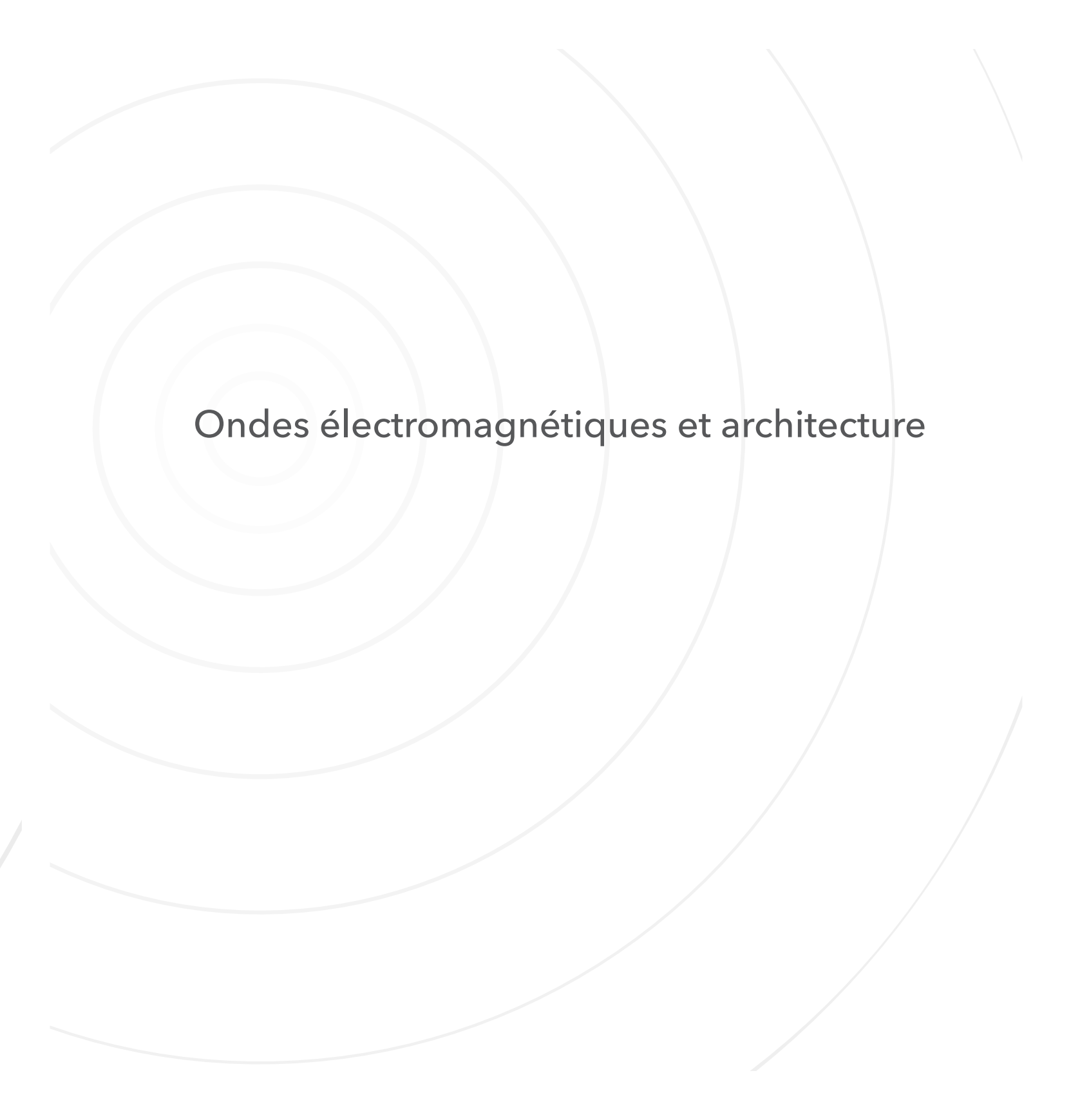


The background features a series of concentric circles and arcs on the left side, centered around the text. These lines are light gray and vary in radius, creating a ripple effect. On the right side, there are several curved lines that are not concentric, also in light gray, which appear to be segments of larger circles or arcs. The overall composition is minimalist and modern.

Ondes électromagnétiques et architecture

Enoncé théorique de master en architecture
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Suivi de l'énoncé et du projet de master:
prof. Corentin Fivet
prof. Marilyne Andersen
Barbara Tirone



2020, Ludovic Fleischner

Ce document est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution (CC BY <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

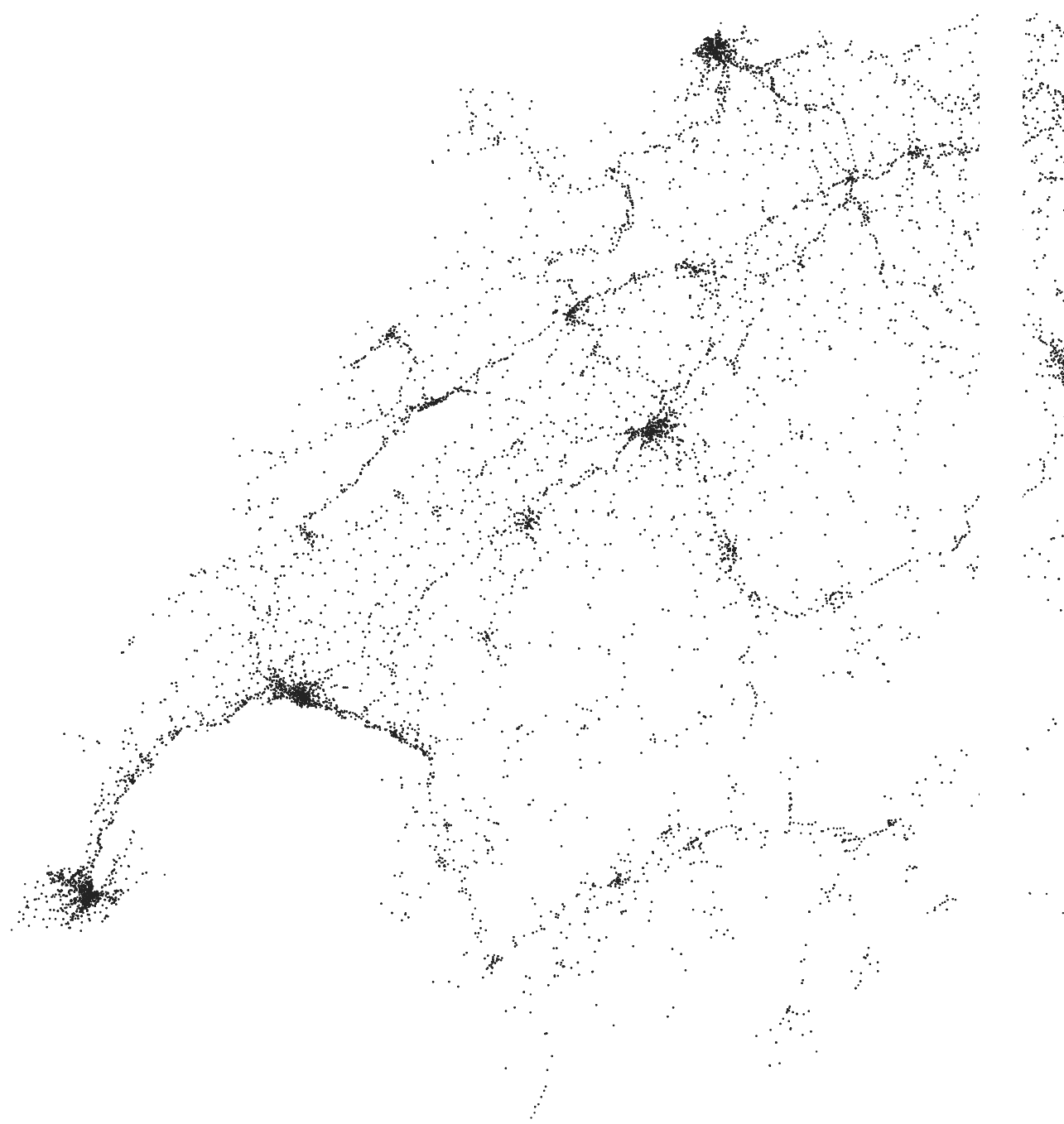
Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à la licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs auteurs.

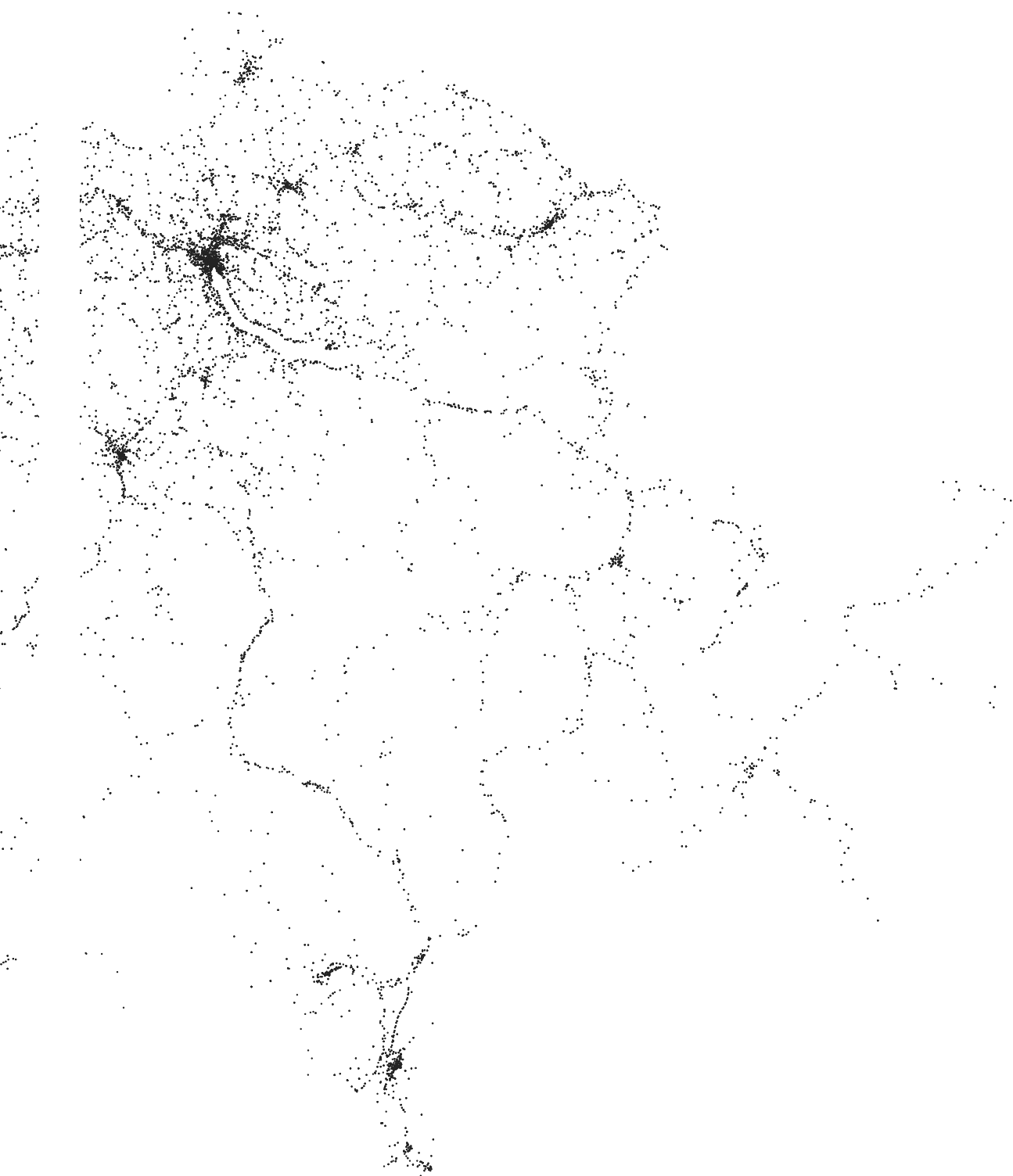
Ondes électromagnétiques et architecture

Ludovic Fleischner

Enoncé théorique

janvier 2020





sommaire

La cohabitation avec les ondes est une question d'actualité	9
Les moyens de protection locaux contre les ondes existent	21
Des logements spécifiques pour les personnes électrosensibles ont déjà été construits	27
L'intégration de la protection contre les ondes sur peut avoir une influence sur la composition du plan	37
Synthèse	55
Conclusion	59
Bibliographie	65
Annexes	71

**La cohabitation avec les ondes
est une question d'actualité**

Une cohabitation marquée par des contradictions ?

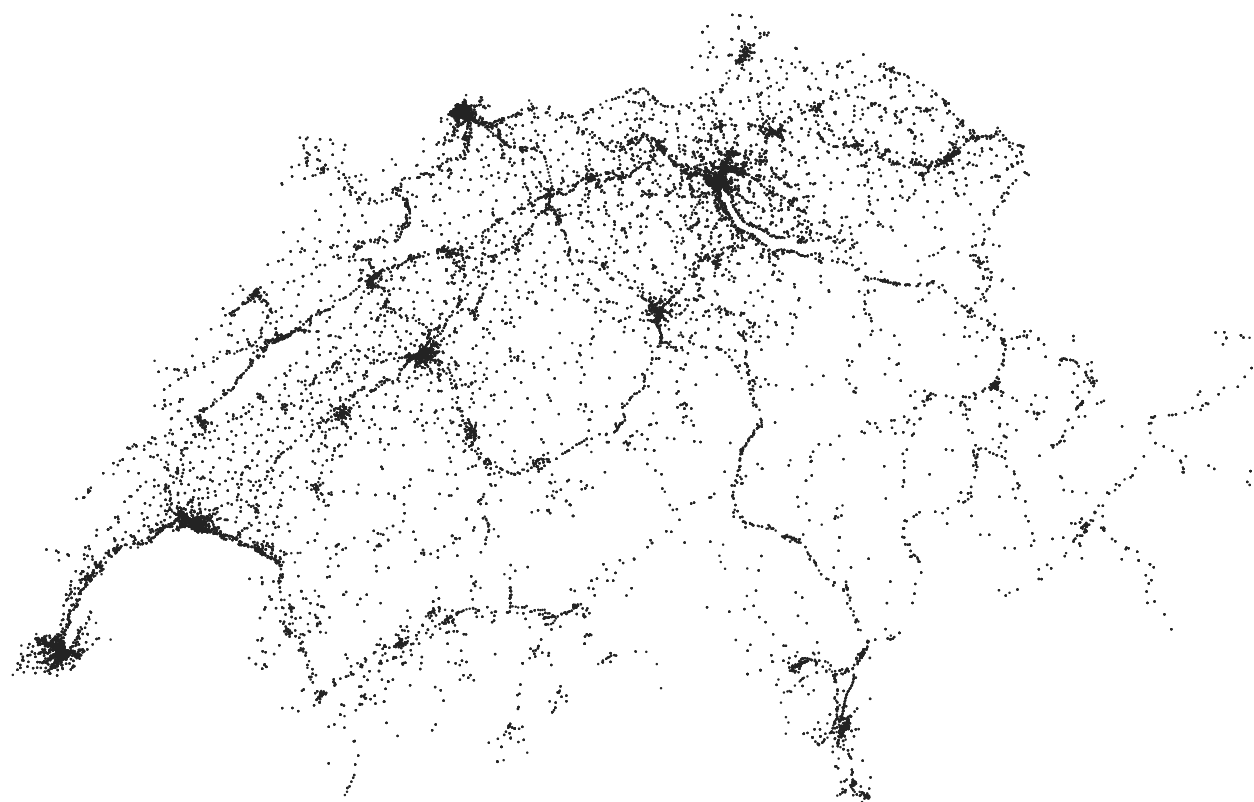
Les ondes électromagnétiques sont omniprésentes dans notre environnement quotidien. Téléphonie mobile, wifi et appareils connectés sont indissociables de notre mode de vie actuel. Pour autant les craintes face à l'effet potentiel de ces ondes sur la santé humaine ne se sont pas dissipées et le sujet crée toujours des polémiques. Polémiques qui se réveillent à chaque introduction d'une nouvelle technologie, comme cela est actuellement le cas avec l'introduction de la technologie 5G.

La cohabitation avec les ondes électromagnétiques est ainsi une problématique d'actualité qui est marquée par une dualité entre la crainte, voir l'hostilité d'une partie de la population vis-à-vis des sources d'ondes électromagnétiques, en particulier quand il s'agit des antennes de téléphonie mobile, et d'un autre côté, la perspective d'une société ultra connectée, dépendant de plus en plus des réseaux sans fils pour son développement. La même ambiguïté est présente au niveau individuel, on ne souhaite pas, du moins pour la plupart d'entre nous, l'installation d'une antenne à proximité de notre logement, pourtant nous sommes habitués à

pouvoir être connectés à tout moment, à disposer d'un réseau wifi ou mobile de bonne qualité. Cette place prise par les réseaux de nos jours s'illustre par les prix que peuvent atteindre certains téléphones et la fréquence de renouvellement de ceux-ci.

La technologie est vue comme un moyen de répondre aux enjeux de la ville actuelle ou de demain, que ce soit, parmi de nombreux autres exemples, par le développement des compteurs d'électricité intelligents ou de la voiture (électrique) autonome. Les sources d'ondes deviennent ainsi toujours plus nombreuses et diverses, qu'elles proviennent de l'intérieur ou de l'extérieur des logements. Concernant les antennes de téléphonie mobile, la densité de sources est certes bien plus importante dans les centres des villes, la concentration d'antennes étant beaucoup plus grande, mais en Suisse, presque tout le territoire est couvert (pratiquement 100% de la population et 90% du territoire). Selon l'office fédéral de l'environnement (OFEV), on comptait ainsi début 2019, selon l'office fédéral de l'environnement (OFEV), plus de 18'000 antennes de téléphonie mobile en Suisse¹, un chiffre qui devrait rapidement augmen-

¹ Office fédéral de l'environnement (OFEV), « Téléphonie mobile - comment cela fonctionne-t-il? », consulté le 4 décembre 2019, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-elektrosmog/elektrosmog-und-licht-fachinformationen/elektrosmog-quellen/mobilfunk-als-elektrosmog-quelle/mobil-telefonieren---wie-funktioniert-das-0.html>.



La répartition géographique des plus de 18'000 antennes de téléphonie mobile présentes sur le territoire suisse.
Illustration réalisée en novembre 2019 à l'aide des geodonnées mises à disposition en ligne par l'OFEV.
[<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/etat/donnees/geodonnees.html>]

ter de manière importante avec le déploiement actuellement en cours des antennes destinées à la 5G, puisqu'environ 26'000 antennes relais supplémentaires sont prévues².

Il y a donc deux réalités à première vue difficilement conciliables. L'usage des technologies dépendantes de rayonnements électromagnétiques est totalement intégré dans notre vie quotidienne, mais en même temps, l'innocuité de ces rayonnements est toujours discutée, et les ondes inspirent une certaine méfiance. Est-il alors possible de limiter son exposition sans trop renoncer au cocon technologique dans lequel nous vivons ?

Un débat de longue date

L'impact potentiellement nocif des rayonnements non-ionisants est discuté depuis au moins 15 à 20 ans, avec la généralisation de la téléphonie mobile puis du wifi et d'autres modes de connexion sans fil. Des études conduisent notamment à des recommandations se basant sur le principe de précaution, surtout liées à des normes d'émission plus basses pour les antennes ou appareils³. Les effets potentiels sur la santé sont ainsi un sujet polém-

mique depuis de nombreuses années et il n'y aura probablement pas de réponse définitive sur la question avant longtemps, le sujet comprend en outre une grande composante psychologique.

Le rapport mandaté par le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) sur la téléphonie mobile et le rayonnement et publié en novembre 2019 dresse un état des connaissances concernant les effets sur la santé, relevant notamment les éléments décrits ci-après :

Dans un contexte de forte exposition, le rayonnement haute fréquence est suspecté de pouvoir causer des tumeurs et a été classé comme potentiellement cancérogène pour l'être humain par le centre international de recherche sur le cancer (CIRC) en 2011. Aucun lien n'a en revanche pu être établi entre l'exposition aux stations émettrices de téléphonie mobile, de radio ou de télévision et d'éventuelles tumeurs. Il est relevé qu'une série d'expériences montre que l'exposition aux ondes d'un téléphone mobile affecte les ondes cérébrales au repos et durant le sommeil. La qualité du sommeil ne semblant pas affectée, l'importance de ces effets sur la santé n'est pas claire.

² Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), « Rapport Téléphonie mobile et rayonnement », 18 novembre 2019.

³ Derek J Croome, *Electromagnetic Environments and Health in Buildings* (London: Spon Press, 2004)

Ondes électromagnétiques

L'exposition de l'être humain à des ondes électromagnétiques n'est pas un fait nouveau : La Terre dispose d'un champ électromagnétique basse fréquence propre, de même, la lumière du soleil constitue également un rayonnement électromagnétique. L'activité humaine, du transport d'électricité aux appareils connectés, a toutefois considérablement augmenté le registre des **champs électromagnétiques** (CEM) auxquels nous sommes exposés⁴, en particulier dans le domaine des ondes radio (**radiofréquences**) et des micro-ondes (cf. annexe I).

Les ondes électromagnétiques de **basse fréquences** sont typiquement liées au transport d'électricité ou aux moteurs électriques. On parle d'ondes de **haute fréquence** pour les émissions liées à la téléphonie mobile ou au wifi par exemple.

Le terme **électrosmog** est parfois utilisé pour désigner cet ensemble de CEM produits par l'homme. Le terme de **rayonnement non-ionisant** (RNI) désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques dont l'énergie n'est pas suffisante pour ioniser des molécules (contrairement aux rayons X ou aux rayons gamma par exemple) et est souvent utilisé pour désigner les CEM liés aux antennes relais de téléphonie mobile.

⁴ Frank M. Clegg et al., « Building Science and Radiofrequency Radiation: What Makes Smart and Healthy Buildings », Building and Environment, août 2019

Le cas des personnes électro-hypersensibles

Le concept d'hypersensibilité électromagnétique date des années 1980, quand, en Scandinavie notamment, des employés de bureau ont commencé à se plaindre de troubles qu'ils attribuaient au travail devant un écran d'ordinateur⁵.

Actuellement, les personnes qualifiées d'électro-hypersensibles attribuent à une exposition au rayonnement électromagnétique, qui peut être de haute fréquence ou de basse fréquence, les maux (fatigue, maux de tête, difficulté de concentration, problèmes de sommeil, dépression, etc.) qui les handicapent dans leur vie quotidienne. Ces situations, qui peuvent être très incapacitantes pour les personnes concernées, ne concernent toutefois de manière aiguë qu'une part assez faible de la population, mais ne sont pas anecdotiques. En Suisse, en 2004 déjà, environ 5% des personnes interrogées se déclaraient électrosensibles à un certain degré⁶.

Plus généralement, une exposition à long terme aux ondes électromagnétiques est suspectée de perturber le sommeil, de causer des fatigues ou des pertes de mémoire, cela en raison des interactions possibles entre les rayonnements pulsés

et le fonctionnement électrique de notre cerveau⁷. Ce n'est donc pas seulement la puissance de l'onde électromagnétique, mais également la forme du signal qui peuvent avoir un effet.

Certains experts considèrent dès lors que l'exposition continue à ces rayonnements constitue un stress environnemental qui peut, comme l'exposition à certains polluants ou à d'autres facteurs de stress, affecter la santé d'un individu⁸. Dans cette logique, on pourrait accumuler au fil du temps une certaine charge liée à l'exposition aux champs électromagnétiques qui peut s'avérer néfaste. Ce dernier point souligne l'intérêt potentiel de disposer de périodes durant lesquels notre corps n'est pas exposé aux ondes et peut se régénérer.

⁵ Office fédéral de l'environnement (OFEV), « Hypersensibilité électromagnétique. Evaluation d'études scientifiques. Etat fin 2011 », 2012.

⁶ Ibid.

⁷ Igor Belyaev et al., « EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses », *Reviews on Environmental Health* 31, no 3 (1 janvier 2016)

⁸ Ibid.

Quantifier le rayonnement

Il existe différentes unités de mesure pertinentes dans le domaine du rayonnement électromagnétique. Celles-ci sont utilisées lors de certifications de conformité en termes de santé et de sécurité (par exemple CE pour l'Europe) ou pour fixer des limites d'immissions due aux antennes. L'immission étant l'intensité de rayonnement dans une zone⁹.

Le taux d'absorption spécifique (TAS)

Il se mesure en Watts par kilogramme (W/kg) ou en milliwatts par gramme (mW/g) et permet de quantifier la dose d'énergie liée aux émissions d'une antenne absorbée par le corps.

La densité de puissance

Elle se mesure en milliwatts par centimètre carré (mW/cm²) et définit, en un endroit donné, l'exposition à la puissance d'une antenne (de téléphonie mobile ou wifi par exemple).

Le champ électrique

Il se mesure en Volts par mètre (V/m). Composante électrique du champ électromagnétique, il est notamment utilisé pour le caractériser et déterminer les puissances d'émission des antennes

L'ordonnance sur le rayonnement non-ionisant (ORNI) régit pour la suisse « la limitation des émissions des champs électriques et magnétiques générées par des installations stationnaires dans une gamme de fréquence allant de 0 Hz à 300 GHz »¹⁰ et fixe des valeurs limites d'immission pour les différentes fréquences en V/m.

⁹ Office fédéral de la santé publique (OFSP) et Office fédéral de l'environnement (OFEV), « Rayonnements et santé. La télécommunication mobile », s. d.

¹⁰ Recueil systématique du Droit fédéral, « RS 814.710 Ordonnance du 23 décembre 1999 sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) », consulté le 30 décembre 2019, <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19996141/index.html>.

Principe de précaution

Devant cette incertitude sur la dangerosité des ondes, l'ordonnance sur le rayonnement non ionisant (ORNI) fixe par exemple un niveau d'émission maximal pour une antenne de téléphonie mobile sur le territoire suisse. Cette décision, prise sur la base du principe de précaution fixe par ailleurs aux opérateurs suisses un cadre plus stricte en termes d'émission que dans l'Union européenne ou en Amérique du Nord. Le nouveau rapport suisse paru dans le cadre de la mise en place de la technologie 5G¹¹ se situe également dans ce débat sur l'émission maximale que l'on peut admettre de la part des antennes en respectant un principe de précaution. La limitation de la puissance des antennes a par ailleurs un autre effet sur le rayonnement dans l'environnement extérieur, qui est d'augmenter le nombre d'antennes nécessaire pour fournir une bonne couverture du territoire.

Si le principe de précaution a dicté un cadre normatif en ce qui concerne les puissances d'émission maximales autorisées par les antennes et les appareils connectés, il peut sans doute aussi être vu à d'autres niveaux. D'une part, le comportement individuel de chacun vis-à-vis de

l'utilisation d'appareils connectés joue un rôle évident dans l'exposition aux ondes; mais d'autre part, la possibilité d'avoir accès à des environnements où l'exposition à l'électrosmog est réduite devrait aussi être pris en compte.

Dans les lignes directrices proposées par l'Académie européenne pour la médecine environnementale (EUROPAEM)¹², une des recommandations principales est de réduire ou éviter l'exposition aux ondes électromagnétiques dans les espaces où l'on passe beaucoup de temps, en particulier ceux dédiés au sommeil. Cette notion d'espace débarrassé d'ondes, parfois qualifié de zone blanche, et dans lequel le corps pourrait en quelque sorte se ressourcer, est repris dans d'autres publications¹³ qui proposent ces coupures dans les expositions aux ondes dans la journée et, à minima, durant la nuit. Cet aspect du principe de précaution est encore plus important quand il concerne des enfants.

¹¹ DETEC, op. cit.

¹² Belyaev et al., op. cit.

¹³ Frank M. Clegg et al., « Building Science and Radiofrequency Radiation: What Makes Smart and Healthy Buildings », Building and Environment, août 2019



Les sept groupes de facteurs définissant un climat intérieur sain selon l'association eco-bau. Illustration provenant d'une fiche réalisée par l'Office fédéral de la santé publique et eco-bau (durabilité et constructions publiques).

[<https://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=21&ID=17>]

La question de l'environnement intérieur sain

Une faible présence des champs électromagnétique ainsi qu'idéalement la capacité de limiter ou contrôler son exposition aux ondes peut être vue comme un aspect du confort intérieur. On peut considérer une faible exposition au rayonnement comme une question de santé, au même titre par exemple que la limitation de l'exposition au bruit ou que la qualité de l'air intérieur face aux polluants ou divers composés organiques volatiles pouvant être libérés par les matériaux de construction ou le mobilier.

Une certaine prise en compte de cet aspect existe déjà dans la définition d'un climat intérieur sain selon l'association eco-bau. Cette prise en compte trouve une application dans la norme de construction Minergie éco. En effet, outre les considérations liées à l'efficacité énergétique, ce label concerne également les questions de santé (lumière du jour, protection contre le bruit et climat intérieur) ainsi que l'écologie du bâtiment (concept, matériaux et processus de construction, énergie grise des matériaux)¹⁴. La certification étant attribuée si la moyenne combinée de l'appréciation de ces six critères est suffisante.

La prise en compte de l'électrosmog est donc un des facteurs composant le climat intérieur sain. Les recommandations dans ce domaine sont en premier lieu un éloignement des sources de rayonnement afin d'en limiter l'intensité. Cela peut prendre en compte les sources extérieures au bâtiment, par exemple en s'assurant que les constructions soient suffisamment éloignées des lignes électriques aériennes à haute tension et également les sources intérieures, en assurant une certaine distance entre le câblage électrique et les espaces où les personnes séjournent régulièrement.

¹⁴ « eco-bau / Thèmes / Climat intérieur sain », consulté le 2 janvier 2020, <https://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=21&ID=17>.

L'association Minergie

Minergie est une marque déposée. Le concept du label à été imaginé en 1994, à l'occasion de la construction de deux premières maisons, par Rudi Krisi, à l'époque directeur du département de l'énergie du canton de Zurich, et Heinz Uebersax¹⁵. La marque Minergie a été reprise en 1997 par les cantons de Zurich et Berne et l'association Minergie a été fondée un an plus tard. La marque est actuellement soutenue par les acteurs économiques, les cantons et la Confédération.

Le label Minergie vise à certifier des bâtiments présentant des besoins très faibles en énergie, que ce soit pour des constructions neuves ou des rénovations. Ceci avec un accent mis sur le confort, de par la qualité de l'enveloppe et un renouvellement systématique de l'air¹⁶.

Le label Minergie-eco

Le label Minergie-eco a été imaginé en lien avec l'association éco-bau qui regroupe des collectivités locales, des institutions de formation et des fédérations représentatives du domaine de la construction, et dont le but est de promouvoir la construction écologique et saine.

Ce label supplémentaire règle les questions de la santé et de l'écologie de la construction et présuppose le respect des exigences du label Minergie (ou Minergie-P, Minergie-A)¹⁷.

Le climat intérieur sain est vu par éco-bau à travers sept groupes de facteurs principaux. Le rayonnement étant l'un d'entre eux.

¹⁵ « Histoire de l'association », MINERGIE Schweiz, consulté le 29 décembre 2019, <https://www.minergie.ch/fr/histoire-de-l-association/>.

¹⁶ « En bref », MINERGIE Schweiz, consulté le 29 décembre 2019, <https://www.minergie.ch/fr/a-propos-de-minergie/en-bref/>.

¹⁷ Severin Lenel et Sandra Aeberhard, « Une construction saine, Bâtiments écologiques selon Minergie-ECO » (Minergie Suisse, Association éco-bau, s. d.).

Les moyens de protection locaux contre les ondes existent

Il existe actuellement sur le marché de nombreux moyens de se protéger relativement efficacement de l'électrosmog. Ce marché du blindage contre le rayonnement électromagnétique comprend d'ailleurs également une dimension sécuritaire, liée à l'enjeu de la protection des données informatiques sensibles par exemple. Ces solutions de protection peuvent concerner l'ensemble de l'enveloppe du bâtiment ou être plus localisées, en protégeant une pièce contre la pénétration des ondes électromagnétiques par l'application d'un revêtement comprenant du métal ou d'une peinture conductrice par exemple.

Les réalisations de protection sont souvent des initiatives de particuliers cherchant à isoler une partie de leur logement, et sont donc des ajouts sur une construction existante. Il existe encore peu d'exemples où la protection contre l'électrosmog fait partie intégrante du design du bâtiment. Quelques logements ont néanmoins été construits dans l'intention de répondre aux demandes particulières des personnes électro-hypersensibles.

Les possibilités de protection peuvent être vues selon leurs différents degrés d'intégration au bâtiment. Dans cette logique, on peut placer en premier lieu les isolants appliqués à posteriori, sur un mur ou sur toutes les faces d'une pièce. Il s'agit dans ces cas de peintures spéciales, de films en aluminium ou d'enduits contenant des éléments conducteurs. A un niveau d'intégration plus poussé dans le bâtiment, on trouve par exemple des éléments utilisés lors de la construction, tels que des treillis métalliques incorporés dans le crépi de façade. Il existe aussi des panneaux composites, à base par exemple de bois ou de plâtre et contenant une couche conductrice qui peut être métallique ou en graphite. Finalement, un certain degré de protection peut être apporté directement par le matériau de construction choisi (cf. capacité d'atténuation du rayonnement par différents matériaux en annexe III).

Si les fenêtres classiques n'offrent quasiment aucune protection, les vitrages basse émissivité (low-E), possédant un enduit bloquant destiné à bloquer les émissions dans les infrarouges, permettent également de bloquer le rayonnement haute fréquence.

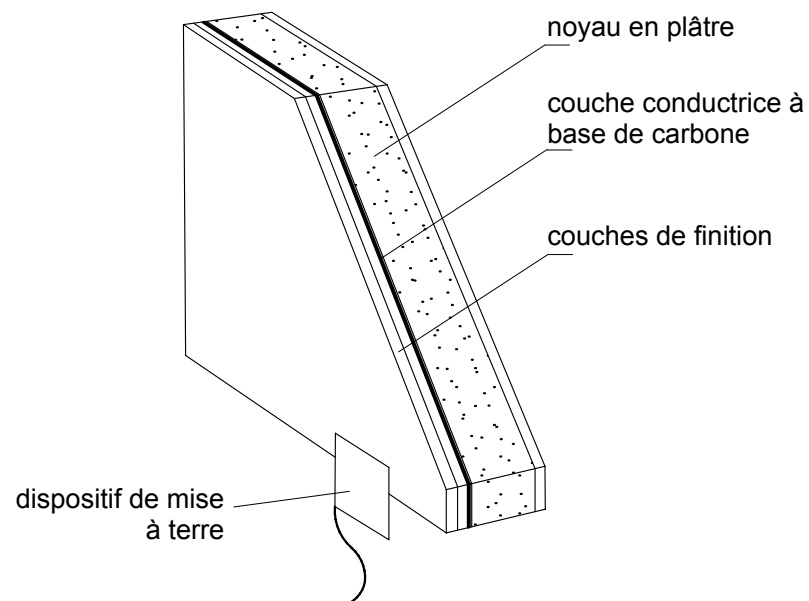


Illustration de principe d'un panneau composite conçu pour bloquer le rayonnement électromagnétique.

Dessin : adapté d'après les descriptions de produits proposés par la firme BAUFRTZ
[\[https://www.baufritz.com/de/gesundheit-und-baubiologie/elektrosmogschutz/\]](https://www.baufritz.com/de/gesundheit-und-baubiologie/elektrosmogschutz/)

Atténuation par réflexion ou par absorption des ondes

Une autre distinction doit être faite entre les matériaux qui protègent des ondes électromagnétiques en les réfléchissant, et les matériaux qui absorbent le rayonnement¹⁸. En effet les dispositifs utilisant des matériaux conducteurs réfléchissent les ondes et forment des espaces protégés selon le principe de la cage de Faraday. Cela signifie aussi que ces dispositifs doivent disposer d'une mise à terre (cf. annexe II). Dans d'autres situations, une atténuation du rayonnement peut se faire par absorption d'une partie des ondes par le matériau qu'elles traversent. L'atténuation est dans ce cas proportionnelle à l'épaisseur du matériau et dépend aussi de la longueur d'onde du rayonnement, les hautes fréquences (de longueur d'onde plus courte) étant beaucoup plus facilement absorbées. Le type de matériau ainsi que sa teneur en humidité joue aussi un rôle : le bois est assez faiblement absorbant, le béton est plus efficace frais que sec, et les murs à base d'argile ou de terre crue présentent une bonne absorbance. Ainsi un mur en brique de terre crue pourrait par exemple atténuer fortement les ondes d'un réseau wifi (2,4 ou 5 GHz), mais n'a pratiquement aucun effet sur un rayonnement basse fréquence.

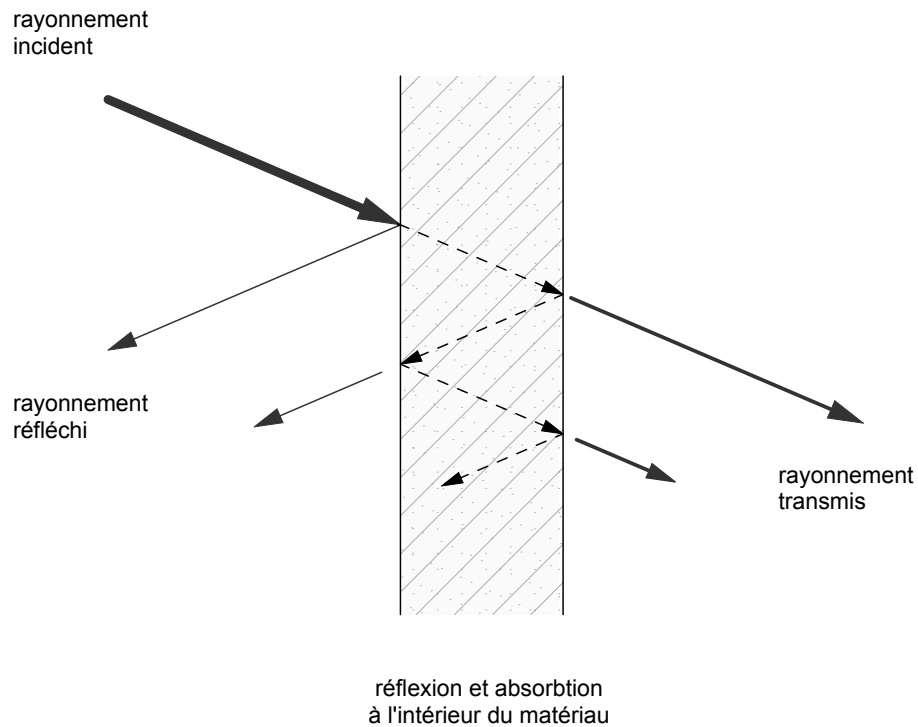
Les enduits et crépis conducteurs et les peintures combinent réflexion des ondes et une certaine proportion d'absorption. Certaines peintures annoncent par exemple 15% de la protection par absorption du rayonnement¹⁹.

S'il est donc plus évident de créer un espace totalement protégé des ondes à l'aide de matériaux réfléchissants, selon le principe de la cage de Faraday, ceux-ci n'éliminent par contre pas la présence de l'électrosmog dans le voisinage et peuvent au contraire, suivant les angles de réflexion des ondes, augmenter l'exposition au rayonnement à proximité. Au niveau des matériaux, la faculté à absorber les ondes plutôt que de les réfléchir offre de clairs avantages en matière de protection et devrait être une approche privilégiée²⁰.

¹⁸ Peter Pauli et Dietrich Moldan, Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen: Baustoffe und Abschirmmaterialien, 3. Auflage, EMV-Themen des VDB, 4. Band (Fürth: AnBUS e.V, 2015).

¹⁹ Allen Cheney, « Shielding Paint T98 », GEOVITAL Academy - Academy for Radiation Protection and Environmental Medicine, consulté le 31 décembre 2019, <https://en.geovital.com/products/electronic-pollution/shielding-paint-t98alpha/>.

²⁰ Clegg et al., op. cit., p.28



Le principe d'absorption et réflexion du rayonnement par un matériau.
 Dessin : adapté, d'après Pauli et Moldan²¹

²¹ Pauli et Moldan, op. cit. (chapitre 4)

**Des logements spécifiques pour
les personnes électrosensibles
ont déjà été construits**

La question de la protection contre les ondes électromagnétiques a déjà débouché sur de multiples initiatives en matière de logement. La réponse face à cette problématique peut être de s'éloigner le plus possible des sources de rayonnement, de chercher à s'en protéger par un « blindage », ou une combinaison de ces deux approches.

S'il existe déjà un certain nombre de logements conçus spécifiquement en intégrant la problématique des ondes électromagnétiques, ces bâtiments sont en général pensés pour les personnes fortement touchées par des symptômes d'électro-hypersensibilité et constituent donc une sorte d'environnement protégé pour ces personnes qui ne peuvent plus vivre normalement dans leur logement habituel, exposé à un rayonnement. En outre, la question de l'électrosmog est en général couplée à celle de l'hypersensibilité chimique multiple (HCM).

La construction de ce genre de logement misant en général également sur une logique d'éloignement des sources principales de champs électromagnétiques dans le territoire (lignes à haute tension, voies de chemin de fer ou antennes relais), cela conduit à les éloigner des centres et limite les choix d'implantation parmi les parcelles disponibles.

L'hypersensibilité chimique multiple

Quelques 5000 personnes souffriraient en Suisse d'hypersensibilité chimique multiple (HCM, mais on peut noter que l'acronyme anglais MCS, pour Multiple Chemical Sensitivity, est souvent utilisé)²².

L'organisation d'entraide suisse sur l'hypersensibilité chimique multiple décrit l'HCM comme « Une réaction de tout le système nerveux à des doses infimes de polluants. La maladie se déclare suite à une exposition unique ou prolongée à un ou à une combinaison de plusieurs agents chimiques »²³.

La personne souffrant de ces symptômes se voit contrainte de modifier son comportement quotidien afin de limiter l'exposition à des «polluants» potentiels, d'où une attention également portée à la qualité de l'air intérieur du logement.

Parmi les produits pouvant déclencher les syndromes d'HCM, on trouve :

- Les diluants
- Les pesticides
- Les parfums
- Les détergents et produits de nettoyage
- La fumée de tabac
- Le smog
- L'ozone

²² Ariane Gigon, « une allergie à de nombreux matériaux très courants. Une maison a été bâtie à leur intention. », LA LIBERTE, 6 novembre 2013.

²³ « Association MCS-SOS | Hypersensibilité Chimique Multiple », consulté le 1 janvier 2020, <https://mcs-sos.ch/?lang=fr>.

Des logements individuels et à l'écart des agglomérations

Il existe probablement un nombre assez important de logements individuels isolés contre les ondes. Cette isolation peut être faite à posteriori sur des maisons existantes. Il existe aussi un enjeu, du moins dans le contexte nord-américain²⁴, dans la prise en compte de l'électrosmog émis par des installations électriques de mauvaise qualité lors de la rénovation de logements existants.

Toujours en Amérique du Nord, il existe aussi plusieurs cas d'ensembles de logements conçus avec l'intention spécifique de répondre aux besoins des personnes souffrant d'HCM ainsi que d'apporter une protection contre les champs électromagnétiques.

Des projets de ce type ont été développés sur base d'une initiative publique en Californie et en Arizona²⁵. Un groupe de dix logements a également été construit dans une zone rurale en périphérie de Dallas²⁶. La protection contre les ondes extérieures est dans ce dernier cas assurée principalement par une fine couche continue

d'aluminium intégrée à l'enveloppe. Tous ces exemples sont dans une logique de logements pavillonnaires, éloignés des concentrations urbaines et installés sur des sites peu pollués.

Peu d'immeubles d'appartements intégrant ces préoccupations

Au niveau des immeubles comprenant plusieurs logements, il existe apparemment peu d'exemples de bâtiments dont la conception prendrait en compte la protection contre les ondes électromagnétiques.

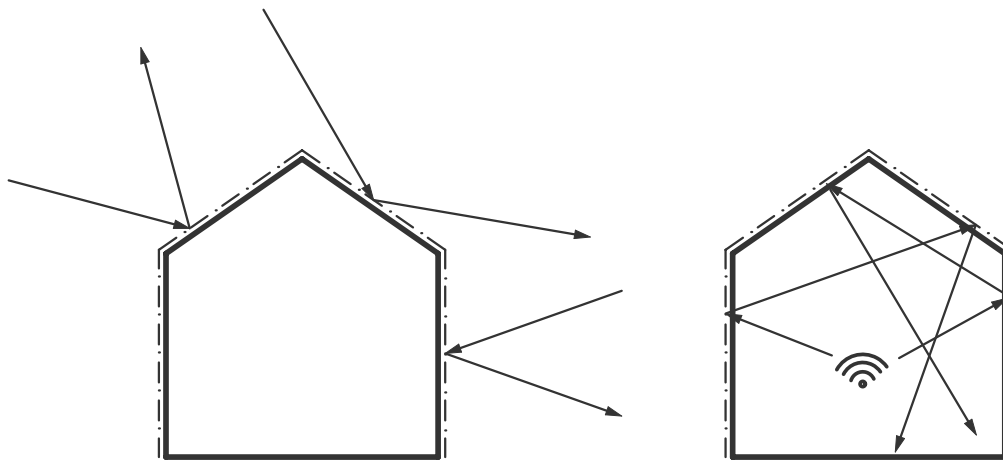
En Suède, un immeuble a été construit en 1996 dans la banlieue d'Uppsala, en prévoyant certains appartements spécifiquement conçus pour les personnes électrosensibles²⁷. Les aménagements réalisés dans ces appartements consistent principalement à éviter l'émission d'électrosmog en blindant les installations électriques et en éloignant des installations techniques les moteurs sources d'ondes. Les lumières à base d'ampoules fluorescentes ont également été évitées.

²⁴ Russell Richman, Alan James Munroe, et Yasmeen Siddiqui, « A Pilot Neighborhood Study towards Establishing a Benchmark for Reducing Electromagnetic Field Levels within Single Family Residential Dwellings », *Science of The Total Environment* 466-467 (janvier 2014): 625-34.

²⁵ « Arizona Public Housing Project », consulté le 5 novembre 2019, <http://www.eiwellspring.org/multiunit/AZPublicHousingProject.htm>.

²⁶ « Ten Texas Cottages », consulté le 4 décembre 2019, <http://www.eiwellspring.org/multiunit/TenTexasCottages.htm>.

²⁷ « Haubitsen Environmental Housing Project », consulté le 5 novembre 2019, <http://www.eiwellspring.org/multiunit/Haubitsen.htm>.



Les espaces isolés des champs électromagnétiques par réflexion des ondes.
Les éventuelles ondes émises à l'intérieur de ces espaces y demeurent piégées,
entraînant une exposition plus forte au rayonnement.
Dessin : L. Fleischner

Un immeuble pour les personnes hypersensibles à Zurich

Un immeuble locatif réalisé plus récemment à Zurich est bien documenté en la matière. Il s'agit d'un projet qui part d'une démarche privée et qui a été soutenue par la ville de Zurich, notamment pour l'acquisition du terrain. L'implantation de l'immeuble a été étudié avec soin, il est situé en bordure d'un quartier résidentiel surplombant le lac, en lisière de forêt, mais toutefois à seulement quatre kilomètres du centre-ville.

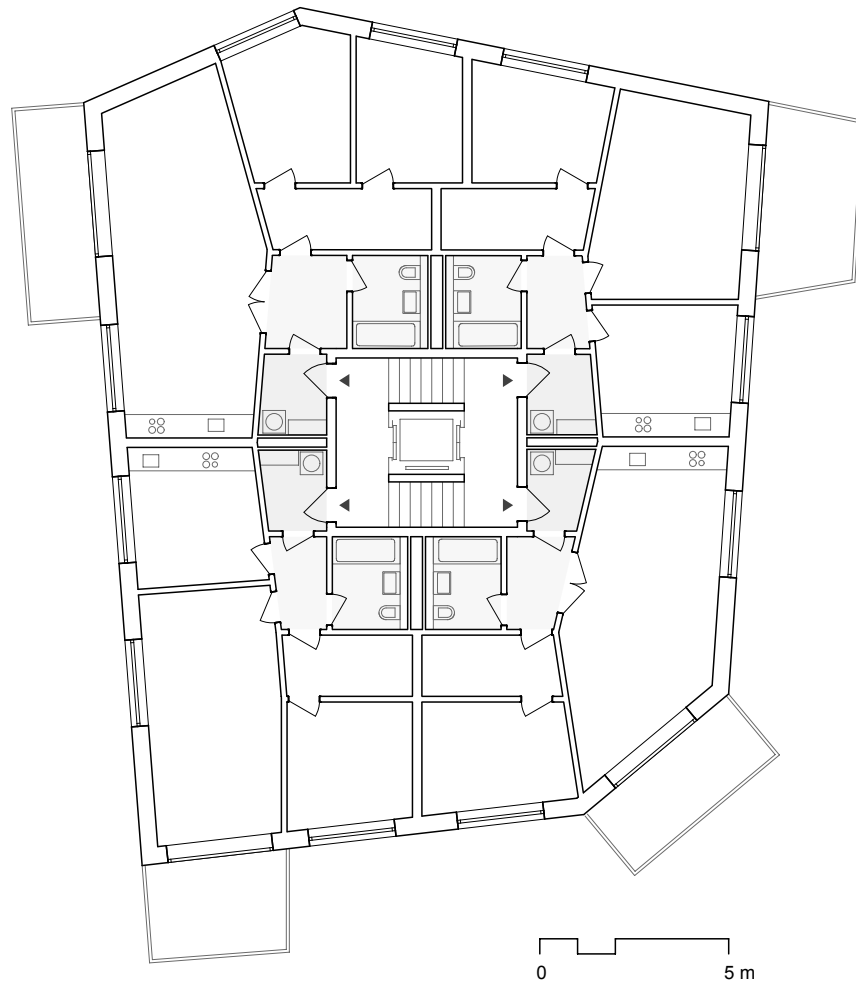
Il s'agit d'une construction qui s'adresse à nouveau en premier lieu aux besoins des personnes souffrant d'HCM, mais qui prévoit également une protection contre l'électrosmog. Cette protection est assurée principalement par un blindage au niveau de l'enveloppe (le treillis servant d'armature au crépi extérieur de la façade est spécifiquement prévu pour l'atténuation des ondes)²⁸.

L'immeuble fonctionnant avec une logique de coopérative, cela permet aussi de fixer des règles sur l'usage d'appareils produisant des ondes dans l'immeuble (le règlement d'habitation interdit le port de parfum, la fumée et le wifi).

Ce bâtiment est par ailleurs un exemple de conception prenant en compte les besoins très spécifiques des futurs habitants. En plus d'une attention particulière pour éviter les sources de composés volatiles (enduits, etc.), les choix de matériaux utilisés ont été faits en collaboration avec des personnes souffrant d'HCM, invitées à donner leur appréciation, en testant différents échantillons de matériaux. De plus le plan est aussi pensé en conséquence, puisque chaque appartement dispose d'un sas immédiatement après l'entrée, équipé d'un lave-linge et à proximité de la salle de bain. Cet espace tampon permet d'éviter d'apporter dans le logement des polluants chimiques venant de l'extérieur.

On peut encore noter que cette construction, considérée comme un projet pilote est jugée concluante et que la coopérative de logement à but non lucratif Gesundes Wohnen MCS espère pouvoir réaliser d'autres immeubles de ce type.

²⁸ « Gesundes Wohnen - | Produkte », consulté le 1 janvier 2020, <http://www.gesundes-wohnen-mcs.ch/pilotprojekt/produkte.html>.



Immeuble construit par la coopérative de logement Gesundes wohnen MCS à Zurich,
 plan de l'étage-type. Architecte : A. Zimmerman, 2010-2013
 Dessin : sur la base des plans publiés dans *hochparterre wettbewerb*, 5/2010

Un projet à Schmitten

Trois immeubles sont prévus à Schmitten, dans le canton de Fribourg. Ils s'agit cette fois-ci d'appartements spécifiquement destinés aux personnes électro-hypersensibles, qui ont d'ailleurs suscité un certain intérêt auprès des médias^{29,30}, et de ce fait également attiré rapidement des sollicitations d'un certain nombre de personnes désireuses de trouver un logement dans ces futurs immeubles, bien que ceux-ci soient encore au stade de la mise à l'enquête. Ceci montre qu'il y a bien une certaine demande pour ce type de résidences.

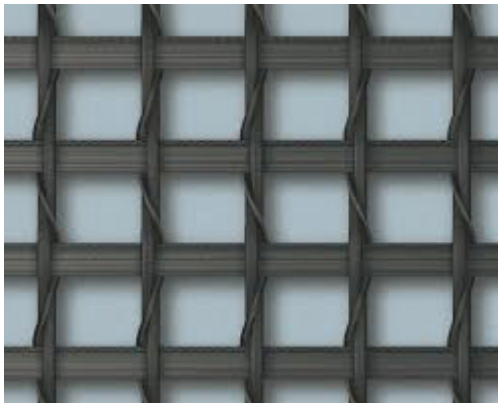
Une grande attention a été portée au choix du site, cherchant à ne pas être trop isolé, mais sans sources d'ondes à proximité immédiate (voie de chemin de fer ou antennes relais). On retrouve là une dimension psychologique, car avoir connaissance d'une antenne, surtout visible, à proximité peut suffire à dissuader les personnes souffrant d'hypersensibilité au rayonnement électromagnétique de s'installer dans l'immeuble.

Il est prévu que ces immeubles reprennent la même solution que dans le projet pilote de Zurich pour ce qui est de l'isolation de l'enveloppe contre les ondes. De plus, chaque appartement sera isolé, par une peinture au graphite atténuant le rayonnement électromagnétique, pour éviter une éventuelle perturbation des voisins si un locataire venait à décider d'installer malgré tout un réseau sans fil chez lui par exemple³¹. Les installations électriques ont été pensées en conséquence, avec une distribution la plus directe possible pour minimiser le linéaire de câble, des câbles blindés et des interrupteurs spéciaux permettant de couper totalement le courant lorsqu'il n'est pas sollicité. Parmi les autres adaptations particulières, figure encore le besoin de démagnétiser les armatures des dalles en béton ou l'isolation des colonnes de lavage quand celles-ci sont situées à proximité d'une chambre par des plaques en un alliage particulier (mu-métal) pouvant bloquer les ondes basse fréquence.

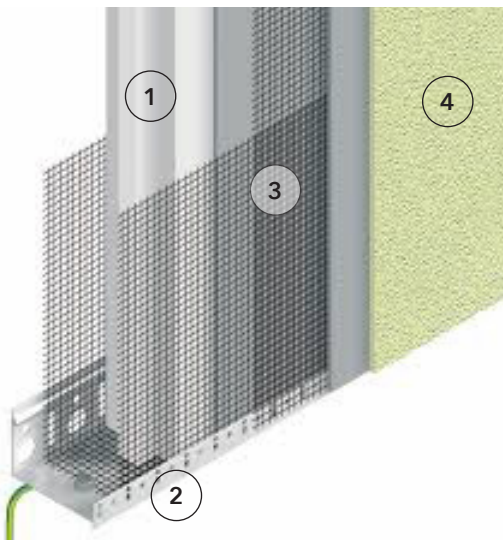
²⁹ « Blindées, isolées, des maisons se révent en havres pour électrosensibles », infoSport, rts.ch, 16 février 2019, <https://www.rts.ch/info/sciences-tech/10218405-blindees-isolees-des-maisons-se-revent-en-havres-pour-electrosensibles.html>.

³⁰ « Habiter à l'abri des ondes », consulté le 1 janvier 2020, <https://www.laliberte.ch/news/regions/canton/habiter-a-l-abri-des-ondes-471388>.

³¹ Gédéon Abebe, Discussion sur la conception de logements pour personnes électro-hypersensibles par le bureau d'architectes aaag, 4 octobre 2019.



Détail d'un treillis d'armature de crépi en fibre de verre dans lequel à été incorporé des fils métallique.



- 1 - Panneau d'isolation
- 2 - Rail conducteur avec dispositif de mise à terre
- 3 - Treillis, maille 4 x 4 mm, recouvrement de 10 cm sur les joints
- 4 - Crépi de finition

Dispositif de protection contre les champs électromagnétiques par un treillis conducteur sous le crépi de la façade. Illustrations provenant de la fiche technique du produit Abschirmgewebe AES, du fabricant Sto.

Légende adaptée de l'allemand.

[https://www.stoag.ch/media/documents/download_broschuere/pdf_fr_/fassade_5/Sto-Abschirmgewebe_AES_De_Web.pdf]

L'intégration de la protection contre les ondes peut avoir une influence sur la composition du plan

Si quelques rares tentatives ont été faites pour apporter une réponse aux attentes particulières des personnes électrosensibles en termes de logement, la problématique de l'isolation contre les ondes ne semble pas s'être étendue à un public plus large. On peut toutefois imaginer, qu'il y a une place pour une réflexion au niveau du design du bâtiment dans des situations plus communes que ces offres de logement très spécifique. La question est donc de savoir si la prise en compte d'une protection contre les ondes électromagnétiques lors de la conception du bâtiment peut amener un plus tangible par rapport à des interventions individuelles effectuées dans le logement à posteriori. Ces solutions devraient donc être différentes. Si les personnes souffrant de symptômes d'hypersensibilité aux ondes cherchent un logement totalement protégé, le reste de la population, même sensibilisée à la question, n'est probablement pas prête à renoncer à toute possibilité de connexion sans fil pour habiter dans des logements isolés des ondes.

Une proposition de prise en compte des ondes électromagnétiques, qui veut s'adresser à une portion plus large de la population doit donc admettre la présence d'ondes et d'appareils connectés, au moins par moments, dans le logement, mais en même temps, doit permettre aux résidents de mieux gérer leur exposition à l'électrosmog. L'enveloppe du bâtiment doit donc être par endroits perméable aux ondes des réseaux de téléphonie mobile et il faut également admettre la présence d'un certain nombre de sources internes au logement, comme par exemple le wifi ou les bases des téléphones « fixes ».

De plus, les bâtiments ont une durée de vie très longue en regard du rythme de l'évolution des technologies. Il est donc difficile de se focaliser sur une technologie en particulier. Les logements à concevoir doivent donc être à même de répondre aux souhaits et exigences de différentes habitants, ayant un usage diversifié des appareils connectés.

Zones blanches

Relativement générique et employée dans différents contextes, l'expression « zone blanche » est souvent utilisée, dans le monde francophone, pour désigner des portions de territoire qui seraient exemptes de rayonnement non-ionisant. Plusieurs associations, comme par exemple le Criirem (Centre de recherche et d'information indépendantes sur les rayonnements électromagnétiques) cherchent à promouvoir la création de telles zones³², vues notamment comme un refuge pour les personnes les plus touchées par des symptômes d'électro-hypersensibilité.

L'expression zone blanche est ici reprise pour désigner les parties du logement qui ne seraient pas ou que très peu soumises à un rayonnement. Selon le contexte dans lequel se trouve le logement, ces zones blanches pourraient se limiter à bloquer les champs magnétiques haute fréquence, principalement dus aux réseaux wifi, téléphones mobiles et autres dispositifs connectés; ou chercher à bloquer tout champ magnétique, haute et basse fréquence. Cette dernière approche demandant de recourir à des dispositifs spécifiques de réflexion des ondes.

³² « Electrosensibilité - électrosensibles- Criirem », criirem.org, consulté le 3 janvier 2020, <https://www.criirem.org/electrosensibles>.

Une prise en compte des ondes dans le design du bâtiment

Une certaine généralisation de la prise en compte des ondes électromagnétiques dans les logements, comme faisant part du sujet plus large de l'environnement intérieur sain, implique la prise en compte de plusieurs aspects.

Une première mesure, déjà mentionnée dans la description des logements pour électro-hypersensibles, consiste à protéger les installations électriques contre les émissions électromagnétiques liées au transport du courant. Cette mesure technique impacte à priori assez peu la conception de l'immeuble et le plan du logement.

Concrètement, la principale mesure qui apporte un changement par rapport à des logements classiques est celle qui consiste à créer certains espaces spécifiquement isolés des ondes. On peut imaginer que ces zones blanches aient des ampleurs diverses, le choix le plus évident étant d'isoler les chambres à coucher, reprenant ainsi les recommandations d'éviter au moins l'exposition aux ondes durant le sommeil³³.

Un autre élément important, qui se situe plus au niveau des choix constructifs, est de chercher à mettre en œuvre au mieux ces intentions et à éviter les effets contre-productifs que pourraient avoir certaines mesures. Ces situations où les mesures mises en place auraient des effets indésirables sont assez faciles à imaginer. En effet une mauvaise réception du signal de téléphonie mobile, car fortement atténué par l'enveloppe de bâtiment, entraîne par exemple une exposition plus importante pour l'utilisateur si le téléphone doit émettre plus fortement pour se connecter au réseau. De même, l'isolation d'un espace contre les ondes, par réflexion de celles-ci, peut entraîner une augmentation des ondes dans l'espace adjacent. Pour éviter ces situations, il faut proposer une séparation claire des espaces isolés des rayonnements. Séparation qui peut être faite à l'aide de matériaux pouvant absorber le rayonnement à l'intérieur du logement.

³³ Belyaev et al., « EUROPAEM EMF Guideline », op. cit.

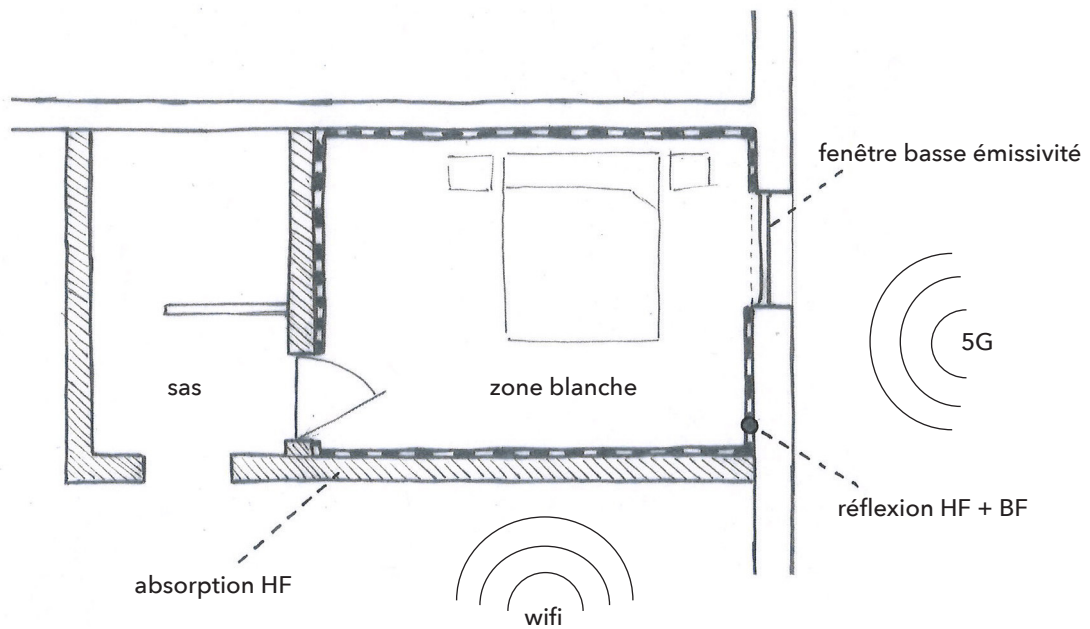


Schéma de principe montrant l'isolation d'une pièce contre les ondes, avec l'utilisation d'une cloison massive pour absorber une partie des ondes réfléchies.
Dessin : L. Fleischner

L'enveloppe du bâtiment

Il est possible pour l'enveloppe du bâtiment de contribuer à l'atténuation de la pénétration des ondes dans le logement, c'est d'ailleurs le cas dans une certaine mesure pour la plupart des bâtiments, en particulier ceux composés d'une façade relativement massive en béton ou en maçonnerie. Le pisé ou la terre crue de manière générale, parmi d'autres qualités en lien avec la physique du bâtiment telles que la régulation de l'hygrométrie ou une bonne inertie thermique, présentent un intérêt potentiel de par leur capacité d'absorption des ondes. Cet élément a par ailleurs déjà été évoqué par certains promoteurs de ce mode de construction³⁴.

Dans les constructions réalisées pour les personnes électro-hypersensibles, le parti pris est de considérer toute l'enveloppe comme une protection réfléchissant les ondes. Une approche différente doit être prise si l'on cherche à isoler seulement certaines zones du bâtiment, si le parti est que les ondes doivent pouvoir pénétrer dans certains espaces. La couche de protection contre le rayonnement est plutôt à imaginer plus à l'intérieur du logement, délimitant les zones blanches. Une partie de façade peut toutefois conserver une

fonction d'atténuation du rayonnement par absorbance. La façade est alors à penser comme une alternance de portions qui peuvent être très ouvertes, par exemple des parties de séjour principalement vitrées, et de portions plus fermées, massives, qui abritent les zones isolées. Pour ces parties de façade isolées, des fenêtres en aluminium équipées de vitrages à basse à basse émissivité thermique constituent une bonne barrière contre le rayonnement haute fréquence.

Il peut y avoir un enjeu sur la question d'une complémentarité ou d'éventuelles contradictions avec des aspects de la physique du bâtiment, comme la gestion des gains thermiques ou de la luminosité. Cela par exemple en fonction de l'orientation du bâtiment et de la position des zones blanches. Il faut que la façade conçue en fonction de la protection contre les rayonnements soit en adéquation avec la façade qui serait conçue selon ces critères de physique du bâtiment. Cela dans le but de garder une cohérence dans l'approche visant à garantir la qualité de l'environnement intérieur.

³⁴ Gernot Minke, *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture* (Birkhauser, 2006), p.35.

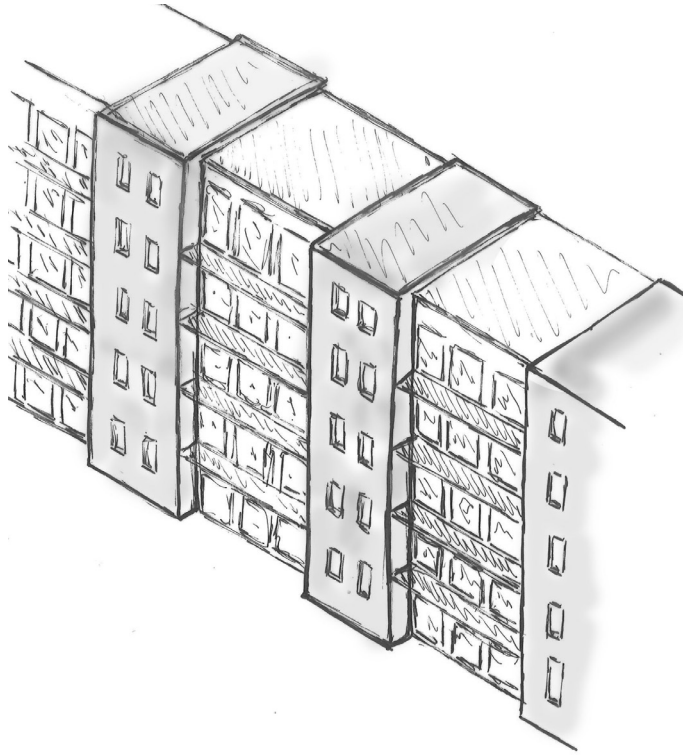


Schéma de principe montrant une alternance de zones protégées et d'éléments plus ouverts dans l'enveloppe.
Dessin : L. Fleischner

Isoler des espaces

Afin de créer ces zones blanches, il existe des possibilités techniques et des matériaux qui rendent possible une atténuation du rayonnement conséquente, de l'ordre de plusieurs dizaines de dB (cf. annexe III).

Le niveau d'isolation contre le rayonnement à atteindre peut faire l'objet de discussion. Le simple fait de décider quelles sont les zones où l'on ne veut pas de rayonnement et de les séparer à l'aide de cloisons plus massives que des cloisons en plaque de plâtre standard doit déjà contribuer à limiter l'exposition. Si l'on veut créer des espaces où les ondes hautes et basses fréquences sont très fortement réduites, il faut alors sans doute utiliser un dispositif formé de matériaux conducteurs et disposant d'une mise à terre. Si le blindage contre le rayonnement électromagnétique se fait par des matériaux réfléchissants, l'ajout de matériaux absorbants devrait permettre d'éviter une augmentation des ondes (par rebond contre les zones blindées) dans les espaces se trouvant entre ces zones protégées.

Une bonne option pour créer cette protection pour être de combiner des murs intérieurs en brique crues, qui permettraient d'absorber une partie du rayonnement haute fréquence avec un enduit conducteur à base d'argile et de particules de graphite qui assurerait la protection complète en bloquant les hautes et basse fréquence. En disposant l'enduit sur l'intérieur de la zone blanche, on s'assure que le rayonnement haute fréquence venant des espaces voisins et qui serait réfléchi par cette couche soit par la suite atténué par la cloison de brique.

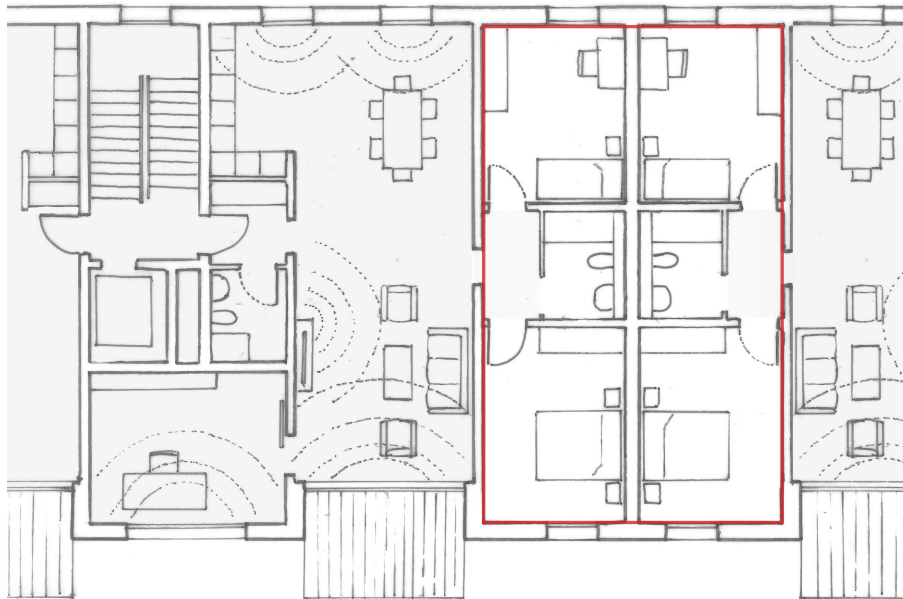


Illustration du principe création de zones blanches sur un exemple de typologie d'appartement relativement standard.

Dessin : adaptation de plans figurant dans le recueil Floor Plan Manual.

[Zürich. 2017. *Floor Plan Manual: 62 Architectural Competitions for Non-Profit Housing*. Édité par Jeremy Hoskyn. English edition. Zürich: Hochparterre.]

La création de ces espaces implique forcément quelques limitations. L'isolation contre les ondes extérieures n'est par exemple plus complète avec une fenêtre grande ouverte, ou alors, elle doit être combinée avec des volets ou des rideaux spéciaux contenant un tressage métallique faisant écran aux ondes. Comme pour les logements spécifiquement destinés aux électro-hypersensibles, à l'intérieur d'un espace protégé contre les ondes, on s'expose à un rayonnement plus important si on tente malgré tout d'utiliser un appareil connecté. L'exposition au rayonnement peut ainsi être jusqu'à quatre fois supérieur en cas d'utilisation de téléphone mobile dans espace isolé des ondes où la connection est très mauvaise³⁵. Idéalement, il ne faudrait pas d'appareil électronique branché en permanence dans ces espaces.

Un regroupement des chambres à coucher d'un appartement, de préférence avec un sas, peut donc constituer une zone blanche. La présence d'un sas permet que les portes des chambres, qui peuvent constituer un point de faiblesse dans le dispositif de protection, ne donnent pas immédiatement sur l'espace exposé aux ondes. Un bon fonctionnement de ce principe implique alors de répliquer la même distribution des espaces d'un étage à l'autre dans l'immeuble, afin de garder une continuité dans les zones protégées.

³⁵ Clegg et al., op. cit., p.29

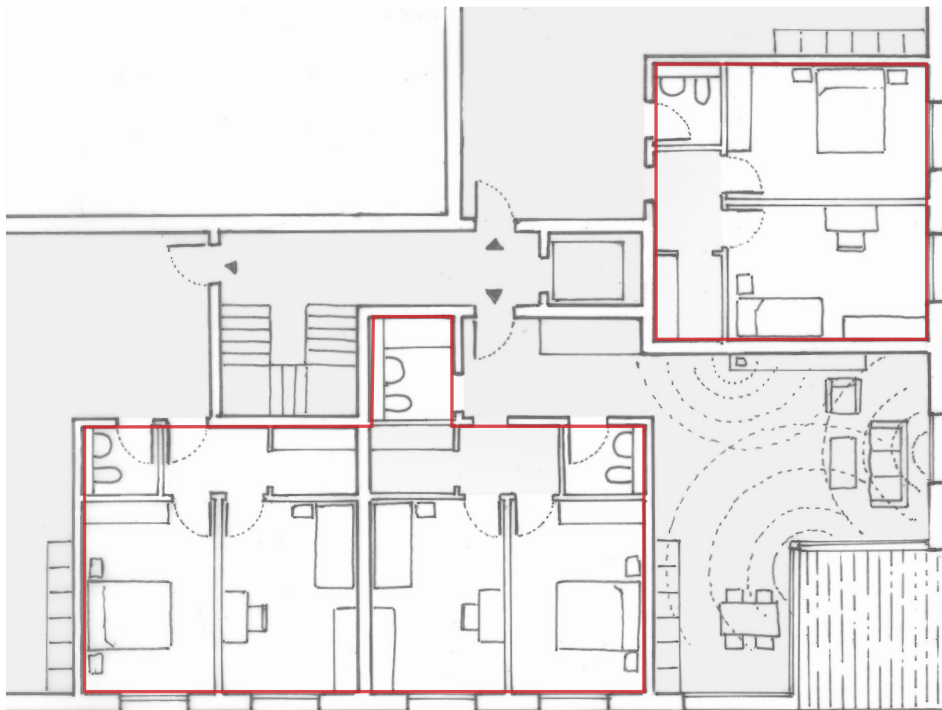


Illustration du principe création de zones blanches sur un exemple de typologie d'appartement relativement standard.

Dessin : adaptation de plans figurant de le recueil Floor Plan Manual.

[Zürich. 2017. *Floor Plan Manual: 62 Architectural Competitions for Non-Profit Housing*. Édité par Jeremy Hoskyn. English edition. Zürich: Hochparterre.]

Du zoning dans le logement

Cette séparation du logement en plusieurs zones dans lesquels les ondes sont présentes ou non amène forcément une certaine rigidité dans la définition des espaces. Il faut alors assumer le fait que cette volonté d'offrir une protection partielle contre les ondes remette ici en question la possibilité de proposer des typologies très flexibles au niveau de l'usage. Les habitations conçues selon la logique du plan libre, les appartements de type loft ou autres logements peu cloisonnés ne sont évidemment pas adaptés à une séparation précise des espaces selon l'exposition ou non au rayonnement.

Dès le moment où l'on détermine quels sont les espaces dans lesquels les ondes sont absentes ou présentes, on assume un choix sur l'usage de ces espaces. Ce type de logement implique une réflexion sur les endroits où l'on a besoin de réseau, et à quel moment de la journée. En effet, on peut également souhaiter passer beaucoup de temps chez soi en étant connecté. Le développement du travail à domicile change aussi les habitudes. Ceci implique une réflexion sur les activités générant des ondes ou nécessitant une connexion, et leur localisation possible dans le logement.

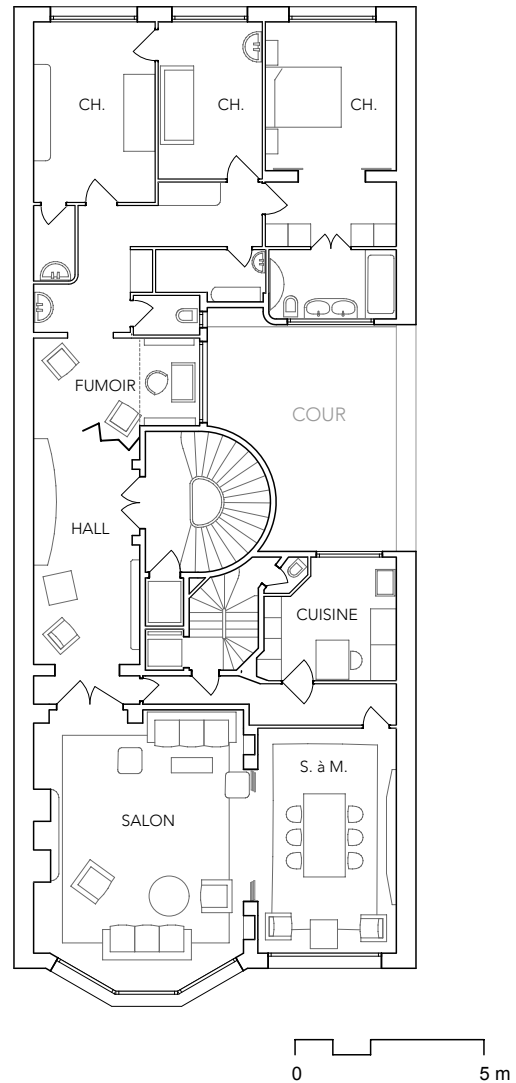
S'il est certes imaginable d'avoir dans les chambres des connexions par câble pour les ordinateurs et pas de connexion wifi, les ordinateurs et autres appareils électroniques produisant également un rayonnement, leur usage régulier dans une zone blanche n'est de toute façon pas vraiment en adéquation avec la logique de cette approche de protection.

Cela limite principalement la chambre à un espace de repos, ou du moins un espace déconnecté, et demande donc de pouvoir accueillir différentes activités dans l'espace de séjour. La zone «grise» ou connectée devrait idéalement disposer de différents espaces. On peut imaginer le besoin de zones plus ou moins calmes ou séparées pour le travail ou d'un coin bureau. Cet espace connecté peut donc se limiter au séjour, ou inclure des pièces supplémentaires, selon la taille de l'appartement.

Certaines typologies d'appartements classiques constituent une bonne illustration de ce que peut être un espace de séjour dans lequel des fonctions différentes peuvent être localisées précisément.

Ci-contre un exemple d'appartement classique dans un Immeuble conçu par l'architecte français Michel Roux-Spitz. Situé Paris, 14 rue Guynemer, l'immeuble a été construit entre 1925 et 1928.

La zone de séjour propose notamment différents espaces clairement délimités et pensés pour différentes activités : salle à manger avec un espace séparé devant la fenêtre, salon avec deux espaces distincts, coin pour la lecture dans le hall et un fumoir attenant à un espace bureau.

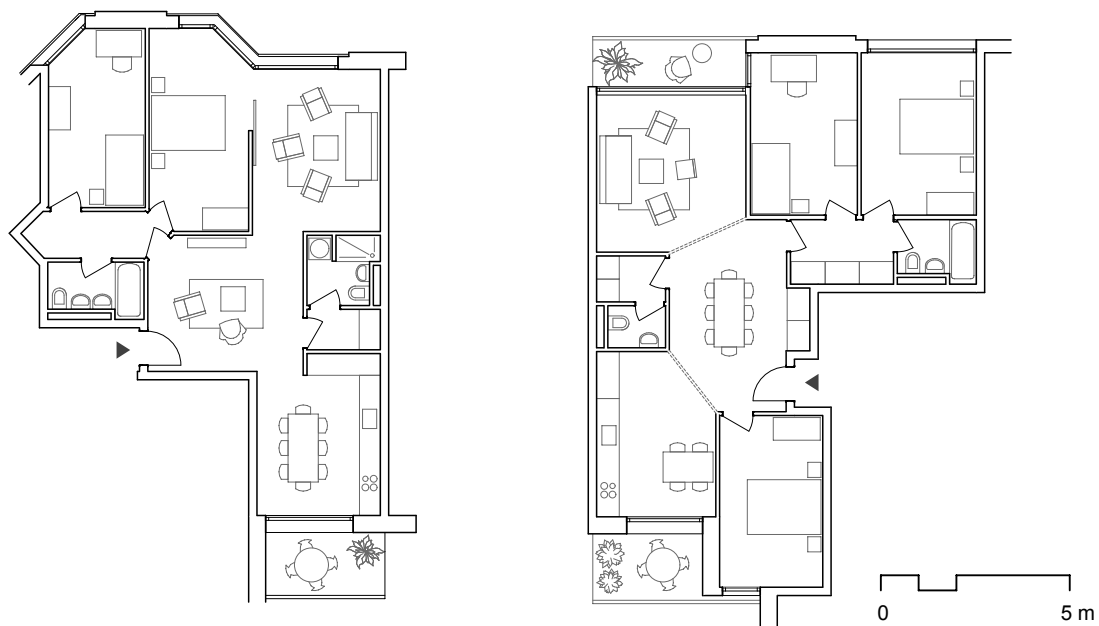


Immeuble situé 14 rue Guynemer, Michel Roux-Spitz, 1925-1928. Plan d'étage
 Dessin : sur la base des plans publiés dans : L'Ecole de Paris: 10 architectes et leurs immeubles
 [J.-C. Delorme et P. Chair, L'Ecole de Paris: 10 architectes et leurs immeubles, 1905-1937, (Paris: Editions du Moniteur, 1981).]

Les appartements bourgeois du début du XX^{ème} siècle disposent bien sûr d'une surface plus grande que la plupart des appartements actuels. Les cibles de surfaces dans lesquelles doivent s'inscrire les logements sociaux ou à loyer modérés, telles que décrites par exemple dans le guide pour les logements d'utilité publique du canton de Vaud³⁶, sont par exemple assez strictes. Ces surfaces cibles laissent ainsi une marge de manœuvre limitée pour développer des logements de qualité, qui incluerait en plus les contraintes supplémentaires liées à l'aménagement de zones blanches dans le logement. Contraintes qui seraient notamment le regroupement des chambres, la présence de sas et le besoin de prévoir éventuellement plus d'occupations différentes dans le séjour.

Il y a néanmoins des possibilités d'aménager des typologies d'appartements de qualité dans des surfaces relativement contraignantes. Les bureaux Jaccaud Spicher Architectes Associés et LRS ont par exemple proposé, dans le cadre de leur projet de logements sur le site de la caserne des Vernets à Genève, des typologies relativement classiques et très soignées. Les différents plans réalisés pour ce concours montrent ainsi des dispositions des zones de séjour qui s'articulent pour aménager plusieurs espaces distincts.

³⁶ Etat de VAUD, « Guide pour les logements d'utilité publique (LUP) », s. d.



Exemples de typologies d'appartement proposées pour le projet de nouvelle construction sur le site de la caserne des Vernets à Genève.

Architectes : Jaccaud Spicher Architectes Associés, LRS

Dessin : sur la base des illustrations de concours

Les nouvelles typologies de logements

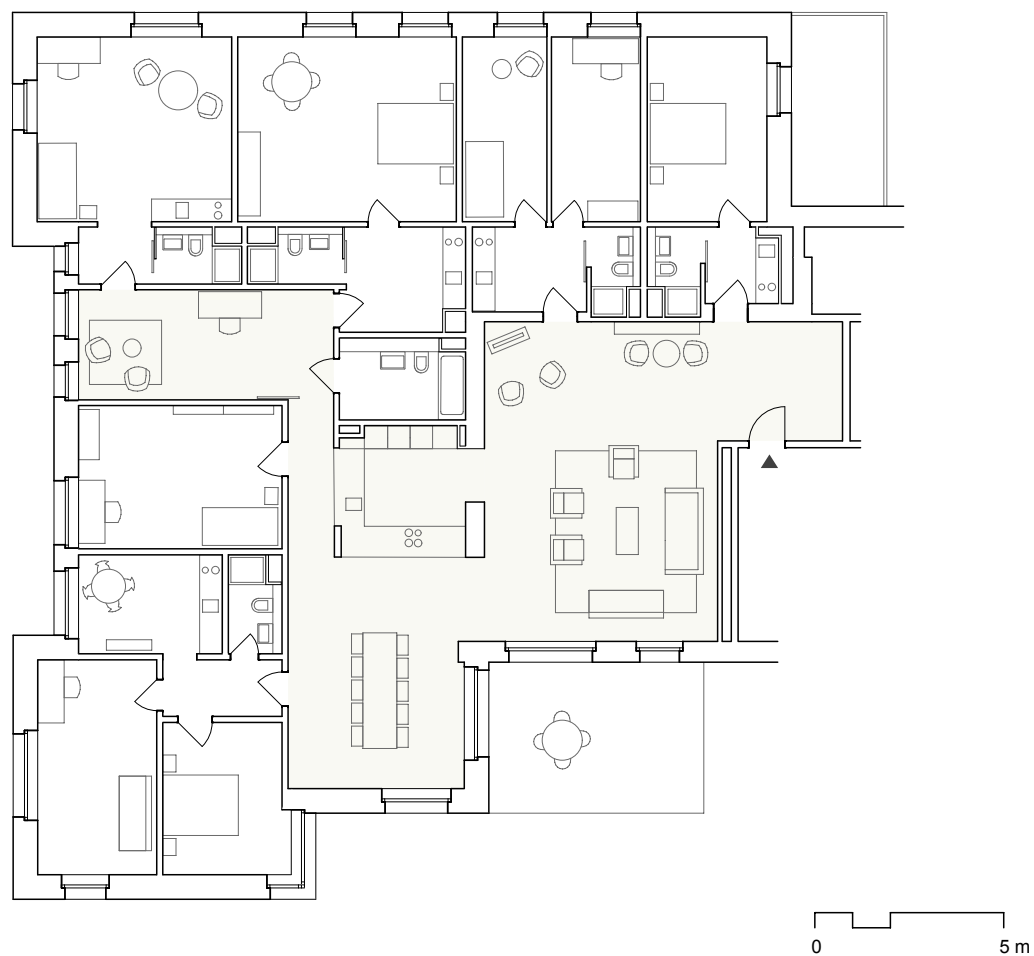
Parmi les formes de logement qui ont émergé ces dernières années, la typologie du cluster se prête assez bien à une adaptation à la problématique de la protection contre le rayonnement, de par son arrangement particulier.

Développé depuis quelques années par des coopératives d'habitation dans la région de Zurich, le concept du cluster associe plusieurs petites suites, d'une ou quelques pièces, dans un très grand appartement. Cette forme de cohabitation offre donc à ses occupants des espaces privés et l'usage des parties communes qui peuvent devenir assez généreuses.

La forme particulière de ces logements peut donc être une inspiration dans la conception d'appartements séparant les espaces. De plus, dans ce type d'appartement, des espaces de séjour partagés plus spacieux peuvent accueillir différentes occupations et on peut imaginer mutualiser certains besoins, comme des espaces de travail. Pour certains exemples de clusters, on peut donc imaginer assez directement une transposition du modèle, avec des espaces privatifs qui deviendraient

des zones blanches. Cela est par exemple le cas pour les clusters développés dans le complexe d'habitation coopératif de mehr als wohnen à Zurich (illustration p. 55).

Il y a toutefois quelques éléments qui peuvent être limitants dans l'emploi du modèle du cluster. Le premier étant qu'il s'agit d'appartements de très grande taille, et qu'il paraît difficile de réduire le concept sur de plus petites surfaces. On trouve ainsi par exemple sept chambres pour une surface utile d'un peu plus de 350 m² (approximation) dans l'exemple de mehr als wohnen illustré ici. Un autre point est que les suites privées comptent en général une, voire deux, chambres. Il faudrait voir ce que donne ce modèle adapté à un usage par des familles.



Un exemple de cluster dans la coopérative d'habitation Kraftwerk 2, Zürich
Architecte : Adrian Streich Architekten
Dessin : sur la base de plans publiés dans la documentation suisse du bâtiment
[<https://projets.batidoc.ch/wohnuerbauung-kraftwerk-2>]



Un des clusters du complexe d'habitation Mehr als wohnen, Zurich
Architectes : Duplex Architekten, 2009-2015
Dessin : sur la base de plans publiés dans Tracés n° 18, 19 septembre 2014

Synthèse

1 : Façade

Ouverte au niveau des séjours, plus fermée à l'emplacement des zones blanches. Répétition de la même organisation de l'espace à chaque étage.

2 : Fenêtres

Utilisation de vitrages à basse émissivité pour les fenêtres donnant sur des zones blanches.

3 : Murs intérieurs

Utilisation d'un matériau pouvant absorber une partie du rayonnement pour la construction des murs séparant les espaces.

4 : Enduit conducteur

Protection supplémentaire au niveau des chambres. Permet d'assurer une atténuation quasi complète du rayonnement haute et basse fréquence.

5 : Sas

Un espace tampon permet d'éviter que les chambres ne donnent directement sur la zone soumise aux ondes et donne une unité à la zone blanche.

6 : Appareils connectés

Une zone de séjour proposant plusieurs espaces distincts favorise un usage des appareils connectés hors de la zone blanche.

7 : Appareils et installations électriques

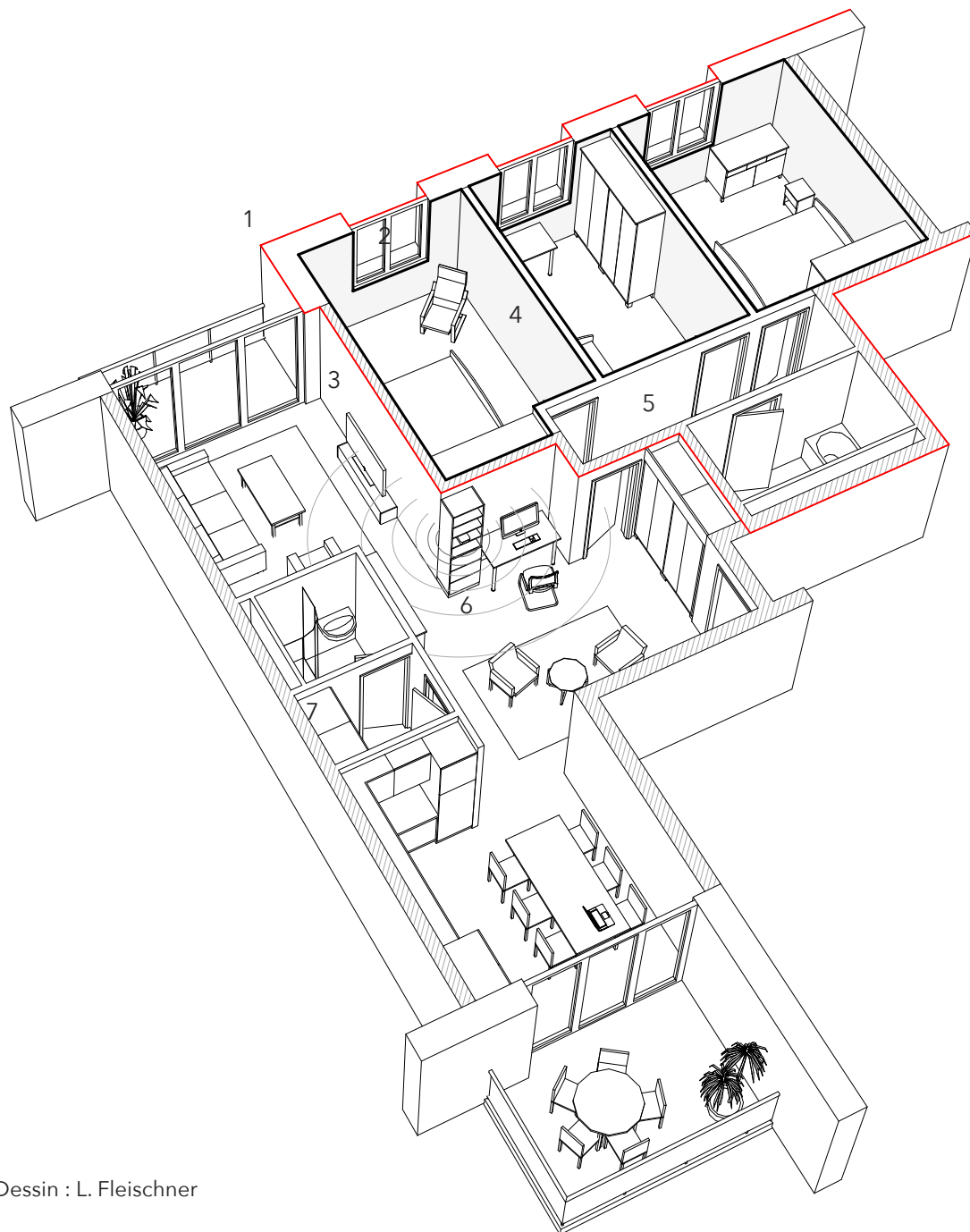
L'installation d'appareils électriques tels que les colonnes de lavage est aussi à privilégier hors des zones blanches. Les installations électriques en général doivent être prévues pour éviter d'émettre du rayonnement.



Un exemple d'utilisation de la terre crue pour la réalisation de murs intérieurs. Mur en brique de terre crue comprimée et stabilisée, épaisseur 14 cm.

Image : Terrabloc

[<http://www.terrabloc.ch/projets-realises>]



Dessin : L. Fleischner

Conclusion

Un domaine qui demande à être davantage pris en compte

Les impacts potentiels des ondes électromagnétiques sur la santé et le bien-être sont discutés depuis longtemps, mais la question reste encore peu intégrée dans la conception de logements. Pourtant il existe certaines attentes réelles face à cette question, et quand des logements protégés sont proposés, ils trouvent preneur. Pour l'instant, les constructions réalisées ou en projet et qui prennent en compte la problématique s'adressent à un public constitué d'individus électro-sensibles qui cherchent à se couper le plus possible de toute exposition au rayonnement non-ionisant. Au-delà de ces quelques exemples, les initiatives de protection sont des démarches privées de personnes isolant à posteriori une pièce, voir éventuellement leur maison individuelle à l'aide des diverses solutions existant actuellement sur le marché.

En gardant à l'esprit qu'il est difficile d'avoir un avis définitif et univoque concernant d'éventuels effets du rayonnement électromagnétique sur la santé, du moins au niveau de puissance auquel on est généralement exposé, on peut imaginer que dans les années à venir, l'attention à la protection contre les ondes dans le logement puisse nettement se développer. En effet,

si notre société semble pour l'instant se diriger vers une intégration toujours plus grande des objets connectés et donc une augmentation de la présence des ondes électromagnétiques, il y a probablement aussi une tendance vers une plus grande attention portée aux enjeux de santé face aux diverses sources de polluants potentiels. Ceci s'illustre par exemple par la remise en question actuelle de l'usage de certains pesticides. Cette problématique s'inscrit en outre dans la thématique des constructions écologiques et peut donc être encore davantage pris en considération comme un des facteurs qui constituent un climat intérieur sain.

Les émissions de rayonnement, notamment des antennes relais pour la téléphonie mobile, sont limitées par des normes, au nom du principe de précaution, car l'on juge que des émissions trop fortes peuvent présenter un risque éventuel. Ce principe de précaution, en plus de justifier des valeurs limite d'émission, pourrait aussi être invoqué pour éviter une exposition continue au rayonnement, même relativement faible, durant toute la journée, suivant ainsi certains experts qui recommandent de ne pas être exposé aux ondes, durant la nuit au moins.

Généraliser une prise en compte des ondes dans le design du bâtiment ?

S'il est possible d'isoler un logement existant contre les ondes électromagnétiques, il est plus pertinent d'intégrer la question en amont lors de la conception du bâtiment, ce d'autant plus que les suisses sont principalement des locataires qui ont donc peu de marge de manœuvre pour agir sur ces questions. Une isolation complète du bâtiment est pertinente si les occupants prévus sont des personnes qui se considèrent électro-sensibles, mais est probablement contre-productive dans la plupart des cas si les logements s'adressent à un public plus large qui ne va pas totalement renoncer à l'utilisation d'appareils connectés.

Cette prise en compte de la protection vis-à-vis du rayonnement lors du design du bâtiment permet de proposer des solutions par le choix de certains matériaux et également en délimitant l'espace du logement entre les zones qui peuvent être exposées à un rayonnement et des zones blanches, isolées contre les ondes. Placé dans le contexte de la construction écologique, la prise en compte de la protection contre le rayonnement fournit un argument supplémentaire pour le choix de certains matériaux durables, comme par exemple l'usage de la terre crue.

L'intégration de la protection contre l'électromog dans le design du bâtiment peut aussi être considéré à plusieurs degrés. Dans certaines situations, le simple fait d'intégrer des matériaux présentant une bonne absorbance des ondes peut être une amélioration déjà considérable. Mais cela peut aller plus loin et consister en une séparation précise des espaces dans le logement, accompagnée d'une réflexion quant à la manière d'habiter ces différents espaces, en lien avec l'utilisation des objets connectés et l'exposition aux ondes qui en découle.

Ceci implique pour l'architecte, outre le fait d'être sensible à la problématique, en premier lieu une certaine connaissance des possibilités en termes d'atténuation du rayonnement électromagnétique, mais également des contraintes dans le design du plan et au niveau de la répétition des dispositions à chaque étage. La mise en place de ces dispositifs de protection demande en outre d'avoir à disposition des spécialistes compétants dans le domaine.

Ces adaptations dans la conception des logements esquissées ici représentent une réponse possible, apportée à une partie de la population qui peut être sensible à cette problématique, sans toutefois être

trop disruptifs par rapport aux tendances de la société actuelle. Il s'agit finalement plutôt d'une opportunité pour mener une réflexion sur notre relation avec les réseaux et notre usage des objets connectés au quotidien. Ces propositions apportent toutefois une certaine rigidité dans la définition des espaces au sein du logement et elles nécessitent aussi que les occupants soient au clair sur la manière dont l'appartement et l'immeuble a été conçu et quelles seraient les pratiques à éviter. Ce dernier point montre aussi qu'il ne faut pas prendre ces propositions comme des solutions totalement généralisables, on peut imaginer que certaines personnes ne souhaitent pas se voir imposer ce qui peut être vu comme un cadre rigide ou des limitations. La protection contre le rayonnement est aussi une problématique qui s'insère peut-être plus facilement dans le contexte de logements développés par des coopératives. Logements dont les occupants peuvent être réunis autour de certains concepts ou certaines valeurs.

Une protection contre le rayonnement en isolant certains espaces est ici proposée dans le cadre du logement, mais on peut aussi se demander si elle est applicable à d'autres lieux. La plupart des bureaux et des places de travail demandent un ordinateur, ou nécessitent des appareils électroniques ou électriques, mais il existe

des endroits où pouvoir être connecté n'est pas indispensable. Cette approche semble particulièrement pertinente lorsqu'il s'agit de crèche, voir également dans le cas des écoles, pour de jeunes enfants. Dans le même ordre d'idées, il est probablement indiqué que dans les hôpitaux et cliniques, certains patients ne soient pas exposés aux rayonnements.

Pour finir, on peut relever qu'il va être sans doute de plus en plus difficile, du moins en Suisse, de trouver des endroits où implanter des logements pour les personnes électrosensibles. Que par ailleurs, si, sans être forcément électro-hypersensibles, des personnes désirent limiter leur exposition au rayonnement, il est pertinent d'avoir des propositions qui puissent s'insérer dans un contexte urbain, plutôt que de voir un logement individuel à la campagne comme seule alternative. Alternative qui contribue au mitage du territoire et à un déplacement hors des zones urbaines des nuisances dues à la ville. La limitation de l'exposition aux ondes peut donc être un élément important pour un 'environnement intérieur sain et un argument à faire valoir lors de la conception de complexes de logements mettant en avant la qualité de vie.

Bibliographie

- Abebe, Gédéon. Discussion sur la conception de logements pour personnes électro-hypersensibles par le bureau d'architectes aaag, 10 avril 2019.
- « Arizona Public Housing Project ». Consulté le 5 novembre 2019. <http://www.eiwellspring.org/multiunit/AZPublicHousingProject.htm>.
- « Association MCS-SOS | Hypersensibilité Chimique Multiple ». Consulté le 1 janvier 2020. <https://mcs-sos.ch/?lang=fr>.
- Belyaev, Igor, Amy Dean, Horst Eger, Gerhard Hubmann, Reinhold Jandrisovits, Markus Kern, Michael Kundi, et al. « EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses ». *Reviews on Environmental Health* 31, n° 3 (1 janvier 2016). <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0011>.
- rts.ch. « Blindées, isolées, des maisons se rêvent en havres pour électrosensibles ». InfoSport, 16 février 2019. <https://www.rts.ch/info/sciences-tech/10218405-blindees-isolees-des-maisons-se-revent-en-havres-pour-electrosensibles.html>.
- « Cage de Faraday ». In Wikipédia, 30 avril 2019. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cage_de_Faraday&oldid=158873705.
- Clegg, Frank M., Margaret Sears, Margaret Friesen, Theodora Scarato, Rob Metzinger, Cindy Lee Russell, Alex Stadtner, et Anthony B. Miller. « Building Science and Radiofrequency Radiation: What Makes Smart and Healthy Buildings ». *Building and Environment*, août 2019, 106324. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106324>.
- Croome, Derek J. *Electromagnetic Environments and Health in Buildings*. London: Spon Press, 2004. <http://site.ebrary.com/id/10098709>.
- DETEC, Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication. « Rapport Téléphonie mobile et rayonnement », 18 novembre 2019.
- « eco-bau / Thèmes / Climat intérieur sain ». Consulté le 9 janvier 2020. <https://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=21&ID=17>.
- « eco-bau / Thèmes / Climat intérieur sain ». Consulté le 2 janvier 2020. <https://www.eco-bau.ch/index.cfm?Nav=21&ID=17>.
- criirem.org. « Electrosensibilité - électrosensibles- Criirem ». Consulté le 3 janvier 2020. <https://www.criirem.org/electrosensibles>.
- MINERGIE Schweiz. « En bref ». Consulté le 29 décembre 2019. <https://www.minergie.ch/fr/a-propos-de-minergie/en-bref/>.
- Etat de VAUD. « Guide pour les logements d'utilité publique (LUP) », s. d.

- « Gesundes Wohnen - | Produkte ». Consulté le 1 janvier 2020. <http://www.gesundes-wohnen-mcs.ch/pilotprojekt/produkte.html>.
- Gigon, Ariane. « une allergie à de nombreux matériaux très courants. Une maison a été bâtie à leur intention. » LA LIBERTE, 6 novembre 2013, 1.
- « Habiter à l'abri des ondes ». Consulté le 1 janvier 2020. <https://www.laliberte.ch/news/regions/canton/habiter-a-l-abri-des-ondes-471388>.
- « Haubitsen Environmental Housing Project ». Consulté le 5 novembre 2019. <http://www.eiwellspring.org/multiunit/Haubitsen.htm>.
- MINERGIE Schweiz. « Histoire de l'association ». Consulté le 29 décembre 2019. <https://www.minergie.ch/fr/histoire-de-lassociation/>.
- Lenel, Severin, et Sandra Aeberhard. « Une construction saine, Bâtiments écologiques selon Minergie-ECO ». Minergie Suisse, Association eco-bau, s. d.
- OFEV, Office fédéral de l'environnement. « Lignes à haute tension (lignes aériennes) - source d'électrosmog ». Consulté le 8 octobre 2019. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-elektrosmog/elektrosmog-und-licht-fachinformationen/elektrosmog-quellen/hochspannungsleitungen-freileitungen-als-elektrosmog-quelle.html>.
- OFEV, Office fédéral de l'environnement. « Hypersensibilité électromagnétique. Evaluation d'études scientifiques. Etat fin 2011 », 2012.
- OFEV, Office fédéral de l'environnement. « Téléphonie mobile - comment cela fonctionne-t-il? » Consulté le 4 décembre 2019. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-elektrosmog/elektrosmog-und-licht-fachinformationen/elektrosmog-quellen/mobilfunk-als-elektrosmog-quelle/mobil-telefonieren-wie-funktioniert-das-0.html>.
- OFCOM, Office fédéral de la communication. « Attribution de fréquences de téléphonie mobile pour la 5G en Suisse ». Consulté le 24 octobre 2019. <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiqués.msg-id-73916.html>.
- OFSP, Office fédéral de la santé publique, et Office fédéral de l'environnement OFEV. « Rayonnements et santé La télécommunication mobile », s. d.
- « Onde électromagnétique ». In Wikipédia, 11 décembre 2019. https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Onde_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique&oldid=165330044.
- Pauli, Peter, et Dietrich Moldan. Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen: Baustoffe und Abschirmmaterialien. 3. Auflage. EMV-Themen des VDB, 4. Band. Fürth: AnBUS e.V, 2015.
- Recueil systématique du Droit fédéral. « RS 814.710 Ordonnance du 23 décembre 1999 sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI) ». Consulté le 30 décembre 2019. <https://www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/19996141/index.html>.

- Richman, Russell, Alan James Munroe, et Yasmeen Siddiqui. « A Pilot Neighborhood Study towards Establishing a Benchmark for Reducing Electromagnetic Field Levels within Single Family Residential Dwellings ». *Science of The Total Environment* 466-467 (janvier 2014): 625-34. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.010>.
- « Ten Texas Cottages ». Consulté le 5 novembre 2019. <http://www.eiwellspring.org/multiunit/TenTexasCottages.htm>.

Autres ouvrages consultés

- Boltshauser, Roger et Cyril Veillon. *Pisé. - Tradition et Potentiel*. Editions Triest, Büro 146, Zürich, 2019.
- Delorme, Jean-Claude, et Philippe Chair. *L'Ecole de Paris: 10 architectes et leurs immeubles, 1905-1937*. Collection Architecture « Les hommes ». Paris: Editions du Moniteur, 1981.
- Panagopoulos, Dimitris J. « ANALYZING THE HEALTH IMPACTS OF MODERN TELECOMMUNICATIONS MICROWAVES », s. d., 55.
- Panagopoulos, Dimitris J., et George P. Chrousos. « Shielding Methods and Products against Man-Made Electromagnetic Fields: Protection versus Risk ». *Science of The Total Environment* 667 (juin 2019): 255-62. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.344>.
- Zürich. *Floor Plan Manual: 62 Architectural Competitions for Non-Profit Housing*. Édité par Jeremy Hoskyn. English edition. Zürich: Hochparterre, 2017.

Annexes

I. Les sources d'ondes électromagnétiques

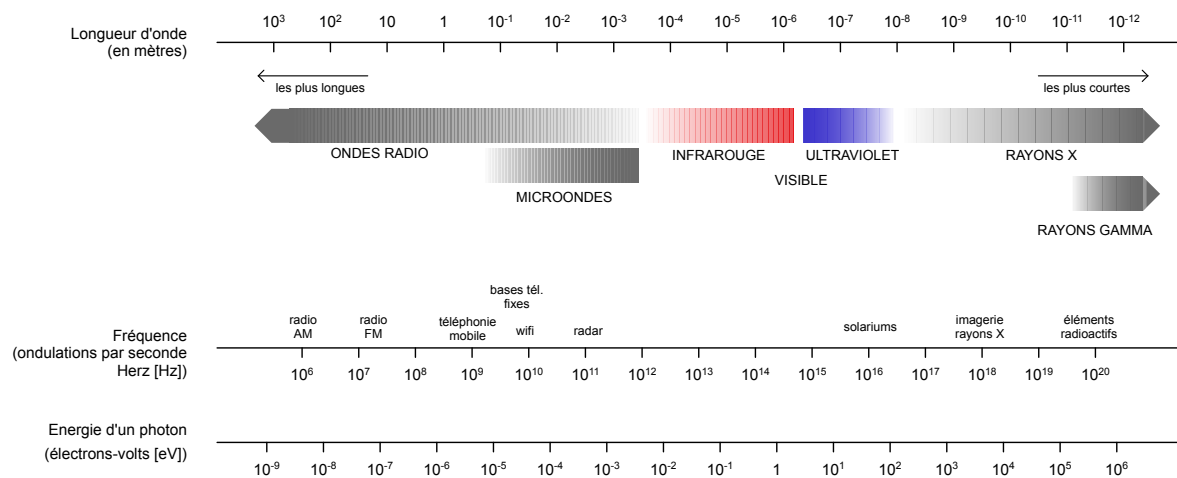
Les ondes électromagnétiques auxquelles on peut être confronté couvrent un spectre très large de fréquence, des ondes basse fréquence aux rayons gamma. La fréquence d'une onde (en Herz [Hz]) est une mesure du nombre d'oscillation par seconde et est donc liée à la longueur d'onde selon la relation $\lambda = c/f$, où λ est la longueur d'onde, c est la vitesse de propagation de l'onde et f représente la fréquence³⁷. Donc, plus la fréquence est faible, plus les longueurs d'ondes sont grandes.

Les rayonnements sont ainsi catégorisés selon leurs longueurs d'onde : par exemple, supérieure à 30 cm pour les ondes radio, entre 3mm et 30 pour les micro-ondes, etc. Les émissions des appareils connectés (wifi, téléphonie mobile, etc.), ainsi que les ondes radar font partie de la catégorie des micro-ondes. L'énergie transportée par les photons dans le rayonnement (mesurée en électronvolt [eV]) augmente proportionnellement avec la fréquence.

Ondes basse fréquence

Les ondes basse fréquence due à l'activité humaine sont principalement liées au transport de courant électrique. Des champs électriques basse fréquence sont émis par les réseaux électriques et les appareils électriques sous tension (le courant alternatif a une fréquence de 50 Hz). Des champs magnétiques basse fréquence sont émis par les lignes électriques haute tension, mais aussi par les transformateurs, les moteurs électriques et également les appareils électriques de forte puissance comme les radiateurs électriques ou les plaques de cuisson.

³⁷ « Onde électromagnétique », in Wikipédia, 11 décembre 2019, https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Onde_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique&oldid=165330044.



Le spectre électromagnétique

Dessin : adapté et traduit d'une illustration de Frank M. Clegg et al., op. cit.

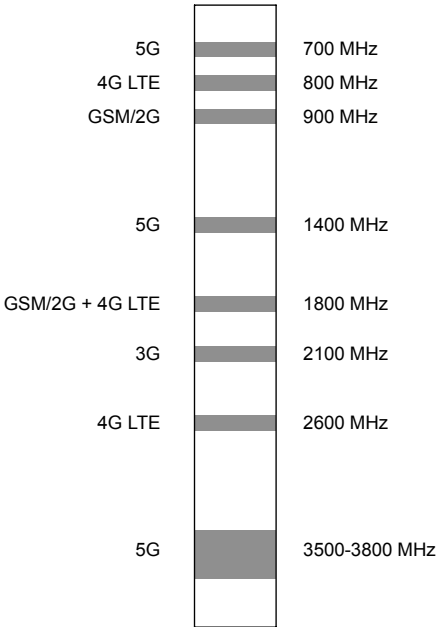
Effets de la distance à la source

La puissance d'un rayonnement électromagnétique décroît avec la distance qui le sépare de sa source. En ce qui concerne par exemple le rayonnement basse fréquence émis par les lignes à haute tension, l'OFEV³⁸ indique que pour une ligne de 380 kV une augmentation de l'exposition aux champs magnétiques est mesurable jusqu'à une distance de 150 à 200 mètres. En ce qui concerne les antennes de téléphonie mobile, une telle règle est plus difficile à établir. En effet le rayonnement est dirigé et ces antennes sont souvent placées en hauteur. La zone d'exposition maximale n'est donc en général pas directement au pied de l'antenne.

L'attribution des fréquences de téléphonie mobile en Suisse.

Les différentes fréquences d'émission destinés aux réseaux mobiles ont été attribuées, aux enchères, aux différents opérateurs par l'OFCOM³⁹. Il s'agit en fait de plages de fréquences, qui peuvent comprendre quelques dizaines de mégahertz, au sein desquels les antennes peuvent émettre. Ces plages sont situées autour d'un certain nombre de fréquences qui

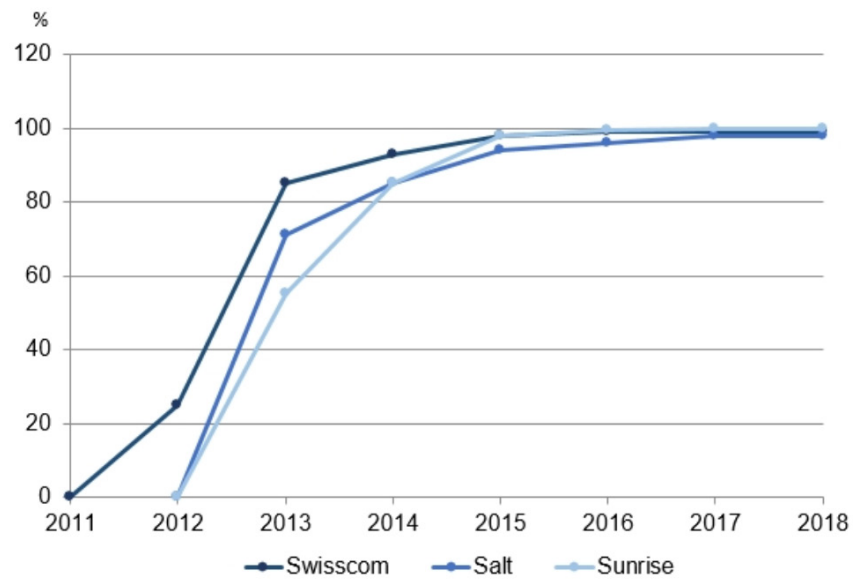
ont été réservées au fil de l'apparition des différentes technologies mobiles et qui se situent entre quelques centaines de mégahertz et quelques gigahertz.



Les fréquence de téléphonie mobile en Suisse
Dessin : sur la base des donnée de l'OFCOM
[<https://www.bakom.admin.ch>]

³⁸ Office fédéral de l'environnement (OFEV), « Lignes à haute tension (lignes aériennes) - source d'électrosmog », consulté le 8 octobre 2019, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themen/thema-elektrosmog/elektrosmog-und-licht-fachinformationen/elektrosmog-quellen/hochspannungsleitungen-freileitungen-als-elektrosmog-quelle.html>.

³⁹ Office fédéral de la communication (OFCOM), « Attribution de fréquences de téléphonie mobile pour la 5G en Suisse », consulté le 24 octobre 2019, <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-73916.html>.



Part de la population couverte par des réseaux LTE (4G) en Suisse, selon la Commission fédérale de la communication (ComCom).

Source de l'image : <https://www.comcom.admin.ch/comcom/fr/page-daccueil/documentation/faits-et-chiffres/telephonie-mobile/couverture-mobile.html>

II. L'isolation contre les ondes : cage de Faraday et mise à terre

Dans le cas d'un « blindage » utilisant des matériaux réfléchissant les ondes, la protection d'un espace contre les rayonnements extérieurs repose sur le principe de la cage de Faraday, qui veut qu'une enceinte conductrice soit étanche aux champs électriques⁴⁰. Cette enceinte doit être reliée à la terre, de manière à maintenir son potentiel électrique fixe. Si ce type de blindage électromagnétique empêche toute pénétration du rayonnement entrant, il empêche également les éventuelles ondes provenant d'une source interne de quitter l'espace protégé.

L'installation d'un dispositif de protection par réflexion des ondes s'accompagne en général d'une mise à terre de ce système de protection. Cette mise à terre permet au dispositif d'assurer une protection contre le spectre complet du rayonnement électromagnétique et notamment contre les ondes de plus basse fréquence. Les matériaux réfléchissant le rayonnement offrent

déjà une protection contre les hautes fréquences à partir du domaine des MHz sans recourir à la mise à terre, une mise à terre dans ce cas servant toutefois à la sécurité sur le plan électrique de l'installation⁴¹. Cette précaution est importante, pour éviter entre autres une éventuelle interaction entre la mise à terre principale de l'immeuble et le dispositif de réflexion ou une contamination par le réseau électrique. Il y a en outre une distance de sécurité à respecter dans l'éventualité de l'installation d'un dispositif parafoudre à proximité.

Dans la pratique, la mise en place de ce type de dispositifs demande donc l'intervention de professionnels compétents. Une mauvaise implantation des dispositifs de mise à terre ou une mauvaise gestion des connexions entre les surfaces isolées peut également créer une boucle pouvant conduire une partie du rayonnement électromagnétique.

⁴⁰ « Cage de Faraday », in Wikipédia, 30 avril 2019, https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cage_de_Faraday&oldid=158873705.

⁴¹ Gerd Welsch, dans Pauli et Moldan, op. cit.

III. Atténuation des ondes par différents matériaux

Le professeur Peter Pauli, en tant que chercheur à l'Université de la Bundeswehr (Munich) et ingénieur spécialisé dans le rayonnement haute fréquence, effectue depuis de nombreuses années des tests sur de nombreux matériaux afin de mesurer leur capacité à atténuer le rayonnement électromagnétique. Les exemples illustrés dans les figures suivantes proviennent de la troisième édition (2015) de sa publication concernant les moyens et matériaux permettant de réduire le rayonnement haute fréquence.

La mesure de l'atténuation des ondes électromagnétiques se fait, comme pour les ondes sonores en décibels [dB]. L'échelle est logarithmique, une atténuation de 10 dB correspond ainsi à une réduction de 90% et une atténuation de 20 dB à une atténuation de 99%.

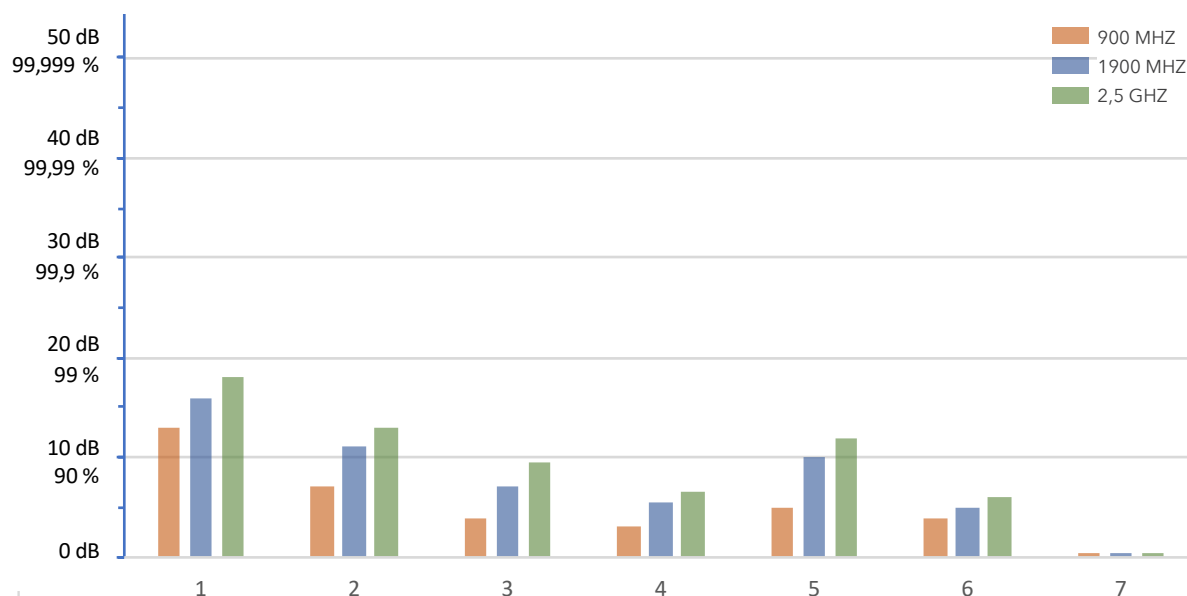
Pour les matériaux de construction habituels (bois, béton, brique), la protection se faisant surtout par absorption du rayonnement, celle-ci est fonction de l'épaisseur du matériau, mais dépend aussi par exemple de la densité et de l'humidité présente dans ce matériau. On peut observer dans

ces mesures que la terre ou les matériaux à base d'argile permettent une protection plus importante que la brique ou le béton par exemple. En outre, les ondes de plus haute fréquence sont plus facilement absorbées par les matériaux.

Des matériaux spécifiquement conçus pour l'interception des ondes disposent eux d'une couche conductrice qui va bloquer et réfléchir le rayonnement. Ces matériaux (enduits, panneaux spéciaux ou peintures) demandent alors une mise à terre.

Les graphiques des pages suivantes sont réalisés à l'aide de quelques données sélectionnées au sein d'un travail bien plus complet, dans l'intention de compléter le propos développé dans les chapitres précédents.

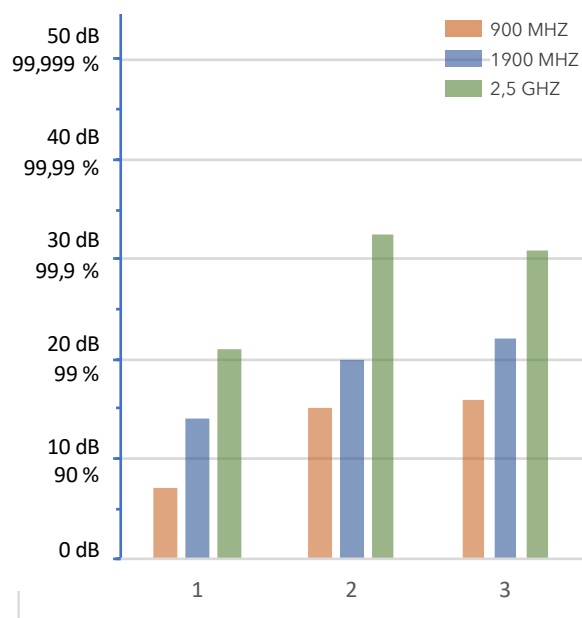
Matériaux courants



Atténuation du rayonnement électromagnétique pour des fréquences de 900 MHz, 1900 MHz et 2,5 GHz. Adapté et traduit de l'ouvrage de P. Pauli et D. Moldan, op. cit.

- 1 - béton armé récent (1 mois), 2400 kg/m³, épaisseur de 16 cm
- 2 - béton armé sec (9 mois), 2400 kg/m³, épaisseur de 16 cm
- 3 - brique silico-calcaire, 1800 kg/m³, épaisseur de 24 cm
- 4 - brique silico-calcaire, 1800 kg/m³, épaisseur de 17,5 cm
- 5 - bois : épicéa-sapin, 400 kg/m³, épaisseur de 17 cm
- 6 - bois : chêne, 750 kg/m³, épaisseur de 16 cm
- 7 - Plaque de plâtre standard, épaisseur 12,5 mm

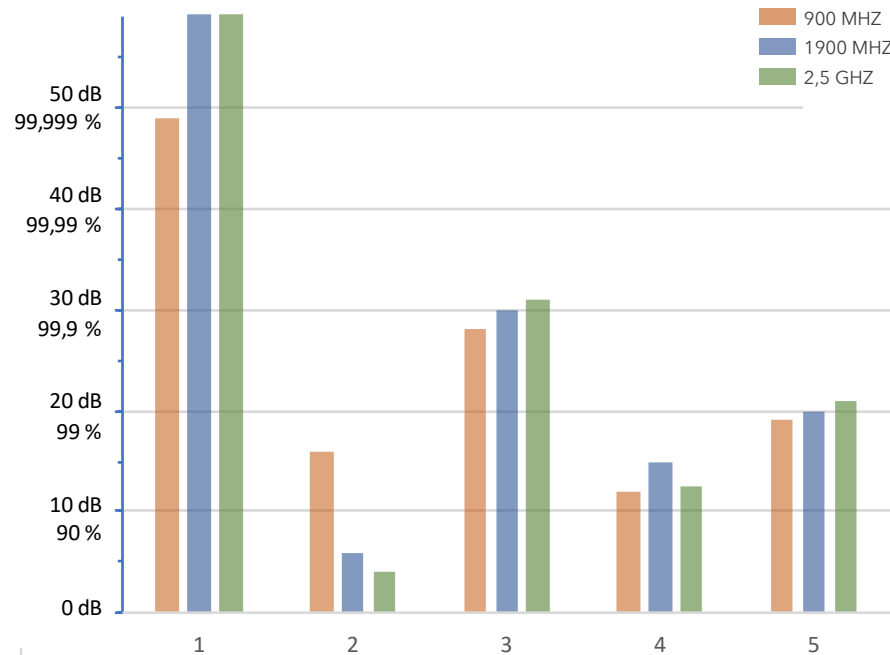
Terre / argile



Atténuation du rayonnement électromagnétique pour des fréquences de 900 MHz, 1900 MHz et 2,5 GHz. Adapté et traduit de l’ouvrage de P. Pauli et D. Moldan, op. cit.

- 1 - Adobe, 1600 kg/m³, épaisseur de 11,5 cm
- 2 - Couverture de toiture à base de terre humide engazonnée, épaisseur de 16 cm
- 3 - Adobe, épaisseur 24 cm + enduit à base d’argile, épaisseur de 2 cm

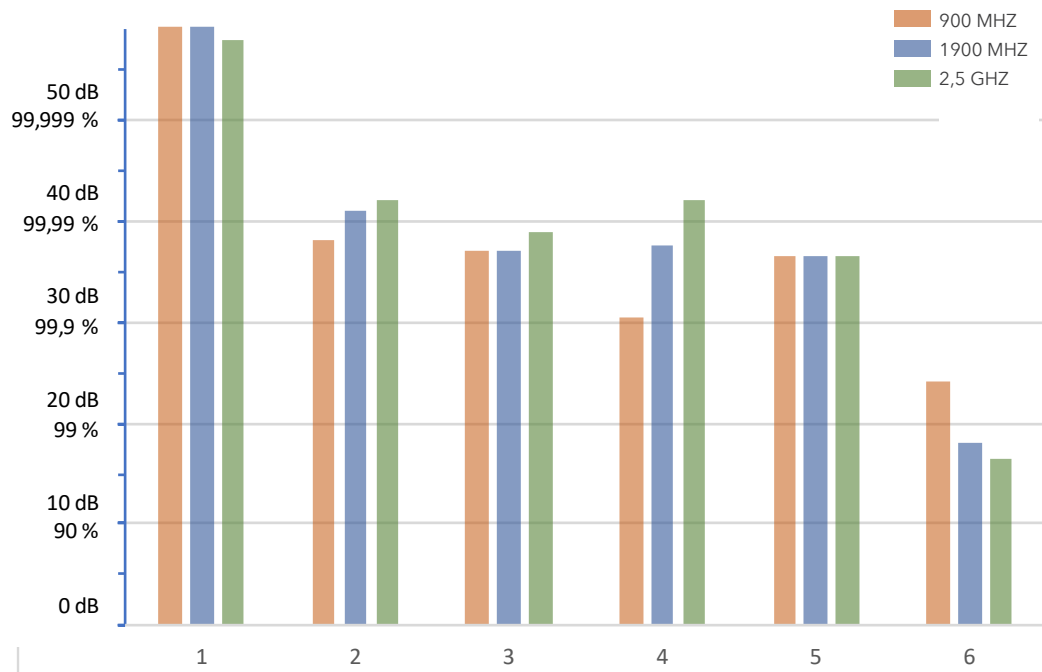
Vitrages et fenêtres



Atténuation du rayonnement électromagnétique pour des fréquences de 900 MHz, 1900 MHz et 2,5 GHz. Adapté et traduit de l'ouvrage de P. Pauli et D. Moldan, op. cit.

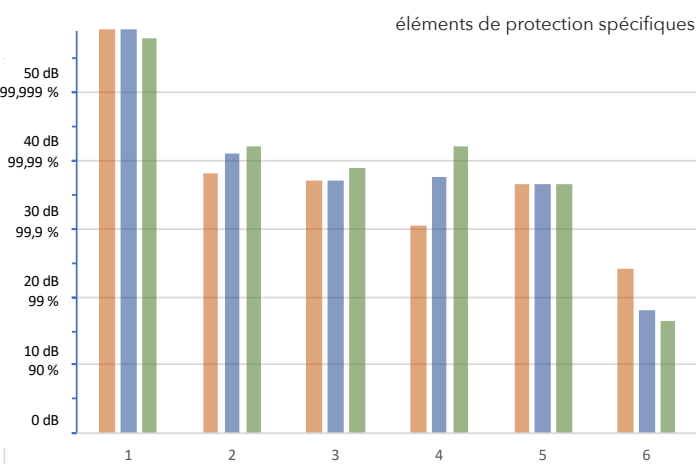
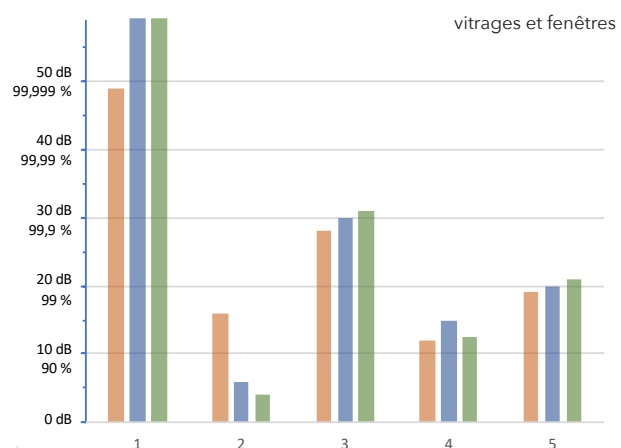
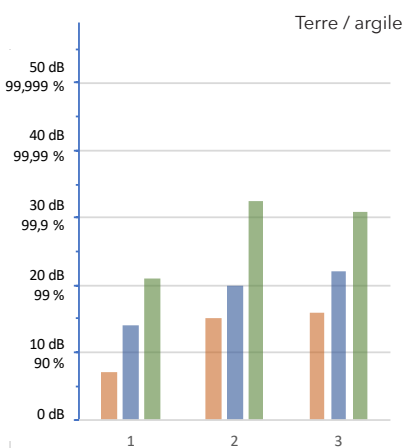
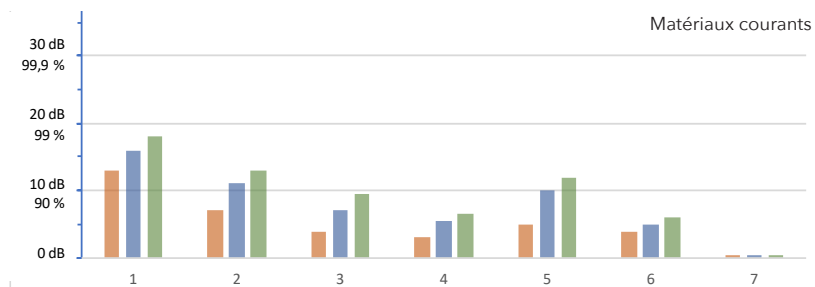
- 1 - Double vitrage basse émissivité (low-e), BioElectric Super [Glas Trösch]
- 2 - Verre armé simple, treillis de 13 x 13 mm, épaisseur de 6 mm
- 3 - Fenêtre aluminium avec vitrage basse émissivité
- 4 - Fenêtre bois avec vitrage basse émissivité
- 5 - Fenêtre PVC avec vitrage basse émissivité

Eléments de protection spécifiques



Atténuation du rayonnement électromagnétique pour des fréquences de 900 MHz, 1900 MHz et 2,5 GHz. Adapté et traduit de l'ouvrage de P. Pauli et D. Moldan, op. cit.

- 1 - Feuille en aluminium, 0,05 mm
- 2 - Enduit conducteur à base d'argile et de graphite, LOMBARDIA [Casa Natura], épaisseur 14 mm
- 3 - Panneau bois-plâtre avec revêtement de protection en carbone, Xund-E-Plus [Bau-Fritz], épaisseur 12,5 mm
- 4 - Plaque de plâtre Climafit Protekto [Saint-Gobain], épaisseur 10 mm
- 5 - Peinture : dispersion synthétique spéciale, HSF44 [YSHIELD]
- 6 - Armature pour crépi en fibre de verre + métal, 4 x 4 mm, Sto-Abschirmgewebe AES [Sto]



30 dB

99,9 %

20 dB

99 %

10 dB

90 %

0 dB

