

# **Exposition aux champs magnétiques statiques**

Rapport d'expertise pour la concertation publique dans le cadre du projet  
INELFE - interconnexion électrique entre la France et l'Espagne

14 avril 2022

Auteur : Dr Olivier Merckel

## Sommaire

Sommaire .....	2
Résumé.....	4
1 Introduction : contexte, objet et méthode .....	7
1.1 Contexte .....	7
1.2 Objet du rapport d'expertise.....	7
1.3 Méthode de recueil, de sélection et de synthèse des données bibliographiques.....	9
1.3.1 Méthode de recueil et de sélection des données sur l'exposition aux champs magnétiques statiques et sur la réglementation .....	9
1.3.2 Méthode de recueil, de sélection et de synthèse des données sur les effets sanitaires	9
2 Exposition aux champs magnétiques statiques .....	12
2.1 Les champs magnétiques statiques.....	12
2.2 Sources de champs magnétiques statiques .....	13
2.2.1 Champ magnétique terrestre .....	13
2.2.2 Autres sources de champs magnétiques statiques .....	15
2.3 Revue des données de mesure d'exposition aux champs magnétiques statiques .....	16
2.3.1 Protocole de mesure .....	17
2.3.2 Exposition dans l'environnement de lignes électriques à courant continu .....	17
2.3.3 Exposition aux appareils d'imagerie par résonance magnétique .....	25
2.3.4 Données d'exposition à d'autres sources artificielles de champ magnétique statique	26
2.4 Simulations de l'exposition au champ magnétique statique (projet d'interconnexion Golfe de Gascogne).....	29
2.4.1 Caractéristiques techniques du projet et conditions de simulation .....	29
2.4.2 Expression théorique et calcul du champ magnétique statique émis par des fils électriques parallèles.....	31
2.4.3 Configuration standard terrestre .....	33
2.4.4 Chambre de jonction terrestre.....	36
2.4.5 Configuration standard maritime.....	39
2.5 Synthèse des informations concernant l'exposition aux champs magnétiques statiques émis par l'interconnexion France-Espagne dans le golfe de Gascogne.....	42
3 Effets des champs magnétiques statiques sur la santé et l'environnement.....	43
3.1 Préambule .....	43
3.2 Effets des champs magnétiques statiques sur l'être humain .....	44
3.2.1 Interactions des champs magnétiques statiques avec le vivant .....	45
3.2.2 Rapports institutionnels : 1997 - 2015 .....	46
3.2.3 Articles de revue.....	53

3.2.4	Utilisation des champs magnétiques statiques à visées thérapeutiques.....	59
3.2.5	Niveaux d'exposition élevés : cas de l'imagerie par résonance magnétique.....	60
3.2.6	Synthèse des connaissances sur les effets des champs magnétiques statiques sur la santé humaine .....	62
3.3	Effets sur l'environnement.....	63
3.3.1	Magnétoperception.....	63
3.3.2	Rapports institutionnels : 1997 - 2019 .....	64
3.3.3	Articles de revue.....	69
3.3.4	Synthèse des connaissances sur les effets des champs magnétiques statiques sur l'environnement.....	72
4	Revue des réglementations limitant les expositions aux champs magnétiques statiques .....	73
4.1	Fondements et construction des réglementations en matière d'exposition aux champs magnétiques statiques .....	74
4.1.1	Lignes directrices de l'Icnirp .....	74
4.1.2	Normes proposées par l'IEEE .....	75
4.2	Réglementation européenne .....	76
4.3	Réglementation française .....	77
4.4	Autres réglementations nationales.....	78
4.5	Synthèse de la réglementation applicable aux champs magnétiques statiques .....	79
5	Conclusion .....	81
	Bibliographie.....	82
	Annexes .....	92
	Annexe 1 : normes techniques pour la mesure de l'intensité des champs statiques.....	93
	Annexe 2 : recherches bibliographiques .....	95
	Annexe 3 : statut législatif des limites d'exposition aux champs magnétiques statiques .....	96
	Annexe 4 : biographie de l'auteur du rapport.....	98

## Résumé

### Exposition au champ magnétique statique généré par le projet d'interconnexion golfe de Gascogne

La circulation d'un courant électrique dans un fil crée un champ magnétique. Ce champ magnétique est appelé « statique » lorsque le courant électrique est continu (son intensité ne varie pas au cours du temps). Les aimants créent aussi des champs magnétiques statiques. Et nous vivons, en permanence, dans le champ magnétique créé par la Terre. Son intensité est d'environ  $45 \mu\text{T}$  (microteslas) en France métropolitaine.

La Terre, les aimants, les lignes de transport d'électricité à courant continu, les batteries, les électroaimants, les supports d'enregistrements sur bandes magnétiques, les disques durs, les moteurs à courant continu, certains générateurs de courant, des capteurs, des lignes de transport ferroviaire, ou encore des applications médicales comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM) génèrent des champs magnétiques statiques, parfois de très fortes intensités (des centaines de milliers de fois plus élevés que celui de la Terre pour l'IRM).

La plupart des lignes de transport de l'électricité (celles à haute tension, mais aussi tous les câbles d'alimentation électrique domestique) présents dans notre environnement génèrent des champs alternatifs, à la fréquence du réseau électrique (50 Hz). Les lignes de transport d'électricité en courant continu sont bien moins nombreuses, elles sont surtout utilisées aujourd'hui pour des liaisons sous-marines entre pays, ou pour relier les parcs éoliens en haute mer à la côte, par exemple.

Les lignes terrestres de transport d'électricité en courant continu, souterraines, émettent généralement un champ magnétique statique qui, au maximum, ne dépasse la valeur du champ magnétique terrestre que dans un couloir de quelques mètres autour de la ligne.

Des mesures effectuées à proximité d'habitations, sur des lignes similaires au projet d'interconnexion dans le golfe de Gascogne, ne montrent aucune exposition au champ magnétique statique supérieure à celui créé par la Terre.

Des simulations du champ magnétique statique, dans les conditions techniques prévues pour l'interconnexion dans le golfe de Gascogne, indiquent, pour la partie terrestre, une valeur maximale de  $31 \mu\text{T}$ , à l'aplomb de la ligne souterraine, à 1 m de hauteur. À 5 m de la liaison, le champ magnétique statique calculé est inférieur à  $10 \mu\text{T}$ , et à 10 m de distance, il n'est plus que d'environ  $2,5 \mu\text{T}$ , quelle que soit la hauteur par rapport au sol. Au-delà, comme l'indiquent aussi des mesures sur le terrain pour des lignes existantes, le champ magnétique émis par la ligne ne peut plus être différencié du champ terrestre.

### Effets des champs magnétiques statiques sur la santé humaine

Le cas de l'exposition au champ magnétique statique est tout à fait singulier. En effet, c'est la seule et unique situation pour laquelle toute personne sur Terre est exposée, continuellement, tout au long de sa vie, quel que soit son lieu de vie, à un niveau de champ magnétique statique quasiment constant.

Si le nombre d'études sur le fonctionnement des cellules et les effets sur les organismes (animaux et humains) a augmenté ces dernières années, les recherches dans ce domaine restent limitées. Plusieurs revues rédigées par des chercheurs et des rapports émis par divers organismes et institutions ont toutefois été publiés sur les effets des champs magnétiques statiques sur l'être humain, depuis plus de vingt ans.

Ainsi, le Centre international de recherche sur le cancer a indiqué, en 2002, que « les champs électriques et magnétiques statiques ne peuvent être classés quant à leur cancérrogénicité pour l'humain (groupe 3) », en l'absence de preuves suffisantes.

Depuis, plusieurs études ont pu mettre en évidence des effets sur le fonctionnement cellulaire dans des expériences *in vitro*, par exemple, ou sur le comportement animal en laboratoire, mais uniquement à des niveaux d'exposition élevés, sans commune mesure avec les intensités des champs émis notamment par les lignes de transport d'électricité ou autres sources similaires.

Toutes les revues et rapports identifiés indiquent qu'aucun effet néfaste pour la santé humaine consécutif à l'exposition à des champs magnétiques statiques n'a pu être observé, à court et long terme, y compris à des intensités de champs élevées. Les effets ressentis par certains professionnels ou patients dans l'environnement des scanners IRM (vertiges, nausées) disparaissent rapidement, ils sont liés à des niveaux très élevés, plus de 100 000 fois plus forts que le champ magnétique terrestre. Les rapports d'expertise et revues soulignent toutefois le faible nombre d'études disponibles, ce qui ne permet pas de conclure formellement quant aux effets biologiques et sanitaires de l'exposition à des champs magnétiques statiques de faible intensité.

#### Effets des champs magnétiques statiques sur l'environnement

Les recherches sur les effets éventuels des champs magnétiques statiques sur l'environnement, en particulier les animaux et végétaux, sont peu nombreuses. Initialement, elles ont principalement été menées afin de mieux comprendre les mécanismes de perception du champ magnétique terrestre qui permet à certaines espèces notamment de s'orienter, par exemple pour les migrations. Si les différents mécanismes sous-jacents ne sont pas encore tous bien compris, la capacité de perception du champ magnétique terrestre, mais aussi du champ électrique, pour certaines espèces, ne fait plus de doute.

Ces dernières années, les études sur l'environnement se sont focalisées sur le milieu marin, c'est en effet au fond de la mer que l'on trouve la plupart des câbles transportant de l'électricité en courant continu, notamment en raison du développement récent des parcs éoliens en haute mer.

Toutes les études et rapports sur le sujet convergent pour indiquer que si ponctuellement, en laboratoire, des effets de l'exposition à des champs magnétiques statiques peuvent être observés chez certaines espèces, à des niveaux d'intensité relativement élevés, il est à l'heure actuelle impossible d'en déduire des impacts potentiels sur les organismes marins dans leur milieu naturel, au voisinage des câbles enfouis. Les niveaux d'exposition, à proximité immédiate, au fond de la mer, peuvent être relativement élevés, mais ils sont extrêmement localisés, et les impacts par exemple sur les migrations de certaines espèces semblent très limités.

#### Réglementations limitant l'exposition aux champs magnétiques statiques

Comme la plupart des pays dans le Monde, la France ne dispose pas d'une réglementation limitant spécifiquement l'exposition du public aux champs magnétiques statiques. La recommandation européenne visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques, publiée en 1999, propose une limite à 40 mT, en s'appuyant sur les travaux de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp), mais elle n'est pas contraignante. L'Icnirp a depuis, en 2009, relevé cette valeur à 400 mT.

Les réglementations protégeant les travailleurs sont beaucoup plus répandues, notamment dans l'Union européenne, où les pays membres ont dû adopter des valeurs limites au moins inférieures à

2 T pour l'exposition du corps entier, et à 8 T pour l'exposition des membres du corps, afin d'éviter la perception éventuelle d'effets sensoriels (vertiges, nausées, etc.).

À notre connaissance, il n'existe aucune réglementation limitant l'exposition de l'environnement, notamment la faune et la flore, y compris en milieu marin.

# 1 Introduction : contexte, objet et méthode

## 1.1 Contexte

INELFE (INterconnexion ELectrique France-Espagne), établie le 1er octobre 2008, est une société mixte constituée à parts égales par les entreprises gestionnaires du réseau de transport d'électricité en France - RTE (Réseau transport d'électricité) - et en Espagne - REE (Red Eléctrica de España).

INELFE est en charge de la construction et de la mise en service de l'ensemble des interconnexions électriques entre la France et l'Espagne. Dans l'objectif d'augmenter le volume d'échange d'énergie électrique entre la péninsule ibérique et le reste de l'Europe, INELFE a ainsi construit et mis en service l'interconnexion Baixas-Santa Llogaia entre la France et l'Espagne en octobre 2015.

Le projet « Golfe de Gascogne » vise pour sa part à établir une liaison électrique entre Cubnezais (France) et Gatika (Espagne) au moyen d'une interconnexion en grande partie sous-marine. Ce projet, porté à la connaissance du public en septembre 2017, fait l'objet d'une concertation publique lancée le 5 Octobre 2017 sous l'égide de la Commission nationale du débat public (CNDP).

Le tracé retenu lors de la première phase de la concertation (« fuseau de moindre impact ») a été validé par le Ministère de la transition écologique et solidaire le 30 mai 2018. Mais les résultats d'études menées depuis juin 2019 n'ont pas permis d'identifier de tracé maritime techniquement réalisable pour le franchissement du Gouf (canyon) de Capbreton. La seule alternative de franchissement du canyon consiste donc à le contourner par un passage ponctuel à terre.

Une nouvelle phase de concertation s'est ainsi tenue d'octobre 2020 à juin 2021 afin de préciser localement cette solution de contournement terrestre. Le fuseau de moindre impact pour le contournement terrestre du Gouf de Capbreton a été validé par le Ministère de la transition écologique le 7 septembre 2021.

La concertation se poursuit néanmoins jusqu'à l'ouverture de l'enquête publique prévue à l'été 2022.

## 1.2 Objet du rapport d'expertise

Dans le contexte de la concertation publique liée au projet de liaison électrique terrestre de contournement du gouf de Capbreton, la CNDP a émis un cahier des charges avec pour objectif *de réaliser un « Dire d'Expert » indépendant concernant la question des champs électromagnétiques statiques d'une ligne électrique en courant continu (400 kV) - enterrée en partie terrestre et ensouillée en partie sous-marine - à partir des simulations disponibles réalisées par RTE, de la bibliographie existante sur des lignes équivalentes et de l'état de la science et de la réglementation en matière d'exposition du public et d'impact pour la faune sous-marine.*

Le tracé de cette interconnexion prévoit en effet, pour la partie française :

- 2 segments terrestres : le contournement du Gouf de Capbreton, de la plage des Casernes à Seignosse jusqu'au Domaine de Fierbois à Capbreton d'une part, et de la station de conversion de Cubnezais jusqu'à l'océan d'autre part ;
- 2 segments maritimes : de la plage de la Cantine Nord au Porge à la plage des Casernes à Seignosse et du Domaine de Fierbois à Capbreton à la frontière franco-espagnole.

La circulation d'un courant électrique dans un câble, que ce courant soit continu (son intensité ne varie pas au cours du temps) ou alternatif (intensité variable), provoque l'émission d'un champ magnétique.

Ce champ magnétique est qualifié de « statique » lorsque le courant électrique est continu, pour indiquer qu'il ne varie pas en fonction du temps. Les câbles de transport d'électricité, qu'ils soient aériens ou souterrains, émettent des champs magnétiques dont l'intensité est directement liée à celle du courant qui les parcourt.

Des simulations du champ magnétique statique généré par la future ligne électrique (courant continu) ont été réalisées par RTE et présentées au public le 06 janvier 2021<sup>1</sup>. RTE a ainsi représenté l'intensité des champs magnétiques statiques émis selon différentes configurations géométriques de pose des câbles électriques (pose courante en configuration standard terrestre, boîte de jonction terrestre et pose courante en configuration standard maritime).

La demande de la CNDP visait à produire un « dire d'expert » indépendant permettant de représenter les valeurs de champs magnétiques statiques maximales émis par la ligne électrique dans les différentes configurations géométriques prévues (valeurs maximales par exemple à 1 m du sol en configuration terrestre et au niveau du sol en configuration maritime, champ magnétique terrestre inclus).

Le cahier des charges émis par la CNDP demandait également de réaliser un état des lieux de la bibliographie existante sur les niveaux de champs magnétiques émis par des lignes équivalentes (lignes souterraines et sous-marines à courant continu) et de fournir l'état de la science en matière d'exposition et d'effets des champs magnétiques statiques.

Enfin, la CNDP souhaitait obtenir un état des lieux de la réglementation en matière d'exposition du public (et optionnellement pour les travailleurs) ainsi qu'en matière d'impact pour la faune en milieu marin.

Ce rapport d'expertise est ainsi constitué des principaux éléments suivants :

- le présent chapitre d'introduction, qui comprend également l'exposé de la méthode suivie notamment pour identifier et sélectionner les sources bibliographiques ;
- le chapitre 2 présente des éléments de connaissance générale sur les champs magnétiques statiques, les résultats de simulations du champ magnétique statique réalisées selon les configurations d'installation prévues des câbles électriques pour l'interconnexion France-Espagne, ainsi qu'une revue des données d'exposition obtenues dans des conditions similaires ;
- le chapitre 3 propose une synthèse des revues disponibles concernant les connaissances scientifiques actuelles en matière d'effets éventuels de l'exposition aux champs magnétiques statiques sur la santé humaine et l'environnement, en particulier marin ;
- le chapitre 4 livre un état des lieux de la réglementation française et internationale applicable concernant l'exposition aux champs magnétiques statiques de la population générale et des travailleurs.

---

<sup>1</sup> <https://www.inelfe.eu/sites/default/files/2021-02/Compte%20rendu%20r%C3%A9union%20publique%20d%E2%80%99information%20CEM%20du%2006.01.21.pdf>.

### 1.3 Méthode de recueil, de sélection et de synthèse des données bibliographiques

Trois recherches bibliographiques différentes ont été menées pour répondre aux demandes de la CNDP :

- la première visait à réaliser un état des connaissances sur les expositions aux champs magnétiques statiques émis par des lignes équivalentes au projet d'interconnexion électrique dans le golfe de Gascogne ;
- la deuxième a permis de fournir un état des connaissances scientifiques concernant les effets des champs magnétiques statiques sur la santé humaine et sur l'environnement, en particulier la faune sous-marine ;
- la dernière a recensé les réglementations existantes concernant l'exposition aux champs magnétiques statiques.

#### 1.3.1 Méthode de recueil et de sélection des données sur l'exposition aux champs magnétiques statiques et sur la réglementation

Les paragraphes consacrés aux données disponibles en matière d'exposition aux lignes électriques en courant continu et aux autres sources de champ magnétique statique (2.2 et 2.3) intègrent des données issues d'une recherche méthodique de références bibliographiques. Des mots clés tels que « static magnetic fields », « HVDC », « sub-marine cables », etc. ont été utilisés pour identifier des documents, dans des moteurs de recherche sur internet. Toutes les références retrouvées ont été consultées, les plus pertinentes ont été conservées, puis synthétisées dans les paragraphes dédiés. Les critères de sélection étaient les suivants :

- tout rapport technique ou article publié dans un journal scientifique ;
- document contenant au moins des données sur des expositions aux champs magnétiques statiques ;
- les conditions techniques de mesure devaient être précisées, notamment les appareils de mesure, les grandeurs et unités, les distances aux sources, etc.

Lorsque les données proviennent d'opérateurs par exemple du transport d'électricité, les documents sont identifiés comme tels dans le rapport, et seuls les éléments factuels sont considérés (mesures d'exposition, etc.).

Une méthode similaire a été employée pour identifier les données relatives à la réglementation.

#### 1.3.2 Méthode de recueil, de sélection et de synthèse des données sur les effets sanitaires

Réaliser une expertise consistant à recueillir, sélectionner et analyser l'ensemble de la littérature scientifique disponible sur les effets sur la santé liés à l'exposition aux champs magnétiques statiques pour en tirer des conclusions argumentées en matière d'évaluation des risques pour la santé nécessiterait d'engager un travail de grande ampleur, pendant plusieurs mois, en impliquant de nombreux scientifiques spécialistes de domaines différents, tels que la physique, la métrologie, la médecine, la toxicologie, l'épidémiologie, etc. L'analyse de la qualité des publications, la discussion des résultats apportés par les différentes études, les conclusions qui peuvent en être tirées en matière

d'effets éventuels sur la santé doivent nécessairement être le résultat d'un travail de groupe, avec une confrontation des points de vue.

Afin de répondre à la demande de la CNDP de produire un état des lieux de la science sur les effets des champs magnétiques statiques, les paragraphes 3.2 et 3.3 présentent une synthèse des connaissances scientifiques produites d'une part par des organismes d'évaluation des risques, tels que le Centre de recherche international sur le cancer (Circ), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) ou des organismes de recherche, tels l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (Ifremer), et d'autre part par des chercheurs ayant réalisé des revues de la littérature sur un thème particulier (effets des champs magnétiques statiques sur la santé humaine, sur des animaux marins, etc.). Les organismes associés à la production et au transport de l'électricité ayant produit des données sur le sujet sont identifiés comme tels dans la suite du document.

Les documents scientifiques ont été identifiés selon les modalités suivantes :

- recherche par mots clés (« health », effects », « static magnetic fields », etc.) de documents de synthèse, de rapports d'organismes dans des moteurs de recherche sur internet ;
- recherche par mots clés de publications scientifiques (revues) dans les moteurs de recherche suivants : EMF-Portal<sup>2</sup>, Pubmed<sup>3</sup> et Scopus<sup>4</sup>. EMF-Portal est un moteur de recherche et une base de données spécifique aux publications scientifiques dans le domaine des champs électromagnétiques et de ses effets sur la santé. Les moteurs Pubmed et Scopus ont permis de compléter la recherche dans des domaines beaucoup plus larges de la santé et des sciences en général ;
- recherche complémentaire de références sur internet ;
- utilisation des références citées dans les publications pour compléter la recherche bibliographique ;
- langue des documents recherchés : française ou anglaise ;
- type de documents recherchés : rapports institutionnels, d'organismes d'évaluation de risques et articles scientifiques de revue<sup>5</sup> (*review*), publiés dans des journaux à comité de lecture.

Les documents identifiés ont ensuite été triés et sélectionnés selon les critères suivants :

- au moins une partie du document est consacrée aux champs magnétiques statiques ;
- revues et rapports consacrés, au moins en partie, aux effets sur la santé humaine et sur la santé des animaux marins, en lien avec l'exposition aux champs magnétiques statiques ;
- les documents contenaient au moins des données sur des expositions à des intensités faibles ou modérées (inférieures à 1 T) ;
- date de publication : avant février 2022 ;

<sup>2</sup> <https://www.emf-portal.org/en>.

<sup>3</sup> <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>.

<sup>4</sup> <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic>.

<sup>5</sup> On distingue notamment les « articles originaux » des « revues ». Ces dernières, réalisées par un ou plusieurs auteurs, proposent une vision synthétique sur un sujet fondé sur l'analyse de plusieurs articles originaux, qui présentent eux des résultats de recherche nouveaux, qui n'avaient pas encore été publiés.

L'annexe 2 présente les détails des recherches bibliographiques : mots clés, nombre d'articles obtenus et analysés, etc.

Une attention particulière a été portée aux documents s'intéressant aux expositions aux champs magnétiques statiques dits de « faible intensité », c'est-à-dire inférieure à 1 mT. En effet, il existe de nombreux documents traitant des effets d'exposition élevées, de l'ordre du tesla, mais qui sont ainsi très supérieures aux expositions générées par les lignes de transport d'électricité. Un paragraphe est toutefois consacré à ces expositions provenant notamment des appareils de diagnostic médical par IRM (cf. 3.2.5).

Au total, répondaient aux critères de sélection :

- pour les effets des champs magnétiques statiques spécifiquement sur l'humain, 6 rapports institutionnels et 7 revues de littérature ;
- pour les effets des champs magnétiques statiques sur l'environnement (végétaux et faune sous-marine), 6 rapports institutionnels et 6 revues de littérature.

L'état de l'art sur les effets des champs magnétiques statiques sur l'humain et les autres êtres vivants présenté dans les paragraphes 3.2 et 3.3 s'appuie ainsi sur toutes les données scientifiques identifiées répondant aux critères énoncés ci-dessus. Les documents synthétisés, identifiés à partir de sources diverses, au moyen d'une recherche la plus complète et objective possible<sup>6</sup>, ont été publiés entre 1997 et 2022. Ces synthèses présentent l'état des connaissances scientifiques décrites par différents chercheurs et organismes d'évaluation des risques sur les effets sur la santé et l'environnement liés à l'exposition aux champs magnétiques statiques, ainsi que les conclusions qu'ils en ont tirées. La priorité a été donnée aux effets sur la santé humaine et sur la faune sous-marine liés aux expositions aux champs magnétiques statiques dont les intensités étaient les plus proches possibles de celles émises par des lignes de transport d'électricité.

La réalisation du travail formalisé dans ce rapport s'est attachée à prendre en compte toutes les données disponibles, dans une démarche de rigueur et d'objectivité scientifique, en citant le cas échéant les opérateurs associés à l'émission de champs magnétiques statiques impliqués dans les travaux décrits et synthétisés.

Ce rapport a pour objectif de fournir des informations au public associé à la concertation organisée par la CNDP dans le cadre du projet INELFE d'interconnexion dans le Golfe de Gascogne, et non à servir une quelconque décision. Ces informations sont données par l'auteur en son nom propre, qui déclare par ailleurs n'avoir aucun lien d'intérêt avec les parties prenantes du projet.

---

<sup>6</sup> Ce rapport n'est donc pas une « revue », au sens consacré du terme (qui inclurait donc l'analyse détaillée d'études dites « originales », portant le plus souvent sur un ou quelques effets chez une espèce, par exemple), ni formellement une « revue systématique ». Une revue systématique, dans sa définition commune, recense, analyse et synthétise de façon standardisée et objective des données scientifiques probantes et pertinentes afin de répondre à une question précise et clairement formulée. Elle utilise une méthode rigoureuse de recherche et de sélection d'information bibliographique (cf. Cirad : <https://doi.org/10.18167/coopist/0065>). C'est la méthode de choix pour préparer l'évaluation de la cancérogénicité de certains agents chimiques ou physiques, par exemple.

## 2 Exposition aux champs magnétiques statiques

### 2.1 Les champs magnétiques statiques

L'appréhension du magnétisme peut être très simple : faire l'expérience d'un *magnet* que l'on « colle » et « décolle » de la porte d'un réfrigérateur... La force qui permet au *magnet* de tenir à la surface d'un réfrigérateur, malgré l'effet de la pesanteur, est la force magnétique ; elle traduit l'existence d'un champ magnétique créé par l'aimant.

Les champs magnétiques font partie de notre monde sensible, et plus largement de notre univers : bon nombre d'étoiles possèdent un champ magnétique, comme le soleil, dont les tâches sombres et les éruptions à la surface sont liées à des particularités locales du champ magnétique.

Les aimants permanents, c'est-à-dire dont la propriété d'aimantation est constante, génèrent un champ magnétique permanent, invariable dans le temps, que l'on qualifie de « statique ». L'autre grande source de champ magnétique dans notre environnement est le courant électrique. Tout déplacement de charges électriques (le « courant »), par exemple dans un fil électrique, crée un champ magnétique. Ce champ magnétique est appelé « statique » lorsque le courant électrique est continu (son intensité ne varie pas au cours du temps)<sup>7</sup>.

L'intensité du champ magnétique s'exprime en tesla (symbole T), en référence au physicien Nikola Tesla. Un tesla représente en quelque sorte la force qu'une source de champ magnétique est capable de produire sur un objet (sensible au champ magnétique...)<sup>8</sup>. En pratique, compte tenu des intensités généralement observées, en particulier pour le champ magnétique terrestre, on utilise fréquemment le millionième de tesla, exprimé sous la forme «  $\mu\text{T}$  ».

#### **Point sur la terminologie**

Historiquement, après avoir découvert que l'électricité - la circulation d'un courant électrique - permettait de produire un champ magnétique, l'inverse a été recherché, et montré : il est possible de générer de l'électricité à partir d'un champ magnétique. Ce phénomène physique est appelé l'induction électromagnétique : il traduit l'apparition d'une force, qualifiée d'électromotrice, dans un conducteur électrique soumis à un flux magnétique variable, responsable de la circulation d'un courant électrique.

À l'origine de cette force, le champ vectoriel<sup>9</sup>, noté  $\vec{B}$ , qui représente la densité de flux magnétique, permettant d'expliquer les effets observés, et en particulier l'induction électromagnétique. L'unité associée à ce champ est le tesla (T).

Un autre champ est utilisé pour décrire notamment les propriétés d'aimantation de la matière, le champ  $\vec{H}$ , dont l'unité est l'ampère par mètre (A/m).

Afin de distinguer ces deux champs, les termes suivants sont parfois utilisés : le champ d'induction magnétique pour  $\vec{B}$ , et le champ d'excitation magnétique pour  $\vec{H}$ .

<sup>7</sup> Si l'intensité du courant varie en fonction du temps, selon une fréquence donnée, l'intensité du champ magnétique varie également selon cette même fréquence.

<sup>8</sup> Un tesla représente la force nécessaire par exemple pour transmettre à un objet d'1kg une accélération d'1 m par seconde à chaque seconde, par mètre et pour un courant électrique de 1 ampère.

<sup>9</sup> C'est-à-dire la propriété de l'espace permettant d'expliquer les phénomènes observés, à laquelle, en tout point, sont associés une valeur absolue, une direction et un sens.

Bien que la Commission électrotechnique internationale a désigné, dans une note publiée en 1998<sup>10</sup>, le champ  $\vec{H}$  sous le terme « champ magnétique » ou « excitation magnétique », et le champ  $\vec{B}$  par le terme « induction magnétique », nous utiliserons dans la suite de ce document le terme « champ magnétique » pour le champ  $\vec{B}$ , d'une part parce que l'usage commun fait plutôt référence à ce terme, et d'autre part parce que l'on s'intéresse en pratique au champ magnétique statique présent dans l'environnement, à l'extérieur des câbles électriques et de matériaux ferromagnétiques.

## 2.2 Sources de champs magnétiques statiques

### 2.2.1 Champ magnétique terrestre

La Terre est elle-même une source de champ magnétique qui, à grande échelle, permet notamment aux êtres vivants d'être protégés des particules énergétiques émises par le soleil, grâce au « bouclier » ainsi créé... Les propriétés attractives de certains minéraux sont connues depuis l'antiquité, et la découverte de leur utilisation comme boussole pour s'orienter remonterait au premier siècle avant JC en Chine, avant son importation en Europe au 12<sup>e</sup> siècle. Mais il faut attendre 1600 pour que le lien entre ces aimants et le champ magnétique terrestre soit établi : un aimant à la surface d'une boule magnétisée, ou de la Terre, indique toujours le même point, le pôle Nord. Les conditions d'apparition du champ magnétique terrestre lors de la formation de la Terre, ainsi que la pleine compréhension des mécanismes qui le créent, font encore l'objet de recherches. Une chose est sûre, et s'observe : l'intensité, et le sens, du champ magnétique terrestre évolue au cours du temps. Tous les ans, le lieu exact des pôles magnétiques nord (près du pôle Sud géographique) et sud (à proximité du pôle Nord géographique) évolue de plusieurs km voire dizaines de km. Par ailleurs, l'intensité du champ magnétique terrestre est variable à la surface du globe : elle est environ deux fois plus élevée aux pôles (environ 65-70  $\mu\text{T}$ ) qu'à l'équateur (environ 25-30  $\mu\text{T}$ ). Le champ magnétique terrestre mesuré à la surface résulte en effet de plusieurs contributions : le champ magnétique généré à l'intérieur de la Terre par effet « dynamo », le plus important, le champ magnétique créé par certaines roches aimantées, ou encore le champ lié aux interactions entre l'atmosphère et les particules énergétiques émises par le soleil<sup>11</sup>. Enfin, la partie externe du champ magnétique terrestre, au-dessus de l'atmosphère (magnétosphère), est soumise aux particules du vent solaire, ce qui peut influencer la valeur globale du champ magnétique au niveau du sol.

L'Institut de Physique du Globe<sup>12</sup> poursuit aujourd'hui une intense activité de recherche et d'observation dédiée au champ magnétique terrestre. En métropole, des mesures permanentes sont effectuées à l'observatoire de Chambon-La-Forêt. Il est ainsi possible de visualiser l'évolution du champ magnétique terrestre enregistré par exemple quotidiennement entre 2015 et 2020 (cf. Figure 1) Entre le 1<sup>er</sup> janvier 2015 et le 31 décembre 2020, la valeur du champ magnétique mesurée a augmenté régulièrement d'environ 47,8  $\mu\text{T}$  à 48,4  $\mu\text{T}$ . Le 21 février 2022, le programme d'échange de données entre observatoires géomagnétiques INTERMAGNET<sup>13</sup> donne ainsi pour le champ magnétique à l'observatoire de Chambon-La-Forêt la valeur de 48,1  $\mu\text{T}$  (cf. Figure 2).

<sup>10</sup> <https://std.iec.ch/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=121-11-56>.

<sup>11</sup> <https://www.ipgp.fr/fr/obsmag/champ-magnetique-de-terre>.

<sup>12</sup> <https://www.ipgp.fr/fr>.

<sup>13</sup> <https://www.intermagnet.org/index-eng.php>.

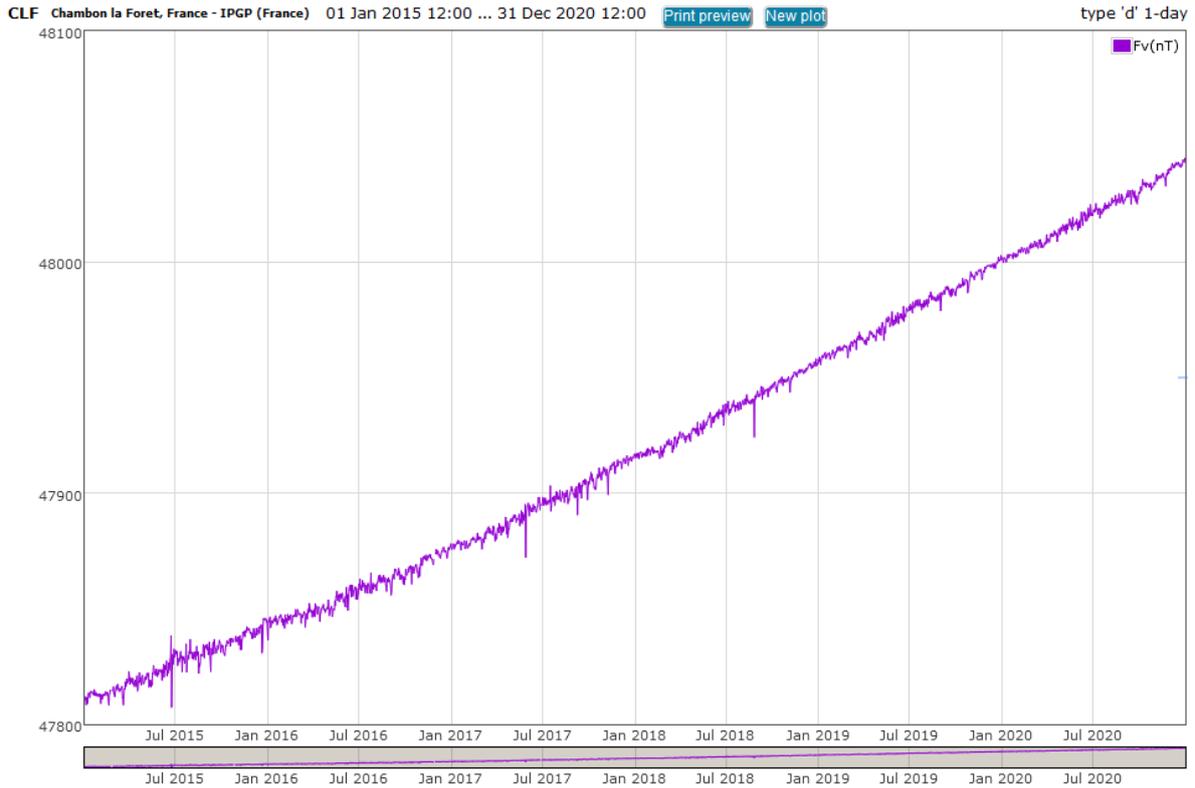


Figure 1 : évolution du champ magnétique à la station de Chambon-La-Forêt entre 2015 et 2020 (mesures quotidiennes).

Source : Bureau Central de Magnétisme Terrestre, IGP, 1 rue Jussieu, 75238 Paris Cedex 05.

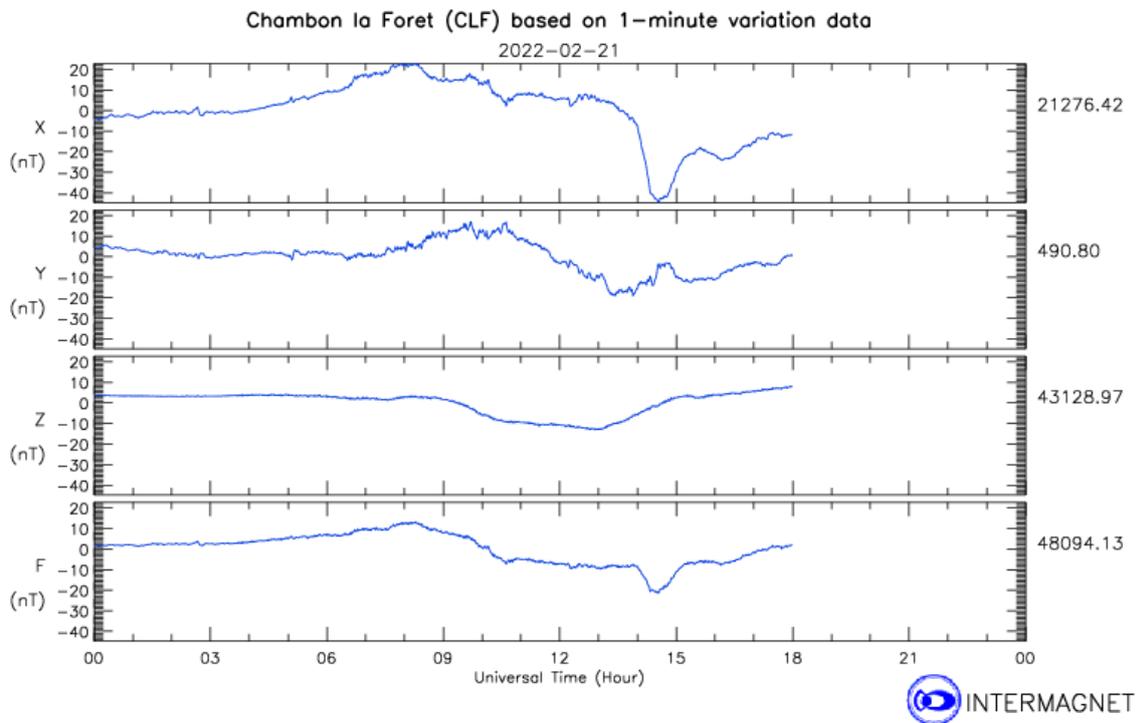


Figure 2 : valeur du champ magnétique à Chambon-La-Forêt le 21 février 2022.

Source : Intermagnet, <https://www.intermagnet.org/index-fra.php>

Le rapport du groupe consultatif indépendant sur les rayonnements non ionisants de l'Agence anglaise de protection sanitaire (Agnir, 2008) sur les champs magnétiques statiques fournit des données sur l'exposition au champ magnétique terrestre au sein des habitations et en milieu de travail. Les résultats d'une étude publiée par Swanson sont décrits : des mesures de champ magnétique statique ont été réalisées dans 55 habitations en Angleterre, en 1992 (Swanson, 1994). Pour chaque volontaire, des mesures ont été réalisées à l'extérieur des habitations, ainsi qu'au centre et à 1 m des quatre coins du salon et au niveau de l'oreiller dans la chambre à coucher. Des variations de l'ordre de  $\pm 10\%$  par rapport à la valeur attendue du champ magnétique terrestre ont été constatées, interprétées comme liées à la présence d'objets ferromagnétiques (meubles, radiateurs). Swanson a également conclu que les variations du champ magnétique terrestre étaient plus importantes au sein même des maisons qu'entre les habitations elles-mêmes. Le rapport de l'Agence sanitaire anglaise décrit également les résultats d'une étude réalisée aux États-Unis, où le champ magnétique résidentiel a été mesuré dans 697 maisons à travers 8 États (Kaune *et al.*, 2001). L'écart-type des valeurs mesurées dans les chambres et les salons était respectivement de 3 et 2,8  $\mu\text{T}$ .

Toujours dans le rapport de l'Agence sanitaire anglaise, il est fait état d'une publication de Bowman et Methner, qui décrit des mesures de champ magnétique en environnement industriel, dans six usines de l'Ohio, aux États-Unis (Bowman et Methner, 2000). Les mesures ont été réalisées à proximité de 59 équipements électriques, à 1 m de hauteur, à l'emplacement d'un poste de travail. La valeur médiane de 39,24  $\mu\text{T}$ , plus faible que le champ magnétique terrestre attendu de 55  $\mu\text{T}$ , est expliquée par les auteurs de la publication comme résultant du blindage créé par les structures métalliques des usines ainsi que par les machines.

### 2.2.2 Autres sources de champs magnétiques statiques

Parmi les dispositifs qui génèrent des champs magnétiques statiques, produits notamment par des aimants, ou des courants continus, figurent par exemple les lignes de transport d'électricité à courant continu, les batteries, les électroaimants, les supports d'enregistrements sur bandes magnétiques, les disques durs, les moteurs à courant continu, certains générateurs de courant, des capteurs, des lignes de transport ferroviaire ou encore des applications médicales comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Cette dernière utilise la résonance magnétique nucléaire, propriété physique de certains atomes lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique. La technique IRM fait en réalité appel à 3 types de champs : un champ magnétique statique très intense (entre environ 1,5 et 3 T<sup>14</sup>), émis par un aimant constitué en règle générale d'une bobine supraconductrice refroidie à l'hélium liquide, un champ magnétique variable (autour de 1 à 10 kHz), et un champ magnétique radiofréquence (fréquence autour de 50 à 150 MHz).

Certaines lignes ferroviaires ont hérité de l'électrification du réseau de chemin de fer entamé à partir de 1920, alors en 1 500 V continu. En-dehors des lignes à grande vitesse, des lignes comme Paris-Lyon-Marseille, Paris-Tours-Bordeaux-Hendaye, Paris-Orléans-Limoges-Toulouse, etc. ainsi que de nombreuses lignes régionales fonctionnent toujours en courant continu. Dans ce cas, le champ magnétique émis par ces lignes n'est évidemment pas « recherché », c'est une conséquence de l'utilisation de l'énergie électrique. C'est bien sûr le cas également pour les champs magnétiques émis par les lignes de transport d'électricité en courant continu, pour lesquelles le champ magnétique créé n'est que la manifestation physique de la circulation du courant électrique.

---

<sup>14</sup> Pour les appareils de diagnostic courants, certains appareils utilisés dans le domaine de la recherche peuvent émettre des champs jusqu'à 7,8 T, voire plus encore.

Les lignes électriques haute tension à courant continu permettent de transporter de l'énergie électrique. Le choix d'utiliser du courant continu plutôt que du courant alternatif est lié notamment à la limitation des pertes énergétiques lors du transport d'électricité sur de longues distances. C'est ainsi la seule solution pour les câbles sous-marins de longue distance. La circulation de l'électricité dans les câbles électriques haute tension produit un champ magnétique et un champ électrique statique, lorsque ceux-ci sont aériens. Lorsque les câbles sont souterrains, ils sont nécessairement isolés par des gaines isolantes, et la présence d'écrans métalliques supprime l'émission du champ électrique. Un champ électrique, au contraire du champ magnétique, ne peut en effet traverser une paroi métallique.

Les lignes électriques haute tension à courant continu sont ainsi principalement utilisées pour transporter l'électricité sur de très longues distances, comme la ligne Québec-Nouvelle Angleterre, entre le Canada et les États-Unis, pour une longueur totale de 1 480 km. En Chine, ce type de ligne est par exemple utilisé entre des barrages hydroélectriques, et pour relier ces installations aux lieux d'utilisation. Un projet prévoit ainsi de construire une ligne de 2 000 km entre Xiangjiaba et Shanghai. En Australie, une liaison souterraine de 180 km de longueur est en projet. En Europe, l'Interconnexion France-Angleterre en courant continu a été construite en 1961, avant d'être rénovée au milieu des années 1980. Le développement des énergies renouvelables, en particulier l'éolien, favorise aujourd'hui les projets de lignes haute tension à courant continu. Les projets de parcs éoliens en mer, par exemple, imposent d'utiliser de telles liaisons pour apporter l'électricité à terre, par des câbles sous-marins. En Allemagne, la présence de parcs éoliens de grande envergure dans le nord du pays a favorisé le projet de construction d'une ligne d'environ 800 km apportant l'énergie du nord au sud, la *Südklink*. À l'heure actuelle, de nombreuses lignes électriques haute tension en courant continu existent entre pays européens, principalement pour transporter l'énergie à travers les mers, au moyen de câbles sous-marins.

Un rapport du JRC, le Centre de recherche conjoint de l'Union européenne, publié dans le cadre du projet de recherche européen *Offshore Transnational Grid*, pour identifier et analyser les enjeux géopolitiques et techniques dans l'établissement d'une interconnexion énergétique entre l'Europe et l'Amérique du Nord, présente un état de l'art des liaisons sous-marines en haute tension à courant continu dans le monde (Ardelean, 2015). Ce travail s'intéresse aux conditions géographiques et environnementales dans lesquelles les liaisons sont établies, aux aspects techniques de la constitution et de l'installation des câbles, mais aussi aux impacts sur l'environnement (cf. 2.3.2). Ce rapport présente en particulier un état de l'art, en 2015, de la distribution des liaisons sous-marines en courant continu dans le monde<sup>15</sup>.

### 2.3 Revue des données de mesure d'exposition aux champs magnétiques statiques

Les paragraphes suivants présentent d'une part les protocoles de mesure de l'exposition aux champs magnétiques statiques aujourd'hui disponibles, et d'autre part les données d'exposition disponibles concernant les champs magnétiques statiques émis par des lignes électriques haute tension à courant continu. À des fins de comparaison, des éléments sur d'autres expositions provenant de sources artificielles, notamment celles liées aux appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM), ainsi que des expositions en milieu professionnel, ou provenant de moyens de transport, sont également décrits.

---

<sup>15</sup> <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC97720/ld-na-27527-en-n.pdf>.

### 2.3.1 Protocole de mesure

Le document de référence pour la réalisation de mesures de l'exposition aux champs magnétiques statiques est la norme de la commission électrotechnique internationale (*International Electrotechnical Commission*) IEC 61786-1:2013. Cette norme fournit des lignes directrices pour la mise en œuvre d'instruments de mesure utilisés pour mesurer l'intensité des champs magnétiques et électriques « quasi statiques » (de 1 à 100 kHz) et du champ magnétique statique, afin d'évaluer l'exposition humaine à ces champs. Parmi les sources de champs visés figurent les appareils ou installations produisant des champs statiques, mais aussi le champ magnétique statique de la Terre. La partie 1 de cette norme couvre les instruments de mesure, et la partie 2 (IEC 61786-2:2014) les procédures de mesure (cf. annexe 1).

Lorsqu'il s'agit de mesurer l'exposition au champ magnétique statique provenant de sources artificielles, dont l'intensité est voisine de celle du champ magnétique terrestre, il peut être utile de soustraire le champ magnétique terrestre à la valeur mesurée, pour bien représenter la contribution de la source étudiée, ou d'indiquer que la valeur mesurée représente l'exposition globale.

En règle générale, d'après les recommandations de la norme IEC 61786, les mesures sont réalisées à une hauteur d'1 m au-dessus du sol.

### 2.3.2 Exposition dans l'environnement de lignes électriques à courant continu

#### Liaison France-Espagne

Parmi les documents mis à disposition par la CNDP pour cette expertise, figure le rapport de mesure de RTE (RTE, 2016) concernant la liaison à courant continu entre la France (Baixas) et l'Espagne (Santa Llogaia). Des mesures effectuées, d'après ce document, en suivant les recommandations de la norme IEC 61786, ont été réalisées avant et après la mise en service de la liaison électrique. Elles ont été réalisées à l'intérieur du poste de connexion et dans la ville de Baixas, ainsi que dans différents villages. Les valeurs de champ magnétique total (donc comprenant le champ magnétique terrestre) sont situées, avant la mise en service de la liaison, autour de 45  $\mu\text{T}$ . On retrouve bien là, aux incertitudes de mesure et particularités locales près, la valeur du champ magnétique terrestre en France métropolitaine.

Deux types de mesures ont été réalisées : des mesures uniques, localisées en un point précis, à 1 m du sol, et des mesures multiples permettant de représenter l'évolution du champ magnétique transversalement à la ligne (« profil »), sur une distance de 10 m de part et d'autre du milieu de la liaison. Ainsi, en sortie du poste de connexion, on observe un profil classique d'atténuation du champ magnétique lorsqu'on s'éloigne des câbles : le champ magnétique est mesuré à environ 85  $\mu\text{T}$  directement au-dessus des câbles, alors qu'au-delà de 5 m de distance, l'influence des câbles n'est plus perceptible, on retrouve alors exclusivement l'intensité du champ magnétique terrestre. On peut par ailleurs noter que ces valeurs ont été obtenues le 30 juillet 2015, après la mise en service de la ligne, pour une puissance électrique dans la ligne de 2 000 W. Lors d'une autre campagne de mesures effectuée le 24 septembre 2015, pour une puissance électrique deux fois inférieure, 1 000 W, les valeurs maximales mesurées sont bien plus faibles, autour de 55  $\mu\text{T}$ .

Les mesures effectuées sur la voirie, à proximité d'habitations du village de Baixas, ne mettent pas en évidence de différence entre le niveau de champ magnétique total avant et après la mise en service de la liaison, pour une puissance électrique de 2 000 W.

Toutes les mesures effectuées à proximité d'habitations, que la ligne transporte une puissance de 1 000 ou 2 000 W, ne montrent aucune différence notable de l'intensité du champ magnétique par rapport à la situation avant sa mise en service.

En conclusion, la valeur maximale de champ magnétique relevée lors de ces campagnes de mesure est d'environ 99  $\mu\text{T}$ . Hormis dans un fuseau de quelques mètres de part et d'autre des câbles, où le champ magnétique statique peut être plus élevé que le champ terrestre lorsque la ligne est en charge, les données de mesure ne montrent pas d'augmentation du champ magnétique qui pourrait être lié au courant circulant dans les câbles. C'est en particulier le cas pour les mesures réalisées à proximité des habitations.

## Liaisons France-Angleterre

### Liaison IFA2

Dans l'objectif d'augmenter les capacités d'échanges entre la France et l'Angleterre, RTE et son homologue britannique National Grid ont construit une nouvelle ligne entre les deux pays, intitulée IFA2. Cette interconnexion en courant continu, d'une capacité de 1 000 MW, est constituée d'une liaison sous-marine de 200 km entre le sud de l'Angleterre et la Basse-Normandie (point d'atterrage à Merville) et d'une liaison terrestre de 24 km, en France, jusqu'au poste de conversion de Tourbe. Elle a été mise en service commercialement le 22 janvier 2021.

Un rapport de mesures du champ magnétique statique après la mise en service de l'interconnexion a été commandé par RTE à l'Issep (Institut scientifique de service public - Belgique). Le rapport de mesures (Issep, 2021), fourni pour les besoins de la présente expertise par RTE, mentionne que 42 mesures ont été réalisées dans le domaine public, dans des zones urbanisées et agricoles, ainsi que dans 24 habitations de riverains de la liaison. Pour 15 d'entre eux, des mesures ont été réalisées avant et après la mise en service de l'interconnexion. Les valeurs présentées sont données sans déduction du champ magnétique terrestre. Les valeurs de champ magnétique dépendent de la charge de la ligne, c'est-à-dire de l'intensité du courant qui transite. L'annexe 3 du rapport fournit à ce propos les valeurs horaires de la puissance engagée dans la ligne pendant les 3 jours de mesures après la mise en service<sup>16</sup>. Les mesures dans l'espace public ont été réalisées le 3 juin 2021 entre 9h30 et 15h, tranche horaire pendant laquelle le transit était maximal. Les valeurs de champ magnétique mesurées peuvent donc être considérées comme représentant un maximum de l'exposition. Pour les mesures réalisées au domicile de riverains, le transit était maximal le 4 juin, de 9h à 17h (10 habitations) et à environ 80 % du maximum le 5 juin, entre 10h et 13h (6 habitations).

#### *Mesures dans l'espace public*

Une des particularités de cette étude est que des mesures ont été réalisées, de façon classique, à 1,5 m du sol, c'est-à-dire à une hauteur moyenne pour une personne, mais également à environ 10 cm du sol, afin de rendre compte de l'atténuation rapide du champ avec la distance. Ces mesures réalisées à deux hauteurs différentes par rapport au sol sont intéressantes, dans la mesure où cela permet, lorsque les valeurs mesurées sont pratiquement identiques, d'exclure l'influence du champ magnétique créé par la ligne. Cette situation est particulièrement visible pour les localisations à l'aplomb de la ligne, pour lesquelles on retrouve systématiquement une valeur de champ magnétique statique plus élevée à 10 cm du sol qu'à 1,5 m. Toutes les mesures effectuées autrement qu'à l'aplomb de la ligne ne permettent pas de mettre en évidence l'influence du champ magnétique émis par la

<sup>16</sup> Le site <https://rnp.unicorn.com/NOM04> permet d'accéder publiquement aux données horaires de transit du courant dans plusieurs interconnexions, dont IFA2.

ligne électrique, aux incertitudes de mesure près. À titre d'exemple, pour les mesures réalisées à Descanneville, lorsque la ligne est enfouie sous la voirie, il n'est pas possible de discerner, en bord de route, le champ magnétique statique émis par la ligne du champ magnétique terrestre. La valeur maximale du champ magnétique mesurée dans la zone du point d'atterrissage est de 138  $\mu\text{T}$  à 10 cm du sol, et 88  $\mu\text{T}$  à 1,5 m. La valeur du champ magnétique terrestre est d'environ 46  $\mu\text{T}$ . En zone urbaine, la valeur maximale relevée est de 107  $\mu\text{T}$  à 10 cm du sol, et 70  $\mu\text{T}$  à 1,5 m. Ces valeurs ont été mesurées à l'aplomb de la ligne.

En zone agricole, toutes les mesures ont été réalisées à l'aplomb de la ligne, la valeur maximale relevée est de 129  $\mu\text{T}$  à 10 cm du sol, et 75  $\mu\text{T}$  à 1,5 m.

#### *Mesures chez des riverains*

Quinze des seize riverains ayant sollicité des mesures après la mise en service de la ligne avaient également bénéficié de mesures avant l'installation. Les mesures réalisées alors en 2018 représentent donc l'unique contribution du champ magnétique terrestre, aux alentours de 48  $\mu\text{T}$ , aux incertitudes de mesure près. Au domicile des riverains, les mêmes valeurs sont partout retrouvées, ce qui indique que la contribution de la ligne électrique au champ magnétique global est trop faible pour être mesurée. Dans deux situations, des écarts de l'ordre de 1 à 2  $\mu\text{T}$  sont observés en extérieur entre les mesures avant et après mise en service, qui pourraient correspondre à l'influence de la ligne, dans la mesure où les points de mesure sont situés à proximité immédiate de la voirie. Au sein des habitations concernées, l'exposition au champ magnétique lié à la ligne n'est plus mesurable.

Les conclusions fournies par l'Issep sur l'exposition aux champs magnétiques statiques émis par la ligne sont les suivantes : « le couloir dans lequel le champ magnétique statique est supérieur à la composante terrestre n'est que de quelques mètres, les diverses mesures présentées dans ce rapport et d'autres mesures complémentaires ont montré qu'au-delà de 3-4 m, le champ magnétique produit par la liaison IFA2 est inexistant ».

#### Interconnexion Aquind

L'interconnexion « Aquind » est un projet de ligne de transport d'électricité à haute tension en courant continu entre la côte sud de l'Angleterre et la Normandie. La liaison est sous-marine et souterraine pour les parties terrestres. Le site internet de la consultation associée à ce projet fournit quelques informations sur les champs magnétiques<sup>17</sup> émis par cette ligne, semblable à celle du projet Golfe de Gascogne (2 paires de câbles). Un état des lieux initial de l'exposition aux champs magnétiques statiques pour la partie souterraine, en Normandie, a été réalisé, avant la construction de la ligne. De nouvelles mesures, une fois la ligne active, ne sont pas prévues. Les données de mesure issues de la ligne France-Espagne ont été utilisées dans le cadre de la concertation. Des simulations des champs magnétiques statiques émis par la ligne ont néanmoins été réalisées par le laboratoire de mesures Simutech. Elles ont permis d'estimer que le champ magnétique statique généré par cette ligne serait de 26  $\mu\text{T}$  à 1 m des câbles, 8  $\mu\text{T}$  à 5 m, et 1  $\mu\text{T}$  à 10 m de la ligne.

#### **Autres données concernant des lignes haute tension à courant continu**

##### National Grid (Grande-Bretagne)

Peu de données concernant le niveau de champ magnétique émis par des câbles souterrains ou sous-marins alimentés en courant continu à haute tension ont été identifiées. Parmi les sources

<sup>17</sup> [https://aquindconsultation.fr/champs-electromagnetiques/.](https://aquindconsultation.fr/champs-electromagnetiques/)

d'information disponibles, le site internet géré par National Grid (gestionnaire du réseau de transport d'énergie, électricité et gaz, au Royaume Uni), pour le compte de l'industrie de l'électricité au Royaume-Uni. Celui-ci fournit des calculs du champ magnétique émis par une configuration type utilisée au Royaume-Uni pour connecter un câble souterrain à une station de conversion : 2 câbles, espacés de 50 cm, à une profondeur de 1 m, transportant 2 000 A à +/- 500 kV (les câbles sous-marins présentent les mêmes caractéristiques, mais sont plus espacés). La figure suivante présente le champ magnétique ainsi calculé (cf. Figure 3). Il est précisé qu'à ce champ magnétique s'additionne le champ magnétique terrestre.

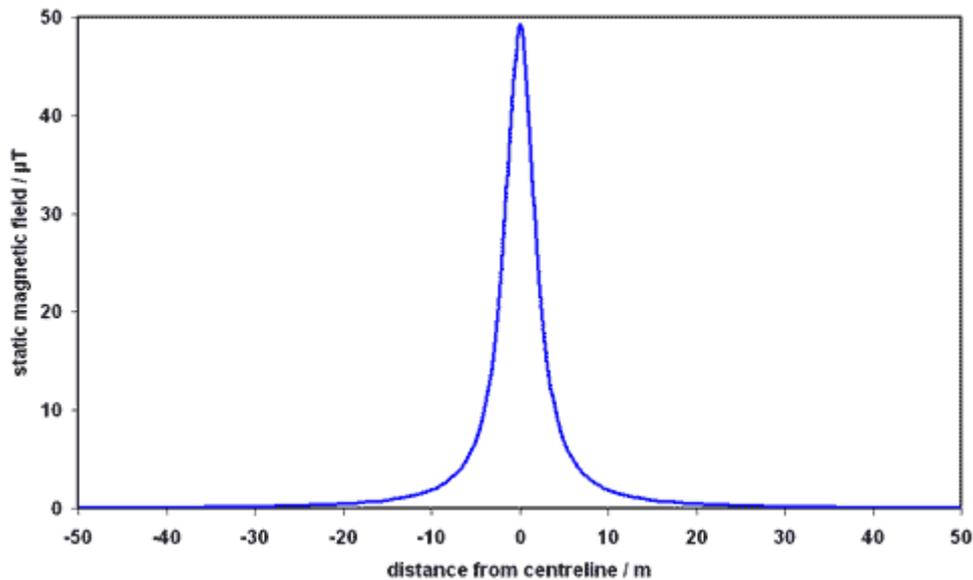


Figure 3 : calcul du champ magnétique statique émis par un câble typique souterrain (National Grid, UK).

Source : <https://www.emfs.info/static-fields/static-sources/hvdc/>

Le tableau suivant présente les valeurs de champ magnétique statique pour le câble seul, et combinées avec le champ magnétique terrestre (pris à 50 µT), dans la configuration particulière d'un câble orienté nord-sud (cf. Tableau 1). En effet, la valeur résultant de la sommation des deux champs magnétiques dépend des orientations respectives du câble et du champ magnétique terrestre. La déviation d'une boussole aux distances considérées par rapport au câble est donnée à titre indicatif.

Tableau 1 : valeurs de champ magnétique pour un câble souterrain (RU)

Câbles espacés de 50 cm, enterrés à 1 m de profondeur		Champ magnétique (µT) pour une distance horizontale par rapport au milieu des 2 câbles			
		0 m	5 m	10 m	20 m
+/-500 kV, 2 kA	Champ émis par le câble seul	49,23	6,91	1,92	0,50
	Champ total (câble + champ magnétique terrestre 50 µT)	96,9	45,77	48,40	49,56
	Déviaton de la boussole (°)	0	12,7	2,0	0,3

### Département américain de l'intérieur - 2011

Le Bureau de la gestion, de la réglementation et de l'application de l'énergie océanique de la région Pacifique (Département américain de l'intérieur) a publié un rapport, en 2011, consacré aux données disponibles concernant les effets des champs électromagnétiques sur certaines espèces animales marines, en lien avec le développement des énergies renouvelables *offshore* (Normandeau *et al.*, 2011). L'installation de parcs éoliens en mer, en particulier, au-delà des interconnexions électriques entre pays, va nécessairement accroître le nombre de câbles électriques sous-marins. S'agissant des champs magnétiques émis par les liaisons en courant continu, ce rapport souligne que les données provenant de documents s'intéressant aux câbles sous-marins sont le plus souvent incomplètes, qu'il s'agisse de mesures réalisées sur le terrain, ou de simulations des champs émis par les câbles. Il précise que dans l'immense majorité des cas, le champ magnétique terrestre n'est pas pris en considération dans les modélisations, alors qu'il peut interagir différemment avec le champ émis par les câbles, en fonction de leur orientation et de leur localisation sur le globe. Les auteurs du rapport ont simulé le champ magnétique émis par différents types de câbles sous-marins (cf. Figure 4).

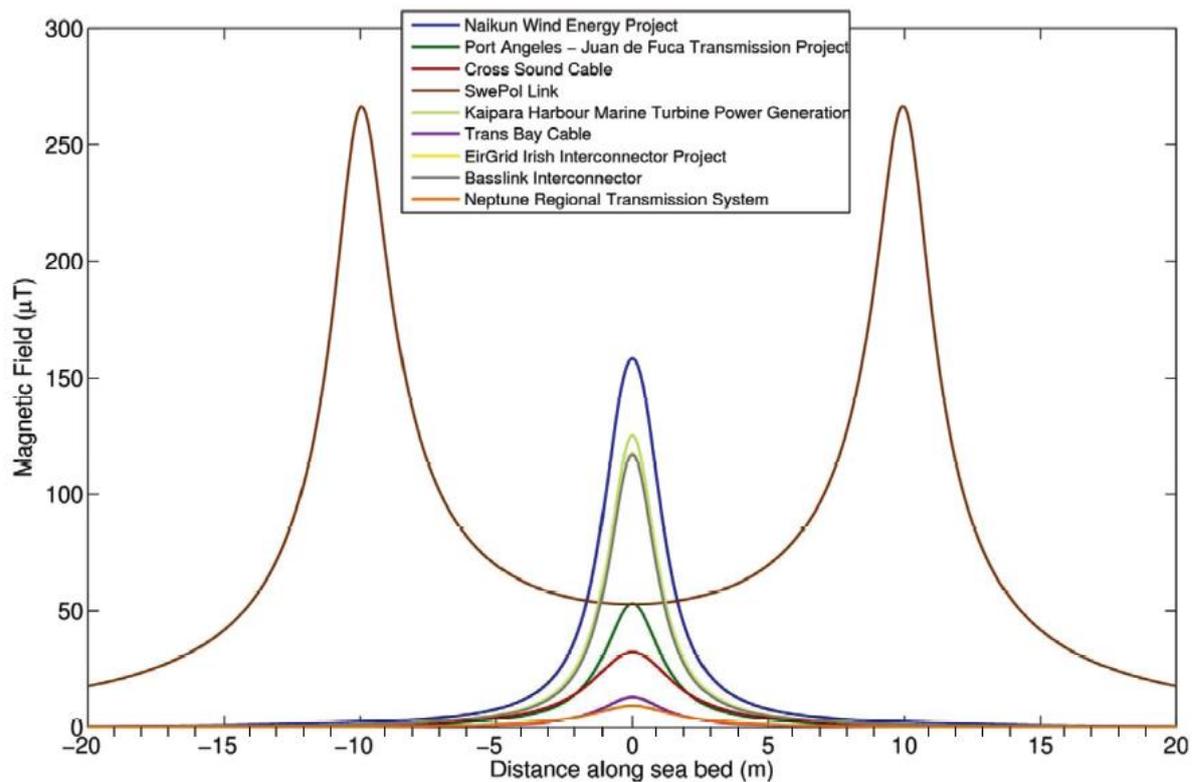


Figure 4 : champ magnétique statique calculé au niveau du fond marin pour 9 projets sous-marins utilisant des câbles monopolaires et bipolaires<sup>18</sup> enfouis.

Note : Les profils pour l'interconnexion Basslink et le projet d'interconnexion irlandais EirGrid se recouvrent totalement.  
Source : Normandeau *et al.*, 2011.

Ces données sont représentées agrégées et moyennées dans la figure suivante (cf. Figure 5).

<sup>18</sup> Liaisons monopolaires : un seul conducteur est utilisé, le retour de courant se fait par la terre, la mer, ou une structure métallique ; liaisons bipolaires : deux conducteurs, de polarités négative et positive sont utilisés.

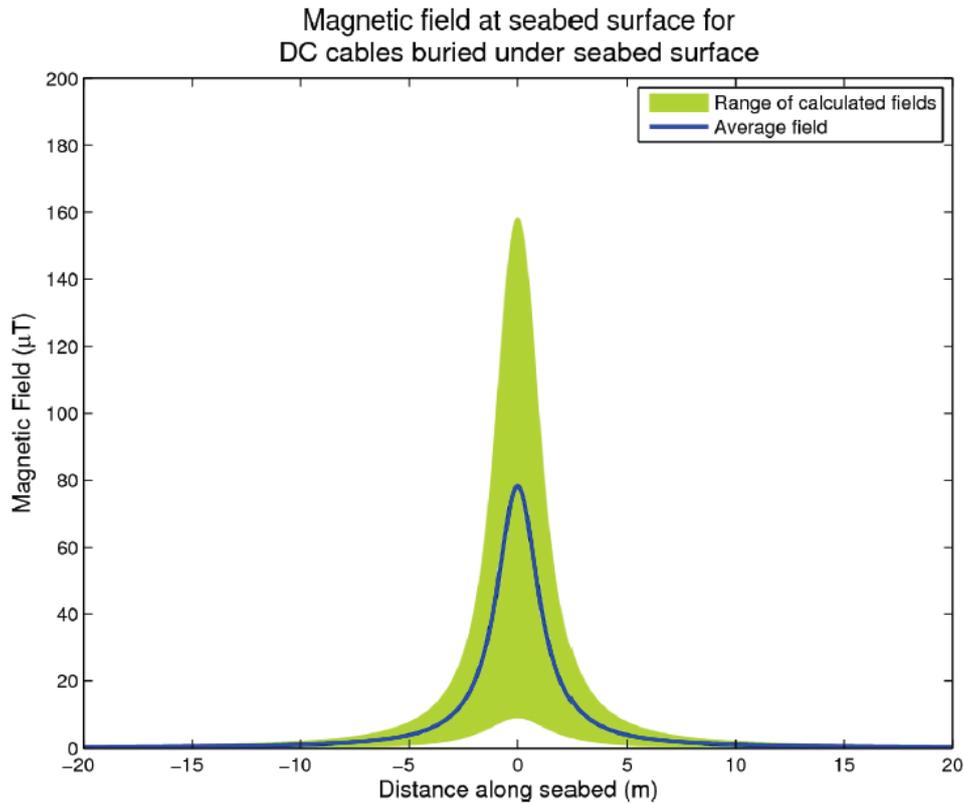


Figure 5 : moyenne du champ magnétique statique (courbe bleue) calculée au niveau du fond marin pour plusieurs projets.

Source : Normandeau et al., 2011.

Les auteurs rappellent également que l'interaction entre le champ magnétique statique émis par les câbles et le champ magnétique terrestre complique l'évaluation de leur influence. L'intensité, la forme et l'extension spatiale du champ magnétique résultant (câble + champ terrestre) dépendent de l'orientation du câble par rapport au dipôle magnétique nord-sud de la Terre. Un exemple de cette interaction est donnée pour un câble du projet Naikun, une ferme éolienne *offshore* en Colombie britannique, au Canada, modélisée sans (à gauche) et avec (à droite) le champ magnétique terrestre (cf. Figure 6). Le câble du projet Naikun est un câble de tension +/- 200 kV, opérant à 400 MW, orienté nord-nord-est. Deux situations ont été modélisées : deux câbles espacés d'1 m (courbes rouges), et deux câbles côte à côte (courbes vertes). Dans les deux cas, ils sont considérés enfouis à 1 m de profondeur.

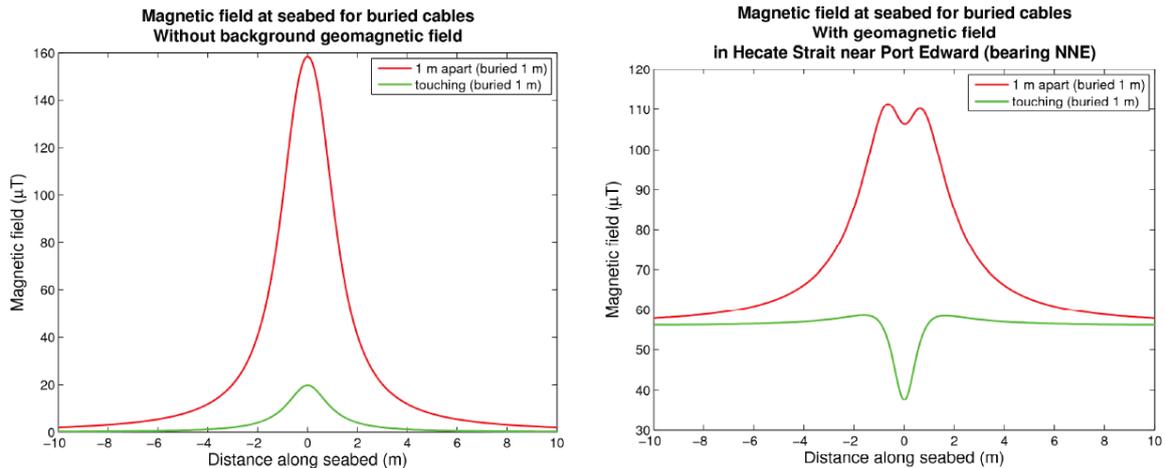


Figure 6 : profil du champ magnétique statique modélisé pour le câble Naikun.

source : Exponent and Hatch, 2009, in Normandeau et al., 2011.

#### Centre de recherche conjoint de l'Union européenne - 2015

Dans un rapport publié en 2015, le Centre de recherche conjoint (JRC) de l'Union européenne (Ardelean *et al.*, 2015) indique que le champ magnétique statique émis par un câble sous-marin est le plus élevé juste au-dessus, et qu'il diminue en s'éloignant du câble, pour devenir identique à celui de la Terre à partir de 6 m de distance. Il s'appuie sur l'étude de Tricas et Gill (Normandeau *et al.*, 2011), qui présente une synthèse de données de champ magnétique le long d'un axe perpendiculaire à un câble enfoui sous le fond marin, avec l'ensemble et la moyenne des valeurs relevées, représentées en fonction de la distance au câble (*cf.* Figure 5).

#### Baie de San Francisco - 2016

Dans le cadre d'un projet financé par l'Institut de recherche sur l'énergie électrique (EPRI, États-Unis) et le Département américain de l'intérieur, Kavet et ses collègues ont publié un article (Kavet *et al.*, 2016) qui présente les résultats de mesures et simulations du champ magnétique émis par un câble de transport d'électricité en courant continu enterré dans la baie de San Francisco. Le câble « Transbaie » (*Trans Bay Cable*), de 85 km de longueur, transporte une puissance électrique de 400 MW, à +/- 200 kV, entre Pittsburg et San Francisco. Des mesures de champ magnétique ont été réalisées en 2014 au moyen de magnétomètres immergés, en quatre localisations dans la baie, notamment à proximité de ponts, le long de profils perpendiculaires au câble. Ce câble se situe en effet dans la direction de routes migratoires pour de nombreuses espèces marines, comme des esturgeons, des saumons ou des truites. Le champ magnétique émis par un câble parcouru par un courant continu a été calculé, grâce notamment à la loi de Biot et Savart (*cf.* 2.4.2), et ajouté vectoriellement avec le champ magnétique terrestre, pour représenter l'effet d'un câble dans la configuration de la baie. Par ailleurs, les mesures réalisées le long de 170 lignes perpendiculaires au câble ont été analysées visuellement afin de détecter des anomalies du champ magnétique terrestre trahissant la présence du câble. De nombreux profils de mesures présentaient des perturbations du champ magnétique non liées au câble, mais aux structures des ponts ou à d'autres objets immergés. La contribution du câble au champ magnétique, dans ces cas particuliers, n'a pu alors être détectée. Les anomalies de champs dues aux ouvrages pourraient être, selon les auteurs, 100 fois supérieures à celle créée par le câble. En revanche, pour 76 profils exploitables, les mesures ont été comparées avec les simulations, conduisant à estimer la profondeur du câble dans la baie à environ 2 m sous le fond

marin. La moyenne journalière du courant pendant les 8 jours de mesure, fournie par la compagnie d'exploitation du câble, était de  $722 \pm 95$  A, à comparer avec les  $986 \pm 185$  A obtenus grâce à la comparaison entre les mesures et les simulations. Au final, en dehors des situations où de fortes anomalies magnétiques dues par exemple à des structures bâties empêchent de discerner la présence du câble, il a été montré qu'il est possible de repérer un câble de courant continu par une approche combinant mesures géomagnétiques et simulations de l'émission de champ magnétique statique.

#### Mer du Nord - 2016

Un rapport préparé par les bureaux d'étude WaterProof Marine Consultancy & Research BV et Bureau Waardenburg BV, pour le compte de l'Office national néerlandais de l'eau, des transports et de l'environnement, fait le point sur les connaissances en matière de champs électromagnétiques émis par les câbles sous-marins, et les impacts potentiels associés en particulier sur la faune marine, dans le contexte d'un développement rapide attendu des fermes éoliennes *offshore* au large des côtes néerlandaises (Snoek *et al.*, 2016). Il existe de nombreux câbles de transport d'énergie en courant alternatif et continu qui sont placés perpendiculairement aux côtes néerlandaises. Le rapport fait le point sur les différents types de câbles, même si, *a priori*, seules des liaisons en courant alternatif étaient prévues. Comme la plupart des documents cités ici, ce rapport s'appuie aussi sur celui du cabinet Normandeau (Normandeau *et al.*, 2011) comme référence des niveaux d'exposition créés par des câbles en courant continu. Le rapport souligne toutefois que les niveaux modélisés par Tricas et Gill (Normandeau *et al.*, 2011) sont respectivement 2 à 3 et 30 fois plus faibles que ceux estimés par des auteurs précédents, Koops (Koops, 2000) et Bochert et Zettler (Bochert et Zettler, 2006). Ils avancent comme explication l'amélioration au cours du temps de la compréhension des calculs de l'intensité des champs magnétiques, et notamment la combinaison des champs émis par les câbles avec le champ magnétique terrestre.

Le rapport recense également les câbles déjà en place ainsi que les projets dans la partie néerlandaise de la mer du Nord. Deux câbles de transport d'électricité en courant continu étaient, à la date de rédaction de ce rapport, en place, entre les Pays-Bas et la Norvège d'une part (câble « Norned », 450 kV, 700 MW), et avec le Royaume-Uni d'autre part (câble « Britned », 450 kV, 1000 MW). Des câbles relient également des fermes éoliennes *offshore* à la côte, et des câbles de tension moyenne (33 kV). Le rapport indique des valeurs d'intensité des champs magnétiques statiques au voisinage des câbles de l'ordre de 100 à 300  $\mu$ T.

#### Mer Baltique - 2019

Dans un article publié en 2019, Otremba et ses collègues (Otremba *et al.*, 2019) ont examiné les impacts environnementaux éventuels du transfert d'énergie électrique produite dans le sud de la mer Baltique, dans les aires marines polonaises, par des fermes éoliennes. Cette revue de littérature s'appuie notamment sur la liaison sous-marine entre la Suède et la Pologne (liaison SwePol) installée en 2000, sur 230 km de longueur. Le champ magnétique terrestre en mer Baltique varie entre 50,1 et 50,5  $\mu$ T. À la date de rédaction de l'article, les auteurs recensaient en tout une douzaine de liaisons sous-marines, monopolaires (SwePol), ou bipolaires. Les auteurs indiquent que dans les liaisons à courant continu, la transmission est généralement effectuée au moyen de 2 câbles, l'un opérant à haute tension, et l'autre (retour du courant) à une tension proche de zéro. Le courant circulant dans les câbles sous-marins est généralement de 1 330 ou 1 600 A (Andrulewicz *et al.*, 2003 ; Öhman, 2007). Ce courant génère un champ magnétique intense maximum de l'ordre de 5,3 à 6,4 mT. Les auteurs ajoutent que, dans ces conditions, les champs magnétiques supérieurs au champ magnétique terrestre sont généralement mesurables dans un rayon de 6 m autour des câbles (Bochert et Zettler, 2004 ; Taormina *et al.*, 2018). L'article présente des calculs de l'intensité du champ magnétique émis

par la liaison SwePol, avec comme caractéristiques les éléments suivants : 1 330 A pour le courant, une tension de 400 kV, une puissance de 530 MW et le retour de courant par un câble basse tension (cf. Figure 7).

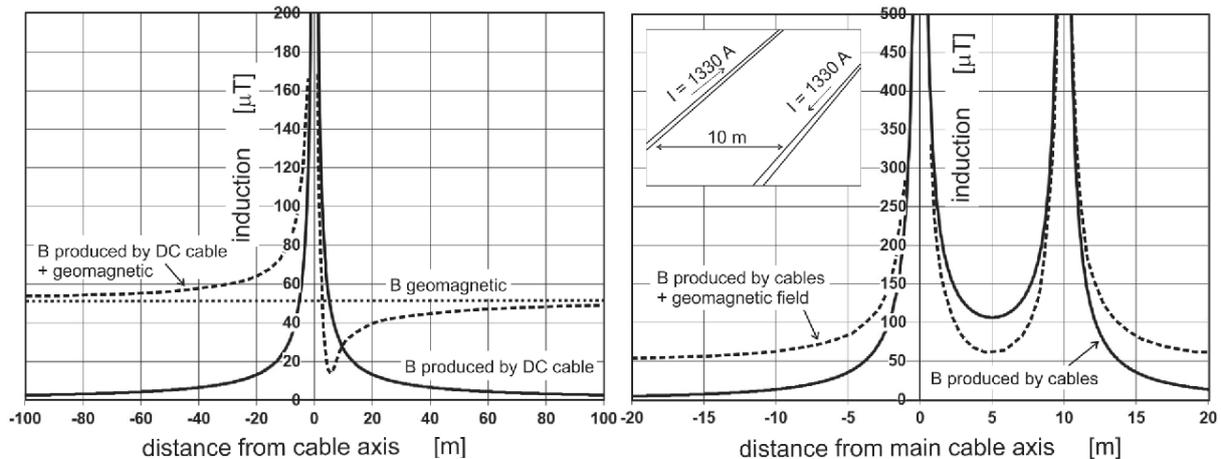


Figure 7 : induction magnétique produite par un câble unique (à gauche) et par deux câbles (à droite), et combinaison avec le champ géomagnétique.

Source : Otremba et al., 2019.

### Albert, 2020

La synthèse de L. Albert (Albert *et al.*, 2020) sur les connaissances sur les effets des champs électriques et magnétiques émis par les câbles électriques sous-marins sur les invertébrés présente notamment un tableau récapitulatif des mesures et calculs du champ magnétique émis par des câbles sous-marins. Pour les lignes monopolaires recensées, le niveau de champ magnétique statique maximum au fond de la mer est de 5 000  $\mu\text{T}$  et 50  $\mu\text{T}$  à 5 m au-dessus.

### 2.3.3 Exposition aux appareils d'imagerie par résonance magnétique

Le diagnostic médical au moyen de l'imagerie et de la spectroscopie par résonance magnétique (IRM et SRM) sont les sources principales de l'exposition des personnes à des champs magnétiques intenses (Agnir, 2008). Bien que ces niveaux d'exposition soient très supérieurs (de plusieurs ordres de grandeur<sup>19</sup>) à ceux du champ magnétique terrestre (de l'ordre de 50  $\mu\text{T}$ ), il paraissait important, à des fins de documentation, d'en faire mention ici. Le fonctionnement d'une IRM implique l'émission de trois types de champs : un champ statique, des gradients de champ (champs d'intensité variables en fonction du temps), et des champs radiofréquences (fréquences supérieures à 10 kHz). Nous considérerons ici uniquement le champ statique, objet de ce rapport. Les valeurs de champ magnétique statique utilisées dans les appareils médicaux courant sont de l'ordre de 1,5 à 3 T. On trouve par ailleurs, au centre de recherche NeuroSpin de Paris-Saclay du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), le plus gros aimant pour IRM du monde, dédié à la recherche sur l'imagerie du cerveau, délivrant un champ magnétique de 11,7 T. Il y a ainsi un facteur 6 en ordre de grandeur entre le champ magnétique terrestre et cet aimant (soit une multiplication par environ 1 000 000).

<sup>19</sup> L'ordre de grandeur d'une valeur est sa plus proche puissance de 10. Par exemple, l'ordre de grandeur de 12 est 10. L'ordre de grandeur de 1 347 est 1 000. « Plusieurs ordres de grandeurs » signifie par exemple un facteur 1 000, ou 1 000 000.

En 2006, il était estimé au Royaume-Uni (Moore *et al.*, 2006) que 1,37 million d'examens cliniques IRM étaient pratiqués tous les ans, correspondant à un examen annuel pour 2,5 % de la population.

### 2.3.4 Données d'exposition à d'autres sources artificielles de champ magnétique statique

Les sources artificielles de champ magnétique statique sont assez peu nombreuses dans notre environnement. En-dehors des usages délibérés des champs statiques ou des courants continus (aimants des IRM, transport d'électricité ou alimentation de trains en courant continu, moteurs à courant continu, certaines applications industrielles, ...), les alimentations d'appareils domestiques (ordinateurs, etc.), qui utilisent des transformateurs de courant, peuvent émettre des champs magnétiques statiques, en plus des champs alternatifs à la fréquence du secteur (50 ou 60 Hz en fonction des pays) et de leurs harmoniques. Les aimants (*magnets*) « collés » par exemple sur une porte de réfrigérateur, émettent un champ magnétique statique de l'ordre de 10 mT. Le record d'intensité pour un aimant, 45,5 T, a été obtenu relativement récemment par Hahn *et al.*, en 2019, avec des matériaux supraconducteurs (Hahn *et al.*, 2019).

Un document<sup>20</sup> de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) fournit quelques valeurs typiques de l'exposition à des sources de champ statique en milieu professionnel et dans l'environnement :

- équipement industriel en courant continu : 50 mT ;
- train à sustentation magnétique<sup>21</sup> : 50 mT ;
- petit aimant (localement) : 1 - 10 mT ;
- imagerie par résonance magnétique (IRM) : 2,5 T.

#### Expositions professionnelles

Le rapport publié en 2008 par l'Agence de protection sanitaire anglaise (Agnir, 2008), déjà cité au § 2.2.1, a réalisé une revue assez complète des données disponibles concernant l'exposition des personnes aux champs statiques. Dans le domaine des expositions professionnelles, il fournit par exemple quelques valeurs de champ magnétique statique émis par des appareils dans des usines de l'Ohio, aux États-Unis, principalement des moteurs à courant continu. Les valeurs relevées vont de

---

<sup>20</sup> [https://www.who.int/peh-emf/about/en/Static\\_and\\_ELF\\_Fields.pdf](https://www.who.int/peh-emf/about/en/Static_and_ELF_Fields.pdf).

<sup>21</sup> *A priori*, seules des lignes au Japon, en Corée du Sud et en Chine fonctionneraient actuellement, pour une longueur totale d'environ 70 km (<https://mediarail.wordpress.com/2019/06/16/et-si-on-parlait-du-train-a-sustentation-magnetique/>).

4,95 à 125,58  $\mu\text{T}$ . La Figure 8, extraite de ce rapport, présente les densités de flux magnétique mesurées à proximité de 59 équipements électriques dans cet environnement.

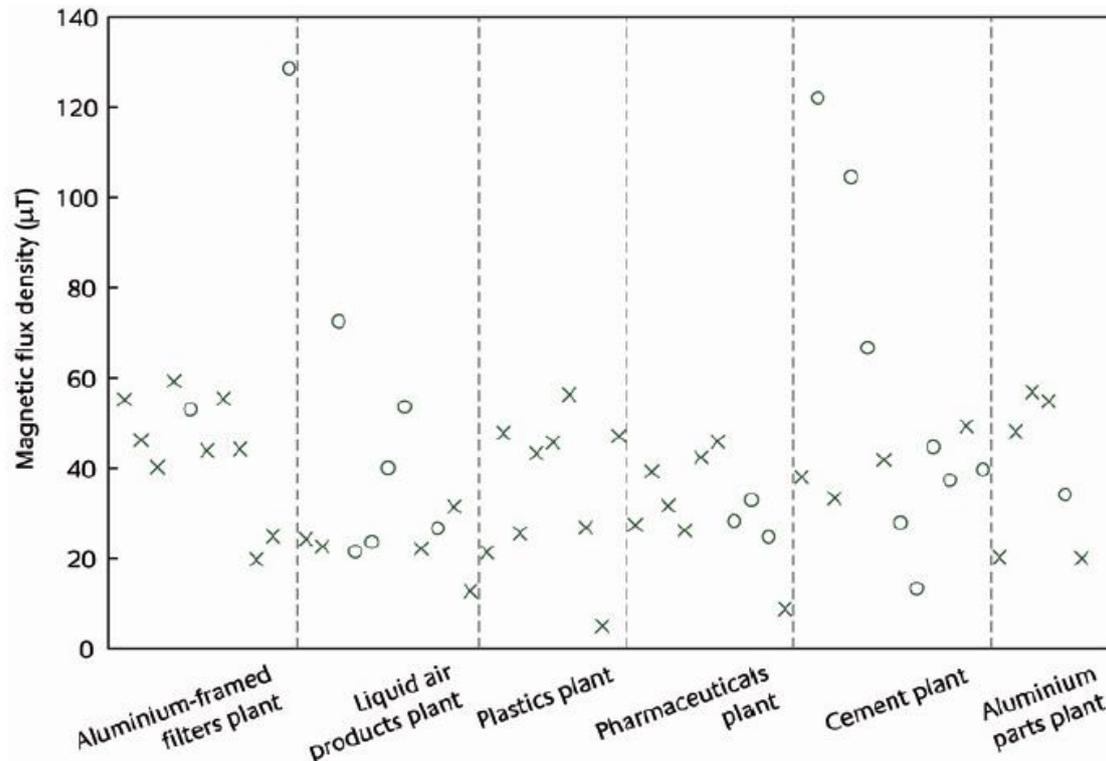


Figure 8 : densités de flux magnétique mesurées à proximité de 59 équipements électriques dans six usines de l'Ohio. Les cercles désignent des moteurs, les croix d'autres types d'équipements.

Source : Agnir, 2008

L'industrie électrochimique est génératrice de champs statiques, par l'utilisation de moyens d'électrolyse nécessitant d'intenses courants (plusieurs milliers d'ampères). Une étude réalisée en 1982 (Marsh *et al.*, 1982) sur 320 travailleurs passant une grande partie de leur journée à proximité de cellules d'électrolyse, citée par le rapport de l'Agence sanitaire britannique, a permis de mettre en évidence une exposition moyenne de 7,6 mT. Le rapport mentionne d'autres études réalisées en Suède et en Allemagne, qui ont décrit des expositions moyennes de l'ordre de 4 à 10 mT. Il cite aussi une étude plus récente réalisée en France (Mur *et al.*, 1998), qui fait état d'expositions autour de 4-30 mT, des valeurs similaires à celles retrouvées en Norvège (Moen *et al.*, 1995, 1996).

Certaines applications de soudage utilisent des courants continus. Le rapport de l'Agence sanitaire britannique mentionne des mesures réalisées sur une cohorte de travailleurs danois (Skotte et Hjælland, 1997), qui ont mis en évidence des champs magnétiques mesurés à 1 cm des câbles de l'ordre de 5 mT pour des stations de soudage sous l'eau, et entre 0,9 et 1,9 mT pour d'autres types de soudage. Pour du soudage par résistance, des mesures ont indiqué des niveaux d'exposition de l'ordre de 0,2 mT au niveau du corps des travailleurs, et 1 mT au niveau des membres (Cooper, 2002)

#### Expositions dans les moyens de transport

Dans le domaine des transports, lorsque des courants continus sont utilisés, des champs magnétiques statiques sont nécessairement produits. Cependant, les modalités de fonctionnement impliquent souvent des variations rapides du courant, et donc des champs variables avec le temps, à des

fréquences de l'ordre du kHz. Le rapport de l'Agence sanitaire britannique (Agnir, 2008) cite des mesures réalisées en Grande-Bretagne sur le réseau ferroviaire (Chadwick et Lowes, 1998) qui, selon les auteurs, ne représentent pas nécessairement des situations typiques d'exposition. Cette étude fournit des valeurs, au niveau du sol dans des compartiments passagers, de l'ordre de 0,1 à 2 mT, et 0,2 mT dans la cabine du conducteur. Dans un train de banlieue, les valeurs mesurées à hauteur de tablette étaient de 16 à 64  $\mu\text{T}$ , et jusqu'à 1 mT au niveau du sol.

Le document de l'Agence britannique cite également un rapport technique (Dietrich et Jacobs, 1999) consacré à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques dans les systèmes de transport, réalisé à la demande du Département américain de l'énergie dans le cadre du programme de recherche sur les champs électromagnétiques et l'information du public (EMF-RAPID). Le Tableau 2 ci-dessous, repris du rapport de l'Agence britannique, synthétise les niveaux de champ mesurés dans des moyens de transport du nord-est des États-Unis, principalement dans la région de New-York (champ magnétique de l'ordre de 54  $\mu\text{T}$  dans cette région en 1999). Seules les mesures réalisées à 90 cm au-dessus du sol ont été reprises dans le tableau. Les valeurs mesurées sont des combinaisons entre le champ magnétique terrestre et celui produit par les moyens de transport, combinaisons qui dépendent de leurs orientations respectives, mais aussi des structures métalliques qui les environnent.

Tableau 2 : exposition aux champs magnétiques statiques dans des moyens de transport.

Moyen de transport (nombre)	Conditions de mesure	Champ magnétique statique ( $\mu\text{T}$ )		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Bateau (1)	50 mesures à 90 cm de hauteur.	54,6	47,6	67,9
Escalier roulant (5)	Mesures à 90 cm de hauteur toutes les 5 s pendant le déplacement.	57,5	30,9	84,9
Tapis roulants (4)	Mesures à 90 cm de hauteur toutes les 5 s pendant le déplacement.	61,6	23,6	121,8
Voitures thermiques (2) et utilitaires (2)	4 560 échantillons pris différentes positions d'assise pendant la conduite.	31,6	0,9	96,8
Voitures électriques et utilitaires (2)	Mesures à hauteur de tête, de taille et de cheville pour tous les sièges.			
	Sur banc de test dynamométrique : Sur piste d'essai :	40,8 38,8	10,6 2,4	104,4 104,1
Avion (MD DC9)	Mesures à hauteur de taille pour 21 sièges et 3 autres emplacements dans la cabine pendant le roulage vers la position de parking au sol.	55,5	47,6	66,9
Navette de transport aéroport (tram en courant alternatif)	50 échantillons pris à 5 s d'intervalle en 4 emplacements à 90 cm de hauteur.	48,6	24,3	73,4
Bus thermique	1 695 échantillons sur 8 sièges pendant des déplacements sur différents types de routes.	39,9	4,1	112,4
Navette de transport électrique (aéroport)	159 échantillons en 11 emplacements pendant des déplacements.	43,5	Non connu	80,8

Moyen de transport (nombre)	Conditions de mesure	Champ magnétique statique ( $\mu\text{T}$ )		
		Moyenne	Minimum	Maximum
Train avec motrice en courant alternatif	Non connu	501	Non connu	90,2

Source : Agnir, 2018, et Dietrich et Jacobs, 1999.

Une publication de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp, 2008) sur les champs électromagnétiques émis par les nouvelles technologies fournit des données sur les trains, dont les systèmes à lévitation magnétique. Des valeurs maximales de 1,5 mT au niveau du sol à proximité du conducteur, décroissant à moins de 1 mT à 20 cm de hauteur, ont ainsi été décrites dans une étude de Mizuma et Kato (Mizuma et Kato, 1999). Dans des voitures de TGV français, des moyennes spatiales du champ magnétique statique de 54,5  $\mu\text{T}$  ont été déterminées, avec un maximum de 96,2  $\mu\text{T}$ . Le document de l'Icnirp mentionne également des mesures réalisées par le Département américain des transports en 1993, sur des prototypes de trains à lévitation magnétique : une moyenne de 49,8  $\mu\text{T}$  et un maximum à 98,1  $\mu\text{T}$  à 1,75 m au-dessus du sol. En-dessous de cette hauteur, les valeurs dépassaient 500  $\mu\text{T}$ , mais n'étaient pas jugées fiables. Dans des trains à lévitation magnétique circulant au Japon, des valeurs très faibles de champ magnétique statique ont été observées : par exemple 1  $\mu\text{T}$  à 10 cm du sol (Mizuma et Kato, 1999). Au final, la publication de l'Icnirp précise que des valeurs de 1  $\mu\text{T}$  à 1,5 mT peuvent être observées dans ce type de moyen de transport.

#### Exposition dans les grands instruments de recherche

Enfin, on peut signaler que les grands instruments de recherche, comme les tokamaks dans le domaine de la fusion thermonucléaire, les accélérateurs de particules (linéaires, synchrotrons), utilisent des champs magnétiques statiques très intenses, qui peuvent exposer les opérateurs. Selon le rapport de l'Agence sanitaire britannique (Agnir, 2008), il existe peu de données concernant ces situations très spécifiques, mais ils citent l'étude de Stuchly (Stuchly, 1986) qui indique que des opérateurs sur des tokamaks pourraient être exposés à de niveaux de l'ordre de 45 mT. Ils indiquent par ailleurs que des projets d'aimants permanents créant des champs de très haute intensité sont à l'étude, de l'ordre de 10 à 50 T.

## **2.4 Simulations de l'exposition au champ magnétique statique (projet d'interconnexion Golfe de Gascogne)**

### **2.4.1 Caractéristiques techniques du projet et conditions de simulation**

Des simulations du champ magnétique statique généré par la future ligne électrique ont été réalisées par RTE et présentées lors d'une réunion publique le 06 janvier 2021. Trois configurations géométriques de pose des câbles électriques ont été considérées : pose courante en configuration standard terrestre, chambre de jonction terrestre et pose courante en configuration standard maritime. Les éléments techniques fournis par RTE concernant les configurations des câbles sont les suivants :

- Type d'interconnexion : deux liaisons, composées chacune de 2 câbles.

- Caractéristiques électriques : les liaisons sont à courant continu, la puissance électrique pour chaque liaison est de 1 000 MW, la tension est de 400 kV, et le courant transité dans chaque câble, pertes incluses, est de 1 294 A. Le courant circule en sens contraire dans les deux câbles de chaque liaison.

Les paragraphes suivants présentent l'expression théorique du champ magnétique statique émis par des fils parallèles parcourus par des courants électriques, puis les simulations du champ magnétique émis par des câbles électriques dans les 3 configurations de pose, en tenant compte des caractéristiques techniques décrites par RTE. Trois représentations graphiques sont fournies pour les deux configurations terrestres :

- la variation du champ statique le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 1 m de hauteur par rapport au sol, sur une distance de 10 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles ;
- la variation du champ statique le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 1 m de hauteur par rapport au sol, sur une distance de 50 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles ;
- la variation du champ statique le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 10 cm, 50 cm, 1 m et 1,5 m de hauteur par rapport au sol, sur une distance de 10 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

Pour la configuration maritime, deux représentations graphiques sont fournies :

- la variation du champ statique le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, au niveau du fond marin, sur une distance de 300 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles ;
- la variation du champ statique le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, au niveau du fond marin, à 1 m, 10 m et 50 m au-dessus du fond marin, sur une distance de 300 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

Pour chaque configuration, les valeurs maximales du champ magnétique statique sont fournies. Le champ magnétique calculé ici ne tient pas compte du champ magnétique terrestre. La façon dont le champ magnétique terrestre et le champ magnétique statique créé par l'interconnexion vont se combiner dépend de l'orientation des câbles, en particulier par rapport à l'axe nord-sud, variable par conséquent sur le parcours de l'interconnexion. En fonction de cette orientation, le champ magnétique statique total peut être inférieur ou supérieur aux valeurs calculées ci-après. En théorie, le champ total minimum pourrait être égal au champ créé par la ligne soustrait au champ magnétique terrestre, ce qui pourrait conduire à une compensation totale, une valeur nulle du champ magnétique. Et au maximum, le champ magnétique total peut être la somme des deux contributions (champ créé par la ligne et champ terrestre). Ainsi, pour obtenir la valeur maximale théorique totale du champ magnétique au voisinage de la ligne (dans la condition très particulière d'orientations identiques entre les champs magnétiques terrestre et créé par les câbles), il faut ajouter aux valeurs calculées pour le champ magnétique de la ligne celle du champ terrestre. En pratique, dans l'hémisphère Nord, aux latitudes moyennes en Europe, le champ magnétique terrestre est orienté principalement vers l'intérieur de la Terre, ce qui signifie que la valeur de la composante horizontale du champ est inférieure à la valeur du champ total. Ainsi, dans la mesure où les câbles électriques sont positionnés horizontalement dans le sol, la valeur totale du champ magnétique sera nécessairement inférieure à la somme des champs terrestre et créé par les câbles.

### 2.4.2 Expression théorique et calcul du champ magnétique statique émis par des fils électriques parallèles

Il est possible de faire remonter l'étude des phénomènes électriques à l'Antiquité, avec l'observation par Thalès de Milet, en Grèce, aux alentours de 600 av. J.-C., de l'attraction de brindilles de paille par de l'ambre jaune frotté. *Elektron*, qui signifie ambre en grec, a donné notamment le terme « électricité », qui désigne l'ensemble des manifestations d'attractions et de décharges électriques provoquées par des charges électrostatiques.

Les aimants sont également connus depuis l'Antiquité, avec les pierres (magnétite) trouvées à proximité de la ville de Magnésie, en Turquie. Les propriétés de ces pierres étaient utilisées par les chinois, il y a plus de 1 000 ans, pour en faire des boussoles.

L'étude des phénomènes tels que l'orientation des boussoles, les lois de l'optique ou encore la foudre ont débouché, à travers nombre d'expériences, sur l'élaboration de lois physiques, et notamment la conviction d'une nature commune entre les phénomènes électriques et magnétiques. Les expériences menées par Franklin, Coulomb ou encore Cavendish ont abouti à mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique, dont l'intensité dépend de la distance à sa source. Puis, grâce aux travaux de Faraday, Ampère et Maxwell, les différentes lois et résultats ont été généralisés, à partir de 1830, pour aboutir au formalisme des équations de Maxwell, en 1872. Ces travaux ont notamment permis de définir le concept de « champ », pour décrire les phénomènes en matière d'influence d'une source sur son environnement, par exemple des particules chargées. Les phénomènes électriques et magnétiques sont alors rassemblés sous le modèle de la propagation d'ondes, qui intègre même les phénomènes lumineux.

Oersted, en 1820, en faisant circuler un courant dans un fil conducteur au-dessus d'une boussole, constata la déviation de l'aiguille, montrant ainsi le lien entre le courant électrique et le champ magnétique. La même année, les physiciens Biot et Savart mesurèrent la durée des oscillations d'une aiguille aimantée provoquée par le passage d'un courant dans un fil, en fonction de la distance. Ils déduisirent de ces expériences que la force appliquée à un des pôles de l'aiguille aimantée, qui la fait donc osciller, est dirigée perpendiculairement à la direction qui relie le fil au pôle de l'aiguille, et que l'intensité de la force diminue à mesure que la distance augmente. Par la suite, Laplace déduisit de ces expériences ce que l'on désigne aujourd'hui comme la loi de Biot et Savart.

Il existe un très grand nombre de cours d'électromagnétisme disponibles sur internet qui détaillent plus ou moins les fondements des connaissances sur ces phénomènes<sup>22</sup>.

Le champ magnétique créé en un point  $M$  par une particule de charge  $q$  située en un point  $P$  et animée d'une vitesse  $\vec{v}$  dans un référentiel galiléen (cf. Figure 9) est :

$$\vec{B}(M) = \frac{\mu_0 q \vec{v} \wedge \overrightarrow{PM}}{4\pi |\overrightarrow{PM}|^3}$$

où  $\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c^2)$ .

<sup>22</sup> On trouvera, à titre d'exemple, ce cours récent et très complet, qui a servi notamment de support aux éléments historiques rappelés ci-dessus : [https://www.fresnel.fr/perso/stout/electromag/Cours\\_Elec\\_Mag\\_PolyT.pdf](https://www.fresnel.fr/perso/stout/electromag/Cours_Elec_Mag_PolyT.pdf).

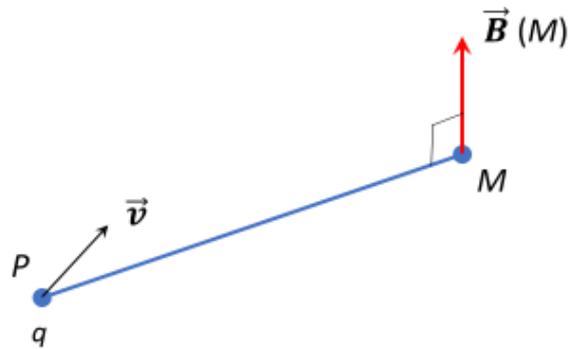


Figure 9 : champ créé par une particule chargée.

L'unité du champ magnétique dans le système international est le Tesla (T) ( $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$ ).

Le facteur  $\mu_0$  est la perméabilité magnétique intrinsèque du vide : il correspond à la capacité du vide à « laisser passer » le champ magnétique. Sa valeur dans le système d'unités international MKSA est :  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$  (H : Henry, avec  $1 \text{ Henry} = 1 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{s} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-2} = 1 \text{ m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-2}$ ).

Il est possible alors de considérer un ensemble de charges en mouvement, pour en déduire l'expression du champ magnétique créé par une distribution volumique de charges, de forme quelconque. Ainsi, en prenant le cas d'un fil électrique parcouru par un courant permanent  $I$ , on obtient la loi de Biot et Savart, qui définit le champ magnétique créé en un point quelconque  $M$  de l'espace. En considérant un fil rectiligne, on obtient l'expression du champ magnétique  $B$  en un point  $M$ , situé à une distance  $D$  perpendiculaire au fil parcouru par un courant  $I$ , résultant de la contribution du fil entre ses extrémités  $\pm q$  (cf. Figure 10) :

$$\vec{\partial B}(M) = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{-q}^{+q} \frac{d\vec{x} \wedge \hat{r}}{r^2}$$

Avec  $\hat{r}$  un vecteur unité.

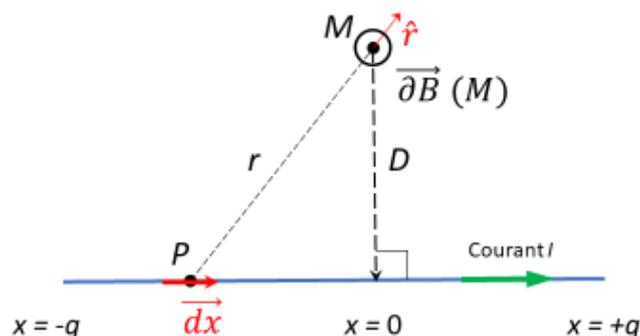


Figure 10 : configuration fil rectiligne.

Le champ magnétique, dans ce cas, est orienté perpendiculairement au plan du dessin, vers le lecteur.

Dans le cas d'un fil « infini », ou en tout cas très long, la valeur de  $q$ , c'est-à-dire la longueur du fil, devient très grande par rapport à  $D$ , la distance d'observation du champ (le champ magnétique s'atténue vite avec la distance, on cherche donc à évaluer le champ à proximité du fil...). En d'autres

termes, la distance d'observation devient négligeable par rapport à la longueur du fil. Dans ces conditions, il est alors possible de déduire simplement de la loi de Biot et Savart l'intensité du champ magnétique (module du vecteur) en un point quelconque de l'espace à proximité du fil :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi D}$$

Si l'on cherche à connaître l'orientation du champ magnétique, il faut bien considérer que le champ est représenté par un vecteur, dont le sens s'obtient par exemple grâce à des règles (dites des « trois doigts de la main droite », du « bonhomme d'Ampère », du « tire-bouchon », ...) appliquées aux caractéristiques du circuit (notamment le sens de circulation du courant).

Compte tenu de la longueur des câbles mis en œuvre dans l'interconnexion France – Espagne dans le golfe de Gascogne, par rapport à leur diamètre, y compris entre deux jonctions (tous les 1 à 2 km pour les parties terrestres), il est possible de considérer les câbles électriques comme de longueur « infinie ». Cette approximation est valable tant que la longueur du câble est très grande par rapport à la distance à laquelle on évalue le champ magnétique. Ainsi, en pratique, cette condition est vérifiée lorsqu'on calcule l'intensité du champ magnétique jusqu'à quelques dizaines de mètres au-delà du câble.

Par ailleurs, lorsque plusieurs câbles sont situés côte à côte (dans le cas présent 2 « liaisons » constituées chacune de 2 câbles), il est nécessaire de prendre en compte, pour le calcul de l'intensité du champ magnétique résultant, le sens des courants circulant dans les différents câbles, et le fait que le champ magnétique total est la somme vectorielle de tous les champs magnétiques créés par les câbles, et non une simple somme des intensités.

Les champs magnétiques résultant de la circulation de courants électriques dans des câbles parallèles entre eux ont ainsi été calculés dans les 3 configurations types prévues par RTE pour l'interconnexion France-Espagne dans le golfe de Gascogne. L'intensité du courant considérée a été fixée conformément aux données techniques fournies par RTE : 1294 A, elle est invariable dans les différentes configurations simulées. Le sens du courant circulant dans les câbles, l'écartement entre les câbles de chaque liaison, et entre chaque liaison, ainsi que la distance à laquelle on évalue le champ magnétique ont une influence sur son intensité. Les paragraphes suivants présentent les valeurs de champ magnétique calculées le long de lignes perpendiculaires aux câbles, à 10 cm, 50 cm, 1 m et 1,50 m du sol pour les configurations terrestres, et au niveau du fond marin, ainsi qu'à 1, 10 et 50 m au-dessus du fond pour les liaisons sous-marines.

### 2.4.3 Configuration standard terrestre

Pour la liaison terrestre, la configuration technique connue est représentée en Figure 11. Ce schéma présente les dimensions retenues pour les calculs, d'après les données fournies par RTE, il ne représente pas nécessairement la configuration exacte future de l'interconnexion. Les sens de passage du courant dans les câbles sont représentés arbitrairement en vert (vers le lecteur) et rouge (sens inverse). L'alternance en fonction du positionnement des câbles des liaisons est en revanche

respectée ici. Les hauteurs au-dessus du sol pour lesquelles le niveau de champ magnétique statique résultant est calculé sont représentées en lignes pointillées sur le schéma.

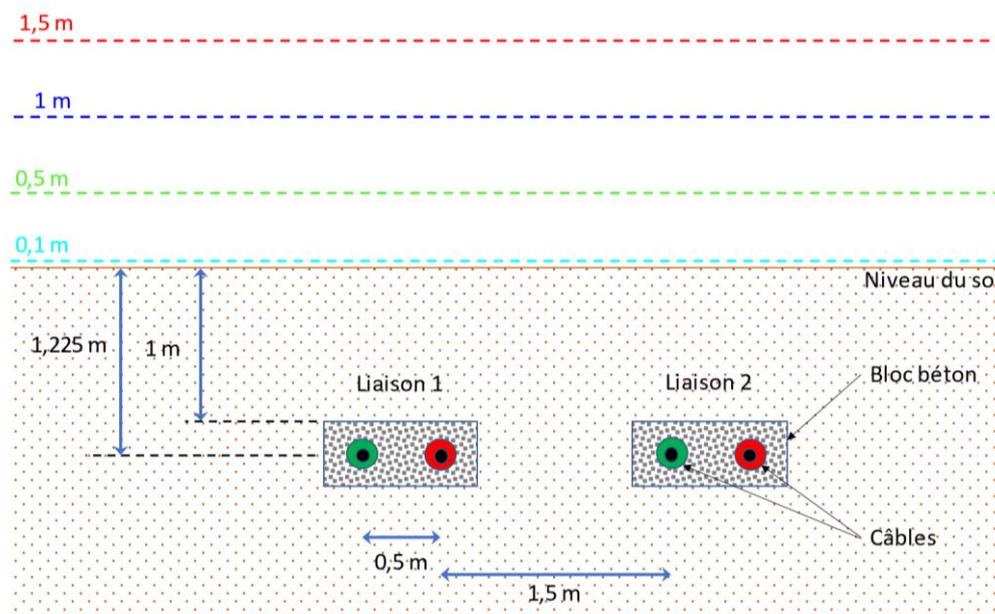


Figure 11 : schéma de positionnement des câbles en configuration standard terrestre et hauteurs de calcul de l'intensité du champ magnétique statique (coupe transversale).

Les câbles sont positionnés dans deux blocs de béton séparés. La distance entre les câbles, dans chaque bloc (liaison 1 ou 2), est de 0,5 m. La distance entre les liaisons, que l'on considère comme la distance entre l'axe des deux câbles les plus proches de chaque liaison, est de 1,5 m. Le sommet des blocs béton est situé à 1 m de profondeur. Par ailleurs, l'axe des câbles est considéré être positionné à mi-hauteur des blocs béton, dont l'épaisseur est prise ici égale à 0,45 m. Ainsi, l'axe des câbles se situe à 1,225 m sous le sol.

La valeur maximale de champ magnétique statique calculée à 1 m de hauteur est de 31  $\mu\text{T}$ . Le Tableau 3 ci-dessous donne les valeurs maximales calculées à différentes hauteurs au-dessus du sol.

Tableau 3 : valeurs maximales du champ magnétique statique en configuration standard terrestre en fonction de différentes hauteurs par rapport au sol.

Hauteur par rapport au sol (m)	0,1	0,5	1	1,5
Champ magnétique statique ( $\mu\text{T}$ )	68,98	45,18	31,04	23,48

La Figure 12 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration standard terrestre, le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 1 m de hauteur, jusqu'à 10 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles. À 5 m de la liaison, le champ magnétique statique est inférieur à 10  $\mu\text{T}$ , et à 10 m de distance, il n'est plus que d'environ 2,5  $\mu\text{T}$ , quelle que soit la hauteur par rapport au sol (cf. Figure 13).

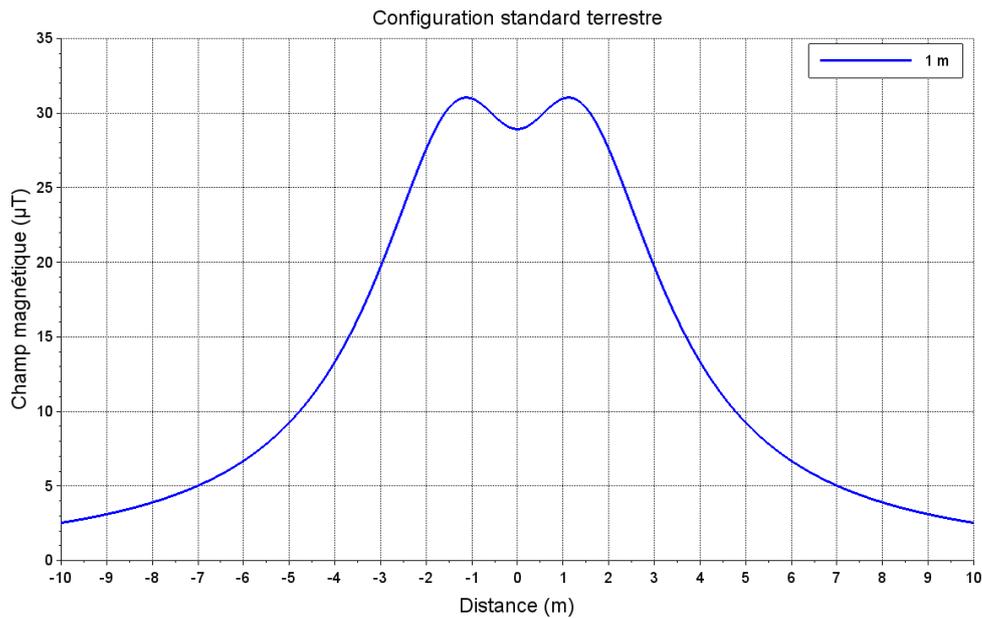


Figure 12 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration standard terrestre à 1 m de hauteur, sur une extension de 20 m.

La Figure 13 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration standard terrestre, le long de lignes perpendiculaires aux câbles, à différentes hauteurs, jusqu'à 10 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

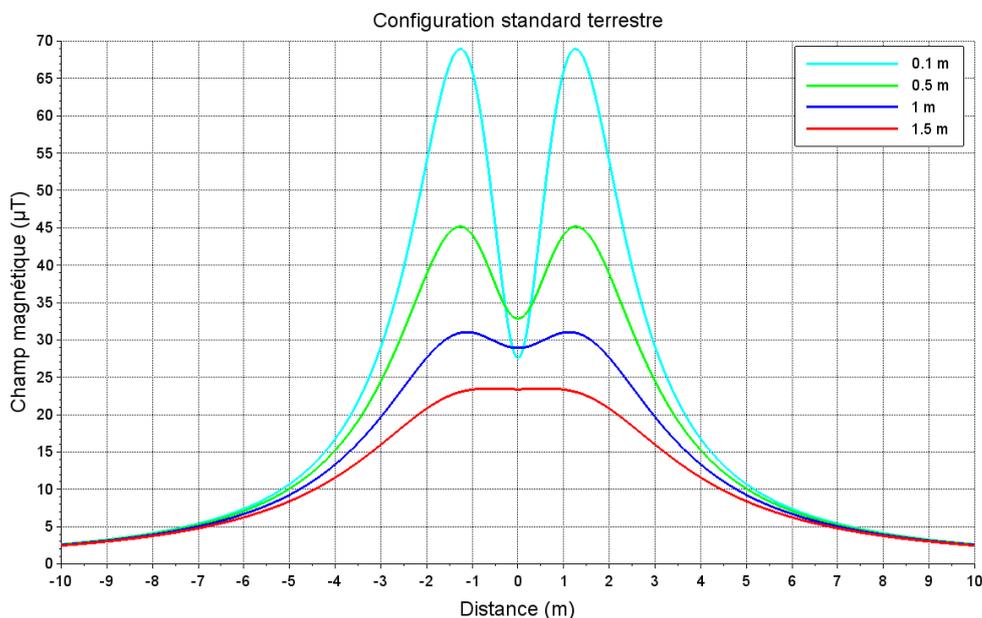


Figure 13 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration standard terrestre (4 hauteurs, sur une extension de 20 m).

La Figure 14 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration standard terrestre, le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 1 m de hauteur, jusqu'à 50 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

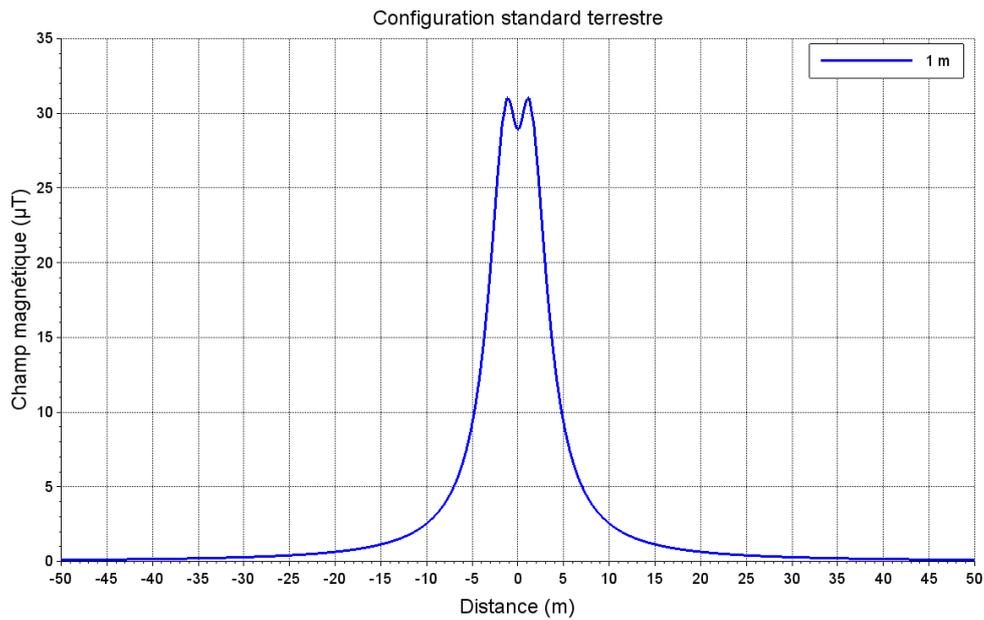


Figure 14 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration standard terrestre à 1 m de hauteur, sur une extension de 100 m.

#### 2.4.4 Chambre de jonction terrestre

Les chambres de jonction permettent de raccorder deux tronçons de câbles entre eux, tous les 1 à 2 km à terre. La distance entre les câbles, dans chaque bloc (liaisons 1 ou 2), est de 0,8 m. La distance entre les liaisons, c'est-à-dire la distance entre l'axe des deux câbles les plus proches de chaque liaison, est de 1,6 m. Le sommet des blocs béton est situé à 0,5 m de profondeur. Par ailleurs, l'axe des câbles est considéré être positionné à mi-hauteur des blocs béton, dont l'épaisseur est prise ici égale à 1 m. Ainsi, l'axe des câbles se situe à 1 m sous le sol.

La configuration technique connue est représentée en Figure 15.

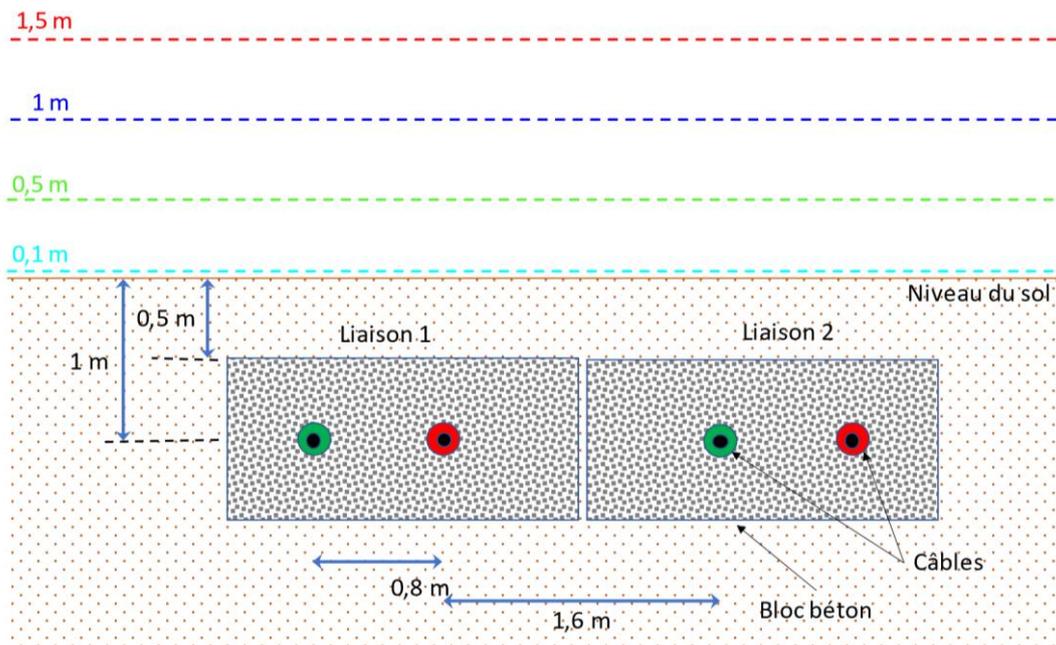


Figure 15 : schéma de positionnement des câbles en configuration chambre de jonction terrestre et hauteurs de calcul de l'intensité du champ magnétique statique (coupe transversale).

La valeur maximale de champ magnétique statique calculée à 1 m de hauteur est de 52  $\mu\text{T}$ . Le Tableau 4 ci-dessous donne les valeurs maximales calculées à différentes hauteurs au-dessus du sol. Les valeurs obtenues dans cette configuration sont plus élevées que dans la configuration standard terrestre, en raison à la fois d'un écartement un peu plus grand entre les câbles - ce qui diminue l'effet de compensation des champs entre des câbles dont les courants circulent en sens contraire-, et d'une profondeur d'enfouissement inférieure (1 m au lieu de 1,225 m).

Tableau 4 : valeurs maximales du champ magnétique statique en configuration chambre de jonction terrestre en fonction de différentes hauteurs par rapport au sol.

Hauteur par rapport au sol (m)	0,1	0,5	1	1,5
Champ magnétique statique ( $\mu\text{T}$ )	138,80	82,34	52,25	37,63

La Figure 16 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration chambre de jonction terrestre, le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 1 m de hauteur, jusqu'à 10 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles. À 5 m de la liaison, le champ magnétique statique est inférieur à 16  $\mu\text{T}$ , et à 10 m de distance, il est inférieur à 5  $\mu\text{T}$ , quelle que soit la hauteur par rapport au sol.

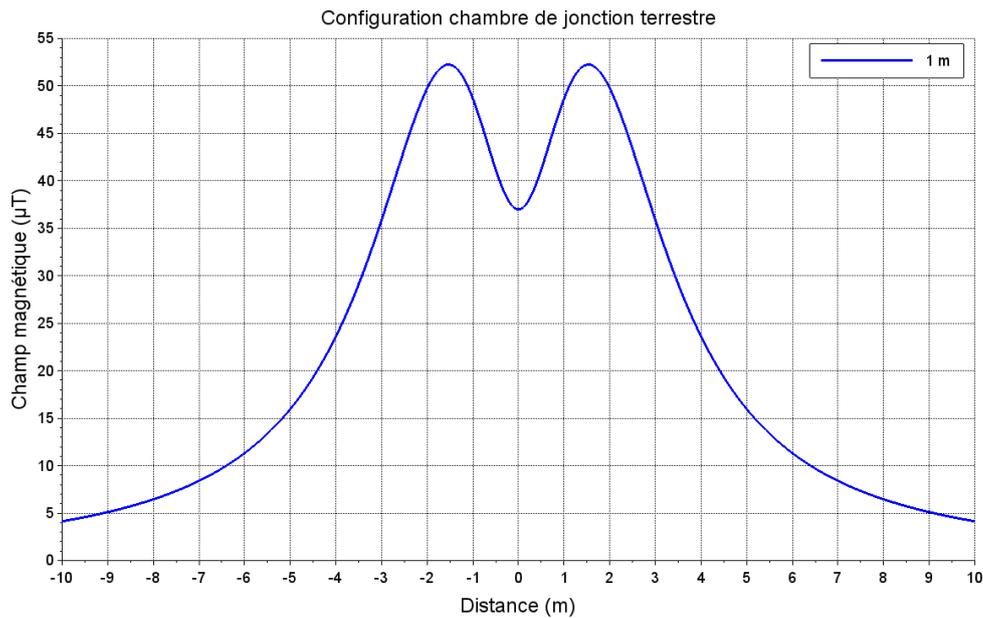


Figure 16 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration chambre de jonction terrestre à 1 m de hauteur, sur une extension de 20 m.

La Figure 17 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration chambre de jonction terrestre, le long de lignes perpendiculaires aux câbles, à différentes hauteurs, jusqu'à 10 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

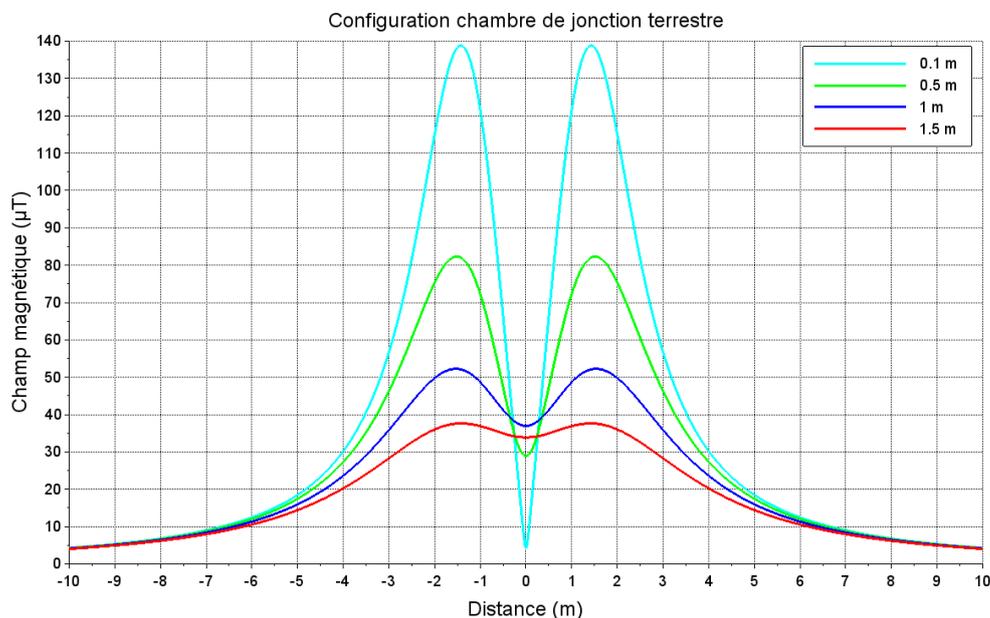


Figure 17 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration chambre de jonction terrestre (4 hauteurs, sur une extension de 20 m).

La Figure 18 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration chambre de jonction terrestre, le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, à 1 m de hauteur, jusqu'à 50 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles

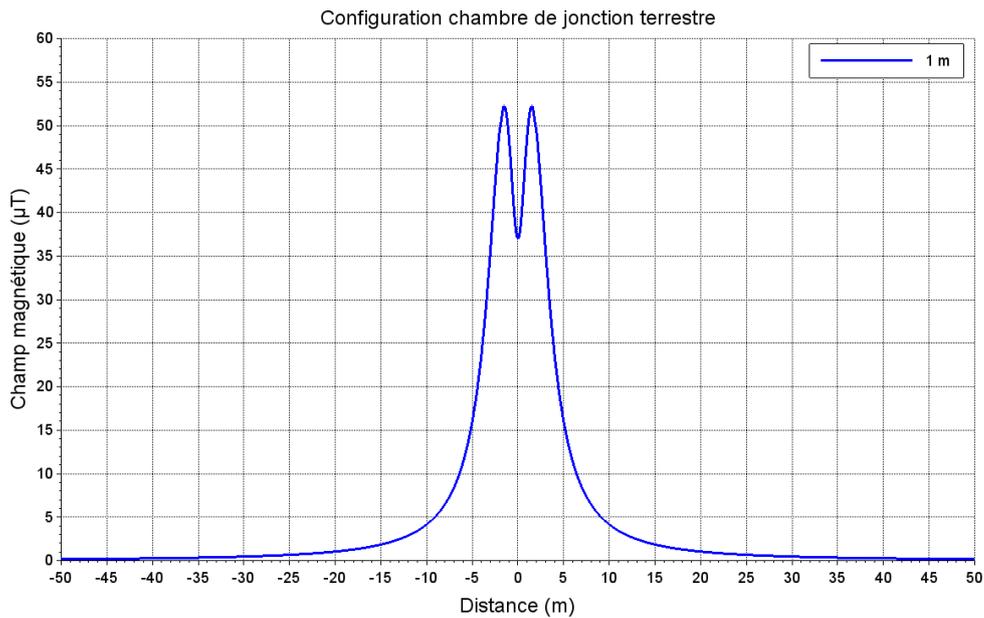


Figure 18 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration chambre de jonction terrestre à 1 m de hauteur, sur une extension de 100 m.

#### 2.4.5 Configuration standard maritime

Dans les liaisons sous-marines, les câbles sont beaucoup plus espacés entre eux. La configuration de positionnement des câbles retenue est la suivante : espacement de 50 m entre les câbles de chaque liaison, et écartement de 250 m entre les câbles les plus proches entre les liaisons. Les câbles sont considérés enfouis à une profondeur d'1 m sous le fond marin. L'intensité du champ magnétique total est calculée dans cette configuration au niveau du fond marin. À noter que les liaisons sous-marines sont beaucoup plus longues que pour les parties terrestres, pour lesquelles les chambres de jonction sont rapprochées tous les 1 à 2 km, ce qui signifie que l'approximation du fil infini est toujours valable, même en évaluant l'intensité du champ magnétique à plusieurs centaines de mètres de part et d'autre des liaisons (par rapport à quelques dizaines de mètres pour la liaison terrestre).

La configuration technique connue est représentée en Figure 19.

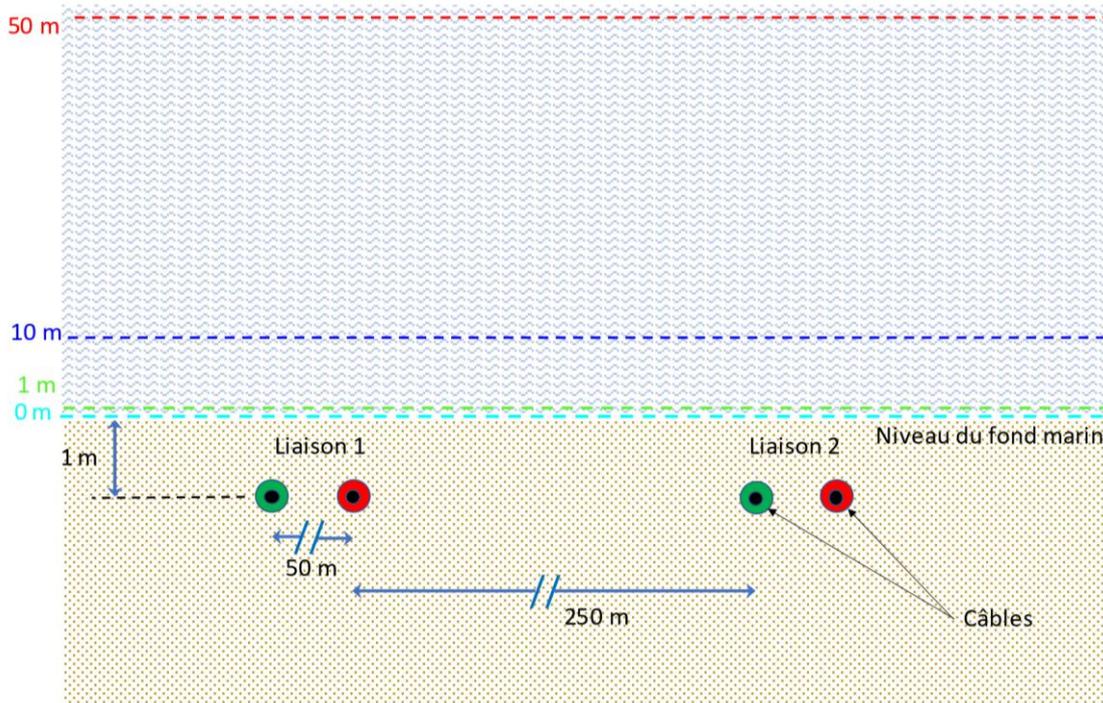


Figure 19 : schéma de positionnement des câbles en configuration standard maritime et hauteurs de calcul de l'intensité du champ magnétique statique (coupe transversale). Les échelles ne sont pas respectées.

La valeur maximale de champ magnétique statique calculée au niveau du fond marin est de  $259 \mu\text{T}$ . Le Tableau 5 ci-dessous donne les valeurs maximales calculées à différentes hauteurs au-dessus du fond.

Tableau 5 : valeurs maximales du champ magnétique statique en configuration chambre de jonction terrestre en fonction de différentes hauteurs par rapport au fond marin.

Hauteur par rapport au fond (m)	0	1	10	50
Champ magnétique statique ( $\mu\text{T}$ )	258,75	129,29	23,48	3,88

La Figure 20 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration standard maritime, le long d'une ligne perpendiculaire aux câbles, au niveau du fond marin, jusqu'à 300 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

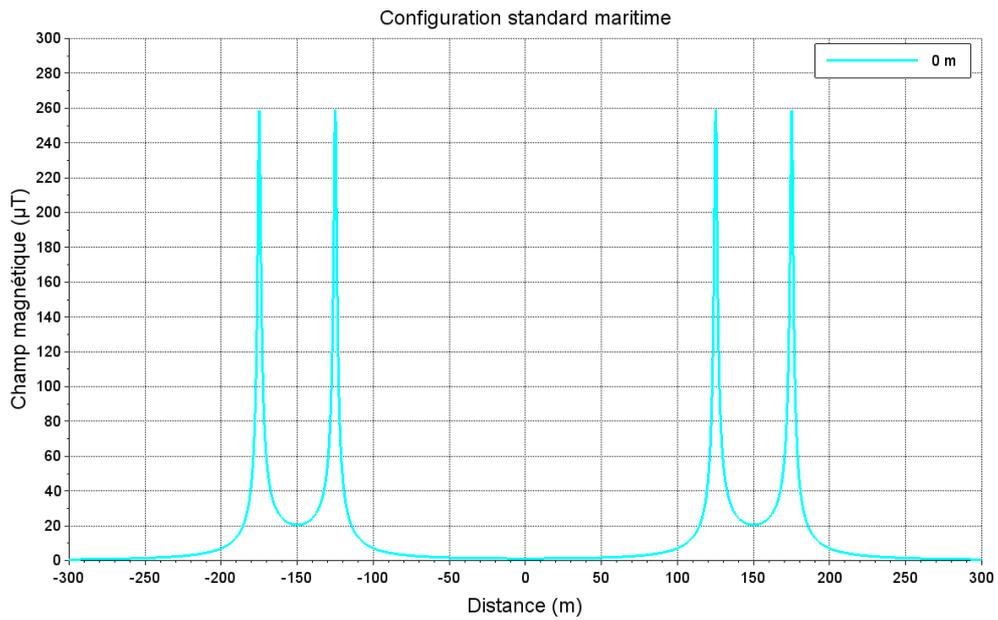


Figure 20 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration standard maritime au niveau du fond marin, sur une extension de 600 m.

La Figure 21 représente les variations du champ magnétique statique dans la configuration standard maritime, le long de lignes perpendiculaires aux câbles, à différentes hauteurs au-dessus du fond marin, jusqu'à 300 m de part et d'autre du point milieu entre les câbles.

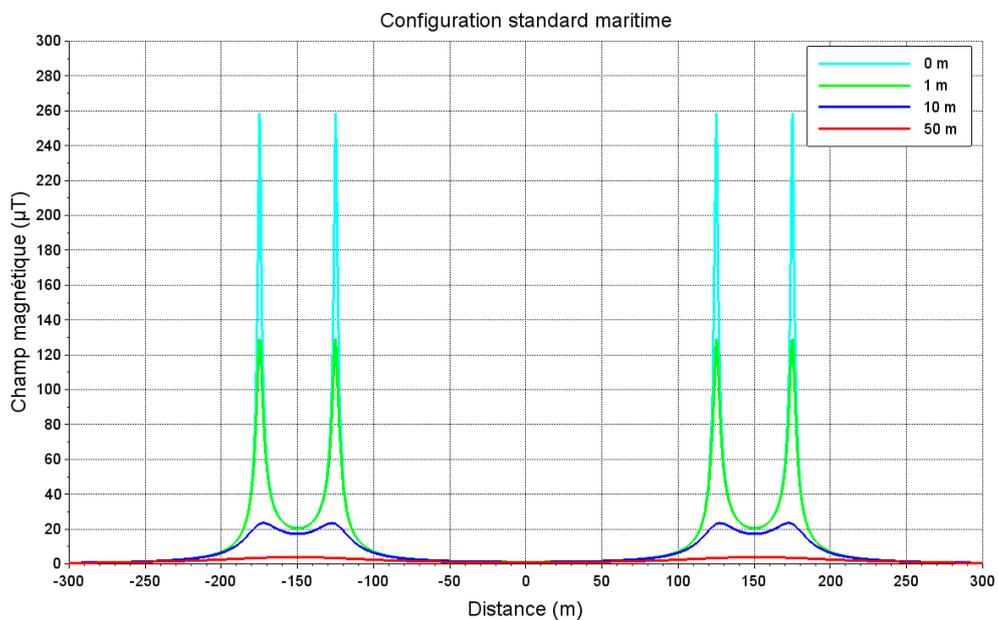


Figure 21 : variation du champ magnétique statique perpendiculairement aux câbles en configuration standard maritime (4 hauteurs, sur une extension de 600 m).

## 2.5 Synthèse des informations concernant l'exposition aux champs magnétiques statiques émis par l'interconnexion France-Espagne dans le golfe de Gascogne

La circulation d'un courant électrique dans un fil crée un champ magnétique. Ce champ magnétique est appelé « statique » lorsque le courant électrique est continu (son intensité ne varie pas au cours du temps). Les aimants créent aussi des champs magnétiques statiques. Et nous vivons, en permanence, dans le champ magnétique créé par la Terre. Son intensité est d'environ  $45 \mu\text{T}$  (microteslas) en France métropolitaine.

La Terre, les aimants, les lignes de transport d'électricité à courant continu, les batteries, les électroaimants, les supports d'enregistrements sur bandes magnétiques, les disques durs, les moteurs à courant continu, certains générateurs de courant, des capteurs, des lignes de transport ferroviaire, ou encore des applications médicales comme l'imagerie par résonance magnétique (IRM) génèrent des champs magnétiques statiques, parfois de très fortes intensités (des centaines de milliers de fois plus élevés que celui de la Terre pour l'IRM).

La plupart des lignes de transport de l'électricité (celles à haute tension, mais aussi tous les câbles d'alimentation électrique domestique) présents dans notre environnement génèrent des champs alternatifs, à la fréquence du réseau électrique (50 Hz). Les lignes de transport d'électricité en courant continu sont bien moins nombreuses, elles sont surtout utilisées aujourd'hui pour des liaisons sous-marines entre pays, ou pour relier les parcs éoliens en haute mer, par exemple.

Les lignes terrestres de transport d'électricité en courant continu, souterraines, émettent généralement un champ magnétique statique qui, au maximum, ne dépasse la valeur du champ magnétique terrestre que dans un couloir de quelques mètres autour de la ligne.

Des mesures effectuées à proximité d'habitations, sur des lignes similaires au projet d'interconnexion dans le golfe de Gascogne, ne montrent aucune exposition au champ magnétique statique supérieure à celui créé par la Terre.

Des simulations du champ magnétique statique, dans les conditions techniques prévues pour l'interconnexion dans le golfe de Gascogne, indiquent, pour la partie terrestre, une valeur maximale de  $31 \mu\text{T}$ , à l'aplomb de la ligne souterraine, à 1 m de hauteur. À 5 m de la liaison, le champ magnétique statique calculé est inférieur à  $10 \mu\text{T}$ , et à 10 m de distance, il n'est plus que d'environ  $2,5 \mu\text{T}$ , quelle que soit la hauteur par rapport au sol. Au-delà, comme l'indiquent aussi des mesures sur le terrain pour des lignes existantes, le champ magnétique émis par la ligne ne peut plus être différencié du champ terrestre.

## 3 Effets des champs magnétiques statiques sur la santé et l'environnement

### 3.1 Préambule

En 1983, le Conseil national de la recherche des États-Unis publiait un rapport, appelé depuis « Red book », qui établissait un ensemble de concepts pour la réalisation d'évaluations du risque, adopté depuis par la plupart des institutions publiques, agences et comités d'experts dans le monde<sup>23</sup>. Ce cadre, qui a évolué depuis, guide la plupart des évaluations réalisées dans l'objectif de gérer les risques. Lorsque les risques sont connus, parfaitement caractérisés, toutes les informations nécessaires peuvent être intégrées à la gestion du risque. Lorsque des incertitudes subsistent, ce qui est le cas très souvent dans le domaine des risques environnementaux, il devient plus complexe de prendre des mesures de gestion. Le « livre rouge » a ainsi proposé des lignes directrices, fondées sur les expériences de nombreuses institutions, pour évaluer les risques en situation d'incertitude.

De manière générale, quel que soit le facteur susceptible de conduire à un risque pour la santé humaine ou l'environnement (produit chimique, agent biologique, phénomène physiques, etc.), évaluer le risque revient à combiner les connaissances sur le danger intrinsèque de ce facteur avec le niveau d'exposition auquel la population considérée y est soumise. Évaluer le risque pour la santé humaine lié à l'exposition aux champs magnétiques statiques revient ainsi à caractériser d'une part le danger que représentent, par eux-mêmes, les champs magnétiques statiques, et d'autre part le niveau d'exposition à ces champs dans les situations considérées. Le chapitre 2 de ce rapport présente des données permettant d'évaluer le niveau d'exposition aux champs magnétiques statiques émis notamment par la Terre, ainsi que par des lignes électriques. À proximité de ces lignes, les expositions sont comparables à celle liée au champ terrestre, elles sont du même ordre de grandeur. Il existe bien sûr d'autres sources (cf. 2.3.4), qui conduisent à des niveaux d'exposition plus faibles, ou beaucoup plus élevés (cas des IRM, par exemple), mais dans des situations bien spécifiques.

Les paragraphes suivants proposent une synthèse des connaissances disponibles dans la littérature scientifique sur les effets intrinsèques sur le vivant des champs magnétiques statiques, par l'intermédiaire de l'examen de plusieurs rapports d'expertise produits par des organismes de référence sur le sujet, et de revues de littérature publiées ces dernières années (cf. méthode au 1.3). Les effets sur l'être humain sont abordés, ainsi que ceux sur l'environnement, avec une attention particulière sur le milieu marin, compte tenu des caractéristiques du projet d'interconnexion dans le golfe de Gascogne.

Un premier paragraphe du chapitre 3.2 dédié aux effets sur l'être humain est consacré aux connaissances actuelles sur les mécanismes d'interaction entre les champs magnétiques statiques et le vivant.

Les rapports rédigés par des organismes œuvrant dans le domaine de l'évaluation des risques liés aux champs électromagnétiques sont ensuite évoqués, avant de présenter les synthèses des publications scientifiques (revues sélectionnées) consacrées aux effets spécifiques des champs magnétiques statiques sur la santé.

Le paragraphe 3.2.4 est consacré aux effets à visée thérapeutique recherchés par l'exposition à des champs magnétiques statiques. Les éléments apportés par la recherche de la compréhension des

---

<sup>23</sup> <https://www.nap.edu/catalog/366/risk-assessment-in-the-federal-government-managing-the-process>.

mécanismes permettant d'expliquer certaines observations dans ce domaine peuvent en effet être utiles pour fournir une vision globale des effets sur le vivant.

Enfin, même si les niveaux d'exposition associés aux appareils de diagnostic médical par imagerie par résonance magnétique sont beaucoup plus élevés que le champ géomagnétique, par exemple (environ 100 000 fois plus élevés...), il paraissait important, afin de donner une vision la plus complète possible du sujet, de fournir une synthèse des connaissances concernant les effets indésirables associés aux champs magnétiques statiques émis par les IRM, qu'il s'agisse des patients ou des professionnels (personnels de soin, de maintenance, etc.).

Le chapitre 3.3 est consacré aux effets sur l'environnement. La magnétoperception est abordée en premier lieu, notamment comme mécanisme évident d'interaction entre le champ géomagnétique et les organismes vivants. Puis, comme pour les effets sur l'humain, les rapports institutionnels recensés sont ensuite synthétisés, ainsi que les revues consacrées, pour l'essentiel, aux effets sur la faune marine des champs magnétiques statiques émis par des câbles sous-marins.

Les rapports institutionnels et les revues de littérature sont présentés par année de publication.

### 3.2 Effets des champs magnétiques statiques sur l'être humain

Dans le domaine de l'exposition aux champs et rayonnements électromagnétiques de fréquences inférieures à celles des infrarouges<sup>24</sup>, le cas du champ magnétique statique est tout à fait singulier. En effet, c'est la seule et unique situation pour laquelle toute personne sur Terre est exposée, continuellement, tout au long de sa vie, quel que soit son lieu de vie, à un niveau de champ magnétique statique quasiment constant. Nous avons vu au § 2.2.1 que l'intensité du champ magnétique terrestre varie très lentement en fonction du temps, et qu'elle est deux fois plus élevée aux pôles (environ 65-70  $\mu\text{T}$ ) qu'à l'équateur (environ 25-30  $\mu\text{T}$ ). Des sources artificielles de champ magnétique, telles que celles décrites dans le § 2.3, viennent donc s'ajouter avec le champ magnétique terrestre. Pour être précis, comme le champ magnétique est un pseudo-vecteur, ces différentes contributions s'ajoutent vectoriellement, ce qui peut conduire à observer une augmentation ou une diminution de la valeur absolue du champ magnétique terrestre. Bien entendu, lorsque la contribution de la source artificielle est très élevée - c'est le cas par exemple lors d'un examen IRM -, la contribution du champ terrestre devient négligeable en comparaison.

L'intérêt scientifique pour la recherche d'effets éventuels de l'exposition aux champs magnétiques statiques a été longtemps limité, du fait certainement à la fois de cette exposition permanente au champ magnétique terrestre, et du faible nombre de situations d'expositions remarquables. Hormis avec l'imagerie par résonance magnétique (IRM), qui fait l'objet de recherches depuis de nombreuses années sur les éventuels effets indésirables associés, l'exposition aux champs magnétiques statiques artificiels dans la population est assez limitée : dans certaines activités industrielles, par exemple la soudure à l'arc, ou encore avec quelques lignes de chemin de fer. Le développement des énergies renouvelables, avec notamment les parcs éoliens *offshore*, et la nécessité de renforcer la sécurité des approvisionnements en électricité, a cependant favorisé ces dernières années le développement de lignes de transport d'électricité en courant continu, remobilisant ainsi les chercheurs pour évaluer les

---

<sup>24</sup> En effet, la Terre émet par exemple, comme tout corps chauffé, des rayonnements infrarouges. Nous sommes par ailleurs exposés aux rayonnements optiques, par la lumière solaire. Et de nombreuses régions, notamment en France métropolitaine, nous exposent de façon permanente au radon. Hormis les ondes radioélectriques, très faibles, qui nous parviennent des lointains objets de l'espace, on ne trouve pas de source permanente significative de champs ou rayonnements électromagnétiques de fréquences inférieures aux infrarouges. À l'exception donc du champ magnétique terrestre...

éventuels effets de l'exposition aux champs magnétiques statiques. Le nombre de publications scientifiques dans ce domaine semble ainsi en légère augmentation ces dernières années, et plusieurs revues de littérature sur le sujet ont été publiées assez récemment.

Afin de mettre en évidence l'évolution de l'intérêt pour ce sujet et des connaissances scientifiques disponibles, les publications retenues dans l'analyse sont présentées par ordre chronologique croissant.

On peut noter qu'il existe une littérature assez abondante sur les effets de la sous-exposition au champ magnétique terrestre (« champ hypomagnétique »), provenant de recherches menées en lien avec d'hypothétiques voyages de très longue durée dans l'espace. Une revue relativement récente sur le sujet (Binhi, 2017) réactive les interrogations concernant les mécanismes de perception du champ magnétique terrestre, qui ont fait l'objet d'un certain nombre de recherches dans le passé, sans qu'on en ait aujourd'hui toutes les clés de compréhension. Il semble bien pourtant qu'il existe une certaine diversité dans le règne animal, mais aussi végétal, en matière de mécanismes de magnétoperception, au-delà de celui mieux connu utilisé par les migrateurs pour leur orientation.

La revue bibliographique effectuée a par ailleurs laissé apparaître un grand nombre d'articles consacrés à la stimulation transcrânienne, pour des applications thérapeutiques, et une très importante proportion d'articles consacrés aux effets éventuels associés à l'exposition aux champs statiques émis par des appareils d'IRM. Les publications qui s'intéressent aux effets des champs statiques émis par les lignes de transport d'électricité à haute tension ou par d'autres sources sont très peu nombreuses.

### 3.2.1 Interactions des champs magnétiques statiques avec le vivant

Au-delà des effets des champs magnétiques statiques sur le vivant, que des chercheurs cherchent à caractériser par le biais d'études *in vivo* (chez l'animal), ou cliniques et épidémiologiques chez l'humain (donc sur des organismes entiers, notamment), des recherches ont été consacrées à l'étude des mécanismes biologiques par lesquels les champs magnétiques peuvent et pourraient interagir avec le vivant. En général, ces recherches réalisées *in vitro* s'appuient sur des cultures cellulaires, provenant de différents organismes, pour explorer les différents mécanismes biochimiques notamment qui peuvent s'y tenir. Un certain consensus semble s'être établi depuis quelques années dans la communauté scientifique sur la compréhension de ces mécanismes.

Dans sa monographie publiée en 2002 (IARC, 2002), le Centre international de recherche sur le cancer indique ainsi que les champs magnétiques statiques peuvent interagir avec les tissus par l'intermédiaire de 3 mécanismes (Tenforde, 1990 ; Tenforde, 1992). Ces éléments sont reproduits ci-dessous.

*En premier lieu, des interactions électrodynamiques peuvent se produire avec des courants ioniques, tels que le flux sanguin ou la conduction de l'influx nerveux. Cette interaction conduit à l'induction d'un champ électrique et d'un potentiel électrique, par exemple à travers un vaisseau sanguin. Ce type d'interaction apparaît seulement à une densité de flux magnétique élevée ( $\geq 1$  T).*

*Le deuxième mécanisme d'interaction est un effet magnéto-mécanique qui implique l'orientation de certaines structures biologiques dans des champs magnétiques intenses (Tenforde, 1992). Une sensibilité aux champs de faible intensité est observée chez plusieurs espèces biologiques, telles que certaines bactéries, les poissons et les oiseaux. En outre, des structures de magnétite ont été trouvées chez certains animaux comme les abeilles, le thon, le saumon, les tortues, les pigeons, les dauphins et les humains. La capacité à utiliser ces champs pour se diriger a été démontrée pour certaines espèces, par ex. les abeilles.*

*Les études sur l'homme n'ont pas apporté la preuve d'une orientation fondée sur le champ géomagnétique (Tenforde, 1992).*

*Le troisième mécanisme concerne l'effet Zeeman, par lequel un champ magnétique peut modifier les niveaux d'énergie de certaines molécules. L'une des conséquences de l'effet Zeeman est de modifier la probabilité de recombinaison de paires de radicaux formés dans certains processus biochimiques. Cela peut entraîner des changements dans la concentration de radicaux libres, qui peuvent être très réactifs. Ce « mécanisme de paires de radicaux » est bien établi en magnétochimie (Hamilton et al., 1988 ; McLauchlan, 1989 ; Cozens & Scaiano, 1993 ; Scaiano et al., 1994 ; Grissom, 1995 ; Mohtat et al., 1998), et sa pertinence pour les effets biologiques à faibles intensités de champ (par exemple, en dessous de 500  $\mu$ T) est actuellement à l'étude (Brocklehurst et McLauchlan, 1996).*

*Les champs magnétiques statiques intenses ont plusieurs effets indirects, tels que les interférences électromagnétiques avec les dispositifs médicaux implantés (par exemple stimulateurs cardiaques et défibrillateurs), et par les forces exercées sur des objets métalliques externes ou implantés. Par exemple, les gradients de champ magnétique dans les appareils d'imagerie par résonance magnétique sont connus pour transformer des objets métalliques en projectiles potentiellement dangereux.*

On notera par ailleurs que quelques chercheurs mettent en avant, notamment en Russie, l'existence d'effets thérapeutiques, et notamment antidouleur, de l'exposition à des champs magnétiques statiques de faible intensité. Mais comme on peut le constater dans une revue de Zhadin, malgré un usage apparemment fréquent de ces thérapies dans ce pays, les explications mécanistiques qui sous-tendraient ces observations ne sont pas claires (Zhadin, 2001).

### **3.2.2 Rapports institutionnels : 1997 - 2015**

Parmi les rapports de divers organismes et institutions qui se sont intéressés aux effets des champs magnétiques statiques sur l'être humain, six sont cités ci-dessous, publiés entre 1997 et 2015. À notre connaissance, il n'existe pas de revue globale plus récente qui aborde les champs statiques. Il faut noter que l'Organisation mondiale de la santé prépare, depuis 2012, une revue complète des effets des champs électromagnétiques (toutes fréquences) sur la santé, dont la date de parution n'est pas encore connue.

#### Département américain de l'énergie - 1997

Un rapport publié en 1997 par le laboratoire national d'Oak Ridge (Lockheed Martin Energy Research Corporation), pour le compte du Département américain de l'énergie, propose une revue des effets sur l'environnement des lignes de transport d'électricité à haute tension en courant continu (Bailey, 1997). Les auteurs précisent que les études chez l'humain et l'animal n'indiquent pas que les expositions aux champs magnétiques statiques jusqu'à 20 000 mG<sup>25</sup> (soit 2 mT) pourraient provoquer des effets délétères sur la santé. Ils soulignent toutefois que la migration des oiseaux ou d'autres animaux, ou leur comportement, peuvent être influencés par les champs magnétiques statiques. Le rapport précise que le niveau de champ magnétique statique à côté d'une ligne de transport d'électricité haute tension en courant continu, en Amérique du nord, serait au plus 10 % inférieur ou supérieur à celui du champ magnétique terrestre. Pour cette raison, les auteurs indiquent qu'il semble improbable que la petite contribution de ces lignes électriques représente un questionnement pour la santé. Ils précisent que les préoccupations liées aux effets éventuels des lignes en courant alternatif

<sup>25</sup> Le gauss (symbole G) n'est pratiquement plus utilisé comme unité (ancien système CGS, pour centimètre gramme seconde) pour le champ d'induction magnétique. 1 tesla = 10 000 gauss.

basses fréquences devraient inciter à réaliser des évaluations de l'intensité des champs produits par les lignes à courant continu, pour différencier ces différents types de lignes.

#### Centre international de recherche sur le cancer - 2002

La monographie réalisée par le Centre international de recherche sur le cancer (IARC, 2002) sur la cancérogénicité des champs électriques et magnétiques statiques et basses fréquences conclut que les expériences menées sur différents modèles expérimentaux de mammifères et d'autres animaux indiquent systématiquement l'absence d'effets néfastes sur la reproduction et le développement de l'exposition à des champs magnétiques statiques intenses (0,25 à 1 T). Les champs magnétiques statiques à fort gradient spatial et ceux combinés à des champs alternatifs ont été signalés comme pouvant affecter le développement embryonnaire des grenouilles et des souris, bien que le nombre d'études soit faible.

Au final, le Circ fournit l'évaluation suivante pour la cancérogénicité associée aux champs électriques et magnétiques statiques :

*Évaluation des niveaux de preuve pour les données humaines et animales :*

*Il n'existe pas de preuves suffisantes chez l'humain de la cancérogénicité des champs électriques ou magnétiques statiques [et des champs électriques de très basse fréquence].*

*[Il n'existe pas de preuves suffisantes chez les animaux de laboratoire de la cancérogénicité des champs magnétiques de très basse fréquence].*

*Il n'existe pas de données relatives à la cancérogénicité des champs électriques ou magnétiques statiques [et des champs électriques de très basse fréquence] chez les animaux de laboratoire.*

*Évaluation globale :*

*Les champs électriques et magnétiques statiques [et les champs électriques de très basses fréquences] ne peuvent être classés quant à leur cancérogénicité pour l'humain (groupe 3).*

#### Organisation mondiale de la santé - 2006

Un rapport d'expertise collective sur les effets sanitaires de l'exposition aux champs statiques a été publié sous l'égide de l'Organisation mondiale de la santé, en 2006 (WHO, 2006). Cette monographie (Environmental Health Criteria n°232) a recensé tous les effets sur la santé décrits dans la littérature scientifique disponible. Un résumé très complet de ces travaux, en français, est disponible dans le document, à partir de la page 290 et aussi en document séparé<sup>26</sup>. Ce résumé présente les sources de champs statiques, les mécanismes d'interaction, la synthèse des revues des études *in vitro*, chez l'animal, en laboratoire sur des sujets humains, ainsi que les études épidémiologiques. Ce résumé rappelle aussi l'évaluation du risque sanitaire réalisée, et les recommandations formulées à l'intention des autorités nationales, ainsi qu'une liste complète de recommandations de recherche pour compléter les connaissances disponibles.

Les auteurs du rapport font remarquer que l'une des principales difficultés rencontrées dans l'évaluation des effets de l'exposition aux champs magnétiques statiques est le manque de données pertinentes. Peu d'études ont été réalisées sur les éventuels effets à long terme sur la santé des

<sup>26</sup> [https://www.who.int/peh-emf/publications/EHC\\_232\\_Static\\_Fields\\_full\\_document.pdf?ua=1](https://www.who.int/peh-emf/publications/EHC_232_Static_Fields_full_document.pdf?ua=1). La traduction en français du résumé seule est accessible à ce lien : [https://www.who.int/peh-emf/publications/13\\_Summary\\_and\\_Recommendations\\_FRENCH.pdf?ua=1](https://www.who.int/peh-emf/publications/13_Summary_and_Recommendations_FRENCH.pdf?ua=1).

personnes exposées, en particulier à des champs de  $\sim 1$  T et plus. La probabilité de l'existence de tels effets peut cependant être évaluée, en première approximation, à partir de l'examen des mécanismes d'interaction biophysique connus (cf. 3.2.1).

Les conclusions du groupe d'experts sur les effets sanitaires des champs magnétiques statiques sont détaillées en fonction des effets aigus et chroniques, elles sont reproduites ci-dessous.

#### *Effets chroniques et différés*

*Concernant les champs magnétiques statiques, les preuves disponibles provenant des études épidémiologiques et de laboratoire ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions sur les effets chroniques et différés. Le Circ (2002) a conclu qu'il n'y avait pas de preuves suffisantes chez l'humain de la cancérogénicité des champs magnétiques statiques, et qu'il n'existait pas de données pertinentes provenant des études expérimentales animales. Les champs magnétiques statiques ne peuvent donc pas, à l'heure actuelle, être classés quant à leur cancérogénicité pour l'humain.*

#### *Effets aigus*

*Une exposition de courte durée à des champs magnétiques statiques de l'ordre du tesla et aux gradients de champ associés a révélé un certain nombre d'effets aigus.*

*Des réponses cardiovasculaires, telles que des modifications de la pression artérielle et de la fréquence cardiaque, ont été occasionnellement observées chez des volontaires humains et dans des études animales. Toutefois, ces réactions physiologiques sont normales pour une exposition à des champs magnétiques statiques jusqu'à 8 T.*

*Bien que cela n'ait pas été vérifié expérimentalement, il est important de noter que des calculs suggèrent trois effets possibles de variations de potentiels électriques induits : des modifications mineures du rythme cardiaque (qui peuvent être considérées comme n'ayant aucune conséquence pour la santé), l'induction d'extrasystoles (qui pourrait être plus significatif sur le plan physiologique) et une augmentation de la probabilité d'arythmie par réentrée (pouvant conduire à une fibrillation ventriculaire). Il est admis que les deux premiers effets n'apparaissent qu'au-dessus de 8 T, tandis que le seuil d'apparition pour le troisième semble difficile à déterminer à l'heure actuelle, en raison de la complexité de sa modélisation. Environ 5 à 10 personnes sur 10 000 sont particulièrement sensibles à une arythmie par réentrée, et le risque pour ces personnes pourrait être accru par l'exposition aux champs magnétiques statiques et aux gradients de champs.*

*Toutefois, les données disponibles présentent de telles insuffisances que dans leur ensemble, elles ne permettent pas de tirer de conclusions définitives quant aux effets des champs magnéto-statiques sur les paramètres physiologiques évoqués plus haut.*

*Lorsqu'un sujet effectue des mouvements dans un gradient de champ statique, il peut éprouver une sensation de vertige, des nausées, parfois des phosphènes et un goût métallique au niveau de la cavité buccale si l'intensité du champ statique dépasse environ 2 à 4 T. Même s'ils sont passagers, ces effets peuvent être indésirables pour le sujet. S'ajoutant à une éventuelle perte de coordination œil-main, ces effets peuvent perturber l'exécution de tâches délicates (interventions chirurgicales par ex.) et donc menacer la sécurité.*

*Il a été fait état d'autres effets sur les réactions physiologiques, mais il est difficile d'en tirer des conclusions définitives tant que ces résultats n'auront pas été reproduits de façon indépendante.*

*Cette évaluation des risques liés aux champs statiques a été réalisée sur la base de toutes les informations scientifiques disponibles. Cela a impliqué l'identification de tous les risques pour la santé pouvant être*

déterminés et quantifiés. Néanmoins, le manque drastique d'informations n'a pas permis de caractériser correctement les risques liés à l'exposition aux champs statiques. Il existe des indications, provenant d'études de modélisation et/ou de certaines observations chez l'humain, que des niveaux de champ pourraient provoquer des effets aigus. Cependant, les informations sur les effets à long terme et différés sont insuffisantes pour caractériser le risque, seul un positionnement général peut être formulé, qui s'appuie sur très peu d'études correctement menées.

Dans un document de présentation accessible sur son site internet<sup>27</sup>, l'OMS résume ainsi l'état des connaissances concernant les effets sur la santé des champs magnétiques statiques :

- Contrairement aux champs électriques, les champs magnétiques statiques peuvent pénétrer librement dans les tissus biologiques.
- Ils peuvent interagir directement avec des charges mobiles (ions, protéines, etc.) et les matériaux magnétiques présents dans les tissus par l'intermédiaire de différents mécanismes physiques.
- Cependant, aux niveaux des champs présents dans l'environnement, le seul mécanisme significatif est l'induction de champs et de courants électriques statiques dans les tissus.
- Ainsi, bien que les champs électriques externes ne puissent pas y pénétrer, les champs magnétiques externes peuvent engendrer des champs électriques dans le corps.
- Un grand nombre d'études sur les champs magnétiques statiques ont été réalisées sur les cellules et leurs éléments, le matériel génétique, l'embryogenèse, le système nerveux central, le comportement, etc.
- Dans l'ensemble, elles ne suggèrent aucun effet néfaste sur les principaux paramètres du développement, du comportement ou de la physiologie pour les expositions à court terme (jusqu'à environ 2 T).
- Cependant, des expériences toxicologiques à long terme sur des animaux doivent encore être menées pour évaluer les effets d'une exposition chronique.
- Chez les travailleurs exposés professionnellement, certaines études ont révélé un risque accru de mortalité et de cancer.
- Cependant, d'autres cancérogènes possibles et contaminants environnementaux ont été couramment retrouvés dans l'industrie et leurs effets n'ont pas été correctement étudiés.
- Il est donc impossible d'attribuer l'augmentation du risque à l'exposition aux champs magnétiques sans évaluer plus avant l'impact de ces autres facteurs.

#### Agence britannique de protection de la santé - 2008

Le Groupe consultatif indépendant sur les rayonnements non ionisants de l'Agence sanitaire britannique a publié en 2008 un rapport sur les champs magnétiques statiques (Agnir, 2008). Ce rapport très détaillé fournit des informations sur les sources et niveaux d'exposition (cf. 2.2.1, 2.3.3 et 2.3.4) et fait état des données scientifiques disponibles provenant d'études chez l'humain, l'animal et sur des cultures cellulaires en lien avec des effets de l'exposition aux champs magnétiques statiques. Le résumé exécutif du rapport précise que des expositions particulièrement élevées, jusqu'à plusieurs teslas, peuvent provenir de l'imagerie par résonance magnétique et la spectroscopie, ou encore de sources utilisées dans la recherche scientifique. Selon les auteurs, il existe plusieurs mécanismes théoriques, via des interactions électrodynamiques et magnétomécaniques, par lesquelles ces

<sup>27</sup> [https://www.who.int/peh-emf/about/en/Static\\_and\\_ELF\\_Fields.pdf](https://www.who.int/peh-emf/about/en/Static_and_ELF_Fields.pdf).

champs pourraient directement affecter des fonctions biologiques, notamment en réduisant le flux sanguin dans l'aorte, en induisant des courants électriques dans les tissus environnants, en stimulant les nerfs périphériques ou encore en perturbant le système vestibulaire (organes de l'équilibre).

Le rapport souligne qu'en laboratoire, l'alignement de certaines macromolécules et de cellules avec un champ d'environ 0,5 T ou plus a pu être observé, sans conséquences évidentes de ce phénomène. Ils soulignent qu'aucun effet délétère direct des champs magnétiques seuls sur les cellules n'a été établi, même si des modifications de fonctions cellulaires ont pu être observées dans des expériences impliquant des champs de 0,2 T et plus.

Concernant les études chez l'animal, le rapport de l'Agence britannique indique que des réactions d'aversion, indiquant probablement des effets sur le système vestibulaire, ont été observées à des niveaux d'exposition à des champs de 4 T et plus. Avec des expositions à des champs supérieurs à 100 mT, l'induction de courants électriques dans la zone du cœur et des principaux vaisseaux sanguins a été démontrée chez l'animal, mais aucune conséquence néfaste pour la santé n'a été mise en évidence. Les auteurs ajoutent que peu d'études ont été consacrées à d'autres effets biologiques chez l'animal, qui n'ont montré aucun effet néfaste.

Chez l'humain, le rapport indique que des effets cardiovasculaires ont été observés pour des expositions supérieures à 8 T, mais que ces effets étaient minimes et dans les plages de variations physiologiques normales. Les auteurs soulignent que, dans ce domaine, les données disponibles sont cependant limitées.

Le document de l'Agence britannique mentionne également que des personnes exposées à des champs supérieurs à environ 2 T peuvent ressentir des sensations temporaires, notamment de vertige et de goût métallique. Ces manifestations sont apparemment reliées, selon les auteurs, au moins en partie aux mouvements des personnes dans le champ statique, et peuvent donc être réduites en se déplaçant lentement. Le rapport ajoute que des études consacrées à d'autres fonctions cognitives et neurologiques n'ont pas fourni de preuves convaincantes d'effets.

Les auteurs indiquent que les études épidémiologiques et cliniques sont en nombre limité. Celles publiées au moment de la rédaction du rapport n'étaient pas en faveur d'effet délétère à long terme. En particulier, il n'y avait pas d'étude de cohorte ou de suivi à long terme de patients ou de personnels impliqués dans les services utilisant la résonance magnétique disponible.

Au final, le groupe d'expert conclut d'après les preuves disponibles :

- *Pour des expositions aux champs magnétiques statiques supérieures à 2 T : des effets sensoriels transitoires peuvent être ressentis par certaines personnes ; ces effets sont liés au moins en partie au mouvement dans le champ.*
- *Aucun effet sur la santé sérieux ou permanent n'a été observé chez l'humain pour des expositions jusqu'à 8 T, mais les données scientifiques sont limitées.*
- *Les effets sur l'humain d'expositions supérieures à 8 T sont inconnus, mais des effets sensoriels ou cardiovasculaires pourraient être augmentés dans le cas d'exposition à des niveaux plus élevés.*

#### Commission de protection contre les rayonnements non ionisants - 2009

La Commission de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp – *International commission on non-ionizing radiation protection*) a publié en 2003 une revue sur les effets des champs

magnétiques statiques et de basse fréquence (Icnirp, 2003)<sup>28</sup>. Par la suite, elle a publié des lignes directrices pour limiter l'exposition des personnes aux champs statiques en 2009<sup>29</sup>, accompagnée d'une notice explicative (Icnirp, 2009)<sup>30</sup>.

L'Icnirp, pour justifier les valeurs limites proposées, a réalisé au préalable une revue de la littérature afin d'identifier les éléments de preuve pouvant amener à associer l'exposition aux champs statiques à des effets avérés sur la santé. Les valeurs limites proposées par l'Icnirp sont présentées dans le chapitre dédié à la réglementation (cf. chapitre 4). L'Icnirp rappelle, en introduction de son évaluation des effets des champs statiques, que les trois mécanismes d'interaction avec le vivant établis sont l'induction magnétique ainsi que des interactions magnéto-mécaniques et électroniques.

Selon l'Icnirp, les nombreuses études *in vitro* réalisées (sur l'orientation des cellules, leur croissance, l'activité métabolique et l'expression des gènes) ne fournissent pas de preuve convaincante d'effets délétères de l'exposition aux champs magnétiques statiques jusqu'à des expositions de plusieurs teslas. L'Icnirp considère que les études animales en laboratoire, qui montrent des effets comportementaux pour des champs au-delà de 4 T, et l'induction de courants dans les régions proches du cœur au-delà de 0,1 T, sans que les conséquences de cela soient claires, ne permettent pas d'en déduire des conséquences pour la santé, notamment en matière d'effets neurologiques, sur les fonctions cardiovasculaires, le développement du fœtus, ou encore la cancérogénèse, jusqu'à des niveaux d'exposition de 8 T.

L'Icnirp a également considéré les études expérimentales réalisées chez l'humain, pour lesquelles elle considère qu'aucun effet sur les paramètres physiologiques n'a pu être montré en-dessous de 8 T, mis à part une légère augmentation dans la pression sanguine systolique. Pour l'Icnirp, en-dessous de 8 T, hormis des effets sur la coordination œil-main et la sensibilité aux contrastes visuels, aucun effet sur les autres fonctions cardiovasculaires, la température, la mémoire ou les temps de réactions auditives n'a été démontrée dans les études réalisées sur des volontaires. Comme indiqué dans de nombreux autres documents, l'Icnirp signale tout de même les symptômes transitoires de nausées, vertiges, goût métalliques et phosphènes, dépendant selon les individus, en cas de déplacement plus ou moins rapide, notamment de la tête ou des yeux, dans un champ de 2 à 3 T.

Au moment de la réalisation de son travail, l'Icnirp constatait le faible nombre d'études épidémiologiques disponibles portant sur la santé à long terme de personnes exposées aux champs magnétiques statiques, et aucune sur les personnes exposées à des niveaux élevés, comme celles travaillant dans l'environnement des IRM. L'Icnirp constate que les études réalisées en population professionnelle, dans les domaines notamment de l'industrie de l'aluminium ou du soudage (expositions de l'ordre de plusieurs dizaines de mT), comportaient des limites méthodologiques ; elles n'ont pas indiqué d'effets importants sur l'incidence du cancer, la reproduction ou les autres conséquences éventuelles étudiées.

L'Icnirp conclut globalement que la recherche n'a pas montré que l'exposition à des niveaux faibles de champ électrique et magnétique statique pourrait avoir des effets délétères sur la santé.

---

<sup>28</sup> <https://www.icnirp.org/en/publications/article/static-and-low-frequency-review-2003.html>.

<sup>29</sup> <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatgdl.pdf>.

<sup>30</sup> <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPFactSheetStatic.pdf>.

### Comité scientifique européen pour l'évaluation des risques sanitaires émergents et nouvellement identifiés - 2015

Dans son avis adopté en janvier 2009, le Comité scientifique européen pour l'évaluation des risques sanitaires émergents et nouvellement identifiés consacre un chapitre aux effets sur la santé des champs statiques (Scenih, 2009). Ce rapport, qui réalise une mise à jour d'un précédent avis publié en 2007 (Scenih, 2007), se concentre notamment sur les sources qui, à l'époque, étaient en pleine expansion, à savoir les appareils d'IRM. Le Scenih s'est ensuite une nouvelle fois penché sur les risques potentiels liés aux champs électromagnétiques (Scenih, 2015), avant de prendre un autre nom, le Comité scientifique européen sur la santé, l'environnement et les risques émergents (Scheer). L'avis publié en 2015 recense les nouvelles études publiées depuis son précédent avis, et en propose une revue détaillée.

De nombreux aspects du fonctionnement cellulaire ont été examinés dans des études *in vitro*, depuis l'avis du Scenih publié en 2009. L'expression des gènes et la génotoxicité, le stress oxydant et les effets sur les membranes, la croissance cellulaire, la différenciation et la viabilité (en tout 24 études) ont été analysés. Seulement 3 études ont utilisé des expositions faibles, de l'ordre du champ magnétique terrestre. Toutes les autres ont été réalisées à des niveaux élevés, plusieurs mT, voire dizaines ou centaines de mT, dont beaucoup de l'ordre du T. En conclusion, le Scenih observe que, dans la plupart des études disponibles, l'exposition au champ magnétique statique a eu des effets sur les différents paramètres cellulaires évalués, de façon parfois transitoire. L'expression des gènes a été observée dans toutes les études, et ces éléments confirment les précédentes conclusions du Scenih.

Le Scenih indique que plusieurs études chez l'animal ont été publiées depuis son précédent avis de 2009, dans les domaines des effets sur le système nerveux, le comportement, le développement embryonnaire, le métabolisme et divers paramètres physiologiques et fonctionnels. Des études se sont également intéressées aux mécanismes d'interaction primaires. Ils remarquent par ailleurs qu'aucune étude n'a été spécifiquement consacrée à l'interaction éventuelle entre l'exposition aux champs magnétiques statiques et le développement de tumeurs. Le Scenih indique que de nombreuses études observent des effets chez l'animal liés à des expositions de l'ordre du millitesla au tesla, mais les résultats se limitent souvent à une seule étude, pour un aspect spécifique, ce qui complique l'interprétation de tous ces éléments. Les effets sur le système nerveux, observés depuis plusieurs années selon le Scenih, sont contradictoires : la diminution de la douleur semble être relatée dans une certaine continuité, d'un côté, mais ce n'est pas le cas concernant les effets sur le comportement, même à des niveaux élevés d'intensité des champs magnétiques.

En conclusion des études chez l'animal, le Scenih exprime que, pris dans leur ensemble, les résultats décrits dans les études ne permettent pas de réaliser une évaluation des risques solide liée à l'exposition au champ magnétique statique, comme c'était déjà le cas dans leur précédent avis.

Concernant les études humaines, le Scenih indique que 3 études observationnelles sur les symptômes subjectifs ont été publiées depuis 2009, chez des personnels travaillant sur des IRM. Des données ont également été publiées concernant l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne. Les auteurs citent également les études réalisées sur les fonctions cognitives, les fonctions reproductives, les effets génotoxiques et sur un ensemble de symptômes recherchés dans diverses populations de travailleurs. Toutes ces études ont été conduites pour des niveaux d'expositions élevés, voire très élevés (le plus souvent dans l'environnement d'IRM).

En conclusion des études humaines, le Scenih indique que les études observationnelles ont montré que le mouvement dans des champs magnétiques statiques élevés peut provoquer des symptômes subjectifs comme des vertiges et des nausées, plus probablement à partir de 2 T

### 3.2.3 Articles de revue

Les revues de littérature sur le sujet des effets des champs magnétiques statiques sur la santé humaine abordent généralement la question dans son ensemble : niveaux d'exposition, interactions, effets. Il était donc difficile d'envisager de présenter séparément les données sur les mécanismes, les études expérimentales, notamment réalisées chez l'animal (mais dans un but de fournir des données utiles à l'évaluation des impacts pour la santé humaine...) et les études humaines, notamment épidémiologiques. Le choix a donc été de fournir ici des synthèses des études recensées, par ordre chronologique, même lorsque certaines sont plutôt consacrées à un type d'études (effets cellulaires par exemple). Comme on s'en rendra compte par la suite, très peu d'études ont été réalisées à des niveaux d'expositions faibles, de l'ordre de la dizaine ou de la centaine de  $\mu\text{T}$ , hormis celles qui visent à comprendre les mécanismes de la perception du champ magnétique terrestre. Les amplitudes des niveaux de champ magnétique étudiés sont par ailleurs souvent très grandes, entre les études, les revues intègrent donc des niveaux très différents dans leurs analyses. Les synthèses tentent malgré tout, lorsque les études l'on mentionné, de préciser à quels niveaux d'exposition des effets éventuels ont été observés. Un paragraphe spécifique sur l'IRM est par ailleurs proposé (cf. 3.2.5), qui présente une revue réalisée à partir d'articles exclusivement dédiés à cet environnement.

#### Repacholi *et al.* - 1997

Un séminaire international intitulé « Effets biologiques des champs électriques et magnétiques statiques et extrêmement basses fréquences et risques sanitaires associés » s'est déroulé à Bologne (Italie) du 4 au 6 juin 1997. Ce séminaire était parrainé conjointement par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp), ainsi que par le Ministère allemand en charge de l'environnement, le Ministère japonais de la santé et l'Office fédéral suisse de la santé publique.

Après le séminaire, quatre groupes de travail ont examiné et révisé un document de travail, préparé par l'OMS, qui résumait les revues récentes des données scientifiques sur les effets sur la santé de l'exposition à ces champs (UNEP/OMS/IRPA, 1987 ; Simon, 1992 ; NRPB, 1993 ; Icnirp, 1994 ; EC, 1996 ; NRC, 1996) et fournissait des recommandations pour des recherches futures. Ce rapport (Repacholi *et al.*, 1999), qui présente le consensus obtenu au sein des groupes de travail, résume les principaux résultats des recherches sur le sujet et fait le point sur les connaissances concernant les effets des champs électromagnétiques sur la santé.

Le paragraphe consacré aux mécanismes d'interaction des champs avec le vivant décrit les trois mécanismes déjà exposés en 3.2.1, pour les champs statiques, observés à des niveaux d'intensité élevés.

Cette revue recense les différentes études réalisées par exemple sur les effets des champs magnétiques statiques sur l'orientation de macromolécules, les membranes cellulaires et les cellules elles-mêmes, ou encore les réactions chimiques, les mutations du matériel génétique, le système nerveux central, ou encore l'orientation dans le champ magnétique terrestre... Des études sur le risque de cancer ou d'autres effets sur la santé, en milieu professionnel, ont également été réalisées, avec des effets observés pour des niveaux d'exposition supérieurs à 0,5 T. Ces études, du fait de leurs limites intrinsèques, ne permettent cependant pas de se prononcer sur les éventuels effets à long terme. Les auteurs soulignent que les résultats de nombre d'études observant des effets biologiques ne sont pas cohérents, et qu'ils n'ont pas été clairement confirmés. On notera par ailleurs qu'à l'exception d'une étude, indiquant un niveau d'exposition de 50  $\mu\text{T}$ , elles ont la plupart été réalisées à des niveaux élevés de champ magnétique, au-delà de 0,5 mT. Les symptômes déclarés par des

personnels travaillant dans l'environnement d'aimants permanents sont rappelés dans cette revue, notamment l'irritabilité, la fatigue, les maux de tête, la perte d'appétit, ou encore la tachycardie, la diminution de la pression artérielle, etc., tout en rappelant l'absence d'évaluation des facteurs de confusion (autres agents physiques ou chimiques par exemple) dans les études qui les ont mentionnés. Les auteurs décrivent également les résultats d'études réalisées dans les années 1980 chez des travailleurs dans l'industrie de l'aluminium, notamment en matière de risque de leucémie, pour lequel les résultats, dans l'ensemble, ne sont pas significatifs. Les quelques études réalisées chez l'animal, selon les auteurs, n'ont pas mis en évidence d'effets qui aient été confirmés par la suite, dans une littérature datant des années 1980 jusqu'au milieu des années 1990.

En conclusion, concernant les études expérimentales en laboratoire et celles réalisées chez l'humain, en s'appuyant notamment sur des travaux d'expertise antérieurs de divers organismes (UNEP/WHO/IRPA, 1987 ; NRPB, 1992 ; Icnirp, 1994), les auteurs considèrent que, prises dans leur ensemble, elles ne suggèrent aucun effet néfaste sur les paramètres importants liés au développement, au comportement et à la physiologie des organismes supérieurs, pour des expositions de courte durée à des champs statiques jusqu'à environ 2 T. Dit autrement, selon les auteurs, les quelques études menées à ce jour ne mettent pas en évidence la probabilité d'observer des effets néfastes aigus sur la santé à des densités de flux magnétique inférieures à environ 1 ou 2 T.

Les auteurs reconnaissent toutefois que, compte tenu des perspectives de développement du diagnostic médical par l'IRM et, à l'époque, de nouvelles technologies impliquant des champs continus puissants (trains à sustentation magnétique ou réacteurs à fusion nucléaire), ils estimaient nécessaire de conduire des études à grande échelle sur l'exposition à long terme aux champs magnétiques statiques. En effet, les quelques études épidémiologiques publiées alors laissent un certain nombre de questions non résolues concernant la possibilité d'induction de cancers par l'exposition aux champs magnétiques statiques. Parmi les sources d'incertitude dans ces études, il faut noter des évaluations limitées de l'exposition et un faible nombre de participants. Selon les auteurs de la revue, il paraît peu probable que les champs magnétiques statiques soient mutagènes, ce qui devrait inciter les laboratoires à se focaliser sur la recherche sur les mécanismes de promotion ou de progression des tumeurs. Les auteurs précisent que les quelques études réalisées dans ce domaine suggèrent l'absence de cancérogenèse à des expositions à des champs allant jusqu'à 1 T (EC, 1996). Ils concluent finalement que des mécanismes identifiés expliquent comment l'exposition à de très fortes densités de champ magnétique statique pourraient avoir des effets néfastes sur la santé, mais qu'il est peu probable que ces mêmes mécanismes puissent engendrer des effets délétères pour la santé à des niveaux d'exposition plus faibles.

#### Feychting - 2004

Une revue des études épidémiologiques ayant investigué le lien entre l'exposition aux champs magnétiques statiques et des effets éventuels à long terme sur la santé humaine a été publiée en 2004 par Feychting (Feychting, 2004). L'auteure souligne que les effets potentiels des champs magnétiques statiques sur la santé ont fait l'objet de bien moins de recherches que, par exemple, les champs basses fréquences (créés par le transport du courant) ou radiofréquences (liés notamment aux technologies de communication). En grande majorité, ce sont les risques de cancer qui ont été étudiés par les quelques études épidémiologiques disponibles à l'époque, même si les conséquences sur d'autres pathologies ou la reproduction ont parfois été évaluées.

Les études recensées dans cette revue ont été réalisées chez des populations de travailleurs dans les domaines de la production d'aluminium, de l'électrolyse du chlorure de sodium, du soudage et du diagnostic médical (IRM). L'auteure note comme limite à ces études que peu d'entre elles

concernaient en réalité spécifiquement les effets de l'exposition aux champs magnétiques statiques. Par conséquent, l'évaluation de l'exposition aux champs, dans ces études consacrées en général à un ensemble divers de pathologies et d'exposition à des agents multiples a été faible ou inexistante.

L'auteure remarque que les études qui ont proposé une évaluation de l'exposition aux champs magnétiques statiques n'ont pas indiqué de risques accrus de cancer, mais qu'elle se fonde généralement sur un petit nombre de malades, ce qui réduit leur puissance statistique, et que l'évaluation de l'exposition est le plus souvent « grossière ». L'auteure souligne que le contrôle des facteurs de confusion, qui peuvent être nombreux dans ce type d'environnement de travail<sup>31</sup>, est également limité, et qu'il est probable que l'effet « travailleur sain »<sup>32</sup> ait influencé les résultats. Elle ajoute que quelques études réalisées chez des travailleurs de l'aluminium et parmi les opérateurs d'IRM ont apporté des éléments en matière d'effets sur la reproduction, mais que les limites liées à la conception de ces études empêchent d'en dégager des conclusions.

En conclusion, l'auteure indique que les éléments de preuves apportés par les études épidémiologiques ne permettent pas de formuler des conclusions sur les effets potentiels sur la santé de l'exposition aux champs magnétiques statiques.

#### Miyakoshi - 2005

Dans une revue publiée en 2005, Miyakoshi s'intéresse aux effets sur le fonctionnement cellulaire des champs magnétiques statiques, en particulier les effets sur l'ADN (Miyakoshi, 2005). L'auteur souligne l'hétérogénéité des articles disponibles, en ce qui concerne l'intensité des champs magnétiques statiques et les durées d'exposition (de quelques minutes à plusieurs mois). L'auteur propose néanmoins cette conclusion : « l'exposition aux champs magnétiques statiques n'a aucun effet, ou des effets extrêmement faibles, sur la croissance cellulaire et la toxicité génétique quelle que soit l'intensité des champs magnétiques ». Toutefois, l'auteur remarque en situation de co-exposition, par exemple avec des rayonnements ionisants ou certains produits chimiques, que certains travaux suggèrent fortement que le champ magnétique statique pourrait modifier les effets liés à ces autres expositions. Ceci a été en particulier observé lors de traitements thérapeutiques appliqués avant l'exposition à un champ magnétique statique. Mais l'auteur signale la difficulté à interpréter ces données, dans la mesure où les effets décrits dépendaient des types de cellules étudiées, sans qu'il soit donc possible d'en tirer des conclusions robustes.

#### Ghodbane *et al.* - 2013

Près de dix ans plus tard, une revue (Ghodbane *et al.*, 2013) s'est intéressée aux effets des champs magnétiques statiques sur les mécanismes précurseurs du cancer, avec en arrière-plan l'idée d'éventuels effets synergiques entre les champs magnétiques statiques et des traitements contre le cancer. Cette revue recense donc également les études qui se sont intéressées aux techniques impliquant des champs magnétiques statiques dans la recherche d'effets thérapeutiques contre le cancer. Au-delà de cet aspect, cette revue intègre un certain nombre d'études spécifiques sur les effets cellulaires des champs magnétiques statiques : la création de radicaux libres et le stress

<sup>31</sup> Les travailleurs des professions exposées aux champs magnétiques statiques, tout spécialement dans l'industrie, sont souvent également exposés à une grande variété d'autres agents potentiellement dangereux, y compris certains cancérigènes connus, selon l'auteure de la revue.

<sup>32</sup> L'effet dit du « travailleur sain » met en avant le biais possible introduit dans les études épidémiologiques par le fait que la population des personnes qui travaillent sont, par définition, en meilleure santé que la population générale, qui comprend aussi les personnes qui, pour des raisons de santé, ne sont pas en état de travailler. La population des travailleurs n'est donc pas représentative de la population générale.

oxydant, ainsi que l'apoptose et la génotoxicité. Reflétant les recherches réalisées sur ce sujet, la revue de Ghodbane *et al.* ne mentionne que les publications concernant des expositions à des champs magnétiques statiques d'intensité intermédiaire (de 1 mT à 1 T), et à de fortes (1 à 5 T) et très fortes (> 5 T) intensités. Les champs de faible intensité (< 1 mT) ne sont pas examinés dans cette revue.

Les auteurs expliquent que les modifications des cellules observées dans les expérimentations, lors d'expositions à un champ magnétique statique, résulte selon eux d'une cascade de mécanismes. Ils évoquent en premier lieu la perturbation du métabolisme des radicaux libres et l'élévation de leur concentration. Selon eux, cela entraîne un phénomène de stress oxydant et, par conséquent, des effets sur les canaux ioniques, ce qui entraîne alors des modifications de la morphologie cellulaire et de l'expression de différents gènes et protéines, ainsi que des modifications de l'apoptose et de la prolifération cellulaire. On retrouve ici aussi une remarque, déjà formulée dans d'autres revues, selon laquelle l'exposition aux champs magnétiques statiques seuls, quelle que soit leur intensité, n'a aucun effet, ou seulement des effets extrêmement faibles, sur la croissance cellulaire et la toxicité génétique. Ainsi, les auteurs de cette revue font remarquer que la co-exposition entre les rayonnements ionisants ou certains produits chimiques, comme le cadmium, avec le champ magnétique statique, peut de façon plus évidente entraîner des effets. Enfin, indication déjà formulée dans d'autres revues, chaque effet observé ne le serait que dans un type de cellule particulier, et pas dans d'autres, ce qui rend bien évidemment très difficile la formulation d'une vision d'ensemble, et encore moins des conclusions robustes et leur interprétation en matière d'effets potentiels sur la santé.

En lien avec les objectifs poursuivis dans leur travail, les auteurs soulignent par ailleurs que plusieurs travaux de recherche ont observé des effets, notamment inhibiteurs, des champs magnétiques statiques sur des cellules tumorales. Cette synergie entre l'action des médicaments anticancéreux et les champs magnétiques statiques est recherchée afin de réduire la toxicité et la résistance aux chimiothérapies.

#### Albuquerque *et al.* - 2016

Albuquerque *et al.* ont publié en 2016 une revue de la littérature sur les effets des champs magnétiques statiques sur les cellules (Albuquerque *et al.*, 2016). Ils ont sélectionné des articles dans les bases de données Pubmed et Google Scholar, sans limite d'année de publication mais en priorisant les articles les plus récents, d'après des critères liés au champ statique et à des systèmes cellulaires particuliers : ADN, expression des gènes, orientation de biomolécules, croissance cellulaire, viabilité cellulaire, morphologie cellulaire, métabolisme du calcium, activité enzymatique, recombinaison de paires de radicaux, synthèse de biomolécules et membranes cellulaires. Pour chacun de ces effets, entre une quinzaine et une trentaine d'études ont été analysées. Les auteurs ne précisent pas toujours les niveaux d'intensité des champs utilisés dans les études décrites. De manière générale, les intensités mises en jeu sont élevées, voire très élevées (très majoritairement quelques mT à plusieurs T. Seules trois études sont mentionnées pour avoir utilisé un champ statique de 100 ou 120  $\mu$ T, sur la croissance cellulaire.

Les auteurs concluent que des modifications biologiques ont été observées dans certains systèmes cellulaires exposés au champ magnétique statique, mais uniquement lorsque ces systèmes possèdent des sensibilités particulières au champ. Ils soulignent que dans un organisme vivant, ces effets seraient extrêmement difficiles à prévoir, et qu'ils seraient vraisemblablement liés à des conditions particulières. Enfin, ils précisent que les effets mentionnés n'apparaissent qu'à des niveaux de champ magnétique statique élevé, voire très élevé.

Driessen *et al.* - 2020

La revue récente réalisée par Driessen et ses collègues (Driessen *et al.*, 2020) visait à analyser de façon systématique<sup>33</sup> les publications disponibles et à évaluer les effets potentiels des champs magnétiques statiques de faible intensité (inférieurs à 1 mT) sur les fonctions biologiques. En effet, peu de revues ont été publiées dans ce domaine des champs électromagnétiques, et aucune, jusqu'à celle-ci, n'avait été consacrée spécifiquement aux champs de faible intensité. Cette revue satisfait aux méthodes les plus rigoureuses en la matière : elle s'est conformée aux modalités PRISMA<sup>34</sup> pour la recherche des publications à intégrer et la préparation de cette revue systématique, et a utilisé la méthode OHAT<sup>35</sup> pour évaluer la qualité des études analysées. La recherche systématique au moyen de mots clés dans les moteurs de recherche PubMed et EMF-Portal a permis de récolter 5 712 articles. Après tri sur leur titre et résumé, pour sélectionner les publications répondant aux critères d'inclusion (en particulier des expositions < 1 mT), 334 articles ont été sélectionnés. Au final, après lecture intégrale des articles, seules 11 études répondaient aux critères d'éligibilité et ont été incluses dans la revue. Aucune étude sur l'humain ne figurait parmi les éligibles. Huit des 11 études finalement incluses dans cette revue ont observé des effets chez des rats, des lapins et des cailles. Ces effets liés à une exposition à des champs magnétiques statiques de faible intensité se traduisent par une altération de la synthèse de la mélatonine, une réduction de l'activité locomotrice, une altération du débit sanguin et de la pression artérielle, des modifications transitoires des paramètres biochimiques liés à la pression artérielle, ou encore par un impact sur des neurotransmetteurs ou l'augmentation des activités enzymatiques.

La revue a consacré une grande attention, à l'aide de la méthode OHAT, à identifier les qualités intrinsèques des 11 études retenues. Elles ont notamment été classées dans différents groupes au regard de leurs limites et qualités méthodologiques. Le faible nombre d'études incluses ne permet bien évidemment pas d'envisager, compte tenu de la variété des effets étudiés, de rassembler de façon cohérente des éléments de preuve. Il faut en effet noter la grande dispersion des effets recherchés par les laboratoires dans ce domaine. Les études ont finalement été classées en fonction des niveaux de risques de biais qu'elles comportent, seules trois d'entre elles se situant dans le premier niveau de qualité, les huit autres dans le second. Les animaux étudiés étaient soit des rongeurs, soit des oiseaux. Le nombre d'animaux par groupes variait de 3 à 50, et le niveau d'exposition de 52  $\mu\text{T}$  à 1 mT. La revue a rassemblé les effets étudiés selon les aspects suivants : la synthèse de mélatonine, le comportement, des paramètres cardiovasculaires, le cerveau et le système nerveux. Les effets observés dans les études concernent environ 200 animaux (rats, lapins et cailles), alors qu'aucun effet n'a été observé chez les souris. Les effets les plus solides qui semblent ressortir de cette évaluation sont ceux concernant le système cardiovasculaire, avec deux études du premier niveau de qualité, et une du second niveau observant des effets sur plusieurs paramètres du système cardiovasculaire. Les auteurs précisent cependant que ces études n'ont pas, au moment de la rédaction de l'étude, été répliquées de façon indépendante. Les autres effets observés apparaissent trop hétérogènes pour en

<sup>33</sup> Ici, le terme « systématique » est employé au sens des « revues systématiques ». Selon l'institution Cochrane, qui fait autorité en la matière, notamment dans le domaine des études cliniques, « une revue systématique est le fruit d'une démarche scientifique rigoureuse constituée de plusieurs étapes bien définies, incluant une recherche de littérature systématique, une évaluation de la qualité de chaque étude considérée et une synthèse, quantifiée ou narrative, des résultats obtenus. Le résultat de ce travail permet de conclure, par exemple, à l'efficacité d'un traitement, le risque d'effets indésirables ou la performance d'un test diagnostique. Parfois les auteurs ne peuvent que constater l'absence de données scientifiques rigoureuses.

<https://swiss.cochrane.org/fr/ressources/revues-systematiques>.

<sup>34</sup> PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) est un ensemble minimal d'éléments fondés sur des preuves pour réaliser des revues systématiques et des méta-analyses.

<sup>35</sup> La méthode OHAT (*Office of Health Assessment and Translation*) est utilisée pour évaluer le niveau de preuve d'effets sur la santé.

tirer des conclusions valables. Pour les auteurs de la revue, cependant, l'interprétation de ces résultats n'a pas permis de déterminer clairement si les effets décrits pourraient être bénéfiques ou néfastes pour la santé.

Les auteurs de cette revue déclarent ainsi que les éléments disponibles dans la littérature examinée ne sont pas suffisants pour tirer une conclusion quant aux effets biologiques et sanitaires de l'exposition à des champs magnétiques statiques de faible intensité (< 1 mT). Ils relèvent, parmi les limites à cette évaluation, l'hétérogénéité des organismes exposés et des paramètres biologiques examinés, ainsi qu'un manque de rigueur scientifique dans la plupart des études examinées, ce qui, selon eux, réduit la crédibilité des résultats décrits.

#### Hartwig et al. - 2022

La revue publiée par Hartwig et ses collègues sur les expositions professionnelles aux champs électromagnétiques présents dans l'environnement des appareils utilisant la résonance magnétique est principalement présentée au paragraphe 3.2.5 ci-dessous (Hartwig et al., 2022). Même si elle se focalise principalement sur les expositions à des intensités élevées de champ magnétique statique, comme pour l'IRM, elle propose tout de même une analyse récente des derniers travaux réalisés à différents niveaux d'expositions.

Les auteurs signalent ainsi que l'interaction biologique possible des champs magnétiques avec des systèmes *in vivo* et *in vitro* a été étudiée dans de nombreux travaux scientifiques, à des expositions modérées (1 mT - 1 T), fortes (1 - 5 T) et très fortes (> 5 T), pour différentes durées allant de quelques minutes à plusieurs jours. Les études réalisées en laboratoire chez l'animal (*in vivo*) ont principalement porté sur le développement embryonnaire, les effets sur le système nerveux, divers paramètres physiologiques, le métabolisme, ainsi que sur le comportement. À des niveaux d'exposition de l'ordre du millitesla au tesla, pour un paramètre spécifique et à chaque fois dans une seule étude, des effets ont pu être observés. Les auteurs, en complément, remarquent que contrairement aux observations passées d'effets sur le système nerveux, les articles récents contredisent ces données. La réduction de la douleur au moyen de l'exposition au champ magnétique statique fait toujours l'objet de recherches, et, dans ce cas, les études récentes semblent cohérentes avec les précédentes.

Comme indiqué dans les autres revues citées plus haut, les études récentes réalisées chez la souris ne semblent pas montrer d'effets délétères. Même à des intensités de champ magnétique statique élevées (3,5 à 23 T), aucun effet n'a été observé sur la consommation d'eau et de nourriture, la glycémie, la circulation sanguine et les paramètres biochimiques sanguins, ainsi que sur le poids des organes et la coloration histologique après un examen quotidien jusqu'à 3 semaines (Tian et al., 2019). Les auteurs citent une autre étude (Wang et al., 2019) portant sur le poids corporel, les indices sanguins ainsi que différents paramètres sur les organes et leur histomorphologie, qui n'a pas montré d'effets chez des souris exposées pendant 28 jours à des champs magnétiques statiques de 2 à 12 T.

La revue de Hartwig et ses collègues analyse également les études réalisées *in vitro*, sur des cultures cellulaires. Selon les auteurs, les résultats des publications les plus récentes confirment ceux des études précédentes, résumés dans plusieurs articles de revue (Miyakoshi, 2006 ; Ghodbane et al., 2013). Les effets cellulaires analysés portaient sur plusieurs paramètres comme la génotoxicité, le stress oxydant, l'expression des gènes et des protéines, l'apoptose, la viabilité, la croissance et la différenciation cellulaire, ainsi que les effets membranaires. En synthèse de ces observations, les auteurs de la revue relèvent notamment que si une altération de l'expression de gènes spécifiques dans des cellules humaines et d'autres cellules de mammifères a été observée, l'effet dépendait à la fois de la durée d'exposition et des gradients de champ. Comme dans de nombreuses études portant

sur le même sujet, quelle que soit la fréquence mise en jeu, un effet sur la génotoxicité a été signalé, mais les auteurs précisent qu'il semble que cet effet transitoire puisse être réparé.

Parmi les études récentes, les auteurs de la revue citent celle de Romeo et ses collègues, qui n'a pas trouvé d'effets sur la viabilité cellulaire, les espèces réactives de l'oxygène et l'intégrité de l'ADN dans des fibroblastes de poumon de fœtus chez l'humain exposés à un niveau de champ magnétique de 370 mT, pour différentes modalités d'exposition (Romeo *et al.*, 2016). Les auteurs soulignent la qualité de cette étude qui a pris soin de limiter les biais possibles, notamment les effets d'échauffement liés à l'exposition. La revue cite aussi une étude de 2018 qui a examiné les effets sur la croissance cellulaire de 12 lignées de cellules humaines cancéreuses et non cancéreuses exposées à des champs magnétiques statiques de 0,2 à 1 T émis par un aimant permanent (Tian *et al.*, 2018), produisant des effets divergents en fonction des différentes orientations du champ magnétique. Enfin, le cycle et la mort cellulaire de 15 lignées cellulaires différentes, essentiellement humaines, a été investigué par Zhang et ses collègues. Ils n'ont pas mis en évidence d'effet d'un champ magnétique statique de 1 T (Zhang *et al.*, 2017). Les auteurs de la revue soulignent toutefois que, pour des densités cellulaires élevées, l'exposition au champ magnétique a réduit le nombre de cellules dans six des sept lignées de cellules cancéreuses humaines. Selon les auteurs, ceci est en faveur, comme dans d'autres études similaires, d'effets dépendant du type de cellule étudié et de leur densité.

Dans la ligne des autres revues mentionnées dans ce chapitre, et de façon classique, les auteurs soulignent les effets potentiels liés à la co-exposition aux champs magnétiques statiques d'intensités élevées avec les produits chimiques ou les rayonnements ionisants.

Enfin, en conclusion, l'hétérogénéité des résultats obtenus dans les études *in vitro* est rappelée, les effets observés dépendant strictement du type de cellule ainsi que de la durée et des caractéristiques de l'exposition.

### 3.2.4 Utilisation des champs magnétiques statiques à visées thérapeutiques

La revue publiée par Glab et ses collègues (Glab *et al.*, 2016), portant sur les publications scientifiques dans le domaine de l'usage thérapeutique des aimants permanents et des sources de champs magnétiques très basses fréquences, a conclu que les effets antidouleur de l'exposition à des champs magnétiques statiques étaient confirmés, mais seulement après un traitement de longue durée. Les auteurs précisent néanmoins que la plupart des études qui se sont intéressées au traitement d'autres symptômes n'ont pu mettre en évidence de différence entre les groupes de personnes traitées avec des placebos et ceux utilisant des champs en guise de traitement.

Une revue plus récente (Fan *et al.*, 2021) a également exploré les applications des champs magnétiques statiques dans le traitement de la douleur. L'usage des champs magnétiques, et pas uniquement statiques, à des fins thérapeutiques est relativement répandu, notamment en Europe de l'Est, sans pour autant que des mécanismes expliquant les effets observés aient été clairement identifiés. Les auteurs de la revue soulignent la facilité avec laquelle les champs magnétiques, grâce aux aimants, peuvent être appliqués localement à des parties spécifiques du corps humain. Ils relèvent cependant que les études cliniques sérieuses sont peu nombreuses, souvent réalisées de manière individuelle, et selon des protocoles hétérogènes.

Ils rappellent également que, bien que les effets thérapeutiques des champs magnétiques statiques n'ont pas été validés cliniquement, la stimulation magnétique transcrânienne (TMS), approuvée notamment par l'Agence américaine des médicaments, est aujourd'hui largement utilisée pour traiter de multiples affections, notamment la migraine, certaines affections psychiatriques, la douleur, ou encore la maladie de Parkinson.

Les auteurs ont analysé 28 études, réalisées avec des témoins non exposés, qui ont étudié les effets des champs magnétiques statiques sur le soulagement de la douleur chez l'humain ou la souris. Ils indiquent que, parmi les études qu'ils ont analysées, 64 % d'entre elles chez l'humain et toutes celles chez la souris ont montré des effets analgésiques des champs statiques. L'efficacité dépendait de l'intensité des champs et/ou de la durée de traitement, ainsi que du type de douleur traitée. Des études sur les mécanismes potentiellement impliqués indiqueraient le rôle possible de certains récepteurs membranaires. Il faut souligner que le niveau d'intensité le plus bas utilisé dans ces études était de 1 mT. Nombre d'entre elles ont utilisé des niveaux de l'ordre de 50 mT, et jusqu'à 1 T pour l'une d'entre elles.

### 3.2.5 Niveaux d'exposition élevés : cas de l'imagerie par résonance magnétique

Les niveaux d'exposition aux champs magnétiques statiques engendrés par les lignes de transport d'électricité, au-delà de quelques mètres de distance, sont au maximum de l'ordre de grandeur du champ magnétique terrestre. Les niveaux d'exposition dans l'environnement des appareils d'imagerie par résonance magnétique sont beaucoup plus élevés, de l'ordre de plusieurs dizaines à centaines de milliers de fois plus élevés. Mis à part quelques rares études, la littérature scientifique consacrée aux effets des champs magnétiques statiques sur la santé s'est principalement concentrée sur les niveaux d'exposition élevés, et notamment ceux produits par les installations de diagnostic médical par imagerie à résonance magnétique (IRM). Le développement relativement rapide dans le monde de cette technologie de diagnostic non invasif a en effet conduit à s'interroger sur ses effets indésirables éventuels, liés notamment à la présence de champs magnétiques statiques très élevés, liés à l'aimant permanent au cœur du dispositif. À noter que les installations d'IRM émettent également des champs basses fréquences et radiofréquences (cf. 2.2.2 et 2.3.3).

Il paraissait important, dans la mesure où les données sur les effets éventuels des champs magnétiques statiques de faible intensité sont limitées, de donner ici un aperçu des connaissances concernant les effets sur la santé de l'exposition à des champs magnétiques statiques de très fortes intensités.

Plusieurs revues ont été publiées pour faire le point sur les effets spécifiques des champs statiques émis dans l'environnement des IRM, en particulier par Chakeres et De Vocht, en 2005, qui ont principalement étudié les effets sur les fonctions physiologiques et neuro-cognitives (Chakeres et De Vocht, 2005). Selon les auteurs, aucun effet délétère n'a été mis en évidence, jusqu'à des intensités de 8 T. Seuls un certain nombre de symptômes de type vertige, goût métallique dans la bouche ou inconfort lié à l'appareil ont été mentionnés par quelques patients.

Une revue réalisée par Saunders en 2005 s'est par ailleurs focalisée sur les effets des champs magnétiques statiques observés dans des expérimentations chez l'animal (Saunders, 2005). L'auteur constate que les effets biologiques d'une exposition aiguë et/ou chronique à des champs magnétiques statiques, en particulier les champs intenses de plus de 1 T, qui sont couramment utilisés en IRM, n'ont pas fait l'objet d'une recherche systématique par des expérimentations *in vivo*. Malgré tout, à partir des données issues des études réalisées dans ce domaine, il remarque que, dans des champs magnétiques statiques supérieurs ou égaux à 4 T, le déplacement des animaux de laboratoire peut être désagréable pour eux, probablement en raison des forces créées par le champ magnétique sur l'appareil vestibulaire de l'oreille interne. Il note aussi, à partir des études réalisées chez l'animal (notamment des primates), pour des expositions au-delà de 100 mT, que la circulation du sang dans un champ statique peut générer des potentiels électriques à travers l'aorte et d'autres artères principales. Ces deux effets ont également été observés chez des volontaires humains.

L'auteur précise ensuite qu'un certain nombre de publications décrivent des effets sur le système nerveux et le débit sanguin, la pression artérielle et d'autres paramètres du système cardiovasculaire, souvent à des champs bien inférieurs à 1 T. Ces observations sont cependant isolées, elles n'ont pas été corroborées par d'autres recherches.

Poursuivant l'investigation des différents effets étudiés dans la littérature, la revue de Saunders précise qu'aucun effet néfaste n'a été clairement démontré concernant les effets possibles sur la reproduction et le développement. Là encore, cependant, il existe peu d'études de qualité disponibles, en particulier pour des champs supérieurs à 1 T. Ainsi, selon l'auteur, il n'est pas possible de conclure sur des effets éventuels en lien avec une exposition supérieure à 1 T.

En résumé, cette revue indique que les études réalisées spécifiquement sur l'IRM ne permettent pas de conclure, en raison notamment d'un nombre trop faible d'animaux considéré dans les études, sur les effets éventuels de ces expositions sur la santé. Les résultats sont hétérogènes, et l'auteur précise que si un effet existait, il serait impossible à distinguer des autres facteurs de confusion potentiels qui accompagnent l'exposition aux champs statiques. Concernant la cancérogenèse, l'auteur dresse un constat similaire : les données disponibles, trop peu nombreuses, ne sont pas concluantes.

Heinrich et ses collègues, en 2011, ont également publié une revue centrée sur les effets des champs magnétiques statiques des IRM sur la cognition, les perceptions sensorielles et les constantes physiologiques, faisant notamment le constat, sauf pour les perceptions visuelles, de l'hétérogénéité des résultats entre les études. Le niveau minimum d'exposition dans ces études était de 0,7 T (Heinrich *et al.*, 2011).

Très récemment, une revue a été publiée par Hartwig et ses collègues sur les expositions professionnelles aux champs électromagnétiques présents dans l'environnement des appareils utilisant la résonance magnétique (Hartwig *et al.*, 2022). Les auteurs rappellent que l'imagerie par résonance magnétique (IRM) est l'une des méthodes d'imagerie diagnostique les plus utilisées dans le monde : il existe aujourd'hui environ 50 000 scanners. Ils précisent qu'un minimum de cinq professionnels de différentes disciplines travaillent dans l'environnement des scanners IRM. Cette revue propose une analyse de l'état de l'art de la littérature disponible sur plusieurs aspects de l'exposition professionnelle aux champs électromagnétiques liés aux IRM : la réglementation, les publications scientifiques sur les effets biologiques et la surveillance sanitaire, ainsi que l'évaluation de l'exposition. La revue a intégré des articles originaux publiés dans des revues internationales à comité de lecture entre 2013 et 2021, en langue anglaise, ainsi que les données réglementaires.

La partie de la revue consacrée aux effets des champs statiques rappelle que les trois principaux mécanismes physiques d'interaction entre les champs magnétiques statiques et les tissus biologiques sont l'induction magnétique, ainsi que les interactions magnéto-mécaniques et chimiques.

Les auteurs indiquent que les sensations de nausée et de vertige qui sont parfois signalées comme consécutives à des expositions à des intensités de champ élevées trouvent leur origine dans l'effet d'induction magnétique. Le déplacement à travers le gradient de champ statique dans l'environnement d'un appareil d'IRM produit un effet semblable à celui provoqué par un champ magnétique variable dans le temps, connu lui pour induire une tension dans les matériaux conducteurs de l'électricité. C'est le cas notamment pour les tissus biologiques. Le champ électrique, d'intensité élevée, dans le corps en mouvement, peut donc engendrer des maux de tête, des nausées, des vertiges, des phosphènes (manifestations visuelles), des engourdissements et picotements, une diminution des capacités de proprioception voire une perte d'équilibre.

Un champ magnétique statique exerce une force sur des objets ferromagnétiques (comme les métaux à forte susceptibilité magnétique). Il est donc possible que le champ statique produit dans l'environnement d'une installation d'IRM agisse sur les dispositifs médicaux implantés dans le corps humain (clips, implants vasculaires ou orthopédiques).

Les auteurs mentionnent que le troisième mécanisme d'interaction possible entre le champ magnétique statique et le corps s'exerce au niveau atomique, en perturbant des réactions chimiques (modification de la chimie du spin des électrons). En deçà d'une intensité de champ magnétique de 7 T, les auteurs de la revue font remarquer que ce mécanisme d'interaction n'a pas d'effet significatif sur la santé. Et même au-delà, les recherches sont encore trop peu nombreuses pour tirer des conclusions définitives sur des effets possibles qui découleraient de cette interaction.

Concernant les effets sur la santé des champs magnétiques statiques, les auteurs rappellent qu'il n'existe que quelques études épidémiologiques disponibles, la majorité d'entre elles ayant porté sur les risques de cancer. Comme dans les autres revues consultées, les auteurs soulignent que les résultats de ces études n'ont pas mis en avant de risque accru concernant le développement de cancers, tout en rappelant à la fois la faiblesse de la taille des échantillons (petit nombre de cas) et l'évaluation imprécise de l'exposition, ce qui limite la puissance statistique et diminue le niveau de confiance dans les associations calculées. Comme d'autres auteurs, ils ajoutent que les études réalisées en milieu professionnel ne tiennent pas assez compte des facteurs de confusion, comme peuvent l'être des co-expositions, notamment à certains cancérigènes connus comme les rayonnements ionisants ou les produits chimiques. Les personnels qui travaillent dans l'environnement des IRM, et pas nécessairement uniquement lors de leur utilisation, pourraient y être exposés.

Les auteurs de la revue font le point sur les symptômes subjectifs, comme les vertiges et les nausées, qui peuvent être perçus lorsqu'on se déplace dans l'environnement des IRM, typiquement dans un champ magnétique intense, supérieur à 2 T. Ils rappellent que ce phénomène a été discuté dans un avis du Comité scientifique européen sur les risques sanitaires émergents et nouvellement identifiés (Scenihr, 2015), qui avait notamment analysé les études observationnelles publiées avant 2015. Ils mentionnent également la revue systématique et la méta-analyse réalisées par Heinrich et ses collaborateurs, déjà citée plus haut (Heinrich *et al.*, 2011). Ils rappellent que seule l'observation d'effets visuels, statistiquement significative, était homogène dans les études analysées, au contraire des modifications des constantes physiologiques. Des articles plus récents ont également mentionné des résultats similaires sur les symptômes comme les étourdissements, les vertiges et les nausées. La prévalence de ces symptômes serait plutôt associée à une plus longue durée de travail dans les services d'IRM qu'à l'intensité du champ (De Vocht *et al.*, 2015). À noter toutefois qu'une augmentation des vertiges avec l'augmentation de l'intensité du champ statique a été observée chez les personnes travaillant autour des scanners par d'autres auteurs.

### 3.2.6 Synthèse des connaissances sur les effets des champs magnétiques statiques sur la santé humaine

Le cas de l'exposition au champ magnétique statique est tout à fait singulier. En effet, c'est la seule et unique situation pour laquelle toute personne sur Terre est exposée, continuellement, tout au long de sa vie, quel que soit son lieu de vie, à un niveau de champ magnétique statique quasiment constant.

Si le nombre d'études sur le fonctionnement des cellules et les effets sur les organismes (animaux et humains) a augmenté ces dernières années, les recherches dans ce domaine restent limitées. Plusieurs revues réalisées par des chercheurs, et des rapports sur les effets des champs magnétiques

statiques sur l'être humain ont toutefois été publiés par divers organismes et institutions, depuis plus de vingt ans.

Ainsi, le Centre international de recherche sur le cancer a indiqué, en 2002, que « les champs électriques et magnétiques statiques ne peuvent être classés quant à leur cancérogénicité pour l'humain (groupe 3) », en l'absence de preuves suffisantes.

Depuis, plusieurs études ont pu mettre en évidence des effets sur le fonctionnement cellulaire dans des expériences *in vitro*, par exemple, ou sur le comportement animal en laboratoire, mais uniquement à des niveaux d'exposition élevés, sans commune mesure avec les intensités des champs émis notamment par les lignes de transport d'électricité ou autres sources similaires.

Toutes les revues et rapports identifiés indiquent qu'aucun effet néfaste pour la santé humaine consécutif à l'exposition à des champs magnétiques statiques n'a pu être observé, à court et long terme, y compris à des intensités de champs élevées. Les effets ressentis par certains professionnels ou patients dans l'environnement des scanners IRM (vertiges, nausées) disparaissent rapidement, ils sont liés à des niveaux très élevés, plus de 100 000 fois plus forts que le champ magnétique terrestre. Les rapports d'expertise et revues soulignent toutefois le faible nombre d'études disponibles, ce qui ne permet pas de conclure formellement quant aux effets biologiques et sanitaires de l'exposition à des champs magnétiques statiques de faible intensité.

### 3.3 Effets sur l'environnement

#### 3.3.1 Magnétoperception

Le terme « magnétoperception », dans le monde vivant, fait référence à la perception d'un champ magnétique statique et, en règle générale, du champ magnétique terrestre. Plusieurs auteurs se sont intéressés à la perception du champ magnétique terrestre par les êtres vivants, notamment pour expliquer les capacités d'orientation de nombreuses espèces animales, comme les oiseaux par exemple. Les oiseaux migrateurs, les truites, les abeilles, mais aussi les drosophiles, ou encore certains microorganismes, notamment, perçoivent le champ magnétique terrestre (Wiltschko et Wiltschko, 2005). La magnétoperception est par ailleurs suspectée, mais non prouvée à l'heure actuelle, chez certaines espèces migratrices comme les cétacés. Cela pourrait aussi concerner des mammifères non-migrateurs, tels que les rats-taupes par exemple (Němec *et al.* 2001). La compréhension des mécanismes de perception du champ géomagnétique fait également l'objet de recherches : certaines espèces seraient plutôt sensibles à la direction du champ magnétique, d'autres à son intensité ou à sa polarité. Deux mécanismes biologiques sont invoqués pour expliquer ces capacités de détection : l'un lié à la présence de magnétite (cristaux d'oxyde de fer) dans des cellules des organismes, l'autre lié à des protéines appelées cryptochromes.

L'observation de bactéries ayant la capacité de s'orienter dans le milieu marin, dans les sédiments et la colonne d'eau, par Blakemore (Blakemore, 1975), a été le point de départ de recherches sur le sujet. Ces bactéries, appelées magnétotactiques, possèdent des structures cellulaires, les magnétosomes, qui contiennent des cristaux de minéraux de fer. Ces magnétosomes pourraient s'orienter, à la manière des aimants, avec le champ géomagnétique. Ces structures seraient spécifiques à ces microorganismes, elles n'ont pas été retrouvées chez les vertébrés. En revanche, la magnétite a été retrouvée dans de nombreux organismes, jusqu'à l'être humain. Chez certains oiseaux migrateurs, des cristaux de magnétite ont été retrouvés dans une partie du bec et de l'oreille interne, dans un organe

spécifique aux oiseaux et aux poissons. Cependant, La compréhension fine des mécanismes qui conduisent, à partir de la présence de ces cristaux dans les organismes, à une capacité d'orientation, fait encore l'objet de recherches.

L'autre système de magnétoperception décrit à la fois chez de nombreuses espèces animales et végétales utilise des protéines photoactivables appelées cryptochromes. Ces protéines, des récepteurs sensibles à la lumière bleue, participent à des réactions chimiques impliquant l'énergie lumineuse, dont l'efficacité dépendrait du champ magnétique (Ahmad *et al.* 2007 ; Gegear *et al.* 2010 ; Maeda *et al.* 2012). Chez l'oiseau, des zones plus ou moins sombres suivant l'orientation de l'animal dans le champ géomagnétique apparaîtraient ainsi dans son champ de vision, lui permettant ainsi de s'orienter.

Le rapport commandé par le bureau américain de la gestion des énergies marines (Normandeau *et al.*, 2011), présenté au paragraphe 2.3.2, propose une revue des espèces marines sensibles aux champs électriques et magnétiques, en s'intéressant principalement à la faune présente dans les eaux proches des côtes des États-Unis. Les auteurs soulignent qu'il existe des preuves robustes de cette sensibilité pour les poissons élastranchés (requins et raies). Des preuves existent aussi pour les mammifères marins, les tortues de mer, d'autres poissons et des invertébrés.

Les auteurs confirment qu'un grand nombre d'invertébrés et de vertébrés perçoivent, répondent ou s'orientent grâce au champ magnétique (*cf.* Wiltschko et Wiltschko, 1995). Ils citent les études qui se sont spécifiquement intéressées à la capacité de détection des champs magnétiques chez les mollusques (Lohmann et Willows, 1987), les crustacés (Boles et Lohmann, 2003 ; Ugolini, 2006), les poissons élastranchés (Kalmijn, 1982 ; Hodson, 2000 ; Meyer *et al.*, 2005), les poissons osseux (Walker, 1984 ; Quinn, 1980 ; Walker *et al.*, 1997 ; Nishi *et al.*, 2004 ; Nishi et Kawamura, 2006) et les tortues de mer (Lohmann, 1991). Ils soulignent que la détection du champ magnétique pourrait être utilisée au-delà des phénomènes de migration, pour déterminer les lieux d'alimentation, de reproduction, de refuge et différentes fonctions liées au cycle de vie des animaux.

Les auteurs citent les études comportementales de Lohmann et ses collaborateurs sur les tortues, qui ont démontré leur aptitude à utiliser des repères magnétiques, à la fois comme « boussole » et comme « carte » pour se repérer dans leur milieu de vie, mais aussi dans les longues migrations (Lohmann 1991 ; Lohmann *et al.* 2001 ; Lohmann *et al.* 2004). Les auteurs soulignent que le rôle fonctionnel des informations fournies par le champ magnétique, bien décrit chez la tortue, a été démontré pour la langouste (Boles et Lohmann, 2003). Cela pourrait, selon eux, s'appliquer à d'autres organismes marins, notamment chez les poissons, mais cela nécessite d'être testé.

### 3.3.2 Rapports institutionnels : 1997 - 2019

#### Département américain de l'énergie - 1997

Le rapport publié en 1997 par le laboratoire national d'Oak Ridge (Lockheed Martin Energy Research Corporation), pour le compte du Département américain de l'énergie (*cf.* 3.2.2), propose une revue des effets sur l'environnement des lignes de transport d'électricité à haute tension en courant continu (Bailey, 1997). Un chapitre est consacré aux effets sur la faune sauvage et les plantes. Les auteurs remarquaient déjà que peu d'études avaient été réalisées dans le cadre des communautés d'organismes, et plutôt sur des individus, en laboratoire. Ils soulignaient que, pourtant, l'impact sur une espèce peut avoir des conséquences globales sur les écosystèmes, par les mécanismes d'effets en cascade impliquant plusieurs espèces. Les études investiguant l'action des champs magnétiques statiques sur des plantes n'ont pas mis en évidence d'effets génétiques délétères (McCann *et al.*,

1993). Celles étudiant la croissance et l'activité enzymatique ont mis en avant des résultats hétérogènes (Simon, 1989).

En conclusion, les auteurs indiquaient qu'aucune des études mises en œuvre pour examiner les effets potentiellement néfastes de l'exposition des plantes et de la vie sauvage aux champs émis par les lignes haute tension à courant continu n'avait révélé d'effets néfastes.

#### Département américain de l'intérieur - 2011

Le rapport du Département américain de l'intérieur publié en 2011, introduit dans des sections précédentes (cf. 2.3.2 et 3.3.1), fournit une revue détaillée des données disponibles concernant les effets sur les espèces marines des champs électromagnétiques d'origine anthropique (Normandeau *et al.*, 2011). Ce rapport est cependant principalement orienté vers les espèces spécifiques présentes autour des côtes des États-Unis, mais c'est un des plus complets sur le sujet, et relativement récent.

Les auteurs du rapport soulignent que les impacts potentiels des champs électromagnétiques artificiels sur les espèces marines ne sont pas encore bien compris (Gill *et al.*, 2005). Parmi les effets potentiels qui pourraient être liés à la présence d'une anomalie locale du champ géomagnétique, générée par la présence d'un câble au fond de la mer, les auteurs citent, pour les espèces locales, qui vivent au fond de la mer, une possible désorientation pour celles utilisant le champ géomagnétique dans leur recherche de nourriture. Les espèces utilisant ce champ dans la détection des prédateurs ou de leurs congénères pourraient voir également leur comportement affecté. Enfin, les câbles pourraient constituer des anomalies sur le parcours d'espèces migratrices. Les auteurs précisent toutefois qu'il ne s'agit là que de spéculations, et qu'il serait nécessaire d'évaluer si ces impacts potentiels sont réels et quelle serait leur importance écologique, pour les populations d'espèces et l'environnement concerné.

Le rapport détaille les impacts potentiels spécifiques à chaque groupe d'espèces marines. Les auteurs font par exemple remarquer que le niveau de sensibilité des requins et des raies au champ électrique est très bas et que, bien qu'aucune donnée comportementale directe n'existe, il est probable que ces espèces détectent, réagissent et puissent montrer des comportements d'évitement à des champs électriques relativement élevés (Cliff et Dudley, 1992 ; Yano *et al.*, 2000). Si les câbles sous-marins de transport du courant ne produisent par eux-mêmes aucun courant électrique direct dans l'eau de mer, le champ magnétique statique émis peut induire des champs électriques dans la colonne d'eau et chez les poissons, par le mouvement de l'eau dû aux courants marins ou à celui des poissons. Ainsi, les auteurs indiquent par exemple qu'un requin actif nageant en eau calme pourrait détecter le champ électrique induit en s'approchant du câble. Cependant, ils ajoutent que cette perception dépendrait de nombreux facteurs tels que l'orientation du câble par rapport au champ géomagnétique, ses caractéristiques, la direction de nage de l'animal, les mouvements locaux des marées, etc. Des observations de terrain sur des raies ont par ailleurs mis en évidence qu'elles modifient leur trajectoire lorsqu'elles rencontrent un champ continu non uniforme, signifiant là aussi peut-être leur capacité à détecter des champs électriques induits par les courants marins dans le champ magnétique terrestre (Kalmijn, 1988). Les auteurs du rapport soulignent par exemple l'impossibilité à fournir une estimation des effets éventuels des câbles sur les populations de requins gris au voisinage des côtes américaines qui restait, selon eux, spéculative.

Le rapport propose également une revue des données existantes pour les autres poissons, et souligne que les impacts dépendent notamment des seuils de sensibilité des différentes espèces. Les auteurs précisent qu'au-delà de la détection du champ magnétique par certaines espèces, qui semble maintenant bien établie, son importance dans l'orientation ou la navigation n'est pas bien comprise

(Walker *et al.*, 2007). Certains auteurs ont émis l'hypothèse que les poissons qui utilisent le champ géomagnétique pour leurs déplacements pourraient modifier leur comportement au voisinage d'un câble (Gill et Kimber, 2005). L'impact de l'anomalie de champ magnétique créée par les câbles pourrait être à la fois « locale », pour les espèces vivant à proximité, ou concerner par exemple celles migrant sur de longues distances. Les données disponibles à ce sujet sont cependant limitées, soulignent les auteurs. Différents auteurs font mention de capacités d'orientation chez différentes espèces magnétosensibles, qui pourraient être utilisées dans le cadre de leurs migrations : le grondeur blanc (*Haemulon plumieri*), la plie européenne (*Pleuronectes platessa*) ou encore le sébaste à bande noire (*Sebastes inermis*) (Quinn et Ogden, 1984 ; Metcalfe *et al.*, 1993 ; Nishi et Kawamura, 2006).

En ce qui concerne les espèces électrosensibles, elles pourraient être également affectées par la présence de câbles, en raison des champs électriques induits. Cela pourrait voir des répercussions sur la détection des proies ou l'interaction sociale et la reproduction. Une étude sur des anguilles européennes (*Anguilla anguilla*) (Öhman *et al.* ; 2007) a ainsi suggéré la détection d'un câble sous-marin, sans toutefois que cela constitue un obstacle à leur migration. Là encore, il n'est pas possible, selon les auteurs, d'en déduire des conclusions sur l'impact réel sur les populations de poissons.

Concernant les mammifères marins, les auteurs du rapport indiquent que l'ensemble de la littérature actuelle suggère que les cétacés peuvent détecter le champ géomagnétique et l'utiliser pour se diriger pendant les migrations (Klinowska, 1985 ; Kirschvink, 1990 ; Walker, 1992 ; Hui, 1994). Les mécanismes qui sous-tendent cette capacité d'orientation ne sont pour autant pas encore compris, et l'impact potentiel d'un câble sous-marin est inconnu.

Les tortues marines peuvent percevoir les champs magnétiques (*cf.* 3.3.1), elles utilisent celui de la Terre pour la navigation sur de longues distances, la migration et l'orientation. De nombreuses études ont mis en évidence leur magnétosensibilité et des réponses comportementales à des niveaux d'intensités de 0,0047 à 4 000  $\mu\text{T}$  pour les tortues caouannes et de 29,3 à 200  $\mu\text{T}$  pour les tortues vertes. Si des expériences ont montré que des modifications de l'intensité du champ magnétique et de son angle d'inclinaison peut affecter le comportement de nage des tortues, les mécanismes sous-jacents ne sont pas connus. Par ailleurs, il n'existe aucune donnée sur les impacts éventuels des champs magnétiques émis par des câbles sous-marins sur les tortues de mer. Plusieurs hypothèses de perturbations des comportements, par exemple pour les jeunes tortues (migration vers le large, recherche de nourriture, etc.) qui vivraient à proximité de câbles peuvent être formulées, mais les auteurs du rapport indiquent que les conséquences seraient vraisemblablement mineures (Lohmann *et al.*, 2008).

Concernant les invertébrés, les auteurs s'appuient notamment sur des preuves disponibles chez la langouste des caraïbes (*Panulirus argus*), qui indique une sensibilité au champ magnétique de l'ordre des niveaux émis par certains câbles sous-marins. Des hypothèses d'effets sur l'orientation, la migration, la lutte contre les prédateurs sont formulées par les auteurs, tout en soulignant que les preuves permettant de caractériser la nature de ces effets font défaut, et qu'ils seraient de toute façon très dépendants des caractéristiques locales des milieux considérés (caractéristiques et orientation des câbles, nature du fond, etc.).

Les conclusions globales du rapport sur les impacts des champs électromagnétiques des câbles sous-marins sur les espèces marines sont traduites ci-dessous :

- *Les espèces électrosensibles sont susceptibles de pouvoir détecter les champs électromagnétiques provenant de câbles à courant continu et à courant alternatif, avec une sensibilité élevée aux câbles à courant continu. Ces taxons comprennent :*

- *les élasmobranches ;*
- *certains poissons téléostéens ;*
- *certains crustacés décapodes.*
- *Les espèces magnétosensibles sont plus susceptibles de détecter les champs électromagnétiques des câbles à courant continu que ceux des câbles à courant alternatif. Ces taxons comprennent :*
  - *les tortues de mer ;*
  - *certains mammifères marins ;*
  - *certains crustacés décapodes.*
- *L'électrosensibilité est bien documentée chez les élasmobranches, de sorte que les connaissances sur les effets de l'exposition aux champs électromagnétiques sur une espèce peuvent être appliquées avec prudence à une autre espèce ayant une physiologie et des comportements similaires (par exemple, position préférée dans la colonne d'eau, proies, préférences d'habitat).*
- *Les réponses comportementales aux champs électriques ou magnétiques sont connues pour certaines espèces, mais l'extrapolation aux impacts résultant de l'exposition aux câbles électriques sous-marins est spéculative.*
- *Les espèces démersales<sup>36</sup> (certains élasmobranches, d'autres espèces de poissons ou des crustacés décapodes) sont plus susceptibles d'être exposées à des champs de forte intensité que les espèces pélagiques.*
- *Bien que les informations biologiques disponibles ne permettent qu'une évaluation préliminaire des impacts, des modélisations indiquent que les champs électromagnétiques émis par les câbles électriques sous-marins sont limités dans l'espace (à la fois verticalement et horizontalement). Cette limitation spatiale doit être prise en compte dans toute évaluation d'impact car elle réduit le risque qu'un organisme donné soit exposé.*

#### Hydro-Québec - 2013

Les données sur les impacts sur l'environnement des champs magnétiques statiques sont peu nombreuses. En milieu terrestre, un rapport réalisé par Hydro-Québec<sup>37</sup>, au Canada, rappelle les conclusions d'une étude cofinancée par Hydro-Québec et une entreprise d'électricité rattachée au Département américain de l'énergie, sur l'impact des lignes à haute tension en courant continu sur les bovins. Deux publications sont issues de cette étude (Raleigh, 1988 ; Angell *et al.*, 1990) qui n'a pas mis en évidence d'effets sur la santé, la fertilité, la production ou le comportement du bétail destiné à la boucherie. Une revue de la littérature (Gamroth, 1990) réalisée par l'université de l'Oregon, également citée par ce rapport, n'a pas observé d'effets sur la production de lait, la santé et la reproduction de vaches laitières à proximité d'une ligne à 500 kV en courant continu.

#### Centre de recherche conjoint de l'Union européenne - 2015

Dans son rapport publié en 2015 (Ardelean, 2015), le Centre de recherche conjoint (JRC) de l'Union européenne indique que les premières études réalisées pour évaluer l'influence des champs électromagnétiques sur les espèces marines ne mettent pas en évidence de preuve tangible de

<sup>36</sup> Selon l'Ifremer, « les espèces démersales vivent au-dessus du fond. Ces espèces sont très mobiles mais très dépendantes du fond d'où elles tirent leur nourriture. Parmi elles on trouve la dorade, le merlu, le merlan, la morue... ».

<sup>37</sup> Hydro-Québec est une société dont l'actionnaire unique est le gouvernement du Québec. Elle produit, transporte et distribue l'électricité au Québec.

perturbation dans leurs routes de migrations ou dans leur comportement, tout en soulignant la nécessité d'engager d'autres travaux de recherche à plus long terme, et couvrant un plus grand nombre d'espèces et d'environnements (Meißner et Sordyl, 2006 ; Normandeau *et al.*, 2011).

#### Départements américains de l'énergie et de l'intérieur - 2016

Les départements américains de l'énergie et de l'intérieur, ainsi que le bureau de la gestion de l'énergie des océans ont commandé une étude à l'institut de recherche sur l'électricité (EPRI<sup>38</sup>) et à l'université de Californie, Davis, afin d'évaluer les impacts des câbles de transport d'électricité à haute tension en courant continu sur le milieu aquatique, en particulier les espèces migratoires, dans la baie de San Francisco (Kavet *et al.*, 2016b). Les auteurs concluent que les « anomalies » créées par les ponts qui sont situés en travers des routes migratoires des jeunes saumons et des esturgeons verts adultes ne semblent pas générer de problèmes pour leurs déplacements, dans un sens ou dans l'autre. Les saumons juvéniles pourraient être attirés par les câbles situés au fond de la baie, comme de premières investigations théoriques l'avaient suggéré, mais aucun impact n'a été observé pendant la migration, alors que les câbles étaient en fonctionnement. Les câbles semblent toutefois avoir des impacts différents sur les esturgeons verts, en fonction des sens de migration, notamment sur le temps de trajet qui est allongé pour sortir de la baie, et diminué dans le sens inverse. Mais globalement, les auteurs indiquent que cela n'a pas impacté la migration de l'espèce dans son ensemble. On notera par ailleurs que ces données ont été obtenues pour plusieurs années d'enregistrement des migrations, entre 2007 et 2009 en l'absence de transfert d'énergie dans le câble, et une seule année pendant lequel le câble était actif (2011).

#### Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer - 2019

Une synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins sur les espèces marines a été réalisée par l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), à la demande et avec le financement du gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE). Cette synthèse bibliographique (Carlier, 2019), qui actualise un précédent état de l'art réalisé également par l'Ifremer en 2011 sur la même problématique, à la demande de RTE, traite de l'impact potentiel des câbles électriques sous-marins sur différentes composantes des écosystèmes marins côtiers.

Les différentes perturbations que peuvent engendrer un câble sous-marin sont abordées, à la fois pendant les phases de travaux (pose, maintenance) et pendant celle d'exploitation. Ce rapport s'intéresse notamment aux impacts sur la biodiversité et les fonctionnalités des compartiments benthiques et halieutiques<sup>39</sup>.

Le rapport de l'Ifremer distingue là aussi, pour le compartiment benthique, d'une part les données fournies par des expérimentations réalisées en milieu contrôlé, en laboratoire, qui permettent d'étudier des comportements particuliers et des mécanismes biologiques en maîtrisant les conditions expérimentales, et d'autre part les études de terrain, plus propices à fournir des éléments sur les impacts réels sur les populations d'organismes. S'agissant des études en milieu contrôlé, les auteurs soulignent l'absence d'effet de l'exposition à des champs magnétiques statiques, même élevés (3,7 mT), sur des invertébrés marins comme la crevette grise, le crabe ou la moule. D'autres études, réalisées à des niveaux d'exposition variables et sur différentes espèces, ne mettent pas en évidence

<sup>38</sup> EPRI : Electric power research institute.

<sup>39</sup> Les organismes benthiques (animaux ou végétaux) vivent fixés au sol ou se déplacent en rasant le fond des mers et des océans. Le terme halieutique désigne ce qui se rapporte à la pêche.

de résultats cohérents, même si certaines montrent une détection possible des champs ou des effets biologiques, dont les conséquences potentielles sur les organismes restent difficiles à interpréter.

Concernant les études de terrain, les auteurs soulignent qu'ils n'ont pas identifié de littérature scientifique consacrée aux effets sur la biodiversité benthique, les seules données disponibles étant focalisées sur les ressources présentant un intérêt commercial.

L'impact des champs magnétiques sur les ressources halieutiques est ensuite examiné par les auteurs, par l'analyse des expériences en milieu contrôlé d'une part et sur le terrain d'autre part. Les études conduites aux stades du développement embryonnaire ou larvaire donnent des résultats hétérogènes en fonction des espèces de poissons, en tenant compte notamment de celles qui sont électrosensibles. Il faut souligner que ces études sont la plupart du temps réalisées à des niveaux d'exposition assez élevés, correspondant aux intensités maximales pouvant être générées par des câbles sous-marins. Des effets sont en revanche retrouvés chez la truite ou le saumon au stade juvénile, qui pourraient avoir un impact sur leur vie en milieu naturel. Des effets également retrouvés en laboratoire chez le saumon rouge, le tourteau ou encore la roussette plaident, selon les auteurs, à plus de recherches pour comprendre qu'elles pourraient en être les implications sur le terrain.

Précisément, les auteurs analysent ensuite les études menées sur le terrain, et notamment celle déjà citée plus haut sur des anguilles en mer Baltique (Westerberg et Lagenfelt, 2008), dont les auteurs ont estimé que la perturbation de la nage liée à la présence d'un câble ne constituait pas d'obstacle au déplacement de l'espèce. Deux études américaines, plus récentes, sont également citées, dont les résultats non totalement convergents, selon les auteurs, n'indiquent pas d'impact néfaste pour le comportement ou la survie des deux espèces étudiées, le crabe et le homard américain (Love *et al.*, 2017; Hutchison *et al.*, 2018).

En conclusion de cette revue des impacts sur les organismes marins liés aux champs électromagnétiques émis par les câbles sous-marins, les auteurs du rapport soulignent que, si nombre d'études ont identifié des effets sur différentes espèces en laboratoire, extrapoler ces résultats à la population de ces organismes en milieu naturel reste extrêmement compliqué. Il est en effet nécessaire de considérer un grand nombre de paramètres liés par exemple au développement des animaux, mais aussi à la diversité des milieux naturels eux-mêmes. De façon générale, l'impact des champs magnétiques semble, en laboratoire, être limité au développement au stade embryonnaire, pour des valeurs d'exposition relativement élevées. En milieu naturel, les quelques études disponibles n'indiquent pas que les câbles puissent constituer un obstacle aux déplacements des espèces considérées, hormis peut-être pour certains saumons (croissance et capacité à retrouver leur rivière d'origine).

### 3.3.3 Articles de revue

#### Maffei *et al.* - 2014

Une revue pour le moins originale de Maffei et ses collègues s'est penchée sur les effets du champ magnétique sur la croissance, le développement et l'évolution des plantes (Maffei *et al.*, 2004). Les réflexions des auteurs sont liées notamment aux évolutions du champ magnétique terrestre sur une très longue échelle de temps (inversions des pôles magnétiques terrestres), mais aussi dans la perspective hypothétique de longs voyages spatiaux qui impliqueraient, pour les candidats au voyage, un environnement privé du champ magnétique terrestre. Les auteurs font le point sur les connaissances en matière de perception du champ magnétique par les organismes vivants, aussi bien les plantes que les animaux, concluant à un effet du champ magnétique terrestre, globalement, sur le vivant.

À noter qu'une revue récente (Radhakrishnan, 2019) fournit globalement les mêmes conclusions. Parmi toutes les études considérées dans ce travail, moins de 10 ont été publiées depuis 2014, dont deux rédigées par l'auteur lui-même.

#### Otremba et al. - 2019

La revue de littérature préparée par Otremba et ses collègues sur les effets potentiels du transport d'énergie électrique (cf. 2.3.2) est focalisée sur le cas des aires marines polonaises, dans la partie sud de la mer Baltique (Otremba et al., 2019). Les auteurs rassemblent, comme dans les autres revues disponibles sur le sujet, les différents articles qui mettent en évidence les capacités des différents organismes marins à percevoir aussi bien les champs électriques que les champs magnétiques, publiés depuis 1978. Ils citent certains poissons, les élasmobranches, les tortues de mer et les cétacés comme ayant la capacité de percevoir le champ magnétique terrestre, grâce à la présence de magnétite dans leur corps, et de s'en servir à des fins d'orientation, soit comme une boussole, soit comme une « carte ». Cette capacité de magnétoperception serait effective par exemple à la fois chez les espèces de saumons qui migrent, pour lesquels elle serait utile, mais aussi chez les autres. L'impact des champs magnétiques artificiels sur les migrations n'est en revanche, selon les auteurs, pas démontrée, comme en témoignent des études contradictoires chez les espèces d'anguilles japonaises d'une part et européenne et américaine d'autre part.

La revue cite plusieurs revues ayant montré des effets sur le développement des poissons et la physiologie des premiers stades de vie, dont certaines récentes (2015 et 2019). Ils font remarquer par ailleurs que de façon surprenante, alors qu'en raison de la disposition des câbles au fond de la mer les espèces benthiques et démersales pourraient être les plus concernées, les publications sur ces espèces sont assez rares. Les résultats de ces études semblent hétérogènes.

La sensibilité à l'électricité de certaines espèces est également revue, à travers les travaux de Gill notamment (Gill et al., 2005). L'impact des câbles de transport d'énergie électrique est ici, selon les auteurs, limité notamment aux systèmes de transfert d'énergie utilisant des électrodes, qui pourraient ainsi représenter un problème local, dans un rayon très proche de ces installations.

Les auteurs précisent que la plupart des études qu'ils ont analysées ont été réalisées avec des niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques ne représentant pas ceux que l'on pourrait observer dans l'environnement réel des câbles immergés. Ils indiquent cependant que les impacts négatifs des champs magnétiques sur la faune marine sont évalués par plusieurs auteurs comme faibles (Bergstrom et al., 2014 ; Taormina et al., 2018). Les auteurs ajoutent enfin que les liaisons en courant continu bipolaires, au contraire des monopolaires, permettent, en plaçant les câbles de polarités inverses à proximité, de limiter le niveau du champ magnétique statique global.

En conclusion, pour les auteurs, la question des effets réels liés à la modification du champ magnétique terrestre ou à l'introduction de champs électriques et magnétiques artificiels dans l'environnement sur les espèces marines n'a pas de réponse claire aujourd'hui, et l'impact sur l'environnement des câbles de transfert d'énergie électrique reste donc spéculatif.

#### Sarraf et al. - 2020

La revue de Sarraf et ses collègues s'est intéressée aux utilisations des champs magnétiques statiques pour favoriser la germination des graines, dans un objectif d'amélioration des rendements agricoles. Ils ont ainsi recensé les publications ayant décrit des méthodes favorisant la germination par l'intermédiaire de l'exposition à des champs magnétiques statiques d'intensité modérée. Les études citées utilisent toutes des niveaux d'intensité au minimum de plusieurs mT : la plus faible à 4 mT, les

autres entre plusieurs dizaines et centaines de mT. Certaines études auraient montré des impacts positifs sur la germination, les racines des plantes et leur longueur, l'absorption d'eau et de dioxyde de carbone, et au final les rendements des cultures, tandis que d'autres contestent ces résultats, laissant entendre au contraire que l'exposition aux champs réduit la croissance des plantes. Les mécanismes invoqués pour expliquer des effets sont encore mal décrits, ils pourraient impliquer les cryptochromes présents dans de nombreux organismes, dont les plantes.

#### Albert et al. - 2020

Une publication issue d'un travail de thèse de L. Albert (Albert *et al.*, 2020) présente une synthèse des connaissances sur les effets des champs électriques et magnétiques émis par les câbles électriques sous-marins sur les invertébrés. Les auteurs rappellent que l'intensité des champs magnétiques et électriques diminue avec la distance au câble, et que, par conséquent, les compartiments benthiques et sédimentaires sont exposés aux valeurs de champ les plus élevées.

Les auteurs de cette synthèse soulignent que la littérature scientifique sur les champs magnétiques artificiels et les réactions des invertébrés marins s'est nettement améliorée, au cours de la dernière décennie, même si de nombreuses incertitudes subsistent. Ils citent par exemple une étude réalisée sur 7 espèces différentes de crustacés et mollusques, qui avait conclu à un impact mineur sur la survie des animaux adultes (Bochert et Zettler, 2006). En revanche, ils indiquent que 75 % des études qu'ils ont analysées montrent des effets à court terme sur les réponses physiologiques et comportementales. Cette synthèse distingue les effets physiologiques des effets comportementaux. Pour les effets physiologiques, les effets semblent contradictoires, avec des études qui n'observent pas d'effet des champs électromagnétiques, par exemple sur des réponses au stress, et d'autres qui suggéreraient une altération de sécrétion d'enzymes, en relation avec les rythmes biologiques des invertébrés. Aucun effet à long terme des champs statiques n'a été observé. Au final, les auteurs soulignent que les résultats de ces recherches sont contradictoires.

Concernant les effets sur le comportement, là encore, les résultats des recherches sont hétérogènes. Certaines mettent en évidence des changements comportementaux : la moitié des articles indiquant par exemple une attraction vers les champs magnétiques pour trois espèces de crustacés, alors que d'autres signalent une répulsion, ou une modification de l'orientation. Les auteurs indiquent par ailleurs que 30 % des articles qu'ils ont analysés ne mentionnaient aucune modification du comportement. Les auteurs font remarquer que la grande majorité des travaux de recherches ont été réalisés sur des animaux individuels, et qu'il faudrait, afin d'évaluer les conséquences sur le terrain, estimer les impacts éventuels des champs électromagnétiques sur des populations, ce qui n'a pas été fait.

Concernant les impacts réels des champs magnétiques émis par les câbles sous-marins sur les écosystèmes, les auteurs se réfèrent notamment à Boehlert et Gill (Boehlert et Gill, 2010), pour souligner que l'interprétation des études réalisées en milieu contrôlé, en laboratoire, sur des comportements individuels, pour en déduire des impacts écologiques sur des populations d'organismes doit être réalisée avec précaution. Ils précisent qu'à l'heure actuelle, il n'est pas possible de conclure sur l'impact éventuel que ferait peser les champs magnétiques artificiels sur les populations marines d'invertébrés.

#### Buenau et al. - 2022

Considérant l'intérêt porté à l'utilisation de l'énergie marine (par l'intermédiaire des vagues, des marées et des courants océaniques), une revue récente de Buenau et ses collègues a rassemblé et

décrit les différents modèles existants visant à évaluer les impacts potentiels des systèmes de conversion d'énergie marine sur l'environnement (Buenau *et al.*, 2022). Parmi les interactions potentielles figurent les changements dans les systèmes océanographiques, le bruit sous-marin, les changements d'habitat, le risque de collision, le déplacement d'animaux marins, et les effets des champs électromagnétiques.

Les auteurs de cette revue relèvent que plusieurs recherches indiquent que les champs électromagnétiques provenant des générateurs et des câbles associés aux dispositifs de conversion d'énergie marine peuvent être détectés par certaines espèces marines. Ils ajoutent cependant que les effets de cette perception sur la physiologie et le comportement des espèces sont encore difficiles à interpréter, en raison des incertitudes associées. Ils citent en particulier un article de Hutchison et ses collègues, qui ont modélisé les champs magnétiques émis par des sections transversales de câbles de transport d'électricité en courant continu et ont validé les résultats avec des mesures sur le terrain (Hutchison *et al.*, 2020), relevant également le faible nombre de publications de ce type. La mesure, ou la modélisation, de l'exposition liée à ces câbles peut en effet paraître, en théorie, assez simple, mais les auteurs font remarquer qu'il n'existe que peu de données sur ce sujet, ce qui ne favorise ni la réalisation d'études sur des animaux, ni leur interprétation.

Concernant les effets des champs électromagnétiques sur la faune marine, les auteurs citent notamment les publications de Albert et ses collègues (Albert *et al.*, 2020), et celle de Hutchison *et al.* Ils soulignent que les résultats des études comportementales sont variables et dans l'ensemble peu concluants (Albert *et al.*, 2020), ce qui ne permet pas de construire et valider un modèle d'effet. La diversité des espèces, des habitats et des comportements à considérer rend la tâche difficile lorsqu'on s'intéresse aux impacts sur le comportement, sur le terrain. Les auteurs concluent que, comme pour toute étude comportementale, il peut être difficile de déterminer les causes précises du comportement observé, qui peut dépendre de nombreux facteurs.

### 3.3.4 Synthèse des connaissances sur les effets des champs magnétiques statiques sur l'environnement

Les recherches sur les effets éventuels des champs magnétiques statiques sur l'environnement, en particulier les animaux et végétaux, sont peu nombreuses. Initialement, elles ont principalement été menées afin de mieux comprendre les mécanismes de perception du champ magnétique terrestre qui permet à certaines espèces notamment de s'orienter, par exemple pour les migrations. Si les différents mécanismes sous-jacents ne sont pas encore tous bien compris, la capacité de perception du champ magnétique terrestre, mais aussi du champ électrique, pour certaines espèces, ne fait plus de doute.

Ces dernières années, les études sur l'environnement se sont focalisées sur le milieu marin, c'est en effet au fond de la mer que l'on trouve la plupart des câbles transportant de l'électricité en courant continu, notamment en raison du développement récent des parcs éoliens en haute mer.

Toutes les études et rapports sur le sujet convergent pour indiquer que si ponctuellement, en laboratoire, des effets de l'exposition à des champs magnétiques statiques peuvent être observés chez certaines espèces, à des niveaux d'intensité relativement élevés, il est à l'heure actuelle impossible d'en déduire des impacts potentiels sur les organismes marins dans leur milieu naturel, au voisinage des câbles enfouis. Les niveaux d'exposition, à proximité immédiate, au fond de la mer, peuvent être relativement élevés, mais ils sont extrêmement localisés, et les impacts par exemple sur les migrations de certaines espèces semblent très limités.

## 4 Revue des réglementations limitant les expositions aux champs magnétiques statiques

Dans le domaine des champs électromagnétiques, on trouve principalement deux types de réglementations : celles limitant les émissions des sources de champ, et celles visant à limiter les expositions des personnes aux champs électromagnétiques. Ces deux approches sont bien différentes. Dans le premier cas, c'est la source de champ qui est prise en compte. Elle est donc bien identifiée, et la limitation de ses émissions peut répondre à différents objectifs, comme par exemple éviter de brouiller d'autres émetteurs, veiller à la compatibilité électromagnétique entre appareils électriques et électroniques, ou encore répondre à des besoins de sobriété des émissions, quelles qu'en soient les raisons (politiques, sociétales, etc.). Dans le second cas, lorsqu'il s'agit de limiter les expositions, on s'intéresse cette fois non plus directement aux sources, mais aux personnes ou à l'environnement de façon plus générale (on pourrait imaginer que des appareils rentrent aussi dans cette catégorie), exposés aux champs émis par différentes sources, dont on ne connaît pas nécessairement les caractéristiques. Cette approche est plus complexe, techniquement parlant, en matière de contrôle, puisqu'il faut dans ce cas prendre en compte toutes les émissions qui provoquent une exposition là où on souhaite évaluer le respect de la réglementation. Il existe plusieurs façons de procéder pour établir des valeurs limites d'exposition : de façon arbitraire, ou en fonction de considérations sociétales ou politiques, ou encore en fonction des connaissances scientifiques établissant par exemple un lien entre l'agent (physique, chimique, ...) considéré et des effets éventuels sur la santé.

D'une manière générale, les réglementations limitant l'exposition aux champs électromagnétiques se fondent sur des évaluations scientifiques, même si certaines peuvent inclure ensuite des facteurs de réduction répondant à d'autres critères que la protection seule de la santé. Le premier paragraphe de ce chapitre présente un aperçu des fondements de la construction des valeurs limites, établis par les deux principales organisations dans ce domaine, la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp), et le Comité international sur la sécurité électromagnétique (ICES) de l'institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE). Les différentes réglementations applicables aux champs magnétiques statiques en France et dans d'autres pays sont ensuite présentées.

Les réglementations nationales relatives à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques peuvent diverger assez largement, chaque pays adoptant des mesures plus ou moins contraignantes, donc des valeurs limites différentes, en fonction des bandes de fréquences. De façon très générale, pour établir leur corpus réglementaire, on peut constater que les pays de la Communauté européenne, le Japon et la Chine se fondent plutôt sur les lignes directrices proposées par l'Icnirp, les États-Unis, la Corée du Sud et le Canada sur l'ICES, alors que la Russie s'appuie sur ses propres recherches et limites. Parmi les 27 membres de l'Union européenne, 20 suivent la recommandation 1999/519/CE, et donc les lignes directrices de l'Icnirp (1994 et 1998), alors que 7 imposent des limites plus strictes.

Pour obtenir une vision d'ensemble et détaillée des différentes réglementations concernant les champs électromagnétiques, il est possible de consulter le site de l'organisation mondiale de la santé qui maintient à jour une base de données de ces réglementations, sur déclarations des différents représentants nationaux auprès du projet « champs électromagnétiques de l'OMS<sup>40</sup>.

<sup>40</sup> [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/magnetic-flux-density-\(microt\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/magnetic-flux-density-(microt)).

## 4.1 Fondements et construction des réglementations en matière d'exposition aux champs magnétiques statiques

### 4.1.1 Lignes directrices de l'Icnirp

L'Icnirp distingue, pour les valeurs limites d'exposition aux champs magnétiques statiques qu'elle a proposé, en 1994<sup>41</sup> et en 2009<sup>42</sup>, les expositions professionnelles des expositions de la population générale (Icnirp, 2009).

En 1994, l'Icnirp précisait que les connaissances scientifiques d'alors ne suggérait pas d'effet délétère (sur le développement, le comportement et les paramètres physiologiques) sur les organismes supérieurs, pour des expositions transitoires jusqu'à 2T. L'organisation ajoutait que, d'après l'analyse des mécanismes d'interaction connus, une exposition sur le long terme inférieure à 200 mT ne devrait pas avoir de conséquences sur la santé. Cette limite permettrait de s'assurer que les courants électriques induits dans les vaisseaux sanguins (notamment dans l'aorte), liés au déplacement dans un tel champ magnétique statiques, n'induisent pas d'effet sur la santé. En conséquence, l'Icnirp avait recommandé que l'exposition des travailleurs soit limitée à 200 mT moyenné sur une journée de travail de 8h, avec un plafond à 2 T (5 T pour les membres). Un facteur de sécurité de 5 appliqué à cette valeur, pour la population générale, amenait alors l'Icnirp à recommander une limite d'exposition à 40 mT.

Dans son document publié 15 ans plus tard, en 2009, l'Icnirp indique que pour prévenir des effets sur la santé liés aux interactions avec les champs statiques, il est recommandé de limiter l'exposition à ces champs de sorte que le seuil des interactions entre le corps et les champs externes à partir duquel des effets délétères apparaissent ne soit jamais atteint à l'intérieur du corps. S'agissant des champs électriques statiques, aucune limite n'est recommandée, puisque les champs n'interagissent qu'à la surface du corps. Pour les champs magnétiques statiques, les limites d'exposition visent à éviter l'apparition d'effets tels que les vertiges et les nausées. La Figure 22 reprend les valeurs limites exprimées par l'Icnirp dans sa publication de 2009, elles sont détaillées ci-dessous.

Pour information, l'Icnirp a également émis des lignes directrices afin de limiter l'exposition des personnes amenées à se déplacer dans des champs statiques<sup>43</sup> (Icnirp, 2014). Cela concerne les travailleurs dans des environnements de champs très intenses, comme on peut en trouver par exemple avec les IRM. On notera que dans ce cas, l'Icnirp n'exprime plus les valeurs limites en fonction d'une moyenne temporelle, comme c'était le cas en 1994, mais en dérivée du champ magnétique  $B$  par rapport au temps. Ceci peut expliquer la disparition des valeurs limites à 200 mT pour les professionnels et 40 mT pour le grand public dans le document publié par l'Icnirp en 2009.

#### Expositions professionnelles

Dans ses dernières lignes directrices consacrées aux champ statiques, l'Icnirp recommande que l'exposition de la tête et du tronc dans le cadre professionnel ne dépasse pas une densité de flux magnétique de 2 T, sauf dans les circonstances où des niveaux d'exposition supérieures seraient vraiment nécessaires (Icnirp, 2009). Dans ce cas, l'Icnirp indique que des expositions jusqu'à 8 T sont autorisées si l'environnement est adapté et que toutes les mesures sont prises pour contrôler les effets liés au mouvement dans un tel champ. Il est précisé que les effets sensoriels dus à ces mouvements

---

<sup>41</sup> <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatic.pdf>.

<sup>42</sup> <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPstatgdl.pdf>.

<sup>43</sup> [https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPmvtgdl\\_2014.pdf](https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPmvtgdl_2014.pdf).

peuvent être évités en respectant les restrictions de base proposées dans les lignes directrices concernant les champs électromagnétiques très basses fréquences (*cf.* Icnirp, 2010). Lorsque seule l'exposition des membres est considérée, des expositions jusqu'à 8 T sont acceptables. L'Icnirp justifie ces valeurs en soulignant que les effets de vertiges et de nausée, par exemple, qui peuvent apparaître entre 2 et 8 T, ne sont que transitoires, et peuvent être supportés, lorsque cela est rendu nécessaire par le travail, par des conseils et un entraînement appropriés. L'Icnirp n'introduit par ailleurs aucune considération de moyennage temporel pour ces limites, dans la mesure où elle considère que les effets qui peuvent survenir sont aigus.

#### Expositions de la population générale

En se fondant sur les connaissances scientifiques en matière d'effets directs des champs statiques sur les humains, l'Icnirp propose que les expositions aiguës ne devraient pas excéder 400 mT, quelle que soit la partie du corps considérée. L'Icnirp fait toutefois remarquer que, même si cela ne relève pas de ses missions, il convient de prendre des mesures appropriées pour protéger les personnes qui portent des dispositifs médicaux électroniques implantés, des prothèses ferromagnétiques, ou qui risqueraient d'être blessées par des objets ferromagnétiques, en limitant par exemple le niveau d'exposition au champ statique à des valeurs inférieures à 0,5 mT, en se référant à un document de la Commission électrotechnique internationale publié en 2002 (IEC, 2002). L'Icnirp précise que la limite proposée pour la population générale résulte de l'application d'un facteur de réduction de 5 à la limite pour les expositions professionnelles pour la tête et le tronc, ce facteur s'appliquant à toute la population. Le choix de cette valeur pour le facteur de réduction n'est toutefois pas détaillé par l'Icnirp. On remarquera donc que la valeur initiale proposée par l'Icnirp en 1994 pour limiter l'exposition de la population générale aux champs magnétiques statiques, 40 mT, est passée 15 ans plus tard à 400 mT, en lien avec l'évolution des connaissances scientifiques sur le sujet.

**Table 2. Limits of exposure<sup>a</sup> to static magnetic fields.**

Exposure characteristics	Magnetic flux density
Occupational <sup>b</sup>	
Exposure of head and of trunk	2 T
Exposure of limbs <sup>c</sup>	8 T
General public <sup>d</sup>	
Exposure of any part of the body	400 mT

<sup>a</sup> ICNIRP recommends that these limits should be viewed operationally as spatial peak exposure limits.

<sup>b</sup> For specific work applications, exposure up to 8 T can be justified, if the environment is controlled and appropriate work practices are implemented to control movement-induced effects.

<sup>c</sup> Not enough information is available on which to base exposure limits beyond 8 T.

<sup>d</sup> Because of potential indirect adverse effects, ICNIRP recognizes that practical policies need to be implemented to prevent inadvertent harmful exposure of persons with implanted electronic medical devices and implants containing ferromagnetic material, and dangers from flying objects, which can lead to much lower restriction levels such as 0.5 mT.

*Figure 22 : valeurs limites d'exposition aux champs magnétiques statiques préconisées par l'Icnirp (Icnirp, 2009).*

#### **4.1.2 Normes proposées par l'IEEE**

Le Comité de coordination des normes n°39 de l'IEEE (SCC-39), aussi appelé Comité international sur la sécurité électromagnétique (ICES) de l'IEEE, a pour objectif l'« élaboration de normes pour l'utilisation sûre de l'énergie électromagnétique dans la gamme de 0 Hz à 300 GHz par rapport aux risques potentiels d'exposition des personnes, des matériaux volatils et des dispositifs explosifs à

cette énergie. Ces normes seront fondées sur les effets établis et comprendront des niveaux de sécurité pour l'exposition humaine aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques [...]».

Ce comité a produit plusieurs normes au cours des trente dernières années. Une importante révision de la norme IEEE Std C95.1-1991 avait ainsi été publiée en 2005 (IEEE Std C95.1™-2005). La plus récente est la « norme de l'IEEE pour les niveaux de sécurité concernant l'exposition humaine aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, de 0 Hz à 300 GHz » (IEEE Std C95.1™-2019). Ces documents sont plutôt orientés pour définir les limites des champs électromagnétiques variables en fréquence, mais il est possible d'en déduire que la limite préconisée pour un champ magnétique de 0 Hz, pour le grand public, dans des lieux « non contrôlés » est de 118 mT, pour la tête et le tronc, et 353 mT pour les membres. Pour les personnes autorisées dans des lieux à accès restreint, la limite est de 353 mT, pour la tête, le tronc et les membres.

## 4.2 Réglementation européenne

En 1999, le Conseil de l'Europe a émis une recommandation visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques. La recommandation du Conseil de l'Union européenne 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)<sup>44</sup> définit les restrictions de base et les niveaux de référence qui assurent un « niveau élevé de protection de la santé contre l'exposition aux champs électromagnétiques ». Cette recommandation fait notamment suite à une résolution du Parlement européen sur la lutte contre les nuisances provoquées par les rayonnements non ionisants, prise le 5 mai 1994. Cette résolution invitait la Commission européenne à proposer des mesures normatives afin de limiter l'exposition des travailleurs et du public aux rayonnements électromagnétiques non ionisants.

Une recommandation n'est pas contraignante, mais il est souhaité que les mesures et les politiques nationales en matière de protection de la population contre les risques sanitaires liés aux champs électromagnétiques s'inscrivent dans ce cadre.

Les valeurs limites s'appuient sur les recommandations de l'Inirp (donc, pour le champ magnétique statique, sur les lignes directrices émises en 1994), conformément à l'avis du Comité de pilotage scientifique de la Commission européenne (Scientific Steering Committee, SSC) du 25-26 juin 1998.

La recommandation précise qu'entre 0 et 1 Hz, des « restrictions de base »<sup>45</sup> sont prévues pour l'induction magnétique concernant les champs magnétiques statiques (0 Hz) et la densité de courants pour les champs variables dans le temps jusqu'à 1 Hz, afin de prévenir des effets sur le système cardiovasculaire et le système nerveux central. La restriction de base est de 40 mT pour le champ magnétique statique (appelé dans la recommandation européenne « induction magnétique », cf. 2.1). Cette recommandation s'appuie sur les valeurs limites proposées par l'Inirp en 1994, qui ont depuis évolué, elles ont été multipliées par 10 en 2009.

Il faut noter que la Commission européenne a saisi son Comité scientifique sur la santé, l'environnement et les risques émergents (Scheer), en juin 2021<sup>46</sup>, afin d'indiquer si les nouvelles lignes directrices pour limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques, publiées

<sup>44</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519&from=EN>.

<sup>45</sup> Les restrictions concernant l'exposition à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variables dans le temps qui sont fondées directement sur des effets avérés sur la santé et des considérations biologiques sont qualifiées de « restrictions de base ».

<sup>46</sup> [https://ec.europa.eu/health/system/files/2021-07/scheer\\_q\\_023\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/health/system/files/2021-07/scheer_q_023_0.pdf).

en mars 2020 par l'Icnirp, justifieraient de réviser la recommandation européenne 1999/519/CE, mais cette demande exclut les champs magnétiques statiques, dont les limites en matière d'exposition ne sont ainsi pas remises en cause (alors que l'Icnirp a fait évoluer ses recommandations entre 1994 et 2009).

La recommandation européenne concerne la population générale. Les travailleurs exposés aux champs électromagnétiques bénéficient, eux, depuis 2013, d'une réglementation renforcée en matière d'exposition, par rapport à la population générale, avec la publication de la directive européenne 2013/35/UE du 26 juin 2013<sup>47</sup>.

### 4.3 Réglementation française

Le décret n°2002-775 du 3 mai 2002, contrairement à ce qui peut être parfois indiqué, ne transpose pas en droit national la recommandation européenne 1999/519/CE du 12 juillet 1999, qui n'a pas de valeur contraignante en elle-même, et qui ne peut donc être « transposée »<sup>48</sup>. Le titre de ce décret est pourtant signifiant : « Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. La première phrase de l'article 1 est d'ailleurs claire : « Le présent décret s'applique à toute personne exploitant un réseau de télécommunications tel que défini au 2° de l'article 32 du code des postes et télécommunications. »

Ainsi, si le décret contient effectivement des tableaux, repris de la Recommandation européenne 1999/519/CE, mentionnant des valeurs limites d'exposition du public, notamment dans le domaine des basses fréquences, et en particulier pour le champ magnétique statique (limite à 40 mT), il ne s'applique qu'aux émissions issues des réseaux de télécommunications. Ainsi, l'exposition de la population générale aux champs magnétiques statiques émis par toutes les sources artificielles (*a priori*, les réseaux de télécommunications n'émettent pas de champs statiques !) n'est pas réglementée.

Il en va autrement pour les travailleurs. La Directive 2013/35/UE du Parlement européen et du Conseil concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques) est plus contraignante pour les États membres que la recommandation destinée à la population générale, ceux-ci doivent en effet transposer ce texte dans leur réglementation nationale. C'est ainsi que le décret n° 2016-1074 du 3 août 2016 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux champs électromagnétiques a été publié en France<sup>49</sup>. Pour les champs magnétiques statiques, le décret reprend les valeurs limites fixées par l'Icnirp en 2009, à savoir, pour protéger les travailleurs des effets sensoriels, une limite d'exposition localisée de la tête à 2 T, et 8 T pour les membres. Pour protéger les travailleurs des effets sur la santé, l'exposition de l'ensemble du corps est limitée à 8 T. Il faut noter par ailleurs que la section 9 de l'article 1 du décret est spécifiquement consacrée à l'IRM. Ce décret est entré en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2017.

---

<sup>47</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013L0035>.

<sup>48</sup> <https://www.vie-publique.fr/fiches/20356-comment-les-directives-sont-elles-transposees-en-droit-national>.

<sup>49</sup> <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000032974358>.

#### 4.4 Autres réglementations nationales

L'organisation mondiale de la santé héberge une base de données des réglementations nationales concernant l'exposition aux champs électromagnétiques. La Figure 23 ci-dessous présente les pays déclarant bénéficier ou non d'une réglementation spécifique sur les champs statiques (électriques et/ou magnétiques), si elle s'applique au niveau local, ou encore si elle est en préparation. Les données ne sont pas disponibles pour les pays non colorés. La Figure 24 fournit le même type de représentation, mais pour les réglementations concernant les travailleurs. L'annexe 3 présente en complément le statut législatif (d'application obligatoire, recommandée ou volontaire) de ces limitations de l'exposition au champ statique. Ces données, et celles qui suivent, ont été actualisées pour la dernière fois en mai 2017. À noter que certains pays peuvent disposer de réglementations pour les champs électriques statiques, mais pas pour les champs magnétiques statiques. C'est le cas par exemple de la Russie.

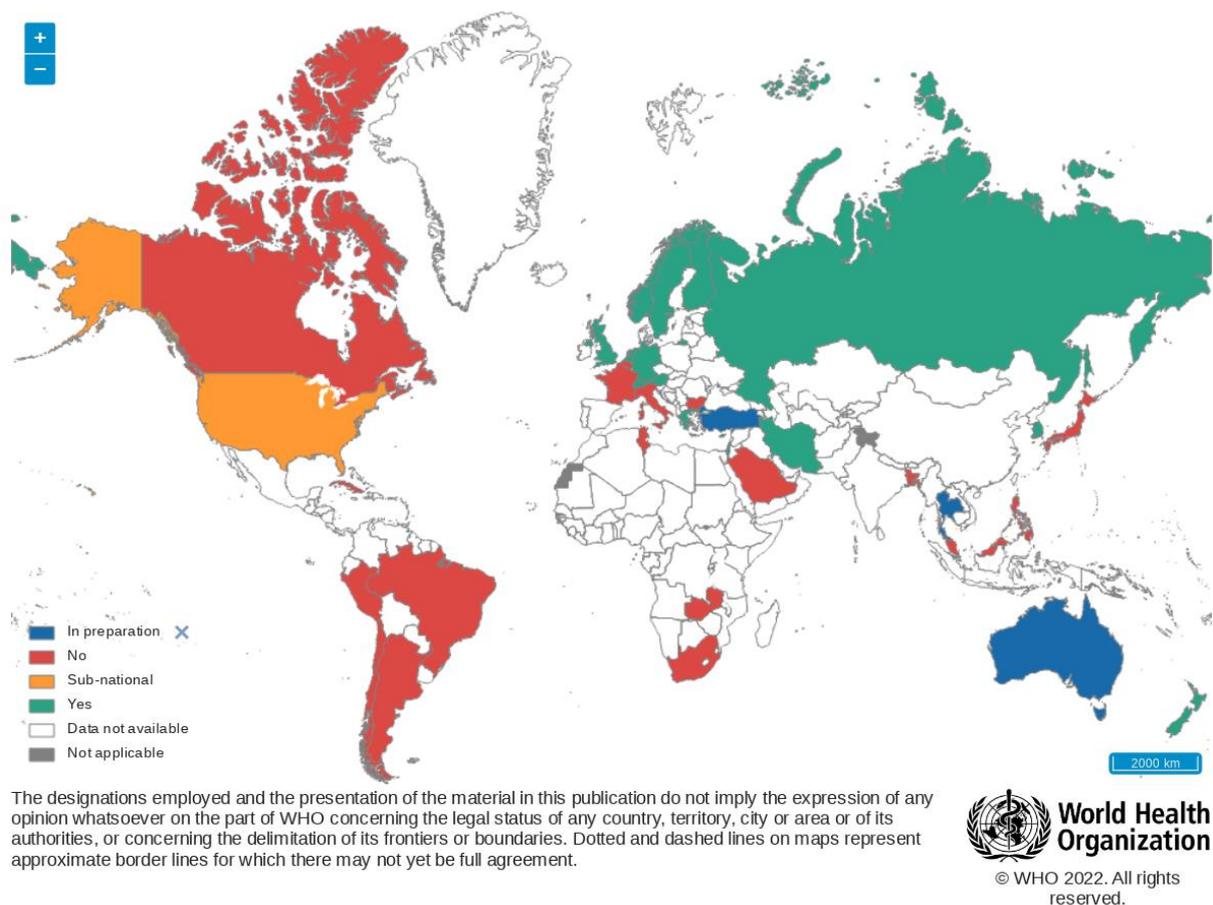


Figure 23 : existence de réglementations limitant l'exposition du public aux champs statiques (2022).

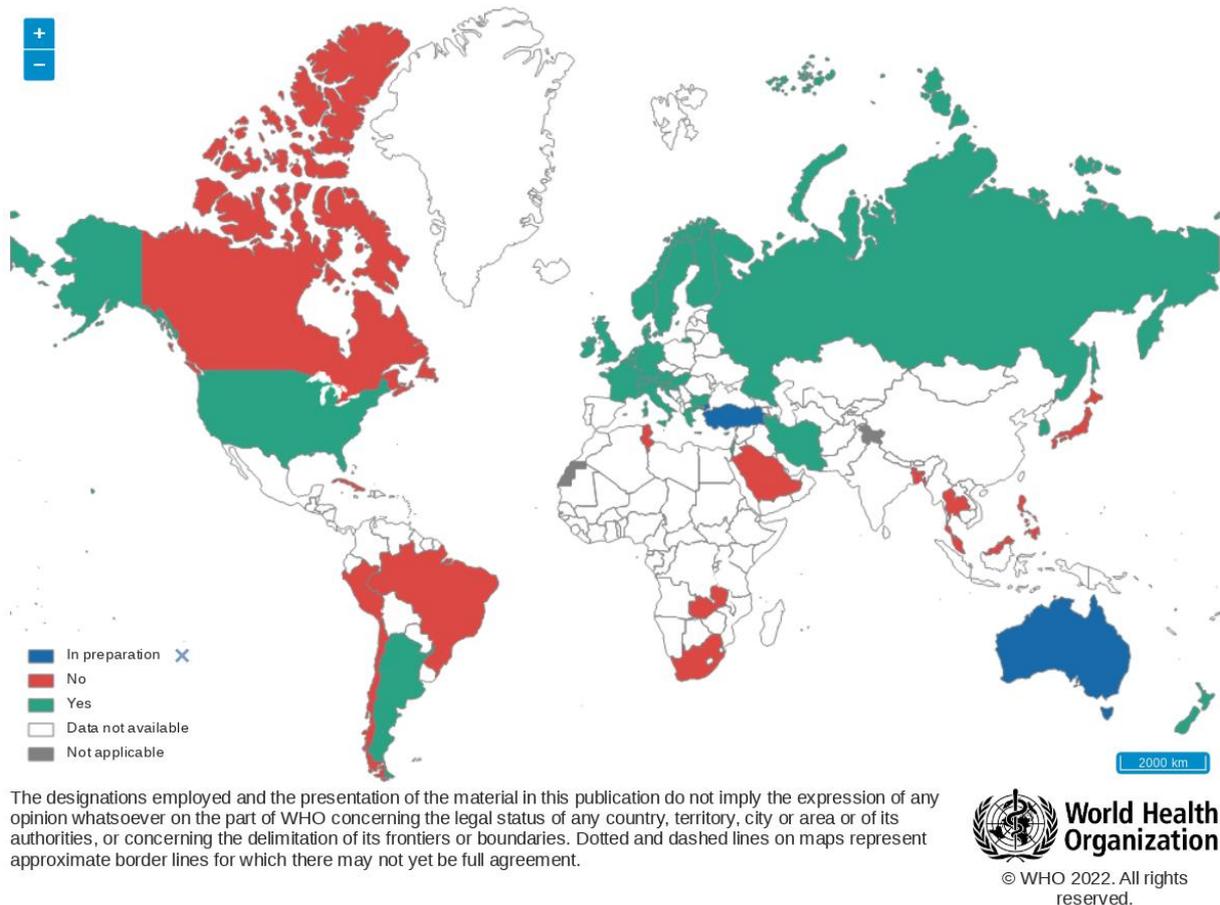


Figure 24 : existence de réglementations limitant l'exposition des travailleurs aux champs statiques (2022)

Ainsi, en Allemagne, en Norvège, en Nouvelle-Zélande et aux Pays-Bas, par exemple, l'exposition du public est limitée à 400 mT pour les effets directs, suivant en cela les préconisations de l'Incirp publiées en 2009. Au Royaume-Uni, la limite est de 40 mT, fondée sur la Recommandation européenne de 1999. En Suisse, la limite pour le public est de 0,5 mT.

Aux États-Unis, il n'existe pas de limite pour le public au niveau fédéral, mais les états peuvent prendre des réglementations particulières.

On constatera également que, comme en France, il n'existe pas de réglementation pour limiter l'exposition aux champs magnétiques statiques au Canada ainsi qu'au Brésil, en Argentine et en Afrique du Sud.

On peut noter par ailleurs la particularité de la Russie, qui dispose d'une valeur limite pour l'exposition aux champs électriques statiques (15 kV/m), mais pas pour les champs magnétiques statiques, seul pays à notre connaissance dans ce cas.

#### 4.5 Synthèse de la réglementation applicable aux champs magnétiques statiques

Comme la plupart des pays dans le Monde, la France ne dispose pas d'une réglementation limitant spécifiquement l'exposition du public aux champs magnétiques statiques. La recommandation européenne visant à limiter l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques, publiée en

1999, proposait une limite à 40 mT, en s'appuyant sur les travaux de la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (Icnirp), mais elle n'est pas contraignante. L'Icnirp a depuis, en 2009, relevé cette valeur à 400 mT.

Les réglementations protégeant les travailleurs sont beaucoup plus répandues, notamment dans l'Union européenne, où les pays membres ont dû adopter des valeurs limites au moins inférieures à 2 T pour l'exposition du corps entier dans des conditions de travail normales, et à 8 T pour l'exposition des membres du corps, afin d'éviter la perception éventuelle d'effets sensoriels (vertiges, nausées, etc.).

À notre connaissance, il n'existe aucune réglementation limitant l'exposition de l'environnement, notamment la faune et la flore, y compris en milieu marin.

## 5 Conclusion

L'exposition des personnes aux champs magnétiques statiques est extrêmement hétérogène. D'une part, chacun, sur Terre, est exposé en permanence, tout au long de sa vie, à un niveau moyen d'environ 30 à 60  $\mu\text{T}$ . D'autre part, des situations particulières peuvent nous exposer, ponctuellement ou plus durablement, à des niveaux beaucoup plus élevés. C'est le cas par exemple d'un examen IRM, qui génère une exposition plusieurs centaines de milliers de fois plus élevée que le champ terrestre. Cela peut être aussi le cas de certaines activités professionnelles. L'examen de la littérature scientifique, ainsi que de rapports de mesures, fait apparaître que les niveaux de champ magnétique statique émis par des lignes de transport de l'électricité en courant continu peuvent être au maximum, *a priori*, de l'ordre de 250  $\mu\text{T}$ , notamment pour les câbles sous-marins. Des mesures et simulations réalisées sur des câbles souterrains, à terre, en France, indiquent que le champ magnétique statique créé par les lignes électriques n'est plus discernable du champ magnétique terrestre dès lors que l'on s'éloigne de quelques mètres du câble.

Des organismes d'expertise et d'évaluation des risques, comme par exemple le Centre international de recherche sur le cancer, ou l'Organisation mondiale de la santé, se sont intéressés aux effets éventuels de l'exposition aux champs magnétiques statiques sur la santé humaine, même si le sujet a peu mobilisé les chercheurs, qui se sont principalement focalisés sur les conséquences des expositions de très fortes intensités. Des revues de littérature ont été publiées récemment, qui incluent les dernières recherches originales publiées sur le sujet. Toutes ces données convergent pour indiquer que des effets transitoires (vertiges, nausées, ...) peuvent apparaître lorsqu'on est exposé à des champs magnétiques statiques très intenses (par exemple au voisinage de certains appareils d'IRM). Cependant, aucun effet néfaste pour la santé n'a été clairement mis en évidence, même à des niveaux d'exposition élevés. En conclusion, y compris pour des niveaux d'exposition faibles, les auteurs des revues récentes ainsi que les rapports d'expertise disponibles soulignent l'impossibilité de conclure quant aux effets éventuels des champs magnétiques statiques sur la santé, en raison notamment du manque de données disponibles.

Un décret publié en 2016 limite l'exposition des travailleurs aux champs magnétiques statiques à 2 T pour l'ensemble du corps, afin d'éviter la perception éventuelle d'effets sensoriels. En revanche, comme dans la plupart des pays dans le Monde, la France ne dispose pas d'une réglementation limitant spécifiquement l'exposition du public aux champs magnétiques statiques.

Le développement de projets de parcs éoliens en haute mer implique de créer des liaisons électriques sous-marines avec la côte. Des recherches ont donc étudié l'impact des champs magnétiques statiques émis par les câbles sur l'environnement, et en particulier la faune sous-marine. Si des effets peuvent être observés chez certaines espèces en laboratoire, à des niveaux d'intensité relativement élevés, il est à l'heure actuelle impossible d'en déduire des impacts potentiels sur les organismes marins dans leur milieu naturel.

## Bibliographie

1999/519/CE : 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) (OJ L 199 30.07.1999, p. 59, CELEX : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999H0519>).

Agnir, Static Magnetic Fields, Report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation, Mai 2008, ISBN 978-0-85951-616-7.

Ahmad M., Galland P., Ritz T., Wiltschko R., and Wiltschko W., 2007. Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*. *Planta* 225 (3):615-624. doi: 10.1007/s00425-006-0383-0.

Albert L., Deschamps F., Jolivet A., Olivier F., Chauvaud L., Chauvaud S. A current synthesis on the effects of electric and magnetic fields emitted by submarine power cables on invertebrates. *Mar. Environ. Res.* 2020 Jul;159:104958. doi: 10.1016/j.marenvres.2020.104958. Epub 2020 Mar 23. PMID: 32662447.

Albuquerque Wendell Wagner Campos, Romero Marcos Pedrosa Brandão Costa, Thiago de Salazar e Fernandes, Ana Lúcia Figueiredo Porto, Evidences of the static magnetic field influence on cellular systems, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, Volume 121, Issue 1, 2016, Pages 16-28, ISSN 0079-6107, <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2016.03.003>.

Andrulewicz E., Napierska D. & Otremba Z., 2003. The environmental effects of the installation and functioning of the submarine SwePol Link HVDC transmission line: a case study of the Polish Marine Area of the Baltic Sea. *J. Sea Res.* 49: 337–345. doi: 10.1016/S1385-1101(03)00020-0.

Angell R.F., Schott M.R., Raleigh R.J. and Bracken T.D., 1990. Effects of a high-voltage direct-current transmission line on beef cattle production. *Bioelectromagnetics*, vol. 11, no 4, p. 273-282.

Ardelean M and Minnebo P. HVDC Submarine Power Cables in the World: State-of-the-Art Knowledge. EUR 27527. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2015. JRC97720.

Bailey W., Weil D., Stewart J., HVDC Power Transmission Environmental Issues Review, Oak Ridge National Laboratory, Lockheed Martin Energy Research Corporation for the United States Department of Energy, ORNL/Sub/95-SR893/2, 1997. [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc698267/m2/1/high\\_res\\_d/580576.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc698267/m2/1/high_res_d/580576.pdf).

Bergström L., Kautsky L., Malm T., Rosenberg R., Wahlberg M. *et al.*, 2014. Effects of offshore wind farms on marine wildlife – a generalized impact assessment. *Environ. Res. Lett.* 9(3): 034012. doi: 10.1088/1748-9326/9/3/034012.

Binhi VN, Prato FS, 2017. Biological effects of the hypomagnetic field: An analytical review of experiments and theories. *PLoS ONE* 12(6): e0179340. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179340>.

Blakemore R., 1975. Magnetotactic bacteria. *Science* 190 (4212):377-379.

Bochert R. and Zettler M.L., 2004. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 25(7): 498–502. doi: 10.1002/bem.20019.

Bochert R., Zettler M., 2006. Effect of electromagnetic fields on marine organisms. In: Koller J., Koppel J., Peters W. (Eds.), *Offshore Wind Energy*. Springer, Berlin, Heidelberg (Germany), pp. 223–234.

- Boehlert G., Gill A., 2010. Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development - a current synthesis. *Oceanography* 23 (2), 68–81. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.46>.
- Boles L. C. and K. J. Lohmann. 2003. True navigation and magnetic maps in spiny lobsters. *Nature* 421:60-63.
- Bowman JD and Methner MM, 2000. Hazard surveillance for industrial magnetic fields: II. Field characteristics from waveform measurements. *Ann. Occup. Hyg.*, 44, 615–33.
- Brocklehurst B. and McLauchlan K.A., 1996. Free radical mechanism for effects of environmental electromagnetic fields in biological systems. *Int. J. Radiat. Biol.*, 69, 3–24.
- Buenau Kate E., Lysel Garavelli, Lenaïg G. Hemery, and Gabriel García Medina. 2022. A Review of Modeling Approaches for Understanding and Monitoring the Environmental Effects of Marine Renewable Energy, *Journal of Marine Science and Engineering* 10, no. 1: 94. <https://doi.org/10.3390/jmse10010094>.
- Carlier A., Vogel C., Alemany J. 2019. Synthèse des connaissances sur les impacts des câbles électriques sous-marins : phases de travaux et d'exploitation. Rapport IFREMER. 99 pp. + Annexes.
- Chadwick P, Lowes F. Magnetic fields on British trains. *Ann. Occup. Hyg.* 1998 Jul; 42(5):331-5. doi: 10.1016/s0003-4878(98)00025-8. PMID: 9729921.
- Chakeres D., de Vocht F., Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, Volume 87, Issues 2–3, 2005, Pages 255-265, ISSN 0079-6107, <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.012>.
- Cliff G. and S. F. J. Dudley. 1992. Protection against shark attack in South Africa, 1952-90. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 43:263-272.
- Cooper T.G., 2002. Occupational exposure to electric and magnetic fields in the context of the ICNIRP guidelines (NRPB-W--24). United Kingdom.
- Cozens F.L. and Scaiano J.C., 1993. A comparative study of magnetic field effects on the dynamics of geminate and random radical pair processes in micelles. *J. Am. chem. Soc.*, 115, 5204–5211.
- De Vocht F., Batistatou E., Mölter A. *et al*, 2015. Transient health symptoms of MRI staff working with 1.5 and 3.0 Tesla scanners in the UK. *Eur Radiol* 25:2718–2726. <https://doi.org/10.1007/s00330-015-3629-z>.
- Dietrich F. M., and Jacobs W. L. 1999. Survey and assessment of electric and magnetic field (EMF) public exposure in the transportation environment. United States.
- European Commission (EC). 1996. Non-ionizing radiation sources, exposure and health effects. European Commission, Directorate General V, Employment, Industrial Relations and Social Affairs. Brussels, Luxembourg. p 163.
- Fan Y., Ji X., Zhang L. and Zhang X., 2021. The Analgesic Effects of Static Magnetic Fields. *Bioelectromagnetics*, 42: 115-127. <https://doi.org/10.1002/bem.22323>.
- Feychting M. Health effects of static magnetic fields--a review of the epidemiological evidence. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* 2005 Feb-Apr; 87(2-3):241-6. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.007. PMID: 15556662.

Gamroth M.J. 1990. A review of high voltage, direct current transmission line effects on dairy cattle health and performance. Préparé par l'Oregon State University pour Hydro-Québec et autres compagnies d'électricité américaines. Portland (Oregon). 8 p.

Gegear R. J., Foley L. E., Casselman A., and Reppert S. M., 2010. Animal cryptochromes mediate magnetoreception by an unconventional photochemical mechanism. *Nature* 463 (7282):804-807. doi: 10.1038/nature08719.

Ghodbane S., Lahbib A., Sakly M., Abdelmelek H. Bioeffects of static magnetic fields: oxidative stress, genotoxic effects, and cancer studies. *Biomed Res Int.* 2013; 2013:602987. doi:10.1155/2013/602987. Epub 2013 Aug 6. PMID: 24027759; PMCID: PMC3763575.

Gill, A. B. and A. A. Kimber. 2005. The potential for cooperative management of elasmobranchs and offshore renewable energy development in UK waters. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 85:1075-1081.

Głab, Grzegorz & Dudek, Jolanta & Klimek, Krzysztof & Skalska-Dulińska, Barbara & Chrobot, Urszula & Chojak-Fijałka, Katarzyna & Ridan, Tomasz & Głodzik, Jacek., 2016. Static or dynamic low-frequency magnetic field? A review of literature. *Rehabilitacja Medyczna.* 20. 31-35. 10.5604/01.3001.0009.4809.

Grissom, C.B., 1995. Magnetic field effects in biology: a survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination. *Chem. Rev.*, 95, 3-24.

Hahn S., Kim K., Kim K. *et al.* 45,5-tesla direct-current magnetic field generated with a high-temperature superconducting magnet. *Nature* 570, 496-499, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1293-1>.

Hamilton C.A., Hewitt J.P., McLauchlan K.A. & Steiner U.E., 1988. High resolution studies of the effects of magnetic fields on chemical reactions. *Mol. Phys.*, 65, 423-438.

Hartwig V., Virgili G., Mattei F.E., Biagini C., Romeo S., Zeni O., Scarfi M.R., Massa R., Campanella F., Landini L., Gobba F., Modenese A., Giovannetti G. Occupational exposure to electromagnetic fields in magnetic resonance environment: an update on regulation, exposure assessment techniques, health risk evaluation, and surveillance. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2022 Feb; 60(2):297-320. doi: 10.1007/s11517-021-02435-6. Epub 2021 Sep 29. Erratum in: *Med Biol Eng Comput.* 2022 Jan 13; PMID: 34586563.

Heinrich A., Szostek A., Nees F. *et al.*, 2011. Effects of static magnetic fields on cognition, vital signs, and sensory perception: a meta-analysis. *J. Magn. Reson. Imaging* 34:758-763.

<https://doi.org/10.1002/jmri.22720>.

Hodson R.B. 2000. Magnetoreception in the short-tailed stingray, *Dasyatis brevicaudata*. MSc Thesis, University of Auckland, New Zealand.

Hui, C.A. 1994. Lack of Association between Magnetic Patterns and the Distribution of Free-Ranging Dolphins. *Journal of Mammalogy* (75):399-405.

Hutchison, Z.L., Sigray, H.H., Gill, A.B., King, J., Gibson, C. (2018). Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables (Sterling (VA): U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management). OCS Study BOEM 2018-003. 251 pp.

Hutchison Z.L., Gill A.B., Sigray P. *et al.* Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Sci Rep* 10, 4219, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x>.

IEC 61786-1:2013 - Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments.

IEC 61786-2:2014 - Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 2: Basic standard for measurements.

International Electrotechnical Commission (IEC). Safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis. Geneva: Switzerland: IEC; IEC 60601-2-33; 2002.

IEEE Std. C95.1. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019.

International Agency for Research on Cancer (IARC) working group on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Non-ionizing radiation, Part 1: static and extremely low -frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans, Volume 80. 1 ed. Lyon, France: IARC Press; 2002. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol80/mono80.pdf>.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Icnirp). 1994. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.* 66:100–106.

International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (Icnirp). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 74(4):494–522; 1998.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Icnirp). Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz) - Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. Munich, 2003.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (Icnirp). Statement on EMF-emitting new technologies. *Health Phys.* 94:376–392; 2008.

International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (Icnirp). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.* 96(4):504–514; 2009.

International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (Icnirp). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz). *Health Phys.* 99(6):818–836; 2010.

International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (Icnirp). Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz. *Health Phys.* 106(3):418–425; 2014.

International Commission on Non-ionizing Radiation Protection (Icnirp). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys.* 118(5):483–524; 2020. Published ahead of print in march 2020: *Health Phys.* 118(00):000-000;2020.

Issep - Rapport de mesure du champ magnétique statique après mise en service de l'interconnexion IFA2 - Rapport n° 1403 / 2021, 22 juin 2021.

Kalmijn A.J., 1982. Electric and magnetic-field detection in elasmobranch fishes. *Science* 218:916-918.

- Kalmijn A.J., 1988. Detection of weak electric fields. Pages 151-186 in J. Atema, R.R. Fay, A.N. Popper, and W.N. Tavolga (eds.) *Sensory Biology of Aquatic Animals*. Springer-Verlag. New York.
- Kaune WT, Banks RS, Linet MS, Hatch EE, Kleinerman RA, Wacholder S, Tarone RE and Haines C, 2001. Static magnetic field measurements in residences in relation to resonance hypotheses of interactions between power-frequency magnetic fields and humans. *Bioelectromagnetics*, 22(5), 294-305.
- Kavet R., Wyman M.T., Klimley A.P., 2016. Modeling Magnetic Fields from a DC Power Cable Buried Beneath San Francisco Bay Based on Empirical Measurements. *PLoS ONE* 11(2):e0148543. doi:10.1371/journal.pone.0148543.
- Kavet R., Wyman M., Klimley A., Vergara X., 2016b. Assessment of Potential Impact of Electromagnetic Fields from Undersea Cable on Migratory Fish Behavior. Report by Electric Power Research Institute (EPRI). Report for Bureau of Ocean Energy Management (BOEM). Report for US Department of Energy (DOE).
- Kirschvink, J.L. 1990. Geomagnetic sensitivity in cetaceans: an update with live stranding records in the United States, In *Sensory Abilities of Cetaceans: Laboratory and Field Evidence* (J.A. Thomas and R.A. Kastelein, eds.) Plenum Press, New York, NY. 639-649 pp.
- Klinowska, M. 1985. Cetacean live stranding sites related to geomagnetic topography. *Aquatic Mammals* (1):27-32.
- Koops, F.B.J. 2000. Electric and Magnetic fields in Consequence of Undersea Power Cables. *Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment: Proceedings of the International Seminar on Effects of Electromagnetic Field on the Living Environment*.
- Leitgeb N., 2014. Limiting electric fields of HVDC overhead power lines. *Radiation and environmental biophysics*. 53. 10.1007/s00411-014-0520-2.
- Lohmann K.J. and Willows A.O.D. 1987. Lunar-modulated geomagnetic orientation by a marine mollusk. *Science* 235:331-334.
- Lohmann K.J., Willows A.O.D., and Pinter R. B., 1991. An identifiable molluscan neuron responds to changes in earth-strength magnetic-fields. *Journal of Experimental Biology* 161:1-24.
- Lohmann K.J., Cain S.D., Dodge S.A., and Lohmann C.M.F., 2001. Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles. *Science* 294:364-366.
- Lohmann, K.J., Lohmann C.M.F., Ehrhart L.M., Bagley D.A., and Swing T., 2004. Animal behaviour - Geomagnetic map used in sea turtle navigation. *Nature* 428:909-910.
- Lohmann, K.J., Luschi P., and Hays G.C., 2008. Goal navigation and island-finding in sea turtles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 356:83-95.
- Love M.S., Nishimoto M.M., Clark S., McCrea M., Bull A.S., 2017. The Organisms Living Around Energized Submarine Power Cables, Pipe, and Natural Sea Floor in the Inshore Waters of Southern California. *Bull. South. Calif. Acad. Sci.* 116, 61-87.
- Maeda K., Robinson A.J., Henbest K.B., Hogben H.J., T. Biskup, Ahmad M., Schleicher E., Weber S., Timmel C.R., and Hore P.J., 2012. Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (13):4774-4779. doi: 10.1073/pnas.1118959109.

Maffei M.E., Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution, *Frontiers in Plant Science*; vol. 5, 2014, doi: 10.3389/fpls.2014.00445.

Marsh J.L., Armstrong T.J., Jacobson A.P., Smith R.G. Health effect of occupational exposure to steady magnetic fields. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1982 Jun; 43(6):387-94.

doi: 10.1080/15298668291409910. PMID: 6981340.

McCann J., Dietrich F., Rafferty C., Martin A.O. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutat. Res.* 1993 Jul; 297(1):61-95. doi: 10.1016/0165-1110(93)90008-b. PMID: 7686274.

McLauchlan K.A., 1989. Magnetokinetics, mechanistics and synthesis. *Chemistry in Britain*, September, 895–898.

Meißner K., Sordyl H., 2006, Literature Review of Offshore Wind Farms with Regard to Benthic Communities and Habitats, in *Ecological Research on Offshore Wind Farms: International Exchange of Experiences. PART B: Literature Review of Ecological Impacts*, Editors: Zucco, C., Wende, W., Merck, T., Köchling, I., Köppel, J., Bundesamt für Naturschutz (BfN), Federal Agency for Nature Conservation.

Metcalf J.D., Holford B.H and Arnold G. P., 1993. Orientation of plaice (*Pleuronectes platessa*) in the open sea - evidence for the use of external directional clues. *Marine Biology* 117:559-566.

Meyer C.G., Holland K.N., and Papastamatiou Y.P. 2005. Sharks can detect changes in the geomagnetic field. *Journal of the Royal Society Interface* 2:129-130.

Miyakoshi J., Effects of static magnetic fields at the cellular level, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, Volume 87, Issues 2–3, 2005, Pages 213-223, ISSN 0079-6107, <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.008>.

Miyakoshi J., 2006. The review of cellular effects of a static magnetic field, *Science and Technology of Advanced Materials*, 7:4, 305-307, DOI: 10.1016/j.stam.2006.01.004.

Mizuma T., Kato Y. Measurement and evaluation method of magnetic field on electric railway systems. Report of Traffic Safety and Nuisance Research Institute 27:1–10; 1999 (in Japanese). In *Icnirp*, 2008.

Moen B.E., Drabløs P.A., Pedersen S., Sjøen M et Thommesen, G., 1995. Symptoms of the musculoskeletal system and exposure to magnetic fields in an aluminium plant. *Occupational and environmental medicine*. 52. 524-7. 10.1136/oem.52.8.524.

Moen B.E., Drabløs P.A., Pedersen S., Sjøen M. et Thommesen G., 1996. Absence of relation between sick leave caused by musculoskeletal disorders and exposure to magnetic fields in an aluminum plant. *Bioelectromagnetics*, 17: 37-43. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1996\)17:1<37::AID-BEM5>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:1<37::AID-BEM5>3.0.CO;2-7).

Mohtat N., Cozens F.L., Hancock-Chen T., Scaiano J.C., McLean J. & Kim J., 1998. Magnetic field effects on the behavior of radicals in protein and DNA environments. *Photochem. Photobiol.*, 67, 111–118.

Moore E.A., Scurr E., Price D. Potential impact of the EU PAD (EMF) on MR clinical practice in the UK. Presented at IPEM MR Safety update Meeting, London, October 2006.

Mur J.M, Wild P., Rapp R., Vautrin J.P. and Coulon J.-P., Demographic evaluation of the fertility of aluminium industry workers: influence of exposure to heat and static magnetic fields. *Human reproduction* 13 7 (1998): 2016-9.

National Research Council (US) Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health. *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*. Washington (DC): National Academies Press (US); 1983. PMID: 25032414.

Němec P., J. Altmann S. Marhold H. Burda and H. H. A. Oelschläger. 2001. Neuroanatomy of magnetoreception: The superior colliculus involved in magnetic orientation in a mammal. *Science* 294 (5541):366-368. doi: 10.1126/science.1063351.

Nishi T., Kawamura G., Matsumoto and K., 2004. Magnetic sense in the Japanese eel, *Anguilla japonica*, as determined by conditioning and electrocardiography. *Journal of Experimental Biology* 207:2965-2970.

Nishi T. and Kawamura G. 2006. Magnetosensitivity in the darkbanded rockfish *Sebastes inermis*. *Nippon Suisan Gakkaishi* 72:27-33.

Normandeau, Exponent, Tricas T., and Gill A., 2011. *Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species*. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, Pacific OCS Region, Camarillo, CA. OCS Study BOEMRE 2011-09.

NRC. 1996. *Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields*. National Research Council, Washington: National Academy Press.

NRPB. 1992. *Electromagnetic fields and the risk of cancer*. Report of an Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton: National Radiological Protection Board, Doc. NRPB 3(1):1-138.

NRPB. 1993. *Board statement on restrictions on human exposure to static and time varying electromagnetic fields and radiation*. Chilton: National Radiological Protection Board, Doc. NRPB 4(5):1-63.

Öhman M.C., Sigra P. & Westerberg H., 2007. Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish. *AMBIO* 36(8): 630-633. DOI: 10.1579/0044-7447(2007)36.

Otremba Z., Jakubowska M., Urban-Malinga B. and Andrulewicz E. Potential effects of electrical energy transmission – the case study from the Polish Marine Areas (southern Baltic Sea) *Oceanological and Hydrobiological Studies*, vol.48, no.2, 2019, pp.196-208. <https://doi.org/10.1515/ohs-2019-0018>.

Quinn T.P., 1980. Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry. *Journal of Comparative Physiology* 137:243-248.

Quinn T.P. and Ogden J.C., 1984. Field evidence of compass orientation in migrating juvenile grunts (*Haemulidae*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 81:181-192.

Radhakrishnan R. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances tolerance against environmental stresses. *Physiol Mol Biol Plants* 25, 1107-1119 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00699-9>.

Raleigh R.J. 1988. Joint HVDC agricultural study: final report. Oregon State University et Bonneville Power Administration (BPA). Portland (Oregon), BPA. Préparé pour Hydro-Québec et autres compagnies d'électricité américaines. 2 volumes.

Repacholi M.H., Greenebaum B. Interaction of static and extremely low frequency electric and magnetic fields with living systems: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*. 1999; 20(3):133-60. doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1999)20:3<133::aid-bem1>3.0.co;2-o. PMID: 10194557.

Romeo S., Sannino A., Scarfi M.R. *et al*, 2016. Lack of effects on key cellular parameters of MRC-5 human lung fibroblasts exposed to 370 mT static magnetic field. *Sci Rep* 6:19398. <https://doi.org/10.1038/srep19398>.

RTE, 2016 - Mesures de champ magnétique statique avant et après la mise en service de la liaison à courant continu France – Espagne, 94p., RTE, 2016.

Sarraf M., Kataria S., Taimourya H., *et al*. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants* (Basel). 2020;9(9):1139. Published 2020 Sep 3. doi:10.3390/plants9091139.

Saunders R. Static magnetic fields: animal studies. *Prog Biophys Mol Biol.*, 2005. Feb-Apr; 87(2-3):225-39. doi: 10.1016/j.pbiomolbio.2004.09.001. PMID: 15556661.

Scaiano, J.C., Mohtat, N., Cozens, F.L., McLean, J. & Thansandote, A. (1994) Application of the radical pair mechanism to free radicals in organized systems: Can the effects of 60 Hz be predicted from studies under static fields? *Bioelectromagnetics*, 15, 549–554.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health, 2007

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), Health Effects of Exposure to EMF, 2009.

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Scenihr), Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), 2015. SCENIHR Rep 1–288 <https://doi.org/10.2772/75635>.

Simon O. 1989. Metabolism of proteins and amino acids. In: *Protein Metabolism in Farm Animals*. Bock, H.D., Eggum, B.O., Low, A.G., Simon, O. and Zebrowska, T. (ed.), pp273-366, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, GDR.

Simon N.J. 1992. Biological effects of static magnetic fields: a review. International Cryogenic Materials Commission, Inc., Boulder, Colorado. p 284.

Skotte J.H., Hjøllund H.I. Exposure of welders and other metal workers to ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 1997; 18(7):470-7. doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1997)18:7<470::aid-bem2>3.0.co;2-#. PMID: 9338628.

Snoek R., de Swart R., Didden K., Lengkeek W., Teunis M., Potential effects of electromagnetic fields in the Dutch North Sea, Phase 1: Desk Study, for Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving WP2016\_1031 - WaterProof Marine Consultancy & Research BV. and Bureau Waardenburg BV, 2016.

[https://www.buwa.nl/fileadmin/buwa\\_upload/Bureau\\_Waardenburg\\_rapporten/16-101\\_BuWareport\\_potential\\_effects\\_of\\_electromagnetic\\_fields\\_in\\_the\\_dutch\\_north\\_sea.pdf](https://www.buwa.nl/fileadmin/buwa_upload/Bureau_Waardenburg_rapporten/16-101_BuWareport_potential_effects_of_electromagnetic_fields_in_the_dutch_north_sea.pdf).

- Stan, A., Costinaş S., and Ion G., 2022. Overview and Assessment of HVDC Current Applications and Future Trends Energies 15, no. 3: 1193. <https://doi.org/10.3390/en15031193>.
- Stuchly M.A. Human exposure to static and time-varying magnetic fields. Health Phys. 1986 Aug; 51(2):215-25. doi: 10.1097/00004032-198608000-00006. PMID: 3733453.
- Swanson J., 1994. Measurements of static magnetic fields in homes in the UK and their implication for epidemiological studies of exposure to alternating magnetic fields. J. Radiol. Prot., 14, 67–75.
- Taormina B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart M. *et al.*, 2018. A review of the potential impact of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. Renew. Sust. Energ. Rev. 96: 380–391. DOI: 10.1016/j.rser.2018.07.026.
- Tenforde T.S., 1990. Biological effects of static magnetic fields. Int. J. appl. Electromagn., 1, 157–165.
- Tenforde T.S., 1992. Interaction mechanisms and biological effects of static magnetic fields. Automedica, 14, 271–293.
- Tian X., Wang D., Zha M. *et al.*, 2018. Magnetic field direction differentially impacts the growth of different cell types. Electromagn Biol Med 37:114–125. <https://doi.org/10.1080/15368378.2018.1458627>.
- Tian X., Wang D., Feng S. *et al.*, 2019. Effects of 3.5–23.0 T static magnetic fields on mice: a safety study. Neuroimage 199:273–280. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.070>.
- Ugolini, A. 2006. Equatorial sandhoppers use body scans to detect the earth's magnetic field. Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology 192:45-49.
- UNEP/WHO/IRPA. 1987. United Nations Environment Programme/International Radiation Protection Association/World Health Organization. Environmental Health Criteria 69: Magnetic Fields. WHO, Geneva.
- Walker, M. M. 1984. Learned magnetic field discrimination in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*. Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology 155:673-679.
- Walker M.W., Kirschvink J.L., Ahmed G., Dizon A.E. 1992. Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. Journal of Experimental Biology. 171: 67-78.
- Walker M.M., Diebel C.E., Haugh C.V., Pankhurst P.M., Montgomery J.C, and Green C.R. 1997. Structure and function of the vertebrate magnetic sense. Nature 390:371-376.
- Walker M.M., Diebel C.E., and Kirschvink J.L., 2007. Sensory systems neuroscience. Pages 335-374 in T. J. Hara and B. Zielinski, editors. Sensory systems neuroscience: Fish Physiology, v. 25. Elsevier Academic Press, Amsterdam, Netherlands; Boston, MA.
- Wang S., Luo J., Lv H. *et al.*, 2019. Safety of exposure to high static magnetic fields (2 T–12 T): a study on mice. Eur Radiol 29:6029–6037. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06256-y>.
- Westerberg H., Lagenfelt I., 2008. Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel. Fish. Manag. Ecol. 15, 369–375. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2400.2008.00630.X>.
- Wiltschko R. and W Wiltschko. 1995. Magnetic orientation in animals. Springer, Berlin, New-York.

Wiltschko W., Wiltschko R. Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *J. Comp. Physiol. A. Neuroethol. Sens. Neural. Behav. Physiol.* 2005 Aug; 191(8):675-93. doi:10.1007/s00359-005-0627-7. Epub 2005 May 11. PMID: 15886990.

World Health Organization (WHO). Environmental health criteria monograph no. 232—static fields. Geneva, Switzerland: WHO; 2006. [http://www.who.int/peh-emf/publications/EHC\\_232\\_Static\\_Fields\\_full\\_document.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/EHC_232_Static_Fields_full_document.pdf).

Yano K., Mori H., Minamikawa K., Ueno S., Uchida S., Nagai K., Toda M., and Masuda M.. 2000. Behavioral Response of Sharks to Electric Stimulation. *Bulletin of Seikai National Fisheries Research Institute* 78:13-30.

Zhadin M.N. Review of russian literature on biological action of DC and low-frequency AC magnetic fields. *Bioelectromagnetics.* 2001 Jan; 22(1):27-45. doi: 10.1002/1521-186x(200101)22:1<27::aid-bem4>3.0.co;2-2. PMID: 11122491.

Zhang L., Ji X., Yang X., Zhang X., 2017. Cell type- and density dependent effect of 1 T static magnetic field on cell proliferation. *Oncotarget* 8:13126–13141. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.14480>.

## Annexes

## Annexe 1 : normes techniques pour la mesure de l'intensité des champs statiques

Les éléments ci-dessous ont été traduits depuis le site de la Commission électrotechnique internationale qui présente les normes IEC 61786-1 et 61786-2.

### Norme IEC 61786-1:2013

La norme IEC 61786-1:2013 fournit des lignes directrices pour les instruments de mesure utilisés pour mesurer l'intensité des champs magnétiques et électriques quasi-statiques dans la bande de fréquences comprises entre 1 Hz et 100 kHz et des champs magnétiques statiques afin d'évaluer les niveaux d'exposition du corps humain à ces champs. Les sources de champs comprennent les dispositifs qui fonctionnent aux fréquences du réseau électrique et produisent des champs à ces fréquences et leurs harmoniques, ainsi que les dispositifs qui produisent des champs dans la gamme de fréquences du présent document, y compris les dispositifs qui produisent des champs statiques, et le champ magnétique statique de la terre. Les intensités couvertes par cette norme sont de 0,1  $\mu\text{T}$  à 200 mT en courant alternatif (1  $\mu\text{T}$  à 10 T en courant continu) et de 1 V/m à 50 kV/m pour les champs magnétiques et les champs électriques, respectivement. Lorsque des mesures hors de cette gamme sont effectuées, la plupart des dispositions de cette norme s'appliquent aussi, mais une attention particulière doit être accordée à l'incertitude spécifiée et aux procédures d'étalonnage. Les premières éditions de la norme IEC 61786-1 et de la norme IEC 61786-2 remplacent la norme IEC 61786:1998. La partie 1 traite des instruments de mesure, et la partie 2 traite des procédures de mesure. Le contenu de la norme a été révisé afin de donner des informations actualisées et pratiques à l'utilisateur.

### Norme IEC 61786-2:2014

La norme IEC 61786-2:2014 fournit des exigences pour la mesure des champs magnétiques et électriques quasi-statiques dont la fréquence est comprise entre 1 Hz et 100 kHz, et des champs magnétiques continus, afin d'évaluer les niveaux d'exposition du corps humain à ces champs. Plus précisément, cette norme énonce les exigences relatives à l'établissement de procédures de mesure permettant d'atteindre des objectifs définis en matière d'exposition humaine. En raison des différences dans les caractéristiques des champs provenant de sources situées dans des environnements différents, par exemple les fréquences, les variations temporelles et spatiales, la polarisation et l'amplitude, et des différences dans les objectifs des mesures, les procédures de mesure spécifiques seront différentes dans les divers environnements. Les sources de champs comprennent les dispositifs qui fonctionnent aux fréquences du réseau électrique et produisent des champs aux fréquences du réseau électrique et leurs harmoniques, ainsi que les dispositifs qui produisent des champs indépendants de la fréquence du réseau électrique, la transmission de puissance en courant continu, et le champ géomagnétique. Les intensités couvertes par cette norme sont de 0,1  $\mu\text{T}$  à 200 mT pour le courant alternatif (1  $\mu\text{T}$  à 10 T pour le courant continu) pour les champs magnétiques, et de 1 V/m à 50 kV/m pour les champs électriques. Lorsque des mesures sont effectuées en dehors de cette gamme, la plupart des dispositions de cette norme s'appliquent toujours, mais une attention particulière doit être accordée à l'incertitude spécifiée et aux procédures d'étalonnage. Exemples de sources de champs qui peuvent être mesurées avec cette norme :

- les dispositifs qui fonctionnent aux fréquences des réseaux électriques (50/60 Hz) et produisent des champs aux fréquences du réseau électrique et leurs harmoniques (exemples : lignes électriques, appareils électriques...);

- les dispositifs qui produisent des champs indépendants de la fréquence du réseau électrique (exemples : chemin de fer électrique (continu à 20 kHz) ;
- avions commerciaux (400 Hz), chauffages par induction (jusqu'à 100 kHz), et véhicules électriques) ;
- et les appareils qui produisent des champs magnétiques statiques : IRM, lignes électriques en courant continu, soudage en courant continu, électrolyse, aimants, fours électriques, etc.

Les courants continus sont souvent générés par des convertisseurs, qui créent également des composantes variables (harmoniques de la fréquence du réseau électrique), qui doivent être évaluées. Lorsque des normes produits concernant les champs électromagnétiques sont disponibles, il convient d'utiliser ces normes produits. En ce qui concerne les mesures de champ électrique, cette norme ne considère que la mesure de l'intensité du champ électrique non perturbé en un point de l'espace (c'est-à-dire le champ électrique avant l'installation du mesureur de champ et de l'opérateur) ou sur des surfaces conductrices. Les sources d'incertitude pendant les mesures sont également identifiées et des conseils sont fournis sur la façon dont elles doivent être combinées pour déterminer l'incertitude totale de la mesure.

## Annexe 2 : recherches bibliographiques

Les recherches bibliographiques ont été réalisées principalement dans 3 moteurs de recherche spécialisés : EMF-Portal, Pubmed et Scopus.

### EMF portal

EMF-Portal est une plateforme d'information en ligne, hébergée par l'Université d'Aachen en Allemagne, qui comprend une base de données de publications scientifiques et une interface de recherche en ligne. La base de données comprenait, début 2022, 35 459 publications (études scientifiques), dans le domaine des effets des champs électromagnétiques.

En février 2022, une recherche dans EMF-Portal des publications concernant des études expérimentales sur les champs magnétiques statiques a retourné 1 598 articles au total. Ceux-ci étaient répartis en 575 études sur la santé, 307 sur des cellules, 242 sur des fonctions cellulaires, 223 sur l'ADN, 141 sur le cerveau et 611 sur d'autres aspects.

La recherche de revues de littérature sur les effets des champs magnétiques statiques dans EMF-portal, le 23 février 2021 a retourné 864 articles. Les titres et résumés de ces articles ont tous été consultés, et il ressort notamment que beaucoup d'entre eux étudient la stimulation transcrânienne, utilisée par exemple en antidouleur ou pour soigner certaines maladies neurologiques. Très peu de la littérature identifiée concerne en réalité les effets des champs magnétiques statiques sur la santé. De façon anecdotique, la référence la plus ancienne datait de 1918...

En raffinant la recherche par des mots clés, par exemple « health », « magnetic », « static », il ressort 67 articles, tous consultés avant sélection finale.

Une recherche complémentaire le 31 mars sur les mots clés « effect » et « marine » dans les revues, uniquement dans le domaine des champs statiques a renvoyé 637 publications, qui ont toutes été triées afin d'en extraire celles utiles à l'expertise.

### Scopus

Une recherche dans le moteur Scopus, le 25 février 2022, avec les mots clés « health », « effects », « static », « magnetic », « fields », sur des articles de type « review », en anglais, a permis de retrouver entre 60 et 140 publications, en fonctions des domaines scientifiques inclus. Ces articles recoupaient pour l'essentiel ceux identifiés dans le moteur EMF-Portal.

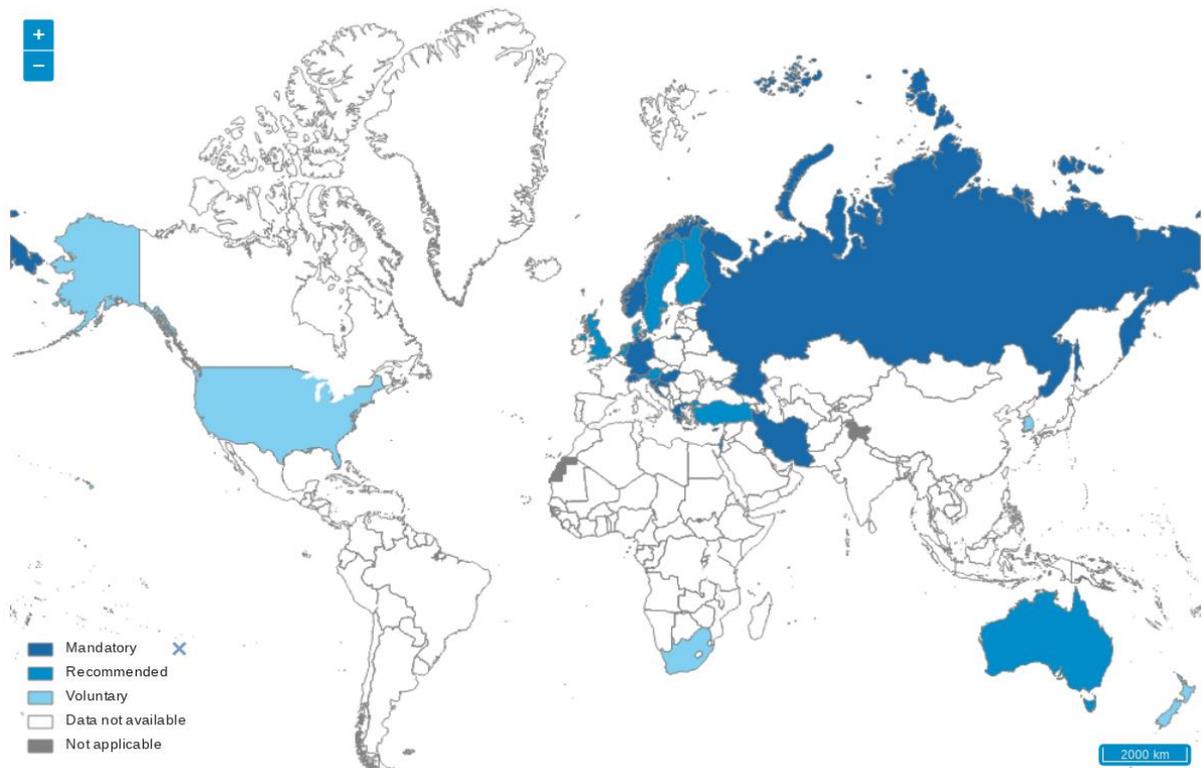
### PubMed

La recherche effectuée le 25 février 2022 avec les mots clés « (health or effects) and static magnetic fields » dans le moteur PubMed a renvoyé 161 résultats, qui se recoupaient également avec les articles identifiés dans les autres moteurs.

## Annexe 3 : statut législatif des limites d'exposition aux champs magnétiques statiques

Les Figure 25 et Figure 26 présentent le statut législatif des limites d'exposition aux champs magnétiques statiques respectivement pour le public et les travailleurs :

- en bleu foncé : d'application obligatoire ;
- en bleu intermédiaire : recommandé ;
- en bleu clair : d'application volontaire
- en blanc : données non disponibles

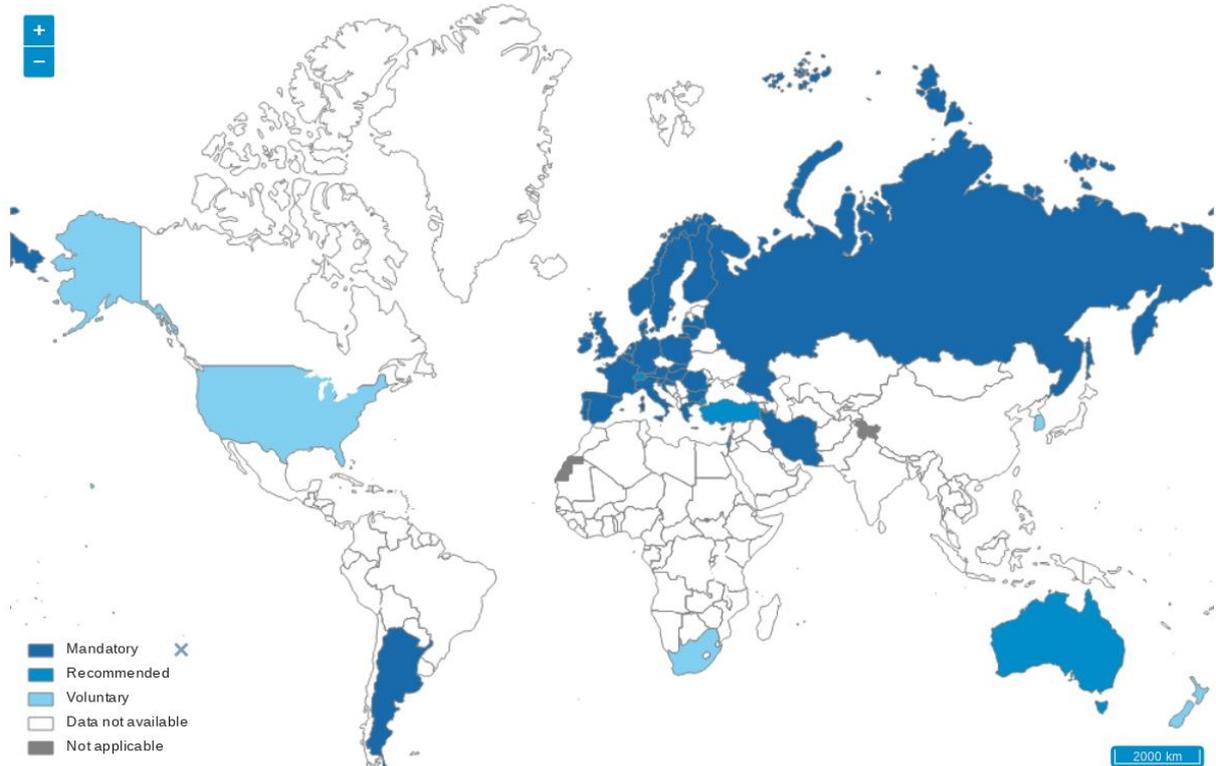


The designations employed and the presentation of the material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of WHO concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted and dashed lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement.



© WHO 2022. All rights reserved.

Figure 25 : statut législatif des limitations de l'exposition aux champs statiques pour le public.



The designations employed and the presentation of the material in this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of WHO concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries. Dotted and dashed lines on maps represent approximate border lines for which there may not yet be full agreement.



Figure 26 : statut législatif des limitations de l'exposition aux champs statiques pour les travailleurs.

## Annexe 4 : biographie de l'auteur du rapport

Titulaire d'un doctorat en physique, Olivier Merckel a intégré le département de recherche en électromagnétisme de l'École supérieure d'électricité en 2002, en qualité d'enseignant-chercheur, pour y poursuivre ses travaux sur l'exposition aux ondes initiés pendant sa thèse, et y développer notamment de nouvelles techniques de mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques. En 2007, il intègre l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, aujourd'hui Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), et prend en 2008 la responsabilité de l'Unité d'évaluation des risques liés aux agents physiques. Cette entité réalise, en s'appuyant sur les travaux de recherche disponibles, et avec le concours de nombreux chercheurs et scientifiques d'organismes nationaux et internationaux, des expertises visant à évaluer les risques pour la santé humaine liés à l'exposition aux champs électromagnétiques, à la lumière, aux nanomatériaux, au bruit, au changement climatique ou encore à des modes particuliers d'organisation du travail. En 2010-2011, il a été nommé auditeur de la promotion Benoît Mandelbrot de l'Institut des hautes études pour la science et la technologie (IHEST). Il dispense par ailleurs des cours sur les effets sanitaires des champs électromagnétiques en Master, notamment à l'École des hautes études en santé publique (EHESP) et à la Faculté de pharmacie de l'Université Paris Cité.

