Bianca Leutzow, Joern Lange, et Taras 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): 980-85. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000001657>.

Paulraj, R., et J. Behari. 2011. « Effects of Low Level Microwave Radiation on Carcinogenesis in Swiss Albino Mice ». *Mol Cell Biochem* 348 (1-2): 191-97. <https://doi.org/10.1007/s11010-010-0654-8>.

Pawlak, P. Krawiec, R., et J. Żurek. 2019. « On Measuring Electromagnetic Fields in 5G Technology ». *IEEE ACCESS* 7: 29826–29835. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2902481>.

Pearce, J. M. 2020. « Limiting Liability with Positioning to Minimize Negative Health Effects of Cellular Phone Towers ». *Environmental Research* 181 (février): 108845. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108845>.

Poljak, D., et M. Cvetkovic. 2019. *Realistic Models for Human Exposure to High Frequency (HF) Radiation*.

- Prost, M., G. Olchowik, W. Hautz, et R. Gaweda. 1994. « Experimental studies on the influence of millimeter radiation on light transmission through the lens ». *Klin Oczna* 96 (8-9): 257-59.
- Radzievsky, A. A., O. V. Gordienko, 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. <https://doi.org/10.1002/bem.20389>.
- Raju G.S.N, Rani G.Radha. 2013. « Transmission and Reflection Characteristics of Electromagnetic Energy in Biological Tissues ». *International Journal of Electronics and Communication Engineering* 6, Number 1: 119–129.
- Raney, G., B. Unruh, R. Lovestead, et B. Winther. 2018. « 64-Element 28 Gigahertz Phased Array 5G Prototyping Platform ». In *2018 11th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM, 1–4, Boulder, CO, USA*. <https://doi.org/10.1109/GSMM.2018.8439161>.
- Raposo, E., N. Bertozzi, F. Simonacci, et M. P. Grieco. 2018. « Therapeutic Effects of a Pulsed Electromagnetic Device in Chronic Cutaneous Ulcers of the Lower Limbs ». *Wound Medicine* 20: 18-20. <https://doi.org/10.1016/j.wndm.2017.12.003>.
- RIVM. 2018. « Comparison of International Policies on Electromagnetic Fields (Power Frequency and Radiofrequency Fields) », 2018.
- Roach, William P., éd. 2009. *Radio Frequency Radiation Dosimetry Handbook*. Fifth. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a536009.pdf>.
- 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). <https://doi.org/10.1098/rsif.2017.0585>.
- Romanenko, S., A. R. Harvey, L. Hool, S. Fan, et V. P. Wallace. 2019. « Millimeter Wave Radiation Activates Leech Nociceptors via TRPV1-Like Receptor Sensitization ». *Biophysical Journal* 116 (12): 2331-45. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2019.04.021>.
- 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 ». *Journal of Neurophysiology* 112 (10): 2423-31. <https://doi.org/10.1152/n.00357.2014>.
- Ruigrok, H. J., D. Arnaud-Cormos, A. Hurtier, E. Poque, F. P. de Gannes, G. Ruffie, F. Bonnaudin, et al. 2018. « Activation of the TRPV1 Thermoreceptor Induced by Modulated or Unmodulated 1800 MHz Radiofrequency Field Exposure ». *Radiat Res* 189 (1): 95-103. <https://doi.org/10.1667/rr14877.1>.
- Russell, C. L. 2018. « 5 G Wireless Telecommunications Expansion: Public Health and Environmental Implications ». *Environmental Research* 165: 484-95. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.016>.
- Sacco, G., S. Pisa, et M. Zhadobov. s. d. « Impact of Textile on Electromagnetic Power and Heating in Near-Surface Tissues at 26 GHz and 60 GHz ». *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*. <https://doi.org/10.1109/JERM.2020.3042390>.
- Samaras, T., et N. Kuster. 2019. « Theoretical Evaluation of the Power Transmitted to the Body as a Function of Angle of Incidence and Polarization at Frequencies >6 GHz and Its Relevance for Standardization ». *Bioelectromagnetics* 40 (2): 136-39. <https://doi.org/10.1002/bem.22170>.

Samsonov, A., et S. V. Popov. 2013. « The Effect of a 94GHz Electromagnetic Field on Neuronal Microtubules ». *Bioelectromagnetics* 34 (2): 133-44. <https://doi.org/10.1002/bem.21760>.

Sasaki, K., M. Mizuno, K. Wake, et S. Watanabe. 2017. « Monte Carlo simulations of skin exposure to electromagnetic field from 10 GHz to 1 THz ». *Phys Med Biol* 9;62(17):6993-7010. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa81fc>.

Sasaki, Kensuke, Taiji Sakai, Tomoaki Nagaoka, Kanako Wake, Soichi Watanabe, Masami Kojima, Nailia Hasanova, Hiroshi Sasaki, Kazuyuki Sasaki, et Yukihisa Suzuki. 2014. « Dosimetry using a localized exposure system in the millimeter-wave band for in vivo studies on ocular effects ». *IEEE transactions on microwave theory and techniques* 62 (7): 1554-64.

Sauter, C., H. Dorn, A. Bahr, M. L. Hansen, A. Peter, M. Bajbouj, et H. Danker-Hopfe. 2011. « Effects of Exposure to Electromagnetic Fields Emitted by GSM 900 and WCDMA Mobile Phones on Cognitive Function in Young Male Subjects ». *Bioelectromagnetics* 32 (3): 179-90. <https://doi.org/10.1002/bem.20623>.

Schneider, J., et M. Stangassinger. 2014. « Nonthermal Effects of Lifelong High-Frequency Electromagnetic Field Exposure on Social Memory Performance in Rats ». *Behav Neurosci* 128 (5): 633-37. <https://doi.org/10.1037/a0037299>.

Serghiou, D., M. Khalily, V. Singh, A. Araghi, et R. Tafazolli. 2020. « Sub-6 GHz Dual-Band 8 × 8 MIMO Antenna for 5G Smartphones ». *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 19. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3008962>.

Shapiro, M. G., M. F. Priest, P. H. Siegel, et F. Bezanilla. 2013. « Thermal Mechanisms of Millimeter Wave Stimulation of Excitable Cells ». *Biophysical Journal* 104 (12): 2622-28. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2013.05.014>.

Sheppard, Asher R., et Mays L. Swicord Quirino Balzano. 2008. « Quantitative Evaluations of Mechanisms of Radiofrequency Interactions with Biological Molecules and Processes ». *Health Physics* 95 (4): 365–396.

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 ». In *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo*, 166-69.

Shikhantsov, S., A. Thielens, G. Vermeeren, P. Demeester, L. Martens, G. Torfs, et W. Joseph. 2020. « Massive MIMO Propagation Modeling with User-Induced Coupling Effects Using Ray-Tracing and FDTD ». *IEEE J. on Selected Areas in Communications* 39 (8): 1955–1963. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000874>.

Shikhantsov, S., A. Thielens, G. Vermeeren, E. Tanghe, P. Demeester, L. Martens, G. Torfs, et W. Joseph. 2019. « Hybrid Ray-Tracing/FDTD Method for Human Exposure Evaluation of a Massive MIMO Technology in an Industrial Indoor Environment ». *IEEE Access* 7: 21020–21031. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897921>.

Shirai, T., T. Ichihara, K. Wake, S. Watanabe, Y. Yamanaka, M. Kawabe, M. Taki, et al. 2007. « Lack of Promoting Effects of Chronic Exposure to 1.95-GHz W-CDMA Signals for IMT-2000 Cellular System on Development of N-EthylNitrosourea-Induced Central Nervous System Tumors in F344 Rats ». *Bioelectromagnetics* 28 (7): 562-72. <https://doi.org/10.1002/bem.20324>.

Shirai, T., M. Kawabe, T. Ichihara, O. Fujiwara, M. Taki, S. Watanabe, K. Wake, et al. 2005. « Chronic Exposure to a 1.439 GHz Electromagnetic Field Used for Cellular Phones Does Not

Promote N-EthylNitrosourea Induced Central Nervous System Tumors in F344 Rats ». *Bioelectromagnetics* 26 (1): 59-68. <https://doi.org/10.1002/bem.20079>.

Shrivastava, Purva, et Rama Rao. 2017. « Investigations of SAR Distributions and Temperature Elevation on Human Body at 60 GHz with Corrugated Antipodal Linear Tapered Slot Antenna ». *Progress In Electromagnetics Research M* 59 (août): 111-21. <https://doi.org/10.2528/PIERM17041707>.

Siervo, B., M. S. Morelli, L. Landini, et V. Hartwig. 2018. « Numerical Evaluation of Human Exposure to WiMax Patch Antenna in Tablet or Laptop ». *Bioelectromagnetics* 39 (5): 414-22. <https://doi.org/10.1002/bem.22128>.

Simkó, M., et M. O. Mattsson. 2019. « 5G Wireless Communication and Health Effects—A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 (18). <https://doi.org/10.3390/ijerph16183406>.

Sinotova OA, Novoselova EG, Glushkova OV, Fesenko EE(2004) A comparison of the effects of millimeter and centimeterwaves on tumor necrosis factor production in mouse cells. *BioWzika* 49(3):545–55016. Li X, Du M, Liu X, --

Sirav, B., et N. Seyhan. 2009. « Blood-Brain Barrier Disruption by Continuous-Wave Radio Frequency Radiation ». *Electromagn Biol Med* 28 (2): 215-22. <https://doi.org/10.1080/15368370802608738>.

———. 2011. « Effects of Radiofrequency Radiation Exposure on Blood-Brain Barrier Permeability in Male and Female Rats ». *Electromagn Biol Med* 30 (4): 253-60. <https://doi.org/10.3109/15368378.2011.600167>.

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 ». *Bulletin of Experimental Biology and Medicine* 160 (4): 425-28. <https://doi.org/10.1007/s10517-016-3187-7>.

Smith, P., N. Kuster, S. Ebert, et H. J. Chevalier. 2007. « GSM and DCS Wireless Communication Signals: Combined Chronic Toxicity/Carcinogenicity Study in the Wistar Rat ». *Radiat Res* 168 (4): 480-92. <https://doi.org/10.1667/RR0680.1>.

Soghomonyan, D., K. Trchounian, et A. Trchounian. 2016. « Millimeter Waves or Extremely High Frequency Electromagnetic Fields in the Environment: What Are Their Effects on Bacteria? » *Applied Microbiology and Biotechnology* 100 (11): 4761-71. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7538-0>.

SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. 2018. « Recent Research on EMF and Health Risk Twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2017 », 2018.

———. 2019. « Recent Research on EMF and Health Risk -Thirteenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2018 », 2019.

———. 2020. « Recent Research on EMF and Health Risk - Fourteenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2019 », 2020.

Soubere Mahamoud Y, Aite M, Martin C, Zhabodov M, Sauleau R, Le Dréan Y and Habauzit D. 2016, Additive Effects of Millimeter Waves and 2-Deoxyglucose Co-Exposure on the Human Keratinocyte Transcriptome. *PLoS ONE* 11(8): e0160810. doi:10.1371/journal.pone.0160810.

Subbotina, T. I., O. V. Tereshkina, A. A. Khadartsev, et A. A. Yashin. 2006. « Effect of Low-Intensity Extremely High Frequency Radiation on Reproductive Function in Wistar Rats ».

Bulletin of Experimental Biology and Medicine 142 (2): 189-90. <https://doi.org/10.1007/s10517-006-0324-8>.

Sukiasyan, A., Y. Mikaelyan, et S. Ayrapetyan. 2012. « Comparative Study of Non-Ionizing and Ionizing Radiation Effect on Hydration of Winter Wheat Seeds in Metabolic Active and Inactive States ». *Environmentalist* 32 (2): 188-92. <https://doi.org/10.1007/s10669-012-9392-7>.

Sun, S., I. Titushkin, J. Varner, et M. Cho. 2012. « Millimeter Wave-Induced Modulation of Calcium Dynamics in an Engineered Skin Co-Culture Model: Role of Secreted ATP on Calcium Spiking ». *J Radiat Res* 53 (2): 159-67. <https://doi.org/10.1269/jrr.11037>.

Tan, S., H. Wang, X. Xu, L. Zhao, J. Zhang, J. Dong, B. Yao, H. Zhou, Y. Gao, et R. Peng. 2017. « Study on Dose-Dependent, Frequency-Dependent, and Accumulative Effects of 1.5 GHz and 2.856 GHz Microwave on Cognitive Functions in Wistar Rats ». *Sci Rep* 7 (1): 10781. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11420-9>.

Thors, B., A. Furuskär, D. Colombi, et C. Törnevik. 2017. « Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO ». *IEEE Access* 5: 19711–19719. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2753459>.

Torgomian, E., V. Oganian, C. Blbulian, et A. Trchunian. 2013. « Changes in ion transport through membranes, ATPase activity and antibiotics effects in *Enterococcus hirae* after low intensity electromagnetic irradiation of 51,8 and 53,0 GHz frequencies ». *Biofizika* 58 (4): 674-80.

Trainer, T. D. 1987. « Histology of the Normal Testis ». *The American Journal of Surgical Pathology* 11 (10): 797-809. <https://doi.org/10.1097/00000478-198710000-00007>.

Usichenko, Taras I., Hardy Edinger, Vasyl V. Gizhko, Christian Lehmann, Michael Wendt, et Frank Feyerherd. 2006. « Low-Intensity Electromagnetic Millimeter Waves for Pain Therapy ». *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine: ECAM* 3 (2): 201-7. <https://doi.org/10.1093/ecam/nel012>.

Varsier, N., D. Plets, Y. Corre, G. Vermeeren, W. Joseph, S. Aerts, L. Martens, et J. Wiart. 2015. « A novel method to assess human population exposure induced by a wireless cellular network ». *Bioelectromagnetics* 36 (2): 451–463. <https://doi.org/10.1002/bem.21928>.

Vecsei, Z., A. Csatho, G. Thuroczy, et I. Hernadi. 2013. « Effect of a Single 30 Min UMTS Mobile Phone-like Exposure on the Thermal Pain Threshold of Young Healthy Volunteers ». *Bioelectromagnetics* 34 (7): 530-41. <https://doi.org/10.1002/bem.21801>.

Vecsei, Z., B. Knakker, P. Juhasz, G. Thuroczy, A. Trunk, et I. Hernadi. 2018. « Short-Term Radiofrequency Exposure from New Generation Mobile Phones Reduces EEG Alpha Power with No Effects on Cognitive Performance ». *Sci Rep* 8 (1): 18010. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36353-9>.

Vecsei, Z., G. Thuroczy, et I. Hernadi. 2018. « The Effect of a Single 30-Min Long Term Evolution Mobile Phone-Like Exposure on Thermal Pain Threshold of Young Healthy Volunteers ». *Int J Environ Res Public Health* 15 (9). <https://doi.org/10.3390/ijerph15091849>.

Vilagosh, Z., A. Lajevardipour, et A. Wood. 2020. « Computer Simulation Study of the Penetration of Pulsed 30, 60 and 90 GHz Radiation into the Human Ear ». *Sci Rep* 10: 1479. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58091-7>.

- Violette, E.J., R.H. Espeland, R.O. DeBolt, et F.K. Schwing. 1988. « Millimeter-Wave Propagation at Street Level in an Urban Environment ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26 (3): 368–380. <https://doi.org/10.1109/36.3038>.
- Vlasova, Irina I., Elena V. Mikhalechik, Alexandr A. Gusev, Nadezhda G. Balabushevich, Sergey A. Gusev, et Konstantin D. Kazarinov. 2018. « Extremely High-Frequency Electromagnetic Radiation Enhances Neutrophil Response to Particulate Agonists ». *Bioelectromagnetics* 39 (2): 144-55. <https://doi.org/10.1002/bem.22103>.
- Vogt, S., M. Detert, D. Wagner, J. Wessel, R. Ramzan, W. Nimphius, A. Ramaswamy, et al. 2018. « A Newly Developed Mm-Wave Sensor for Detecting Plaques of Arterial Vessels ». *Thoracic and Cardiovascular Surgeon* 66 (1): 91-98. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1606318>.
- 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 ». *Bulletin of Experimental Biology and Medicine* 157 (5): 574-76. <https://doi.org/10.1007/s10517-014-2618-6>.
- Walther, D., et K. T. Chou. 2012. « Potential health risks and risk management issues as a result of introducing WiMAX technology in Taiwan ». *Taiwan Journal of Public Health* 31 (5): 399-411.
- Wang, H., S. Tan, J. Dong, J. Zhang, B. Yao, X. Xu, Y. Hao, et al. 2019. « ITRAQ Quantitatively Proteomic Analysis of the Hippocampus in a Rat Model of Accumulative Microwave-Induced Cognitive Impairment ». *Environ Sci Pollut Res Int* 26 (17): 17248-60. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04873-0>.
- Wang, Q. 2017. « Attenuation by a Human Body and Trees as Well as Material Penetration Loss in 26 and 39 GHz Millimeter Wave Bands ». *International Journal of Antennas and Propagation*, 1–8.
- Wang, W., H. X. Liu, D. W. Wang, H. Y. Zuo, et R. Y. Peng. 2013. « Changes in Ca(2+) concentration and caspase-3 expression and their relationship in Raji cells exposed to electromagnetic radiation ». *Zhonghua lao dong wei sheng zhi ye bing za zhi = Zhonghua laodong weisheng zhiyebing zazhi = Chinese journal of industrial hygiene and occupational diseases* 31 (2): 104-7.
- Werner, R., P. Knipe, et S. Iskra. 2019. « A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna ». *IEEE Access* 7: 170682–170689. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2955715>.
- Wessapan, T., et P. Rattanadecho. 2014. « Influence of Ambient Temperature on Heat Transfer in the Human Eye during Exposure to Electromagnetic Fields at 900 MHz ». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 70: 378–388.
- 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 Suppl 1 (mai): 590-99. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0272.2011.01232.x>.
- Wu M, Ye H, Lin J, Chen W, Wu G (2010) Millimeter wave treatment inhibits NO-induced apoptosis of chondrocytes through the p38MAPK pathway. *Int J Mol Med* 25(3):393–399
- Wu, T., T.S. Rappaport, et C.M. Collins. 2015. « The Human Body and Millimeter-Wave Wireless Communication Systems: Interactions and Implications ». In *2015 IEEE International*

Conference on Communications (ICC, 2423–2429,. London. <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7248688>.

Xia, Lu, Qing-Lu Luo, Hai-Dan Lin, Jin-Long Zhang, Hua Guo, et Cheng-Qi He. 2012. « The Effect of Different 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): 2847-56. <https://doi.org/10.1007/s00296-011-2080-y>.

Xu, B., K. Zhao, Z. Ying, D. Sjöberg, W. He, et S. He. 2019. « Analysis of Impacts of Expected RF EMF Exposure Restrictions on Peak EIRP of 5G User Equipment at 28 GHz and 39 GHz Bands ». *IEEE Access* 7: 20996–21005,. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897271>.

Yinhui, P., G. Hui, L. Lin, A. Xin, et T. Qinyou. 2019. « Effect of Cell Phone Radiation on Neutrophil of Mice ». *Int J Radiat Biol* 95 (8): 1178-84. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1607605>.

Zhadobov, Maxim, Stanislav I. Alekseev, Yves Le Dréan, Ronan Sauleau, et Evgeny E. Fesenko. 2015. « Millimeter Waves as a Source of Selective Heating of Skin ». *Bioelectromagnetics* 36 (6): 464-75. <https://doi.org/10.1002/bem.21929>.

Zhadobov, Maxim, Stanislav I. Alekseev, Ronan Sauleau, Yann Le Page, Yves Le Dréan, et Evgeny E. Fesenko. 2017. « Microscale Temperature and SAR Measurements in Cell Monolayer Models Exposed to Millimeter Waves ». *Bioelectromagnetics* 38 (1): 11-21. <https://doi.org/10.1002/bem.21999>.

Zhadobov, Maxim, Ronan Sauleau, Robin Augustine, Catherine Le Quément, Yves Le Dréan, et Daniel Thouroude. 2012. « Near-field dosimetry for in vitro exposure of human cells at 60\,GHz. » *Bioelectromagnetics* 33 (1): 55-64. <https://doi.org/10.1002/bem.20685>.

Zhang. 2019. « Design and Implementation of 28GHz Phased Array Antenna System ». In *2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS, 1–3,. Guangzhou, China*. <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2019.8804044>.

Zhang, Y., J. Ding, W. Duan, et W. Fan. 2005. « Influence of Pulsed Electromagnetic Field with Different Pulse Duty Cycles on Neurite Outgrowth in PC12 Rat Pheochromocytoma Cells ». *Bioelectromagnetics* 26 (5): 406-11. <https://doi.org/10.1002/bem.20116>.

Zhang Yan-wen, Yao Quan, Xu Shang-cheng, Yu Zheng-ping, et Zhang Guang-bin. 2013. « Effects of acute millimeter wave exposure on the expression of substance P and c-fos in rat spinal cord ». *Medical Journal of Chinese People's Liberation Army* 38 (4): 329-33.

Zhangwei Wang, James C.Lin. 2007. « Hearing of Microwave Pulses by Humans and Animals: Effects, Mechanism, and Thresholds ». *Health Physics* 92, Number 6: 621–628.

Zhao, J.X., S.G. Zhao, et W.R. Sun. 2006. « SAR EVALUATION IN THE 0.25 MM HUMAN EYE MODEL EXPOSED TO 30 GHz MILLIMETER WAVE ». *Int J Infrared Milli Waves* 27: 293–300. <https://doi.org/10.1007/s10762-006-9064-0>.

Zhao, K., Z. Ying, et S. He. 2016. « EMF Exposure Study Concerning mmWave Phased Array in Mobile Devices for 5G Communication ». In *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15:1132–1135,. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2015.2496229>.

Ziemann, C., H. Brockmeyer, S. B. Reddy, Vijayalaxmi, T. J. Prihoda, N. Kuster, T. Tillmann, et C. Dasenbrock. 2009. « Absence of Genotoxic Potential of 902 MHz (GSM) and 1747 MHz (DCS) Wireless Communication Signals: In Vivo Two-Year Bioassay in B6C3F1 Mice ». *Int J Radiat Biol* 85 (5): 454-64. <https://doi.org/10.1080/09553000902818907>.

Ziskin, Marvin C., Stanislav I. Alekseev, Kenneth R. Foster, et Quirino Balzano. 2018. « Tissue Models for RF Exposure Evaluation at Frequencies above 6 GHz ». *Bioelectromagnetics* 39 (3): 173-89. <https://doi.org/10.1002/bem.22110>.

Zmyślony, Marek, Paweł Bieńkowski, Alicja Bortkiewicz, Jolanta Karpowicz, Jarosław Kieliszek, Piotr Politański, et Konrad Rydzyński. 2020. « Protection of the population health from electromagnetic hazards - challenges resulting from the implementation of the 5G network planned in Poland ». *Medycyna Pracy* 71 (1): 105-13. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00867>.

DOCUMENT EN CONSULTATION PUBLIQUE

ANNEXES

DOCUMENT EN CONSULTATION PUBLIQUE

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.

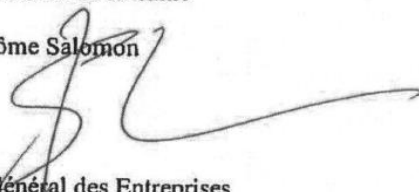
Le Directeur Général de la Prévention des Risques

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 : 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) ou encore 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) 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 40).

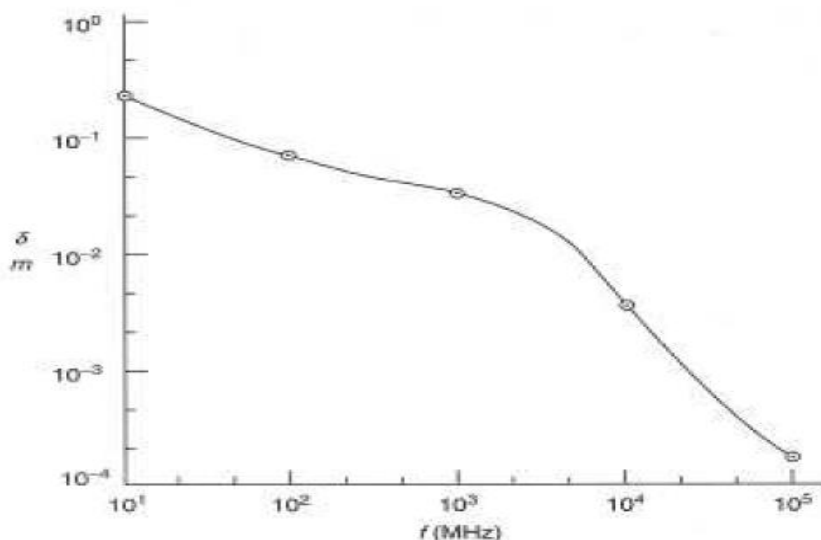


Figure 40 : Profondeur de pénétration d'une onde électromagnétique dans un muscle

Source : 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 excitable (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 surfacique 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 $5,84 \cdot 10^{-11}$ 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 biologique¹⁵⁰ ; 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.

¹⁵⁰ Les molécules d'eau liées à des protéines se comportent différemment de l'eau libre.

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 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).

Annexe 3 : Rappel des notions d'apoptose et de nécrose

Classiquement, la mort cellulaire est catégorisée en deux grandes types : l'apoptose, une mort cellulaire génétiquement programmée, c'est-à-dire que la cellule a, dans son génome, le code génétique des protéines impliquées dans cette mort cellulaire, celles qui vont finir par « tuer » la cellule de l'intérieur et la nécrose, qui était considérée comme une mort cellulaire accidentelle, produite par un agent extérieur, qui n'est pas programmée dans la cellule. En quelque sorte on pourrait dire que l'apoptose est un suicide cellulaire et la nécrose un meurtre mené par un agent extérieur. Ce concept est maintenant désuet.

Il est important de savoir que, en dehors du déterminisme de ces morts cellulaires, le processus cellulaire et la réponse de l'organisme est différente. En effet, pendant l'apoptose, l'activation de protéases et endonucléases spécifiques vont détruire les protéines nécessaires à la survie cellulaire et dégrader le génome. Ceci résulte en changements phénotypiques caractéristiques : la cellule se condense, rétrécit, se détache des cellules voisines, sa membrane plasmique produit des bourgeonnements appelés « blebs », le noyau de la cellule se fragmente, l'ADN se dégrade en petits morceaux de 180 paires de bases ou multiples (les nucléosomes ou oligonucléosomes). La cellule finit par se fragmenter en ce qui est appelé les corps apoptotiques. Les modifications membranaires qui accompagnent ces processus font que les cellules voisines à la cellule qui meurt vont devenir très friandes de ces corps apoptotiques, elles vont les phagocyter et de ce fait la cellule qui vient de mourir va disparaître du tissu « sans laisser de trace ». Ceci évite d'endommager les cellules voisines et diminue sensiblement la réponse inflammatoire du tissu.

Dans la nécrose, *a contrario*, le dommage que souffre la cellule provoque son « explosion » incontrôlée, le déversement du contenu cellulaire dans l'espace intercellulaire, un endommagement des cellules voisines (à cause du déversement du contenu lysosomal essentiellement, mais aussi de protéases et endonucléases cellulaires) et une forte réaction inflammatoire du tissu avec invasion macrophagique et tout ce qui s'en suit.

Quels sont les agents qui provoquent nécrose et apoptose ? L'apoptose peut se déclencher quand « arrive l'heure de la cellule » ; c'est par exemple la disparition cellulaire pendant le développement embryonnaire (réabsorption des membranes interdigitales, par ex) ou par des lésions cellulaires : mutation de l'ADN, infection virale, etc. La nécrose, quant à elle, est produite par des stress cellulaires intenses : brûlure, manque aigu d'oxygène, par exemple.

De nos jours, les caractéristiques cellulaires de la nécrose et de l'apoptose sont toujours valables mais la coupure nette entre ces deux mécanismes est moins tranchée. Dans un tissu, il est possible d'avoir les deux réponses en même temps. Par exemple, lors des AVC, la zone du cerveau directement irriguée par l'artère bouchée va être fortement concernée par la nécrose, tandis que dans la zone alentour, « la pénombre de l'infarctus », on trouvera de l'apoptose.

Ces dernières années, la vision sur la nécrose a été extrêmement modifiée. Elle peut être toujours une « mort accidentelle » de la cellule mais il a été montré que la « nécrose programmée », appelée aussi « necroptose » existe aussi. Elle passe par l'activation de protéines cellulaires spécifiques, notamment les « *receptor interacting protein kinases* » ou RIP kinases, qui vont conduire à la formation de complexes moléculaires capables de faire des trous dans toutes les membranes cellulaires, incluant la membrane plasmique, ce qui va avoir l'effet d'une « explosion de la cellule » provoquée de l'intérieur.

Ainsi, que les mécanismes de mort soient programmés ou non, la grande différence entre apoptose et nécrose n'est pas l'aspect programmé ou non mais la différence dans la

propagation du dommage cellulaire dans le tissu et de la réponse immunitaire qui en découle, qui peut, elle aussi, augmenter le dommage tissulaire.

Comme expliqué précédemment, l'apoptose a des caractéristiques cellulaires bien définies. Elles sont toujours les mêmes, ce qui a conduit à tort à penser qu'il s'agissait d'une seule voie moléculaire qui était impliquée, la voie des caspases. Qu'il s'agisse de la voie des caspases ou d'autres voies, un élément est constant : les cellules ont ce dont elles ont besoin pour mourir, car la mort est leur programme par défaut ; une cellule normale, sans autre instruction, meure. Et quand la cellule active son programme de mort cellulaire, c'est car quelque chose ne va pas, donc cette activation est irréversible. Lorsque la voie des caspases (enzymes protéolytiques) est activée, ceci se fait par clivage de la procaspase qui, elle, est inactive mais toujours présente dans le cytoplasme de la cellule (toute cellule normale est toujours prête à mourir). Et comme la caspase active peut catalyser sa propre activation lorsque les caspases sont activées, on ne voit généralement que la forme clivée. C'est un processus exponentiel. En somme, la cellule normale n'a que la forme entière, non clivée et non active des caspases, la pro-caspase. La cellule en mort cellulaire bien entamée n'a que la forme clivée active. Ce qu'il faut regarder, c'est le taux de clivage, l'expression n'est pas informative (sauf s'il n'y en a pas, bien sûr).

Comme on peut l'imaginer, le clivage des caspases doit être bien contrôlé. Ainsi, pour activer certaines des caspases et initier la cascade de dégradation, il faut des complexes moléculaires dont le plus important est « l'apoptosome ». Il s'agit d'une plateforme moléculaire d'activation. Cet apoptosome est constitué par différents éléments dont le cytochrome C, molécule d'origine mitochondriale. Etant donné que l'apoptosome est dans le cytoplasme, la sortie du cytochrome C de la mitochondrie est requise. Ceci se fait par un jeu de combinaison de protéines de la famille Bcl2 (Bcl2, Bax, entre autres) qui, en se localisant à la membrane mitochondriale, forment des canaux pour laisser échapper le cytochrome C. Comme pour les caspases, l'expression de ces molécules n'est pas très importante, ce qui importe c'est d'avoir les membres pro apoptotiques de cette famille (en l'occurrence Bax) dans la membrane mitochondriale.

Annexe 4 : Titres de presse couverts dans le corpus d'articles constitué sur Factiva

24 Heures (Suisse, Français)
Acteurs Publics (Français)
Agence Belga (Belgique, Français)
Agence Europe - All sources
Atlantico (Français)
ATS - Agence Télégraphique Suisse (Français)
Biotech.Info 3.0 (Français)
Bulletin Quotidien (Français)
BUSINESS IMMO.com (Français)
Centre Presse (Aveyron, France, Français)
Challenges (Français)
Challenges.fr (Français)
Contexte (France, Français)
Corse-Matin (France, Français)
Courrier Picard (Amiens, France, Français)
Décideurs Magazine (Français)
Dordogne Libre (France, Français)
Edition Multimédi@ (Français)
ElectroniqueS (Français)
ElectroniqueS.biz (Français)
Funds (Français)
IFRI: Institut Français des Relations Internationales - All sources
Industrie & Technologies (Français)
Investir-Le Journal des Finances (Français)
Investissement Conseils (Français)
IT Espresso – All sources
Jeune Afrique (Français)
L'Est Eclair (Aube, France, Français)
L'Eclair des Pyrénées (Pau, France, Français)
L'Eclaireur du Gâtinais (Loiret, France, Français)
L'édition du soir par Ouest France (Français)
L'Équipe (France, Français)
L'Est Républicain (Lorraine, France, Français)
L'Eveil de la Haute Loire (France, Français)
L'Express (Français)
L'Humanité (France, Français)
L'Humanité Dimanche (Français)
L'Obs (Français)
L'Opinion (France, Français)
L'Union / L'Ardennais (France, Français)
L'Express-L'Impartial (Suisse, Français)
L'Usine Nouvelle (Français)
La Charente Libre (France, Français)
La Correspondance de la Presse (Français)
La Correspondance de la Publicité (Français)
La Correspondance Economique (Français)
La Côte (Vaud, Suisse, Français)
La Croix (France, Français)
La Dépêche du Midi - All sources
La Gazette des Communes (Français)
La Lettre A (Français)
La Lettre des Nominations (Français)
La Libre Belgique (Français)
La Montagne (France, Français)
La Nouvelle République du Centre Ouest (France, Français)
La Provence (Marseille, Français)
La République des Pyrénées (Pau, France, Français)
La Revue des Collectivités Locales (Français)
La Tribune (France, Français)
La Tribune Hebdomadaire (France, Français)
La Tribune.fr (France, Français)
La Voix du Nord (Lille, France, Français)
LaGazette.fr (Français)
Lamontagne.fr (France, Français)
Le Berry Républicain
Le Courrier de l'Ouest (Angers, France, Français)
Le Courrier des Maires et des Elus locaux (Français)
Le Figaro - All sources
Le Figaro Bourse Premium (France, Français)
Le Journal de l'Île de la Réunion (Français)
Le Journal des Entreprises (Français)
Le Journal du Centre (Nièvre, France, Français)

Le Maine Libre (Le Mans, France, Français)
Le Mensuel d'Agéfi Luxembourg (Français)
Le Monde (France, Français)
Le Progrès (France, Français)
Le Républicain Lorrain (France, Français)
Le Télégramme (Français)
Le Temps (Genève, Français)
Leberry.fr (Cher, France, Français)
LePoint.fr (Français)
Les Echos - All sources
Libération (France, Français)
LSA.fr (Français)
Mesures.com (Français)
Midi Libre (Montpellier, France, Français)
Nice-Matin (France, Français)

Nord Eclair (Nord-Pas-de-Calais, France, Français)
Nouvelobs.com (Français)
Option Finance (Français)
Ouest France (Français)
Paris Normandie (Rouen, France, Français)
Point B@nque (Français)
Presse Océan (Nantes, France, Français)
Sciences et Avenir (Français)
Sciencesetavenir.fr (Français)
Stratégies (Français)
Sud Ouest (Bordeaux, France, Français)
The Canadian Press - All sources
Var-Matin (France, Français)
Ville Rail et Transports (Français)
Vosges Matin (France, Français)

Annexe 5 : Articles du corpus *The Conversation*

- Ahmed W., Downing J., Tuters M., Knight P., 2020, « Four experts investigate how the 5G coronavirus conspiracy theory began », *The Conversation*, 11 juin 2020
- Arnaud-Cormos D., Leveque P., 2020, « 5G et santé : que sait-on ? », *The Conversation*, 8 octobre 2020
- Belgrave D., 2019, "Huawei or the highway? The rising costs of New Zealand's relationship with China", *The Conversation*, 20 février 2019
- Branch P., 2016, "The 'G' in 5G: how mobile generations have evolved", *The Conversation*, 17 janvier 2016
- Branch P., 2018, "What is a mobile network, anyway? This is 5G, boiled down", *The Conversation*, 31 août 2018
- Cappy A., 2020, « Pourquoi la 5G gonflera notre consommation d'énergie », *The Conversation*, 3 novembre 2020
- Chatelain Y., 2020, « Vie privée et risque d'un « capitalisme de surveillance », l'oublié des débats sur la 5G », *The Conversation*, 23 septembre 2020
- Colombero S., Pigni F., Dal Zotto P., 2019, « Tout est-il à jeter dans la 5G ? », *The Conversation*, 25 août 2019
- Destiny T., 2020, « Conspiracy theories about 5G networks have skyrocketed since COVID-19 », *The Conversation*, 2 juin 2020
- Destiny T., 2020, « Faut-il avoir peur de la 5G », *The Conversation*, 5 mai 2020
- Dohler M., 2014, "5G mobile networks will support an internet that's so good you can feel it", *The Conversation*, 29 septembre 2014
- Dohler M., 2014, "Three wireless technologies that could make 5G even faster", *The Conversation*, 23 mars 2015
- Dowse A., 2018, "The 5G network threatens to overcrowd the airwaves, putting weather radar at risk", *The Conversation*, 14 juin 2018
- Dreier J., 2018, « Des failles de sécurité dans la future norme de communication mobile 5G », *The Conversation*, 7 décembre 2018
- Dugoin-Clément C., 2020, « Les enjeux géopolitiques de la 5G », *The Conversation*, 25 septembre 2020
- Findlay C., 2019, « Banning Huawei could cut off our nose to spite our face. Good 5G matters », *The Conversation*, 1 décembre 2019
- Gaskarth J., 2020, « How US-UK intelligence sharing works – and why Huawei 5G decision puts it at risk », *The Conversation*, 5 février 2020
- Glance D., 2016, "Marketers claim 5G will support the Internet of Things but is that really a thing?", *The Conversation*, 28 février 2016
- Gopalan S., 2018, "Explainer: why Chinese telecoms participating in Australia's 5G network could be a problem", *The Conversation*, 5 juin 2018
- Gregory M. A., 2015, "Explainer: what is 5G?", *The Conversation*, 2 avril 2015
- Harambam J., 2020, « Why we should not treat all conspiracy theories the same », *The Conversation*, 11 juin 2020
- Hasan M. S., 2020, « Could 5G replace cable broadband? », *The Conversation*, 8 janvier 2020
- Hill T., Canniford R., Murphy S., « Why 5G conspiracy theories prosper during the coronavirus pandemic », *Conversation*, 9 avril 2020
- Jensen M., 2020, "How misinformation about 5G is spreading within our government institutions – and who's responsible", *The Conversation*, 13 juillet 2020
- Kleinman M., 2018, "5G: UK risks losing its lead, but some simple steps could prevent that", *The Conversation*, 2 août 2018

- Lacey S., 2020, « Huawei's window of opportunity closes: how geopolitics triumphed over technology », *The Conversation*, 7 juillet 2020
- Lagrange X., 2020, « La 5G : qu'est-ce que c'est ? Comment ça marche ? », *The Conversation*, 25 septembre 2020
- Linge N., 2014, "Explainer: after 4G, why do we need 5G phones?", *The Conversation*, 3 janvier 2014
- Linge N., 2019, "5G: what will it offer and why does it matter?", *The Conversation*, 24 janvier 2019
- Loughran S., 2019, « There's no evidence 5G is going to harm our health, so let's stop worrying about it », *The Conversation*, 1 août 2019
- Michaux V., 2020, « La 5G une nouvelle phase de la révolution digitale – mais plutôt pour 2025-2035 », *The Conversation*, 3 septembre 2020
- Paul G., 2020, « Huawei and 5G: UK had little choice but say yes to Chinese – here's why », *The Conversation*, 30 janvier 2020
- Poissonnier H., 2017, « La 5G : une bombe économique à venir... et à préparer », *The Conversation*, 6 avril 2017
- Rabaey J., 2018, "What is 5G? The next generation of wireless, explained", *The Conversation*, 17 mai 2018
- Shanapinda S., 2019, "Blocking Huawei from Australia means slower and delayed 5G – and for what?", *The Conversation*, 23 mai 2019
- Shanapinda S., 2020a, « No, 5G radiation doesn't cause or spread the coronavirus. Saying it does is destructive », *The Conversation*, 7 avril 2020
- Shanapinda S., 2020b, "Apple releases fast 5G iPhones, but not for Australia. And we're lagging behind in getting there", *The Conversation*, 15 octobre 2020
- Tonson B., Couderc E., 2020, « Dossier : 5G, des ondes de choc ? », *The Conversation*, 8 octobre 2020
- Tucker R., 2017, "5G will be a convenient but expensive alternative to the NBN", *The Conversation*, 25 octobre 2017
- Zhang M. Y., 2019, "Blocking Huawei's 5G could isolate Australia from future economic opportunities", *The Conversation*, 3 juin 2019.

Annexe 6 : Mots clef utilisés dans la recherche bibliographique

À titre d'exemple, l'équation de recherche présentée ci-dessous, qui intègre les mots clef utilisés lors de cette expertise, a été utilisée avec le moteur de recherche *Scopus*.

TITLE-ABS-KEY ("millimetre-wave" OR "milli-meter-wave" OR "milli-metre-wave" OR "mm-emf" OR "decimeter-wave" OR "decimeter-wave" OR "decimeter wave" OR "wimax" OR "wifimax" OR "S-band" OR "S band" OR "fifth generation" OR "5th generation" OR "Massive MIMO" OR "mMIMO" OR "MIMO antenna" OR "Antenna array" OR "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 (5g AND (field OR band OR network OR mobile OR system OR radiation)) OR "5G-NR" OR "LTE-M" OR "NB-IoT" OR "IMT-2020" OR "eMMB" OR "mMTC" OR "uRLLC" OR "beam forming" OR "c band" OR "c-band" OR "centimeter wave" OR "centimeter-wave" OR "cm wave" OR "cm-wave" OR "above 6 GHz")

AND (("expos*" OR "coexpos*" OR "co-expos*") OR TITLE-ABS-KEY ("specific absorption" OR sar OR dosimet* OR "power density" OR "health effect*" OR "health impact*" OR bioeffect* OR bio-effect* OR "biological effect*" OR "adverse effect*" OR adenoma* OR alzheimer OR apoptosis OR "auditory function*" OR "birth defect*" OR blood-brain-barrier OR "bone marrow" OR metabolism OR cancer* OR carcino* OR "cell death" OR "cellular proliferation*" OR "central nervous system" OR "cerebral blood flow" OR "circadian rhythm*" OR "cognitive disorder*" OR "cognitive function*" OR "cognitive development" OR "cognitive defect*" OR "cognitive deficit*" OR "cognitive performance*" OR "congenital abnormalit*" OR "congenital defect*" OR dementia* OR "baby development" OR "child development" OR "foetal development" OR "fetal development" OR "newborn development" OR "DNA break*" OR "DNA damage*" OR "DNA repair*" OR electroencephalogram* OR electro-encephalogram* OR electrosensitiv* OR electro-sensitiv* OR electrohypersensitiv* OR electro-hypersensitiv* OR electro-hyper-sensitiv* OR "electromagnetic hypersensitiv*" OR epigenetic* OR "evoked potentials" OR *fertility OR "genomic instabilit*" OR glioma* OR "Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic field*" OR iei-emf* OR leukemia* OR leukaemia* OR lymphoma* OR meningioma* OR mutation* OR necrosis OR neoplasia* OR neoplasm* OR neurodegenerativ* OR neurolemoma OR neurolemmoma OR neurilemoma OR neurilemmoma OR neurinoma OR neuroma* OR "non-thermal effect*" OR "oxidative stress" OR parkinson OR phosphene* OR pregnant OR pregnancy OR schwannoma* OR sclerosis OR thermal-effect* OR toxi* OR tumor* OR tumour* OR ocular OR eye* OR skin OR keratinocyte* OR melanoma OR brain OR "nervous system" OR testis OR heart))

AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re"))

AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "ENGI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PHYS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "EART") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "COMP") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "MATH"))

AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012))