

Auteur: Pierre-Paul Barbier

THÈSE DE DOCTORAT

Université
de Liège



Spécialité: *Sciences de l'ingénieur*

Présentée pour obtenir :

Le Grade de Docteur en Sciences de l'ingénieur de L'Université de Liège

Pr. Lilien Jean-Louis, Promoteur de Thèse



Soutenue
en 2014

Etude et justification des courants de contact induits par les lignes à haute tension dans le parc résidentiel belge et leurs incidences sur la population.

Etude et justification des courants de contact induits
par les lignes à haute tension dans le parc résidentiel
belge et leurs incidences sur la population.

Pierre-Paul Barbier

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières.....	3
Remerciements.....	6
Résumé	7
Introduction générale	8
Organisation de la thèse.....	10
Originalités développées dans le cadre de ce travail	10
Chapitre 1: L'exposition aux champs électromagnétiques	12
1.1. Introduction.....	12
1.1.1. Bref historique.....	12
1.1.2. Les lignes électriques	12
1.2. Les champs électromagnétiques.....	13
1.2.1. Les champs électriques et magnétiques générés par des lignes et des câbles à haute tension	14
1.2.2. L'exposition due aux appareillages et au réseau de distribution	16
1.3. Effets potentiels sur la santé de l'exposition aux CEM : revue de la littérature épidémiologique.....	19
1.3.1. Principaux modèles d'études épidémiologiques.....	19
1.3.2. Résultats des études épidémiologiques	19
1.4. Recommandation d'exposition et le seuil de 0,4 μ T : Les différentes métriques qui caractérisent le seuil d'exposition aux champs ELM basse fréquence.....	27
1.5. Conclusion	31
Chapitre 2: Effet du champ électromagnétique à 50 Hz sur le corps humain	32
2.1. L'exposition d'un corps humain à un champ électrique à 50 Hz	33
2.2. Exposition d'un corps humain à un champ magnétique à 50-60 Hz	38
2.3. Effet d'un champ électrique interne sur le corps humain	40
2.4. Courants de contact	44
2.5. Simulation numérique du corps humain	46
2.5.1. Hypothèses utilisées.....	46
2.6. Conclusion:	48
Chapitre 3: Etude détaillée des courants de contact.....	49
3.1. Les courants de contact (CC)	49

3.1.1.	Introduction et Définition.....	49
3.1.2.	Campagne de mesures.....	50
3.2.	Etude de l'impédance du corps humain.....	57
3.2.1.	Les deux grands standards qui déterminent l'impédance du corps humain.....	58
3.2.2.	Valeurs de tension limite en Belgique.....	62
3.2.3.	Etude de l'impédance du corps humain pour des courants de contact allant de 1 à 250 μ A.....	64
3.1.2.	Simulation par calcul.....	68
3.1.3.	Simulation sur le corps humain.....	72
3.1.4.	Conclusion :.....	73
3.3	Courants de contact, résultats de la campagne de mesures et justifications.....	74
3.3.1.	Courants de contact, résultats de la campagne de mesures.....	74
3.3.1.1.	Courants de contact et champ magnétique :.....	76
3.3.2.	Étude des courants de contact par simulation numérique.....	76
3.3.3.	Courants de contact et champ magnétique résultat de la campagne de mesures.....	78
3.3.4.	Courants de contact et liens équipotentiels.....	81
3.3.5.	Courants de contact et les effets capacitifs.....	88
3.3.6.	Simulation numérique des Cables avec une évacuation.....	99
3.3.7.	Mesure des courants dans une maison passive utilisant des câbles à base de ferrite.....	100
3.3.8.	Courant de contact et personnes electro-sensibles.....	102
3.3.9.	Conclusion.....	103
3.4.	Modèle électrique des courants de contact par effet capacitif.....	105
3.4.1.	Introduction.....	105
3.4.2.	Simulation :.....	105
3.4.3.	Conclusion:.....	113
3.5	Discussion Sur les courants de contact.....	113
3.5.1	L'étude Américaine.....	113
3.5.2	Les différences techniques entre les deux enquêtes :.....	115
3.5.3	Origine des courants de contact.....	118
3.5.4	Conclusion.....	121
Chapitre 4.	Étude du Radon à proximité des lignes HT.....	123
4.1.	Introduction.....	123

4.2.	Les risques liés à l'exposition au radon	125
4.3.	Leucémie infantile et l'exposition résidentielle au radon.....	127
4.4.	Le Radon et les champs électromagnétiques	128
4.5.	Etude du radon à proximité des lignes à HT.	129
4.5.1	Concentration en radon aux abords d'une ligne HT	129
4.5.2	Mesures de la Concentration en radon à proximité d'une ligne à HT.....	131
4.5.3	Impact de foudre - ligne à haute tension et concentration en radon.....	134
4.6	Conclusion.....	136
	Conclusion générale.....	137
	Enrichissement personnel	139
	Perspectives	140
	Bibliographie	141
	Annexe 1 : Répartition des lignes électriques en Belgique.....	150
	Annexe 2 : Indicateurs utilisés en statistique	152
	Annexe 3 : Instrumentation utilisée pour la campagne de mesures	155

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'existerait pas sans l'assistance précieuse et considérable de nombreux amis, collègues et chercheurs enthousiastes.

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Jean-Louis Lilien, Promoteur de cette thèse, pour m'avoir offert ma première expérience professionnelle. Il a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux tout en ayant un œil critique et avisé. Je tiens également à le remercier pour sa patience, son écoute et sa rapidité de correction.

Personne ne peut écrire sans des fondations solides : merci Jen de m'avoir soutenu, motivé tout au long de ces 6 années. Je la remercie également pour le temps passé en relecture et pour avoir réussi à entretenir ma motivation.

Remerciement à tous mes collègues du département de transport et distribution de l'énergie électrique pour leur collaboration durant ces quelques années et pour les discussions animées près de la machine à café.

Je remercie aussi les membres de l'équipe ACE pour leur patience, leurs nombreux conseils avisés ainsi que leurs explications dans le domaine de la modélisation. Je leur suis également reconnaissant pour les heures passées ensemble grâce auxquelles j'ai pu découvrir la simulation numérique.

Je tiens à remercier les scientifiques du groupe du BBEMG, pour nos nombreux échanges.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidé durant ces quelques années, ainsi que toutes celles qui m'ont soutenu pendant la rédaction de cette thèse.

Pour terminer, je remercie les membres du jury pour la lecture et l'évaluation de ce travail.

RÉSUMÉ

Depuis le début des années 70, les risques liés aux champs électromagnétiques 50Hz (ELF) générés par les lignes à haute tension sont largement traités par la communauté scientifique (plus de 1000 références recensées par l’OMS). Suite à ces recherches, des épidémiologistes ont mis en avant une corrélation possible avec le développement de leucémies infantiles. Ce « risque relatif » serait d’un facteur deux pour une exposition prolongée aux champs magnétiques supérieurs à 0,4 μ T. Après un état de l’art du sujet, l’auteur nous montre l’influence que l’exposition aux champs électromagnétiques peut avoir sur le corps humain. Suite aux diverses simulations effectuées, d’autres mécanismes indirects vont être explorés comme les courants de contact. L’objet de ce document est donc d’approfondir cette supposition à l’aide d’études de terrain et de simulations. Celles-ci vont pouvoir démontrer que ces courants, dans certaines situations, vont générer un champ électrique interne plus important que l’exposition aux champs électriques et/ou magnétiques. Dès lors, une campagne de mesures sur les courants de contact a été mise sur pieds afin de vérifier certaines hypothèses telles que : l’influence du champ magnétique, l’impact des liens équipotentiels et l’effet capacitif des câbles. Cette dernière hypothèse a fait l’objet d’une attention particulière de l’auteur. Celle-ci l’a amené à postuler qu’il peut s’établir entre les câbles électriques et les conduites d’eau, des capacités comprises entre quelques nanofarads et picofarads ce qui peut permettre le passage de courant lors du contact avec ces dites conduites. Afin d’appuyer ces dires, des mesures ont été effectuées dans diverses habitations ainsi que des simulations numériques qui ont permis d’établir des modèles électriques. L’ensemble de ces recherches l’ont amené à chiffrer les courants de contact entre 5 et 10 μ A. Néanmoins, des courants d’amplitude plus grande et donc potentiellement dangereux peuvent également apparaître dans certains cas. Différentes solutions seront alors proposées.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis 60 ans environ, la demande en électricité dans le monde a été multipliée par douze. En Belgique, la consommation en électricité n'a cessé de s'accroître passant sur la même période de 10 à plus de 80 TWh. Cette dernière est devenue un partenaire indispensable dans notre vie quotidienne, notre développement technologique et économique. Malgré tous les bénéfices liés à son utilisation, nous baignons constamment dans un champ électrique et magnétique.

Si le public reconnaît les avantages liés à son utilisation, il manifeste une inquiétude croissante quant aux effets induits par son utilisation. L'un des premiers à s'en préoccuper fut Thomas Edison.

Il a été un précurseur en matière de dangers pouvant découler du courant alternatif en haute tension. En effet, fin du XIX^{ème} siècle, une opposition sévère fait rage entre George Westinghouse, partisan du courant alternatif et lui, défenseur du courant continu. Durant cette période, Edison insiste sur les risques que représente le courant alternatif, en haute tension, pour les êtres vivants. Afin d'appuyer ses dires, il va jusqu'à financer l'invention de la chaise électrique. !

« Il a été Westinghouse »

Cette phrase d'Edison fait suite à l'exécution de William Kemmler qui a démontré toute la dangerosité du courant alternatif à haute tension vanté par Westinghouse. Le développement des schémas de mise à la terre dans les années suivantes vont permettre de diminuer les risques d'électrifications.

Thomas Edison fut donc l'un des premiers à s'interroger sur le courant alternatif. Aujourd'hui, toujours d'actualité, ces dangers liés à la haute tension possèdent l'avantage d'être connus et maîtrisés.

C'est seulement en 1979, près d'un siècle après l'apparition des premières lignes électriques, que cette question refait surface. Tout a commencé par une étude épidémiologique réalisée par les américains Wertheimer et Leeper : ils ont observé une répercussion néfaste des lignes haute tension sur la population se trouvant à proximité. Selon cette analyse, le fait de résider à proximité d'une ligne électrique augmenterait le risque de développement de leucémies infantiles.

A cette époque, le monde scientifique s'interroge à nouveau sur le fait de savoir si le champ magnétique et/ou électrique, généré par les lignes à haute tension, pourrait être l'origine probable de l'accroissement de certains cancers.

Fin des années 80 et début des années 90, des questions fusent également en Belgique suite à des plaintes d'agriculteurs ayant observé des effets néfastes sur leur bétail à proximité d'une ligne à haute tension. Le Ministère a conclu en 1988, que dans l'état actuel des connaissances, il n'y avait pas de preuves sur l'influence de la ligne.

Début des années 90, différents groupes de scientifiques de l'Université de Liège se regroupent et étudient l'influence du champ électrique et magnétique à basse fréquence sur la santé. Trois ans plus tard, ce groupe prend de l'ampleur et est rejoint par différentes universités et centres de recherches, c'est la naissance du BBEMG (« Belgian Bioelectromagnetic Group »).

En 2000, une idée innovante est émise par des chercheurs de l'institut de recherche en énergie électrique de Palo Alto aux USA (EPRI). D'après eux, ce ne serait pas l'interaction directe du champ magnétique avec l'être humain qui serait responsable du développement leucémique mais un effet indirect. Ce dernier s'appuierait sur des phénomènes physiques et perturberaient les habitations se trouvant près des lignes. Cette hypothèse

porte le nom de « courant de contact »¹. Ce courant tirerait son origine de l'induction du champ magnétique dans toutes les conduites métalliques (eau, chauffage, circuit électrique) se trouvant à proximité de la ligne.

Le principe suivi se développe ainsi : cette induction magnétique créerait des différences de potentiels de quelques dizaines voire centaines millivolts en divers endroits de l'habitation. Une personne peut donc toucher deux objets ou conduites à des potentiels différents et être parcourue par un « courant de contact » de quelques dizaines, centaines microampères. De telles intensités ne sont pas perceptibles (le seuil de sensibilité humaine étant proche de 500 microampères) ni éliminées par la protection différentielle des habitations (fixée à un seuil de 30 milliampères). Des simulations numériques sur l'être humain ont été réalisées dans cet objectif : elles montrent que ces courants qui parcourent le corps en cas de contact (ex : si un être humain prend son bain ou sa douche, un courant de contact s'écoule entre l'arrivée d'eau et l'évacuation en passant par la personne) seraient plus importants que ceux induits directement par l'exposition aux champs magnétiques.

Les premiers résultats de ces analyses sont assez troublants. En effet, Rob Kavet montre sur des campagnes de mesures menées aux USA, que les courants de contact sont statistiquement plus importants lorsque le champ magnétique augmente.

Ces études ne parlent pas d'un effet direct, comme le foudroiement relaté par Edison, mais plutôt des effets indirects liés au transport de l'énergie électrique. En regardant de plus près, on se rend compte qu'en Belgique, les données relatives aux courants de contact, sont inexistantes. Voici donc le fondement de cette thèse qui portera sur : « l'étude et la justification des courants de contact induits par les lignes haute tension dans le parc résidentiel belge et leur incidence sur la population ». De plus, cette recherche correspondant parfaitement aux activités de l'unité TDEE² (de l'Université de Liège membre du BBEMG), il m'est alors proposé de prendre part à cette investigation.

De nos jours, en Europe et plus particulièrement en Belgique, l'exposition aux courants de contact est inconnue. Dans le cadre de notre collaboration, nous décidons d'estimer cet impact sur la population. A cette fin, une campagne d'essais a été réalisée par le département de transport et de distribution de l'énergie électrique de l'Ulg, membre du Belgium Bio Electromagnetic group (BBEMG)³.

Le but de cette démarche est de quantifier l'exposition aux courants de contact de la population belge éloignée et proche des lignes électriques à haute tension. Ces mesures, au nombre de cent cinquante, ont été prises en collaboration avec un organisme de certification. Les techniciens ont donc suivi un protocole rigoureux que nous avons défini, reprenant un nombre important de données concernant :

- L'installation électrique ;
- La valeur du champ magnétique ;
- Les courants de contact dans l'habitation.

Ces résultats ont fait l'objet d'une analyse détaillée ayant pour but de vérifier si une corrélation pouvait exister entre les courants de contact et le champ magnétique.

Ensuite, d'un point de vue scientifique, il fallut chercher et démontrer l'origine de ces courants de contact et déterminer l'impact de ceux-ci sur l'être humain. Ces différents points ont été étudiés grâce à la collaboration

¹A ce jour, aux Etats Unis, Rob Kavet poursuit son investigation.

²Transport et distribution de l'énergie électrique

³Le BBEMG est un groupe belge, composé de plusieurs équipes de recherche, impliqué dans l'approfondissement des effets biomédicaux des champs électriques et de l'induction magnétique générés par le transport et l'utilisation de l'énergie.

de plusieurs équipes du groupe BBEMG, ce qui a favorisé la transversalité de l'étude. L'analyse de ces résultats initie l'objet de cette thèse.

Il est à noter que j'ai porté une attention particulière dans l'explication de certains phénomènes scientifiques qui peuvent sembler basiques pour des spécialistes des domaines concernés. Le BBEMG étant un groupe d'experts multidisciplinaires, il me semblait important que les informations en rapport avec cette thèse puissent être assimilées par l'ensemble des membres.

Ce choix a également été motivé par l'affinité que j'entretiens avec la pédagogie et ma volonté d'interagir et d'échanger avec un plus large public.

ORGANISATION DE LA THÈSE

La thèse est composée de cinq parties :

1. Le chapitre 1 est l'introduction de la thèse.
J'aborde dans ce premier chapitre tous les rappels nécessaires à la compréhension des études épidémiologiques ainsi que l'état de l'art de celles-ci.
2. Dans le chapitre 2, je présenterai les effets liés à l'exposition du champ magnétique 50 Hz sur l'être humain.
3. Le protocole ainsi que l'analyse des résultats sont présentés dans cette troisième partie que j'ai subdivisée en sous chapitres.
 - a. Dans le chapitre 3.1, on retrouve l'introduction aux courants de contact et le détail du protocole de mesures.
 - b. Le passage du courant à travers le corps humain ne peut être étudié sans approfondir nos connaissances sur l'impédance de celui-ci aux niveaux de tension appliquée dans nos gammes de mesure. Cette analyse est présentée dans le chapitre 3.2.
 - c. Le chapitre 3.3 présente l'analyse statistique des résultats de la campagne de mesures ainsi que les hypothèses mises en avant pour justifier les courants de contact. Ce point représente le cœur de cette thèse.
 - d. Le chapitre 3.4 est consacré à la modélisation des courants de contact.
 - e. Dans le chapitre 3.5, je vais comparer les résultats obtenus en Belgique avec ceux venant des USA.
4. Le Chapitre 4 explore une piste innovante qui sera développée en parallèle de l'étude sur les courants de contact.
5. Je conclurai ce travail dans le chapitre 5

Vous retrouverez en annexe, quelques documents relatifs à l'étude et aux calculs réalisés dans le cadre de ce travail.

ORIGINALITÉS DÉVELOPPÉES DANS LE CADRE DE CE TRAVAIL

Une des originalités de ce travail a été de montrer que l'origine des courants de contact est capacitive dans les régions du monde avec schéma TT. Ce n'est probablement pas le cas dans les zones à schéma TN. La contribution liée aux champs ELM 50 Hz existe mais peut être négligée dans ce type de configuration.

Une autre recommandation proposée dans le cadre de ce travail est de scinder les études épidémiologiques en fonction du système de mise à la terre (TT ou TN).

Une remarque importante a été portée à l'origine des effets biologiques sur l'être humain. Si ceux-ci sont fonction du champ électrique interne, il faut considérer majoritairement l'impact des courants de contact et non le champ B ou le champ E.

Nous avons mis en place une banque de données de 150 habitations en répertoriant pour chacune d'elle plusieurs mesures telles que : les mesures des courants de contact, tensions de contact combinées aux valeurs de mise à la terre, champ magnétique ambiant, qualité de l'installation électrique, lien équipotentiel, ...

J'ai développé l'établissement d'un schéma équivalent d'une installation résidentielle incluant tous les couplages résistifs et capacitifs depuis le transformateur de distribution jusqu'à la terre locale en incluant les installations sanitaires, les filtres antiparasitages.

Il existe d'autres sources épidémiologiques de leucémie infantile avec le même odd ratio que les champs ELM 50 Hz, par ex le radon. La corrélation radon-proximité des lignes à HT semble ne pas être positive.

De manière plus annexe, l'impédance interne du corps humain est résistive et son ordre de grandeur aux très basses tensions (100 mV) est de 2000 ohms, similaire à celle connue dans la littérature aux niveaux 12 V.

1.1. INTRODUCTION

Ce chapitre sera consacré à la mise en place du contexte. J'aborderai les éléments susceptibles de jouer un rôle dans cette étude ainsi que divers rappels théoriques, indispensables, pour une bonne appréhension du sujet de cette thèse.

1.1.1. BREF HISTORIQUE

Dans notre société, l'utilisation de l'électricité est devenue incontournable étant donné qu'elle est utilisée dans la plupart de nos activités.

Dans la première moitié du 19^{ème} siècle, l'alimentation se faisait principalement en courant continu avec comme désavantage la distance de distribution. En effet, les centrales à courant continu n'étaient capables de fournir de l'électricité que dans un rayon de cinq kilomètres autour du lieu de production.

L'un des moyens utilisés pour pallier à cette restriction a été le courant alternatif. Sa capacité à se transformer facilement, permet de choisir les niveaux de tension adéquats pour limiter les chutes de tension et réduire les pertes. Pendant plusieurs décennies se sont alors opposés Edison, partisan du courant continu et Westinghouse et Tesla, promoteurs du courant alternatif.

Ce fut l'attribution du marché de la centrale hydroélectrique 75MW à Westinghouse qui semble avoir donné un avantage au courant 60Hz. La mise en place du système triphasé fut un succès et le 60 Hz en Amérique et 50 Hz en Europe se développèrent progressivement. Ces fréquences furent adoptées car elles avaient la prétention d'être les plus technico-économiques du moment. Dès lors, des multitudes de lignes électriques apparurent afin d'acheminer l'énergie aux divers endroits du continent

1.1.2. LES LIGNES ÉLECTRIQUES

Ces lignes sont composées de 3 phases. Chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs espacés de quelques décimètres facilitant ainsi le transport de l'énergie. L'avantage du triphasé est que la somme des tensions et la somme des courants sur l'ensemble des trois phases est égale à zéro. Ceci a pour effet de diminuer le champ électrique et magnétique quand on s'écarte des phases. Nous verrons également que différentes configurations autres que triphasées permettent de réduire encore mieux le champ électrique et magnétique à proximité des lignes haute tension (HT).

En 2012, en Belgique, la quantité d'électricité qui a transité est de 82 TWh [1] à travers 8400 km de lignes/câbles à haute tension et plusieurs dizaines de milliers de km en moyenne et basse tension. Le réseau est réparti sur 5640 km de câbles aériens portés à 380, 220, 150, 70, 36 et 30kV ainsi que sur 2765 km de câbles souterrains [2] dans lesquels peuvent transiter des courants allant jusqu'à 2000A.

Le transit de l'énergie électrique n'est pas constant, il varie au cours de la journée comme au cours de l'année. Le pic journalier se situe aux alentours de 11h du matin (Annexe 1 : Répartition des lignes électriques en Belgique

). Les pics annuels se trouvent généralement entre la mi-décembre et la fin janvier. On remarque également que les week-ends, la consommation d'énergie est moins importante (Annexe 1 : Répartition des lignes électriques en Belgique

).

Le transit de l'électricité par les lignes est toujours accompagné par la présence :

- d'un champ électrique (CE) qui est lié à :
 - La tension.
 - La proximité des autres phases, du (des) câble(s) de garde, de la terre ou tout objet à proximité.
 - La configuration de la ligne (380kV, 220kV, ...).
- d'un champ magnétique⁴ (CM) qui est lié à :
 - La valeur du courant circulant dans les conducteurs.
 - La configuration de la ligne.

Plus la tension (et donc le courant en régime normal d'utilisation), sera élevée, plus les champs électrique (**Figure 1-1 a**) et magnétique (**Figure 1-1 b**) seront importants.

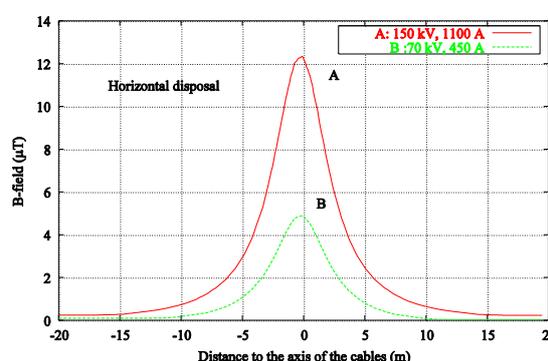
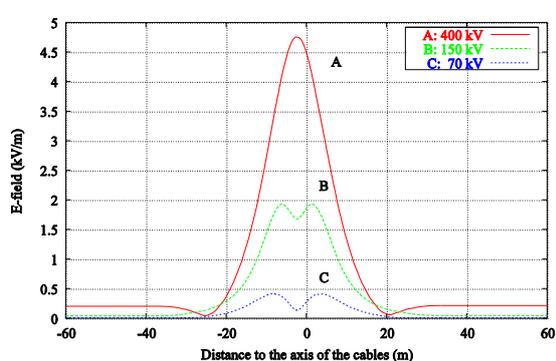


Figure 1-1: a) Valeurs typiques du champ électrique à 1,5 m du sol

b) Valeurs typiques du champ magnétique à 1,5 m du sol [3]

1.2. LES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les ondes électromagnétiques générées par le transport de l'énergie électrique, au niveau du sol, font partie des radiations non ionisantes, à l'inverse des rayons UV et à fortiori des rayons X, Gamma, etc... C'est la théorie de propagation des ondes qui est à l'origine de la classification des rayonnements. Ainsi, les rayonnements non ionisants sont incapables d'ioniser la matière c'est-à-dire d'arracher un électron à un atome. La transition entre les rayons X (ionisants) et les rayons non ionisants se fait dans l'ultraviolet (**Figure 1-2**), soit à une fréquence proche de 10^{16} Hz. La longueur d'onde et l'énergie d'une onde électromagnétique sont données par :

La longueur:

$$\lambda = c/\nu$$

Où :

- λ , équivaut à la longueur d'onde
- c , est la vitesse de la lumière
- ν , est la fréquence

⁴Dans ce document, on parlera de "champ magnétique" (exprimé B en Teslas) plutôt que la dénomination correcte « champ d'induction électromagnétique ». En effet, les équations de Maxwell séparent ces deux notions (H en A/m et B en Tesla) et les relient par une loi matérielle constitutive qui fait intervenir la perméabilité magnétique du milieu. Toutefois, dans la littérature relative aux effets des champs électromagnétiques, le terme « champ magnétique » est très souvent utilisé, comme ici, avec une ellipse linguistique que j'ai admise.

Pour l'énergie nous avons :

$$E=hf$$

Où :

- E , est l'énergie
- h , est la constante de Planck
- ν , est la fréquence de l'onde

Les champs liés au transport de l'énergie électrique sont des champs à très basse fréquence. Ce qui nous donne une énergie de $2 \cdot 10^{-13}$ eV en théorie de propagation. Ce régime est atteint dans le cas du 50 Hz lorsque l'on se situe à 6000 km de la source.

Si on compare cette valeur à l'énergie produite par la lumière visible, cette dernière avoisine les 2 eV soit plus d'un billion de fois plus importante que celle concernée dans ce document.

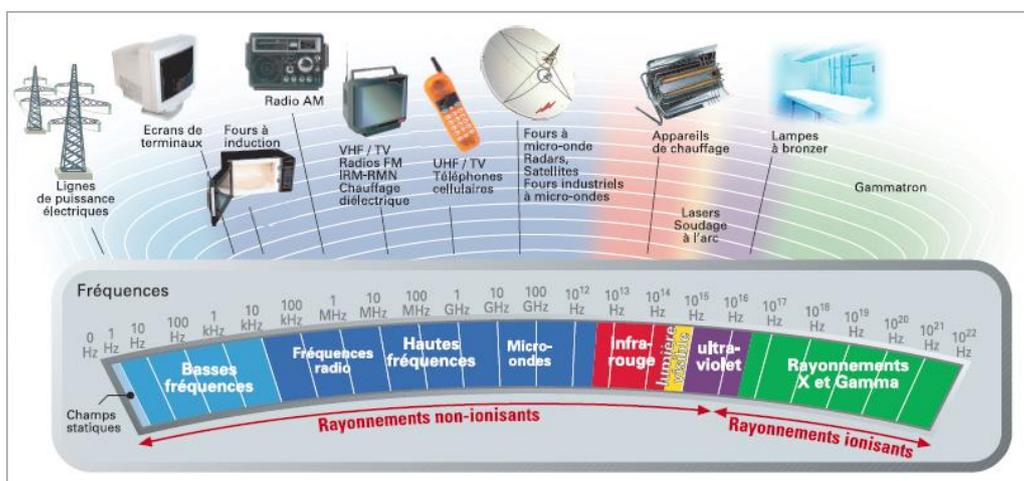


Figure 1-2: Spectre fréquentiel [WEB]

La matière est constituée d'atomes et de molécules qui existent dans un grand nombre d'états, de niveaux d'énergie différents et quantifiés. Lorsqu'un système reçoit une quantité d'énergie ΔE , celui-ci peut passer d'un état A à un état B si l'énergie qu'il a reçue est suffisamment importante c'est-à-dire si $\Delta E > E_B - E_A$. Par exemple, les liaisons de Van der Waals ($\Delta E \sim 0,1$ eV) peuvent être rompues par un rayonnement infrarouge correspondant à une énergie de 0,4 eV. La limite entre les rayonnements non ionisants et les rayonnements ionisants correspond à un seuil biologique de 13,6 eV équivalent à l'énergie d'ionisation des atomes d'oxygène et d'hydrogène. Le corps étant constitué de 65% d'eau, il est donc raisonnable de prendre cette valeur comme transition. Cela signifie que le rayonnement à 50 Hz (au-delà de 6000 km), associé à une énergie de $2 \cdot 10^{-13}$, n'a pas le pouvoir d'arracher des électrons. Néanmoins, lorsque l'on se situe proche de la source, des phénomènes d'ionisation peuvent avoir lieu comme l'effet couronne (grésillement entendu à proximité des lignes).

1.2.1. LES CHAMPS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES GÉNÉRÉS PAR DES LIGNES ET DES CÂBLES À HAUTE TENSION

Le champ électrique est lié à la valeur de la tension du conducteur et à la configuration générale de la ligne. Celui-ci est quasi nul à l'intérieur du conducteur⁵ mais très élevé (cette fois en champ radial, perpendiculaire à la surface du conducteur) sur le conducteur (jusqu'à environ 15 kV_{eff}/cm dans une ligne haute tension en exploitation) ; puis, il décroît ensuite avec la distance en $1/R^2$ comme vu à la Figure 1-1. La valeur du champ électrique est généralement comprise entre 1 et 5kV/m (Figure 1-3) en dessous de lignes aériennes à haute

⁵Le champ électrique à l'intérieur du conducteur dépend de la conductivité du matériau. Il existe longitudinalement et est lié au courant qui passe par la loi d'Ohm, il s'agit de mV/m. C'est lui qui est lié à la chute de tension.

tension, au niveau du sol. Il est évidemment nul dans le sol entourant les câbles souterrains, vu la conductivité des sols d'une part et vu l'écran conducteur entourant généralement chaque phase du câble souterrain (cage de Faraday).

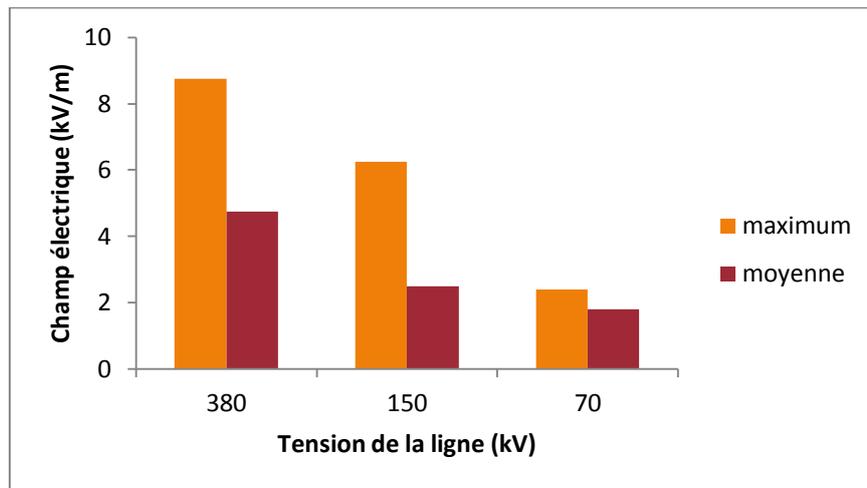


Figure 1-3: Valeurs typiques du champ électrique sous une ligne HT (à environ 1 m du sol) en Belgique [4]

Le champ magnétique, quant à lui, varie avec le courant circulant dans le câble. Il est également fonction de la géométrie des conducteurs et du courant circulant dans tous les conducteurs à proximité. L'alignement (configuration en nappe) de ceux-ci génère un champ magnétique plus important qu'une géométrie en triangle/trèfle (Figure 1-4) [5].

Celui-ci peut être évalué à l'aide des formules suivantes :

Formules qui dérivent de la loi de Biot Savart :

$$B_{flat}(r) = \frac{\sqrt{3}d_{pp}I}{5r^2} (\mu T)$$

$$B_{triangular}(r) = \frac{\sqrt{6}d_{pp}I}{10r^2} (\mu T)$$

Où :

- *B* est le champ magnétique (μT)
- *dpp* est la distance phase à phase (m)
- *r* est la distance entre le centre géométrique de la ligne et le point de calcul (m)
- *I* est le courant dans la ligne (A)

Equation 1-1: Formule dérivée de la Loi de Biot Savart

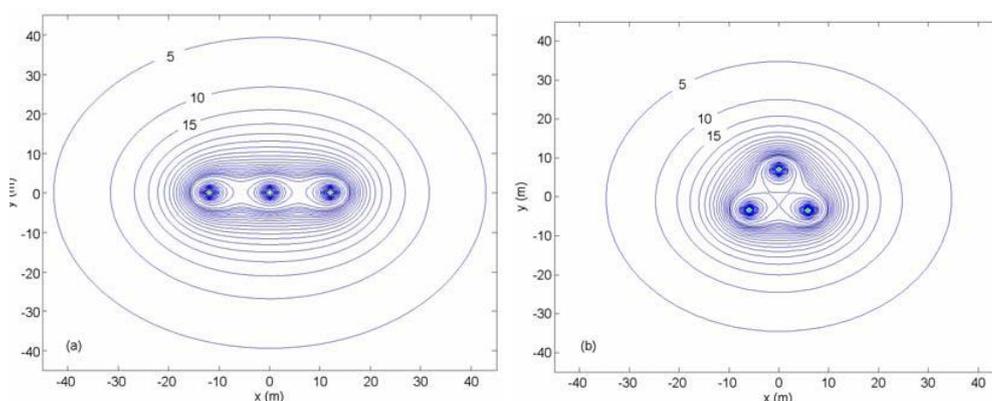


Figure 1-4a: Champ magnétique (μT), câbles en ligne b : champ magnétique, câbles en triangle [5]

D'autres techniques existent pour diminuer la valeur du champ magnétique à proximité des lignes/câbles mais la spécificité de celles-ci ne rentre pas dans le cadre de ce travail. C'est pour cette raison que je vais simplement les énumérer.

L'addition de deux câbles parallèles, reliés pour former une boucle placée sous la ligne HT ou au-dessus du câble souterrain permet de diminuer la valeur du champ magnétique au niveau du sol (formation d'une boucle dans laquelle est induite un courant dont le champ généré va s'opposer au champ principal).

Une autre méthode utilisée consiste à dédoubler les câbles en les arrangeant de manière à diminuer au maximum le champ magnétique. Cette technique dite « mitigation technique » présente un désavantage important pour les travaux de maintenance sur la ligne car l'ensemble des conducteurs électriques se trouve mélangé, obligeant de couper toute la ligne pour effectuer une intervention ou un entretien.

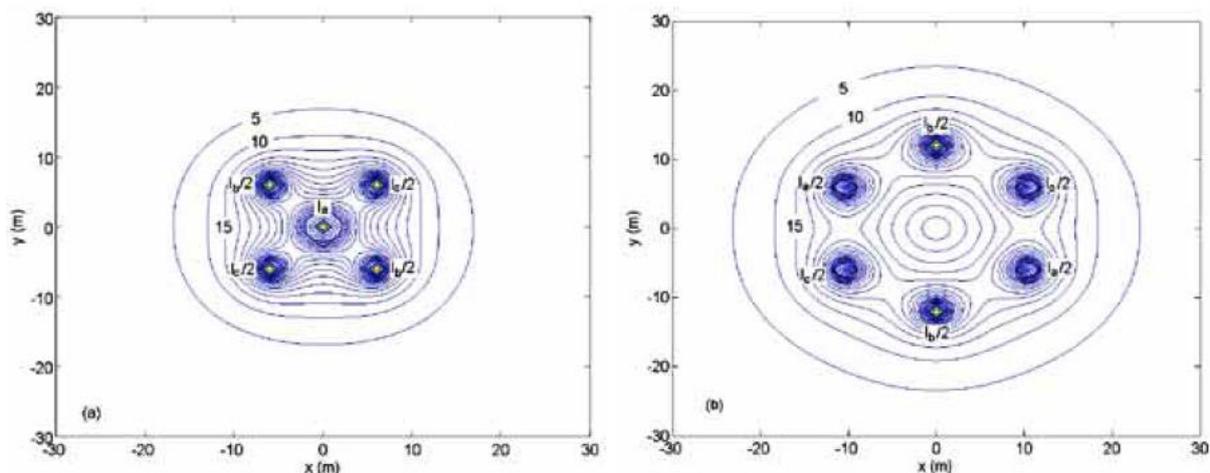


Figure 1-5 : Courbe de niveaux du champ magnétique dans le cadre du dédoublement de phases. Gauche, deux phases dédoublées et droite, dédoublement des trois phases. [5]

1.2.2. L'EXPOSITION DUE AUX APPAREILLAGES ET AU RÉSEAU DE DISTRIBUTION

Dans la vie de tous les jours, nous sommes régulièrement exposés aux champs électromagnétiques 50 Hz (CEM) par ou suite à l'utilisation d'appareils électriques que ce soit à domicile, au travail ou dans les transports. L'intensité du champ électrique diminue fortement si l'on est entouré de matériaux conducteurs (sauf, bien sûr, si une source électrique existe à l'intérieur de la « cage de Faraday »). Citons à titre d'exemple le champ électrique très faible dans une habitation classique (avec hourdis) ou dans un véhicule roulant (train, tram, voiture). A l'inverse, les CM⁶ passent librement à travers la plupart des structures (y compris conductrices) : la population y est donc plus exposée. Au cours de ces dernières années, les études épidémiologiques et les effets sur la santé ont principalement porté sur l'étude des CM car ceux-ci s'avèrent simples de mesure grâce à des protocoles rapidement mis en place.

Les appareils électriques peuvent exposer les personnes à des CEM importants à courte distance.

⁶Champs Magnétiques.

1.2.2.1. PUISSANCE DES APPAREILS

Différentes études ont été réalisées pour définir la valeur du CM à proximité d'appareils en fonctionnement. Certains de ces résultats sont présents dans le tableau ci-dessous.

Résultats obtenus aux Etats-Unis : [6]				
	15,2 cm	30,5 cm	61,0 cm	122 cm
Machine à laver	2	0,7	0,1	X
Aspirateur	30	6	1	0,1
Radiateur électrique	10	2	0,4	X
Fer à repasser	0,8	0,1	X	X
Radoréveil	1,5	0,2	X	X
Ordinateur	1,5	0,5	0,2	X
Chargeur électrique	3	0,3	X	X
Perceuse	15	3	0,4	X

Tableau 1-1: Mesures du champ magnétique à proximité des appareils (μT)

On peut constater que le champ magnétique peut prendre des valeurs importantes lorsque l'on se situe à proximité des appareils. Ensuite, il décroît rapidement pour atteindre des valeurs de bruit de fond à une distance de plus ou moins 1m.

1.2.2.2. TENSION DU RÉSEAU

Il existe dans le monde, deux tensions d'alimentation monophasée résidentielle; le 230 Volts en Europe, Asie et Afrique et le 110 V principalement aux USA et en Amérique du sud (Figure 1-6).

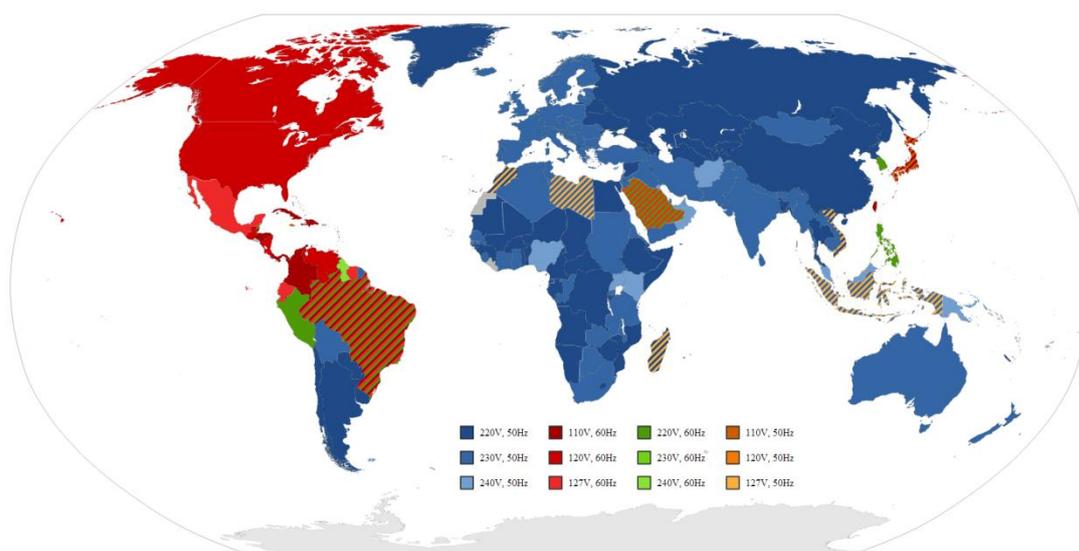


Figure 1-6: Distribution des tensions dans le monde [7]

Si je compare le champ magnétique moyen dans les habitations (obtenu suite à différentes investigations, références voir [Tableau 1-2](#)), je me rends compte, aussi, dans ce tableau que le champ magnétique dans les pays alimentés par du 110V, est deux fois plus important.

Ce phénomène peut s'expliquer en partie par la consommation électrique des appareils. Ceux-ci fonctionnent à une certaine puissance décrite par la formule :

$$P = VI$$

Les pays ayant comme tension d'alimentation du 110V, auront un courant deux fois plus important circulant dans les équipements électriques ; ce qui générera un champ plus important à proximité de l'appareillage. Le champ magnétique décroît de façon importante une fois qu'on s'éloigne de la source ([Tableau 1-1](#)) et ne peut donc pas être la source principale étant donné que les mesures sont normalement prises au milieu de la pièce. Une autre explication peut venir du système de mise à la terre. Dans les pays alimentés en 110 V, le régime du neutre est en TN, ce qui signifie que ce conducteur est parcouru par un courant qui n'est pas équilibré. Ce courant peut générer une augmentation du champ magnétique. Les résultats du [Tableau 1-2](#) restent pourtant troublants vu que l'on retrouve exactement un facteur deux.

110 V			220V		
Auteurs	N (n°br de cas)	B CM	B CM	N(n°br de cas)	Auteurs
Kaune 1987	43	0,058	0,038	208	Merchant, 1994
London, 1991	143	0,067	0,045	56	Cognil, 1996
Kavet, 1992	15	0,058	0,03	44	Preece, 1996
Zaffanella, 1993	986	0,045	0,06	37	Juutilainen, 1989
Bracken, 1994	396	0,075	0,03	13	Karner, 1991
Kaune, 1994	29	0,1	0,03	457	Michaelis, 1997
Kaune et zaffanella, 1994	33	0,07			
Linnet, 1997	585	0,075			
Mader, 1990	21	0,05			
Donnelly, 1991	24	0,105			
Levallois, 1998	17	0,16			
Moyenne		0,079	0,038		

Tableau 1-2 : Champ magnétique en fonction de la tension d'alimentation (basé sur l'exposition aux champs électromagnétiques: mises à jour des risques pour la santé et pertinence de la mise en œuvre du principe de précaution; Institut national de santé publique du Québec.) (μT)

Qui plus est, différentes études ont mis en avant des variations importantes selon les saisons dans les pays où le climat hivernal est fort prononcé (Suède, Canada). La consommation d'électricité est généralement plus

importante à cause du froid et des journées très courtes, ce qui entraîne une explosion de l'utilisation des chauffages électriques. Cette situation engendre donc une augmentation du champ magnétique [8]⁷.

Dans la section suivante, je vais m'intéresser à différentes études qui estiment l'exposition de la population aux champs magnétiques en les associant avec la santé via des études épidémiologiques. Je constaterai qu'il y a près de 30 ans que le corps scientifique étudie une possible nocivité de cette exposition.

1.3. EFFETS POTENTIELS SUR LA SANTÉ DE L'EXPOSITION AUX CEM : REVUE DE LA LITTÉRATURE ÉPIDÉMIOLOGIQUE

Dans un premier temps, nous allons rappeler les principaux modèles d'études épidémiologiques. Les définitions afin d'explicitier les indicateurs utilisés dans le cadre de ce travail tels que : le risque relatif, l'odds ratio, les intervalles de confiance, moyenne et écarts types sont développés en annexe (Annexe 2 : Indicateurs utilisés en statistique).

1.3.1. PRINCIPAUX MODÈLES D'ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

Il existe plusieurs types d'études épidémiologiques, les principales sont les enquêtes d'observations, les études de cas témoins « case control » et les études cohortes.

Les enquêtes d'observations visent à estimer l'exposition de la population à certains agents extérieurs comme les pesticides ou la pollution électromagnétique.

Les études de cas témoins consistent à comparer deux populations, une présentant une maladie et l'autre non. Le but de l'enquête est de rechercher le ou les facteurs susceptibles d'expliquer la maladie. Celles-ci ont l'avantage d'être peu coûteuses. Concrètement : si le lien entre le facteur justificatif et la maladie est faible, d'autres agents peuvent être à l'origine de la maladie. Cela correspond au biais de confusion.

Les études cohortes consistent à prendre deux groupes de personnes bien distincts par leur exposition à un facteur dont on désire connaître l'influence. Par exemple, ou : l'un des deux échantillons serait « un groupe de fumeurs » et l'autre non-fumeur. L'analyse repère alors si un des groupes est plus sensible ou non à une maladie comme le « cancer du poumon ».

1.3.2. RÉSULTATS DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

Je vais développer les résultats qui apparaissent dans les études à proximité des lignes à haute tension.

Précédemment, j'indique que la moyenne géométrique est, non seulement la plus souvent utilisée mais aussi, caractérise le mieux la source. Les études présentées posséderont généralement une distribution log-normal (**Figure 1-7**) ([9]; [10]; [11]; [12]; [13]). Les statistiques ont montré que dans ce cas d'exposition, il vaut mieux utiliser la moyenne géométrique et l'écart type géométrique qui ont été donnés en annexe.

⁷L'utilisation de radiateurs électriques comme moyen de chauffage principal est proscrit dans certains pays dont le Danemark. Cela fait suite à la directive Européenne sur la performance énergétique des bâtiments. De fait, l'énergie pour produire l'électricité nécessaire au chauffage est beaucoup plus importante que si l'on utilisait une chaudière

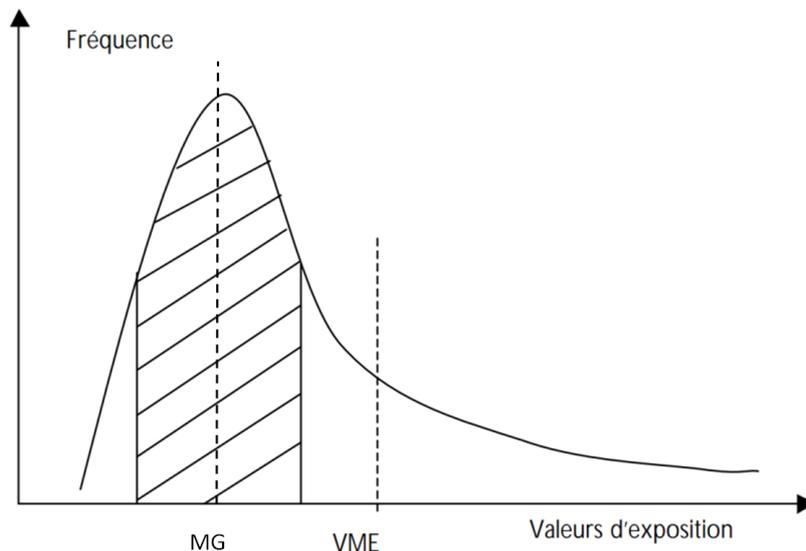


Figure 1-7: représentation d'une courbe log-normale [UCL]⁸

1.3.2.1. EXPOSITION AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, le premier travail d'investigation mené sur le sujet a été réalisé en 1979 par Wertheimer et Leeper à Denver (Colorado). Cette enquête (de type « case control ») sur 355 cas de cancer de l'enfant et 344 cas témoins a montré une association statistique entre la proximité de l'habitation des lignes électriques et le risque de développement leucémique [14]. L'étude basée sur l'estimation des champs magnétiques a été réalisée à partir d'un code de câblage. Ce code consiste à classer les habitations par catégories en fonction de la proximité d'une ligne de transport et de distribution de l'énergie électrique. Dans ce premier article, les logements sont répartis en quatre catégories :

- **VHCC** : Very high current configuration
- **OHCC** : Ordinary high current configuration
- **OLCC** : Ordinary low current configuration
- **VLCC** : Very low current configuration.

Par la suite, une catégorie supplémentaire a été ajoutée de manière à tenir compte des câbles souterrains [15] ; [16]. En utilisant une telle classification, les habitants se situant dans une configuration élevée, obtiennent un champ magnétique de fond beaucoup plus important que ceux étant dans une configuration faible. Les études réalisées ultérieurement [15] et [17], « studies the HVTRC survey » [18] « the EMDEX Residential Project » [19] et « the NCI study » [20] ont montré une relation positive mais non suffisante entre le code de câblage et la moyenne mesurée dans chacune des catégories. Ces enquêtes ont mis en avant un chevauchement important entre les cinq classements étudiés ainsi que des erreurs de concordance entre les valeurs relevées et les valeurs estimées par le codage.

Les études utilisant les codes de câblage ont l'avantage d'être simples à mettre en œuvre et de permettre l'obtention d'une première estimation. Elles ne tiennent toutefois pas compte des variations de charge dans une ligne au cours de la journée ou de l'année et du champ magnétique généré par les appareils domestiques.

Une autre méthode vise à une meilleure interprétation des résultats en tenant compte de paramètres plus nombreux tels que la charge de la ligne et la configuration de la ligne. Ensuite, par simulation, il est possible de déterminer l'exposition de la maison ainsi que les variations de courant sur la ligne au cours de l'année.

⁸VME : Valeur moyenne d'exposition

Suite à la recherche de Wertheimer et Leeper, un nombre important d'études a été mis sur pied pour estimer le champ magnétique. Approfondissons l'une d'entre elles, l'étude de mesures. Trois méthodes apparaissent : la première s'applique à mesurer le champ magnétique au cours de 24 ou 48h dans l'habitation. La seconde vise à estimer le champ magnétique par le port d'un dosimètre. Finalement, le dernier moyen utilise des mesures ponctuelles en divers endroits de l'habitation. Cette méthode sert généralement à vérifier les simulations du champ magnétique faites par ordinateur.

Les résultats obtenus entre les mesures ponctuelles et celles réalisées durant les 24h-48h sont relativement proches [21], [22].

1.3.2.2. LES ÉTUDES SUR 24H-48H

Dans le tableau ci-dessous, je vais présenter différents bilans de terrain visant à connaître le champ magnétique dans les habitations.

Pays	Auteurs	Type d'étude	Mesure	Champ magnétique selon catégorie (μT)				N
				≤ 0.1	$>0.1 \leq 0.2$	$>0.2 \leq 0.3$	>0.3	
Allemagne	Michaelis et Al. 1998	Case Control	24 h – chambre à coucher	89.9 %	7 %	1.7 %	1.4 %	414
	Schüz et al 2001 (b)	Case Control	24 h – Chambre à coucher	93 %	5.6 %	0.9 %	0.5 %	1301
Japon	Kabuto et al 2006 (b)	Case Control	7 jours - habitation	89.9 %	6 %	2.5 %	1.6 %	603
UK	UKCCSI 1999 (b)	Case control	48 h- habitation	92.3%	5.8 %	1.2 %	0.8%	2226
USA	London et al 1991 (a)	Case Control	24 h – Chambre à coucher	69.2 %	19.6 %	4.2 %	7 %	143
	Linnet et al 1997	Case Control	24 h – chambre à coucher	65.7 %	23.2 %	6.6 %	4.5 %	620
	Zaffanella 1993	Exposure Survey	24 h - habitation	72.3 %	17.5 %	5.6 %	4.6 %	987

Tableau 1-3 : synthèse sur l'exposition de la population aux champs magnétiques.

En sachant que l'OMS estime l'exposition de la population à un champ magnétique supérieur à $0.4\mu\text{T}$, entre 1 et 2% [16]. D'après le tableau ci-dessus, en moyenne 3% de la population serait exposée à un champ magnétique supérieur à $0.3\mu\text{T}$. Ces résultats s'accordent avec les conclusions de l'OMS. Ce pourcentage représente environ 183 habitations sur un total de 6294 mesures.

Je vais maintenant m'intéresser aux études avec dosimètre. La plupart des gens n'étant pas cantonnés dans leur habitation, des variations dues aux déplacements peuvent apparaître. Cette méthode permet de mettre en avant des lieux, intérieurs ou extérieurs, où l'exposition est plus forte. Ce genre d'étude est difficile à mettre en

place car elle est contraignante et demande une implication importante de la part des participants. Ce type d'appareil (EmdexII) n'est pas très lourd mais est quand même assez encombrant (2 x 6 x 2.5 cm) ce qui le rend difficile à porter surtout pour les enfants.

Pays	Auteurs	Type d'étude	Mesure	Champ magnétique selon catégorie (µT)				N
				≤ 0.1	> 0.1 ≤ 0.2	> 0.2 ≤ 0.3	> 0.3	
Belgique	Decat, Van den Heuvel & Mulpas, 2005	Exposure Survey	24 h - personnel	81.9 %	11.5 %	1.6 %	5.1 %	251
Allemagne	Brix et al 2001	Exposuresurvey	24 h - personnel	73.6 %	17.8 %	4.1 %	4.5 %	1952
Korée	Yang ju & Myung 2004	Exposuresurvey	24 h - personnel	64 %	24.2 %	4 %	7.8 %	409
Canada	McBride et al, 199	Exposuresurvey	48 h - personnel	59 %	29.2 %	8.5 %	3.3 %	329
USA	Zaffanella & Kalton, 1998	Exposuresurvey	24 h - personnel	64.2 %	21.1 %	7.8 %	4.2 %	995

Tableau 1-4: Etude de l'exposition de la population au champ magnétique pour différents intervalles

La conclusion de l'expérience constate une augmentation de l'exposition par rapport aux mesures sur 24 ou 48h. Cette variation est principalement due aux endroits extérieurs côtoyés comme les supermarchés, les transports en commun, etc ... Ceux-ci ont, en effet, tendance à augmenter la moyenne [23]. Le type de logement et la concentration d'habitants au km² sont des facteurs pouvant augmenter la moyenne d'exposition. Par contre, les enfants seraient moins exposés à l'école.

Si l'on résume, ces méthodes d'exposition ont des avantages et des inconvénients. Les mesures sont généralement plus difficiles à pratiquer car elles requièrent la participation des habitants. Par contre, elles présentent l'avantage de donner une bonne estimation sur de courtes périodes.

Les méthodes indirectes, quant à elles, détiennent l'avantage de tenir compte de l'historique en étant facilement accessibles parce qu'aucune participation n'est requise. Par contre, elles apportent moins de précisions car elles ne tiennent pas compte du champ magnétique pouvant être généré par les appareils domestiques. Or, précédemment, nous avons vu qu'ils peuvent être importants (Tableau 1-1).

On constate également une différence entre les USA et le Canada par rapport aux autres études lorsque le champ magnétique devient important. Cette différence sera expliquée un peu plus loin (**Chapitre 3.5.3**).

En conclusion, l'exposition de la population aux champs électromagnétiques à la fréquence du réseau ne varie pas de façon dramatique à travers le monde. La moyenne géométrique du champ magnétique varie entre 0,025 et 0,07 µT en Europe et de 0,055 et 0,11µT aux USA [16]. Les valeurs d'exposition peuvent être résumées dans le graphique suivant, tiré d'un article canadien visant à informer la population sur le champ magnétique [24].

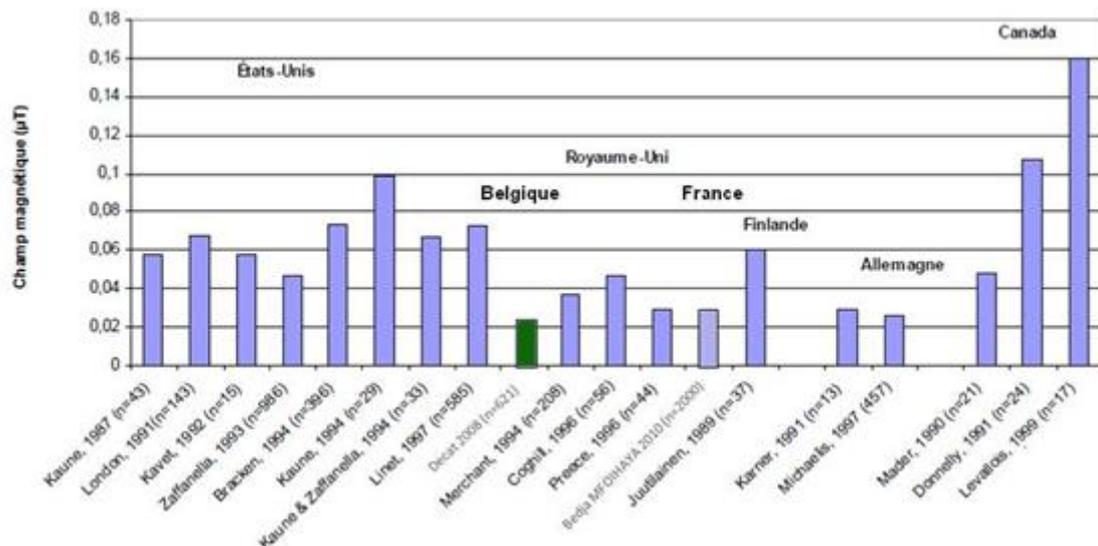


Figure 1-8: Exposition de la population aux champs magnétiques [Revue Canada]

Environ 2% des gens sont exposés à un champ magnétique supérieur à 0,4 µT, tous pays industrialisés confondus. Si l'on reporte ce chiffre à la Belgique, environ 200 000 personnes sont exposées quotidiennement à un champ magnétique supérieur à 0,4 µT. Ces valeurs correspondent à des moyennes journalières. Ce choix a été guidé par les études épidémiologiques. A l'heure actuelle, on ne sait pas s'il y a un effet dose-réponse⁹. Davantage de recherches dans le domaine seraient nécessaires pour se positionner. Les études usuelles en observations épidémiologiques sont basées sur une exposition moyenne de 24 heures. Un minimum de 8 heures, correspondant au temps de sommeil [23], serait particulièrement concerné, faisant des chambres à coucher, des endroits où des mesures de précaution pourraient être prises.

1.3.2.3. RELATION ENTRE LE CHAMP MAGNÉTIQUE ET LA LEUCÉMIE

Maintenant que je connais assez bien l'exposition de la population, je vais m'intéresser au lien que rapporte la littérature entre l'augmentation des cas de maladie leucémique et le champ magnétique.

L'une des premières études importantes sur ce lien a été réalisée par Linet aux Etats Unis en 1997. Cette étude, faite en milieu résidentiel dans 9 états américains, porte sur 638 cas de leucémie aigüe lymphocytaire et 620 cas témoins. Celle-ci montre une faible association non significative, excepté pour les enfants apparaissant dans la tranche d'exposition de 0.4 à 0.5µT où, l'Odds ratio est de 3.28 (IC = [1.15 ; 9.39]).

La deuxième enquête que je présenterai, est une étude effectuée au Royaume-Uni basée sur plus de 10.000 mesures. Cette enquête comporte 7629 cas témoins et 3838 cas de cancer. Celle-ci, aussi importante qu'elle soit, n'a montré aucune association entre le champ magnétique et le risque de cancer. Le risque relatif lié à une exposition supérieure à 0.2 µT, est de 0.9 (IC= [0.49 ; 1.63]) par rapport aux enfants qui ont une exposition moyenne inférieure à 0.1µT. Pour les expositions supérieures à 0.3 µT, le risque relatif est de 0.93 (IC = [0.3 ; 2.91]) [13].

Je vais ensuite présenter une investigation menée par Draper en 2005 [25]. Celle-ci est basée sur la distance entre les lignes HT et l'habitation et ce, depuis la naissance des personnes sondées. Cette étude porte sur 29000 enfants atteints de cancer et ayant moins de 14 ans. Un tiers des cancers représentés sont de type leucémique. Deux enfants du même âge et du même sexe, pris dans la même zone géographique sont alors pris comme témoins, l'un vivant à moins de 200 mètres d'une ligne HT et l'autre à plus de 200 mètres. Les

⁹J'entends par là le risque lors d'une exposition ponctuelle à une valeur plus élevée pendant un laps de temps restreint.

résultats ont montré que le risque relatif pour la leucémie infantile à moins de 200m est 1.69 fois plus grand que pour les enfants vivant à plus de 600m des lignes (IC = [1.13 ; 2.53]). Cette étude ne fait nullement mention du champ magnétique et les auteurs de l'étude restent prudents quant à l'analyse des résultats. En effet à 200 mètres, le champ généré par la ligne est généralement inférieur au champ magnétique ambiant.

Suite à une méta-analyse (regroupement d'études indépendantes visant à augmenter l'échantillon) réalisée par Ahlbom en 2000, les risques liés aux champs magnétiques ont été classés comme un agent potentiellement cancérigène par le CIRC (Centre international de recherche sur le cancer). Cette enquête regroupe les données de plusieurs études Européennes et Américaines. Elle porte sur 3202 cas de leucémie et 10 338 cas témoins. Leurs résultats ont montré une association avec un risque relatif de 2 (IC = [1.27 ; 3.13]) pour un champ magnétique supérieur à 0.4 µT [26].

Bien que toutes les études ne possèdent pas le même protocole, bien que les pays où l'enquête a été réalisée n'ont pas tous le même réseau de distribution ni le même système de mise à la terre ; un biais n'est pas à exclure sans toutefois affirmer qu'il y en ait un.

Si je résume dans un tableau ces différentes enquêtes ayant une reconnaissance scientifique importante, je remarque que l'impact est le plus souvent positif mais faible. Il est à noter que la communauté scientifique n'a, pour le moment, pas trouvé de mécanisme biologique (par les études in vitro ou in vivo) capable d'expliquer une augmentation du risque relatif d'un facteur 2. Or, ce mécanisme serait indispensable à trouver en vue d'une reconnaissance par l'OMS d'un risque réel sur la santé (étant donné que le facteur 2 n'est pas reconnu comme suffisamment élevé pour ce faire). Je peux également constater que plus le champ magnétique augmente, plus les intervalles de confiance sont grands.

Etude	Risque à 0,1µT	Risque à 0,2 µT	Risque >= à 0,4µT
Ahlbom en 2000	RR A		RR 2 [1.27 ; 3.13]
Royaume Uni		OR 0.9 [0.49 ; 1.63]	OR 0.93 [0.3 ; 2.91]
Linnet 1997	NS	NS	OR 3.98 (1.15 ; 9.39)

Tableau 1-5: Risques de développements leucémiques liés aux CM

Je vais clore ce point en estimant le nombre de cas de leucémies infantiles qui peuvent être attribués à l'exposition aux champs magnétiques. Pour ce faire, je vais déduire le risque attribuable à l'exposition au CM. Lorsqu'il existe un lien de causalité entre une exposition et une conséquence, dans notre cas la leucémie infantile, le risque attribuable RA est défini comme la différence entre le risque chez les exposés RE et les non exposés RNE.

$$RA = RE - RNE$$

Si le RA est inférieur à zéro, cela signifie que l'exposition protège la population du risque.

Inversement, si le RA est supérieur à zéro, c'est la maladie qui pourrait être supprimée si l'exposition était éliminée ou réduite.

Le risque attribuable dans la population RAP est une mesure d'impact, celui-ci peut être exprimé de la manière suivante:

$$RAP = \text{proportion exposée. (RE-RNE)}$$

Je vais maintenant définir la mesure d'impact en rapport avec les risques dans la population, celle-ci s'exprime en fraction FAP et est définie comme :

$$FAP = \frac{(\text{risque dans la population}) - (\text{risque chez les non exposés})}{\text{risque dans la population}}$$

Ou encore :

$$FAP = \frac{\text{risque attribuable dans la population}}{\text{risque total dans la population}}$$

Dans notre cas, nous ne connaissons pas le risque attribuable, cependant il peut être exprimé grâce à la formule de Levin qui utilise le risque relatif pour le déterminer.

Dans le cas où les biais sont importants, je dois ajuster la formule pour tenir compte de ce paramètre, ceci se fait en ajustant RR et p. Dans la réalité, uniquement un ajustement de RR est appliqué. Cet ajustement est difficile à réaliser et demande des calculs sophistiqués.

Dans les études de cas témoins, la formule de Levin peut être simplifiée et exprimée comme suit:

Formule de Levin :

$$FAP = \frac{p(RR - 1)}{p(RR - 1) + 1}$$

Où :

- *p* est la proportion de la population exposée
- *RR* est le risque relatif

Cette formule a l'avantage de ne nécessiter aucun réglage de p pour être valable et n'est pas affectée par les contrôles correspondant à des cas. En outre, en supposant que l'exposition est indépendante des facteurs d'ajustement (ce qui est le cas dans les études où il n'y a pas de relation statistique ou dans le cas où une corrélation statistique existe en fonction de l'âge et du sexe) cela permet d'estimer p0 de p et RR via la formule suivante (maladies rares):

$$\frac{P0}{1} - P0 = \frac{P}{1} - P \cdot RR$$

Dans les diagrammes ci-dessous, sont représentés les résultats tirés de l'OMS, concernant différentes études qui ont permis de calculer le facteur attribuable. Ils ont utilisé la moyenne géométrique d'une part et la moyenne arithmétique d'autre part.

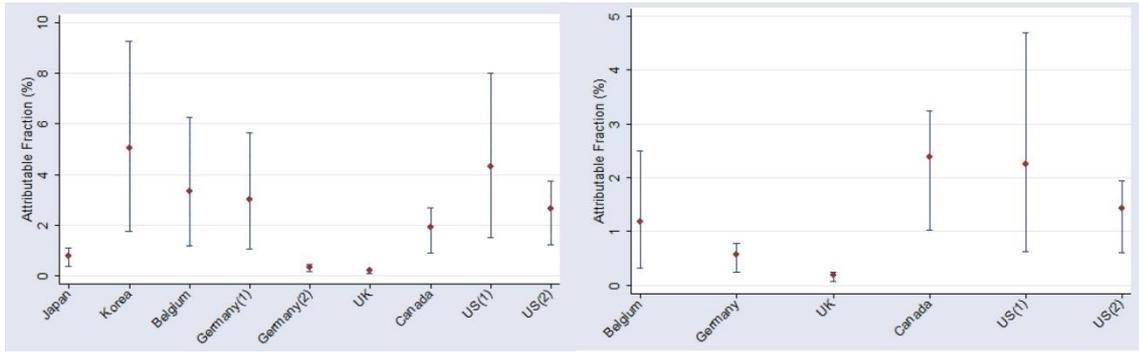


Figure 1-9: Estimation du FAP via la moyenne arithmétique

Figure 1-10: Estimation du FAP via la moyenne géométrique

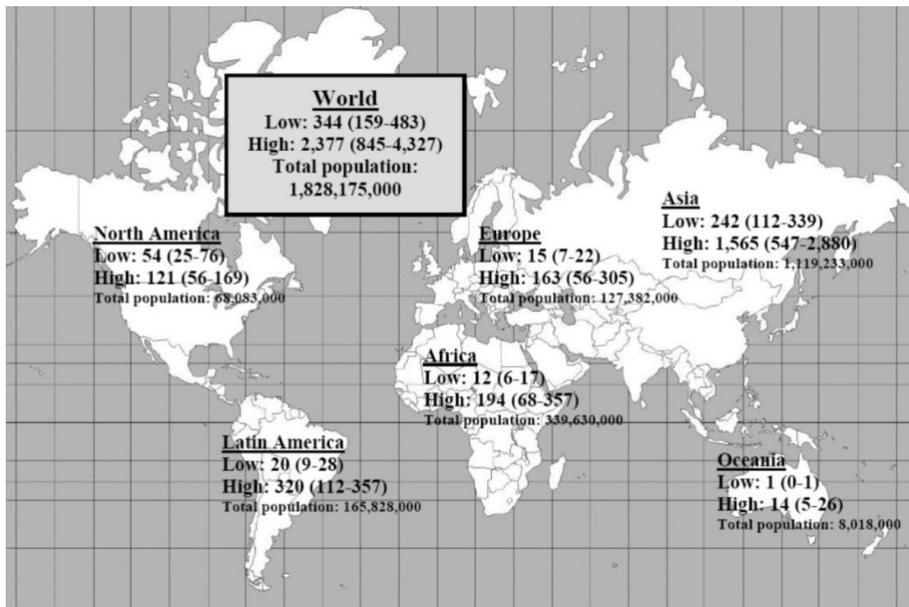


Figure 1-11: Estimation des cas de leucémie infantile attribuable au CEM<14 ans dans le monde basée sur la moyenne arithmétique

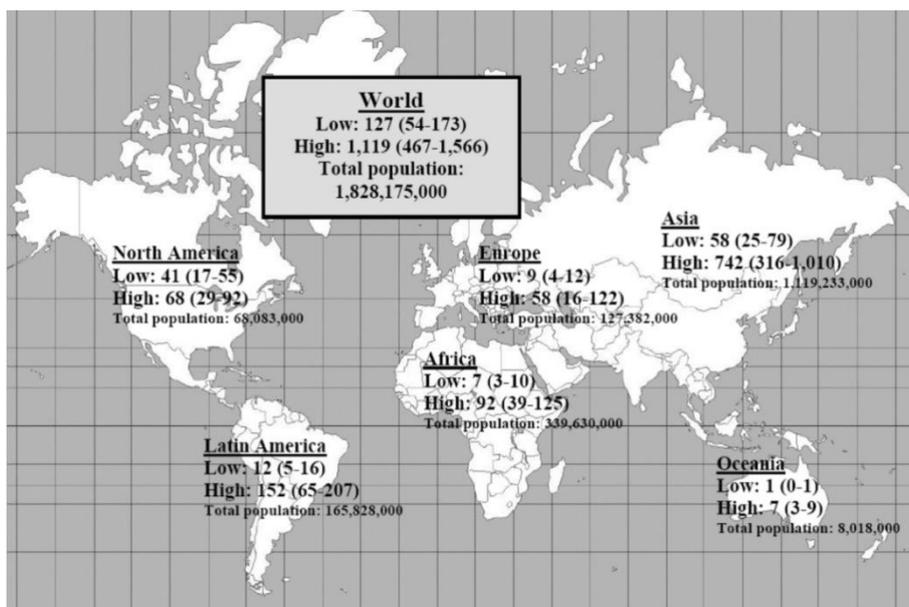


Figure 1-12: Estimation des cas de leucémie infantile attribuable au CEM<14ans dans le monde basée sur la moyenne géométrique

En appliquant les chiffres obtenus de cette simulation à la Belgique, le nombre de cas leucémiques infantiles pour les enfants âgés de moins de 14 ans (attribuables aux champs magnétiques) serait de 2,3 cas par an dans le pire des scénarios. C'est à dire lorsque l'on utilise la moyenne arithmétique et de 0,13 cas soit un cas tous les 7 ans en utilisant la moyenne géométrique. Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, les études possédant une distribution log-normale sont mieux caractérisées par une moyenne géométrique. L'incidence annuelle de la maladie est d'environ 320 cas de leucémie¹⁰, tous types d'origine confondus, par an alors que les taux de guérisons atteignent maintenant les 80 [27].

CELA SIGNIFIE QUE MOINS D'UN POUR-CENT DE CES LEUCÉMIES PEUT ÊTRE IMPUTABLE AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES, DANS LE CAS OÙ LA RELATION SERAIT PROUVÉE! CE NOMBRE ÉTANT RELATIVEMENT FAIBLE, IL EST DONC DIFFICILE DE SAVOIR EXACTEMENT SI LA CAUSE ET L'EFFET SONT EN LIEN DIRECT. D'OÙ LA DISCUSSION RÉCURRENTÉ CONCERNANT LES BIAIS DE SÉLECTION DANS LES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES. AU NIVEAU PHYSIQUE, NOUS VERRONS, DANS LES CHAPITRES SUIVANTS, QUE LES EFFETS DE CE CHAMP SUR LE CORPS HUMAIN SONT RELATIVEMENT BIEN COMPRIS ET CONNUS. L'IMPLICATION DE CES EFFETS PHYSIQUES AU NIVEAU BIOLOGIQUE RESTE PAR CONTRE MÉCONNUE À CAUSE DE LA COMPLEXITÉ DU CORPS HUMAIN. LA FAIBLE VARIATION DE CERTAINS PARAMÈTRES PEUT IMPLIQUER DIFFÉRENTES RÉACTIONS QUE LES BIOLOGISTES ET ONCOLOGUES ÉTUDIÉNT. LA CONNAISSANCE DE CES MÉCANISMES, S'ILS SONT RESPONSABLES DU DÉVELOPPEMENT LEUCÉMIQUE, EST D'UNE IMPORTANCE CAPITALE CAR ILS SONT ALORS SUSCEPTIBLES D'AIDER LA RECHERCHE DANS LA LUTTE CONTRE LE CANCER.

1.4. RECOMMANDATION D'EXPOSITION ET LE SEUIL DE 0,4 μ T : LES DIFFÉRENTES MÉTRIQUES QUI CARACTÉRISÉNT LE SEUIL D'EXPOSITION AUX CHAMPS ELM BASSE FRÉQUENCE

Pour déterminer les risques liés à l'exposition aux champs magnétiques, j'ai parlé de valeurs seuils allant de 0.1 à 0.4 μ T. Ces différents résultats font appel à des valeurs d'exposition moyennes. Une personne peut donc être soumise à un champ magnétique important pendant un laps de temps restreint et avoir une valeur d'exposition moyenne de 0.4 μ T. Pour tenir compte de l'effet de la durée et de l'intensité à laquelle est soumise une personne, les agences pour la protection des personnes ICNIRP (Commission International de protection contre les rayonnements non ionisants) ainsi que l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ont introduit la notion de densité de courant à travers le corps humain (Cf.- Chapitre 2). Cette notion de densité est liée au champ électrique interne par la loi d'Ohm. A l'heure actuelle, c'est cette dernière valeur qui est retenue pour déterminer les seuils d'exposition.

Comme nous venons de le voir, les valeurs de champs magnétiques de 0.2 ou 0.4 μ T sont liées aux études épidémiologiques. A l'heure actuelle, aucun mécanisme biologique n'a été mis en avant pour corroborer ces valeurs d'exposition.

Suite à la publication de Wertheimer et Leeper, la valeur de 0.2 μ T est apparue implicitement comme un seuil de référence qui, dépassé, pouvait exposer à un risque. Ensuite, il y eu l'émergence de la valeur de 0.4 μ T suite aux analyses conjointes de plusieurs études vues précédemment. Sur base des études épidémiologiques, l'indicateur d'exposition retenu a été la moyenne géométrique pendant 24 heures. Lorsque celle-ci se situait en dessous de 0.4 μ T, les auteurs n'observaient pas d'association significative avec le risque de leucémie, la valeur de 0.2 μ T étant alors considérée comme proche du « no effectlevel ». Par contre, lorsque la moyenne

¹⁰ Environ 5 cas par 100.000 habitants

géométrique était égale ou supérieure à 0.4 μ T, le risque relatif était de 2 avec un intervalle de confiance significatif (IC 95% : 1.27-3.13) [28].

Cependant, l'absence de relation entre les niveaux croissants d'exposition et l'augmentation du risque de développement leucémique, la négativité des études expérimentales (notamment celles conduites chez l'animal) et l'absence de mécanisme d'action plausible ont conduit l'ICNIRP à s'en tenir aux valeurs basées sur l'analyse des courants induits.

L'ICNIRP est un organisme scientifique qui a pour mission de développer les lignes directrices sur les limites d'exposition et qui se base sur des expertises scientifiques.

Pour définir ces lignes directrices, ils donnent différents poids aux revues scientifiques en fonction de leur contenu, leur répétition et de leur qualité. Cette commission tient en compte les différents aspects du problème à savoir la médecine, la biologie, la toxicologie, l'épidémiologie, la physique et l'ingénierie. Celle-ci conseille des valeurs limites d'exposition pour le public pour un niveau de protection élevé. Ces valeurs sont basées sur la densité de courant électrique qui peut être induite dans un corps due à l'exposition à un champ électrique ou magnétique. (cf. **Chapitre 2**) C'est à partir des réponses biologiques au courant induit que l'ICNIRP a établi les valeurs de limitation de l'exposition. Cette valeur de 200 μ T pour le public correspond à un courant moyen induit de 2mA/m². Celle-ci est 50 fois inférieure au niveau de stimulation neuronal ou myocardite qui est d'environ 100mA/m². En 2010, de nouvelles lignes directrices ont été apportées à ce document grâce aux avancées scientifiques. Les recommandations actuelles sont exprimées non plus en densité de courant mais en champ électrique interne et sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques	Formulation	Champ électrique en V/m
Travailleurs		
Tissus de la tête appartenant au SNC ¹¹	$2 \times 10^{-3} f$	0,1
Tous les autres tissus de la tête et du corps	0,8	0,8
Population		
Tissus de la tête appartenant au SNC	$2 \times 10^{-4} f$	0,01
Tous les autres tissus de la tête et du corps	0,4	0,04

¹¹SNC = Système nerveux centrale / SNP = système nerveux périphérique

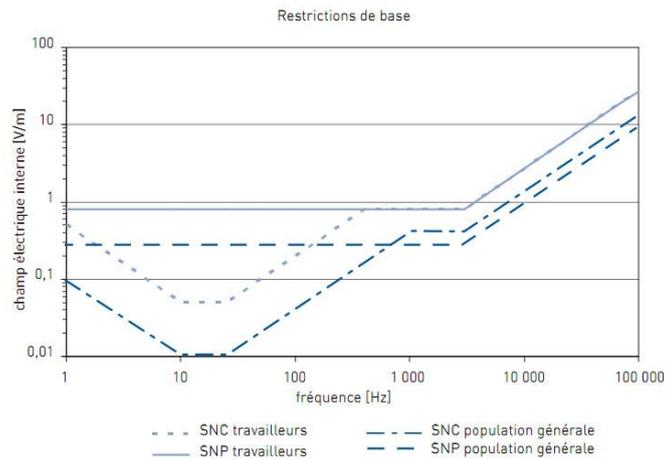


Figure 1-13: Restriction de base de l'ICNIRP 2010 exprimée en champ électrique interne au corps humain

Il est également important de faire une différence entre les recommandations et les normes. Les recommandations sont mises en avant par des organismes scientifiques indépendants. Ceux-ci émettent des conseils pour prévenir les risques. Les pays sont ensuite libres d'adopter une norme en relation ou non avec ces recommandations.

Les deux grandes organisations internationales ont recommandé des limites d'exposition pour le public et les travailleurs.

L'International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), un organisme qui collabore avec l'Organisation mondiale de la santé (OMS), a révisé ses recommandations en 2010. Et après un nouvel examen des données scientifiques dont il dispose, il propose une limite d'exposition pour le public de 200 μ T en tout temps. Ce seuil est basé sur l'apparition des magnétosphènes, auquel a été appliqué un facteur de sécurité de l'ordre de 50.

Pour les travailleurs, un facteur de sécurité de 10 a été appliqué de sorte que la limite recommandée pour ces derniers est de 1 000 μ T.

L'International Committee on Electromagnetic Safety, un comité sous l'égide de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), a également procédé à une analyse des données scientifiques et recommande une limite de 904 μ T en milieu non contrôlé, ce qui correspond aux lieux accessibles au public, et de 2 710 μ T pour les milieux contrôlés [28].

J'observe une nette différence entre les recommandations de l'IEEE et de l'ICNIRP. Les deux agences ne prennent pas en compte les mêmes niveaux de référence pour les fréquences et les effets biologiques. L'IEEE donne ainsi des recommandations moins restrictives pour l'exposition des personnes et des travailleurs à 50-60Hz [16].

Le CIRC (Centre international de recherche sur le cancer) a classé le champ magnétique de fréquence 50-60 Hz comme un facteur cancérigène possible en exposition résidentielle chez l'enfant, au-delà d'une exposition moyenne sur 24 heures de 0.4 μ T (catégories II B). Nous retrouvons cette catégorie dans le tableau ci-dessous (Tableau 1-6 :) dressé par le CIRC pour classer la dangerosité de certains produits ou sources.

	L'agent (le mélange ou le mode d'exposition)...	Exemples (nombre d'éléments)
Groupe 1	... est cancérogène pour l'homme	Boissons alcoolisées – Amiante – Benzène – Radon – Rayon X – Tabac (107)
Groupe 2A	... est probablement cancérogène pour l'homme	Gaz d'échappement des moteurs diesel – Lampe UV –Acrylamide (58)
Groupe 2B	... est peut être cancérogène pour l'homme	Gaz d'échappement des moteurs à essence – Légumes marinés – Café – Champ magnétique basse fréquence (249)
Groupe 3	... est inclassable quant à sa cancérogène pour l'homme	Caféine – Poussière de charbon - champ électrique basse fréquence – Lumière fluorescente –Thé (512)
Groupe 4	... n'est probablement pas cancérogène pour l'homme	Le caprolactame (1)

Tableau 1-6 : Classification des agents en fonction de leur cancérogénicité

Je remarque que le café fait partie de la même catégorie que les champs magnétiques ainsi que 248 autres éléments. Les champs électriques basses fréquences entrent, eux, dans une catégorie inférieure Groupe 3. Je constate aussi que la polémique est généralement surdimensionnée par rapport à d'autres agents comme le café ou les légumes marinés qui sont constamment utilisés par la population.

Le rôle de la Commission européenne est de rendre un rapport présentant les recommandations en matière d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques. Pour ce faire, elle doit tenir compte d'un haut niveau de protection, celui-ci doit être assuré pour les personnes physiques, elle a également pour devoir de prévenir les risques de santé et de dysfonctionnement. C'est dans cette optique qu'elle adopte le principe de précaution.

Le principe de précaution a été développé suite à différents scandales comme la vache folle. Ce principe stipule :

« Qu'en cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement. » (Traité de Maastricht, 1992).

Les recommandations de l'UE sont basées sur les documents de l'ICNIRP. Ces documents, comme nous l'avons vu, utilisent un facteur de sécurité de 50. Les restrictions de base et les niveaux de référence sont basés sur les preuves scientifiques et les effets réels sur la santé. Chaque pays est libre d'adopter son propre niveau d'exposition. A l'heure actuelle, tous les membres ont au -moins adopté la recommandation 1999/519/EC.

Étant donné les incertitudes méthodologiques et l'absence, à ce jour, d'un mécanisme d'action plausible autant que de la négativité des principales études chez l'animal ; la valeur de 0.4µT ne peut être avancée comme un niveau de risque effectif au-delà duquel la probabilité de voir survenir des effets sanitaires dommageables serait démontrée. C'est également la position de l'Organisation Mondiale de la Santé qui considère les preuves scientifiques d'un possible effet sanitaire à long terme actuellement insuffisantes pour justifier une modification des valeurs limites d'exposition, modification qui ne pourrait être qu'arbitraire.

Néanmoins, certains pays recommandent un niveau d'exposition inférieur. C'est le cas en Italie où celui-ci a été revu à la baisse dans les jardins d'enfants, les maisons résidentielles et les écoles où la référence est maintenant de 10 μ T (médiane mesurée sur 24h dans des conditions normales d'opération). De même, lors de la construction de nouvelles lignes, le champ à ne pas dépasser est de 3 μ T [28].

En Région flamande, il existe un arrêté du 11 juin 2004 contenant des mesures de lutte contre les risques de santé par la **pollution intérieure**. Cet arrêté stipule des valeurs de qualité pour différents facteurs chimiques, physiques et biotiques pour l'environnement intérieur. Pour les champs magnétiques, une valeur guide de **0,2 μ T** et une valeur d'intervention (ou valeur déclenchant l'action) de **10 μ T** sont **reprises sans spécifications supplémentaires**.

La Suisse a également une politique forte en matière d'exposition aux champs magnétiques. La valeur limite dans certains endroits est de 1 μ T tels que dans les appartements, les hôpitaux, les écoles.

1.5. CONCLUSION

Dans ce premier chapitre, j'ai mis l'accent sur l'exposition aux champs magnétiques. J'ai remarqué que les données sont principalement issues des continents américain et européen¹². J'ai également observé une différence d'un facteur deux entre les valeurs de CM parmi les pays alimentés en 220 volts par rapport à ceux utilisant le 110V. Cette spécificité peut provenir de la différence de tension ainsi que le mode de gestion du neutre. Les valeurs moyennes relevées varient entre 0,025 et 0,07 μ T en Europe alors qu'elles atteignent de 0,055 et 0,11 μ T aux USA. Différentes études épidémiologiques ont mis en avant un facteur de risque deux, associé à l'augmentation d'un type de leucémie infantile. Même si ce facteur n'est pas obtenu dans toutes les études et est souvent entaché d'un écart type important, il ne peut être passé sous silence. J'ai aussi insisté sur le fait que le nombre de cas à priori imputable aux ondes électromagnétiques est relativement faible, inférieur à 1% du nombre de cas de leucémies infantiles.

Depuis le début des études liées à la santé, en relation avec le champ magnétique à 50 Hz, aucun mécanisme biologique n'a toutefois été mis en avant pour expliquer le lien causal avec l'apparition de la maladie.

Quant au chapitre suivant, il développera deux notions importantes, les « effets physiques » dus à l'exposition à ces ondes et les courants de contact, considérés par Kavet comme une possible source génératrice de ces effets.

¹²Ceux-ci étant les plus industrialisés et où les transits de l'énergie sont les plus importants.

CHAPITRE 2: EFFET DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE À 50 HZ SUR LE CORPS HUMAIN

Grâce au chapitre précédent, nous savons que le champ électromagnétique à 50 Hz est composé de deux champs indépendants, un magnétique et un électrique. Dans cette partie, je tenterai de définir leurs impacts sur la population. Et surtout, quel effet leur attribue-t-on au niveau du corps humain?

D'après la littérature, l'exposition de la population aux champs magnétiques à la fréquence du réseau ne varie pas de façon dramatique à travers le monde. La moyenne géométrique de ces champs ambiants se situe entre 0,025 et 0,07 μT en Europe et entre 0,055 et 0,11 μT aux USA [16], ce qui coïncide avec les valeurs découvertes dans le chapitre précédent [Tableau 1-2, Chap 1.]. Les valeurs plus élevées (jusqu'à quelques dizaines de microteslas) sont possibles uniquement à proximité immédiate des installations électriques parcourues par un courant significatif (ligne à haute tension, câble souterrain, poste à haute tension, cabine de transformation basse tension)

D'après nos observations, l'exposition aux champs électriques est principalement et exclusivement élevée à proximité des lignes HT, en dehors de toute habitation. Concrètement, elle varie entre 1 et 4 kV/m à 1,5 m du sol (Figure 1-3).

L'exposition à un champ électromagnétique induit, à l'intérieur du corps humain, une densité de courant électrique et donc un champ électrique interne (Figure 2-1). Ces deux grandeurs sont reliées par la loi d'ohm :

La loi d'ohm :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Où :

- J représente la densité de courant
- σ est la conductivité du tissu
- E le champ électrique interne.

Equation 2-1

Pour commencer, j'expliquerai les mécanismes responsables de ce champ électrique interne ainsi que les éventuels dangers biologiques liés à celui-ci. Je terminerai par le modèle d'un être humain réalisé au sein du BBEMG. J'estime qu'il me permettra primo, une meilleure visualisation ; secundo, une meilleure quantification des valeurs d'un champ électrique interne.

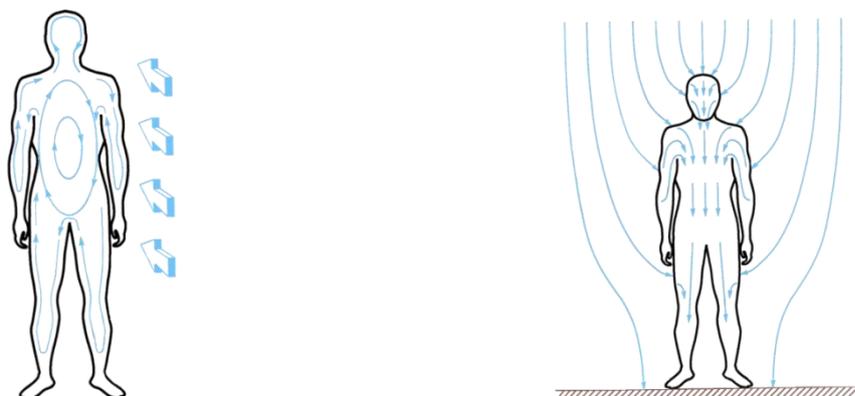


Figure 2-1: Courant induit par un champ magnétique (gauche), courant induit par un champ électrique (droite). Ces deux champs (en orientation) sont typiques de ceux générés (près du sol) par une ligne à haute tension passant au-dessus de l'individu.

2.1. L'EXPOSITION D'UN CORPS HUMAIN À UN CHAMP ÉLECTRIQUE À 50 HZ

Le champ électrique est perpendiculaire au sol. Lorsque le corps humain est plongé dans ce champ, il perturbe de manière significative la distribution spatiale du champ électrique. A basse fréquence, le corps est un bon conducteur, ce qui engendre une déviation presque perpendiculaire des lignes de champ électrique vers l'intérieur du corps (Figure 2-1). Les charges électriques se mettent en mouvement à la surface et dans le corps humain afin de tenter (sans y arriver complètement vu la conductivité non infinie du corps) d'annuler le champ dans le corps conducteur, il en résulte un courant électrique à la même fréquence que le champ, à l'intérieur du corps. Le courant se répartira dans le corps en fonction des conductivités rencontrées.

Si le champ était « continu » (DC), le courant à l'intérieur du corps cesserait une fois l'équilibre des charges atteint¹³. Dans le cas concerné dans cette thèse, le corps étant placé dans un champ alternatif à 50 Hz, on va avoir une oscillation des charges à 50 Hz. Ces oscillations à la fréquence du réseau (50Hz) vont engendrer un courant alternatif et, donc, un champ électrique alternatif à la fréquence du réseau, à l'intérieur du corps humain.

Voyons maintenant les relations théoriques entre le champ, les charges et le courant. Lorsqu'un corps est plongé dans un champ E_0 , celui-ci va déformer les lignes de champ et atteindre localement des valeurs élevées en fonction des courbures de l'objet. Ainsi, une sphère placée dans un champ uniforme E voit à sa surface un champ électrique trois fois plus grand. Lors de l'exposition, les charges vont se mettre en place et, selon les lois de l'électrostatique, nous allons obtenir la relation suivante :

Relation « Champ extérieur et charge superficielle »: Où:

$$\sigma = \epsilon_0 E$$

- σ est la densité de charge superficielle (C/m^2)
- ϵ_0 est la permittivité du vide
- E est le champ superficiel

Equation 2-2

Comme je l'ai dit précédemment, l'oscillation de ces charges va créer une densité de courant qui va transporter les charges vers la surface. Si je veux que mon calcul soit précis, je dois calculer la densité au voisinage immédiat de la surface ; car la densité en un point quelconque de l'intérieur du corps dépend du trajet des lignes de courant, qui vont dépendre elles-mêmes des conductivités locales. (Ex : conductivités différentes des muscles, nerfs, os, ...).

Au voisinage de la surface, la relation entre les charges superficielles σ portées par un élément de surface dS et la densité de courant local J s'exprime par:

Relation « Charge superficielle » et « courant de charge » : Où:

$$J dS = \frac{d\sigma}{dt}$$

- J est la densité locale de courant
- dS un élément de surface
- σ est la densité de charge superficielle

Equation 2-3

¹³ Ce temps nécessaire est en fait très bref et dépend de la constante de relaxation du milieu, à savoir une fraction de milliseconde [87].

Ce qui va me donner en champ alternatif de pulsation ($\omega = 2\pi f$) la relation suivante :

Relation:

$$J = j\omega\sigma$$

Où:

- ω est la pulsation égale à $2\pi f$

Equation 2-4

Or, le corps ne possédant pas une conductivité infinie, il est caractérisé par une conductivité (γ) et une constante diélectrique (ϵ). Supposons maintenant que notre corps est constitué d'une lame à face parallèle plongée perpendiculairement dans le champ ambiant E_0 (Figure 2-2).

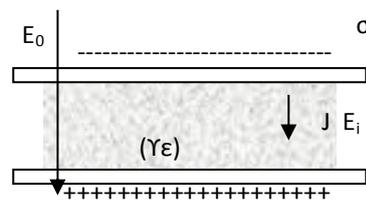


Figure 2-2 : Diélectrique non parfait

Le champ qui va régner à l'intérieur de cette capacité est déterminé par :

Relation:

$$E_i = \frac{E'}{\epsilon_r}$$

Où:

- E_i est le champ électrique interne
- E' est le champ électrique appliqué

Equation 2-5

Notre diélectrique possède également une conductivité γ , ce qui va entraîner un déplacement des charges sous l'effet de ce champ et faire naître à la surface du diélectrique des charges superficielles de densité σ . La présence de ces charges introduit un champ antagoniste de valeur $(-\sigma/\epsilon_0)$, de sorte que le champ réellement appliqué soit donné par :

$$E' = E_0 - \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Equation 2-6

La relation avec le champ électrique interne peut donc se définir comme

$$E_i = \frac{1}{\epsilon_r} \left[E_0 - \frac{\sigma}{\epsilon_0} \right]$$

Equation 2-7

On peut également déterminer les équations qui régissent le comportement du corps (ϵ, γ) seront les suivantes :

$$J = \gamma E_i$$

$$J = \frac{d\sigma}{dt}$$

Equation 2-8

Ce qui me donne, en remplaçant σ et en passant au régime sinusoïdal, l'expression suivante pour le champ électrique interne :

$$E_i = \left[\frac{E_0}{\epsilon_r} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{j\omega\epsilon_0\epsilon}} \right]$$

Equation 2-9

Si $\frac{\gamma}{\omega\epsilon_0\epsilon_r} \ll 1$, alors $E_i = \frac{E_0}{\epsilon_r}$ ce qui correspond à une formulation lorsque le corps est un isolant.

Si $\frac{\gamma}{\omega\epsilon_0\epsilon_r} \gg 1$, alors la formulation devient $E_i = E_0 \frac{j\omega\epsilon_0}{\gamma}$ ce qui correspond à un corps conducteur, comme le tissu biologique. Nous sommes donc dans cette hypothèse au sein de cette thèse.

Dès lors, il est important de remarquer que la permittivité relative du corps n'entre pas dans le calcul du champ électrique interne. L'ordre de grandeur du facteur de réduction entre le champ externe et interne est de l'ordre du million. Pour un champ externe de quelques kV/m, on a un champ interne de l'ordre du mV/m, mais cette réduction n'est toutefois pas suffisante pour négliger une influence biologique éventuelle qui se situe justement aux alentours de quelques dizaines de mV/m. Je développerai ce phénomène dans le chapitre 2.3: « Effet d'un champ électrique interne sur le corps humain »

Exemple : Calculons maintenant de manière simple le champ électrique interne pour une sphère placée dans un champ électrique initial de 10kV/m (valeur maximum rencontrée près des lignes à haute tension (**Chap1, §1.2.1**)). Le champ électrique, à proximité de la sphère, vaudra plus ou moins 30 kV/m à cause de la forme de celle-ci (**Figure 2-3**). En effectuant les calculs avec une conductivité de la sphère de 0,2 S/m, j'obtiens pour le champ électrique interne, 0,41 mV/m. Si je regarde le rapport entre E_0 (champ électrique externe) et E_i (champ électrique interne), je constate que celui-ci est de 10^7 , indépendamment de la valeur de la permittivité relative du contenu de la sphère.

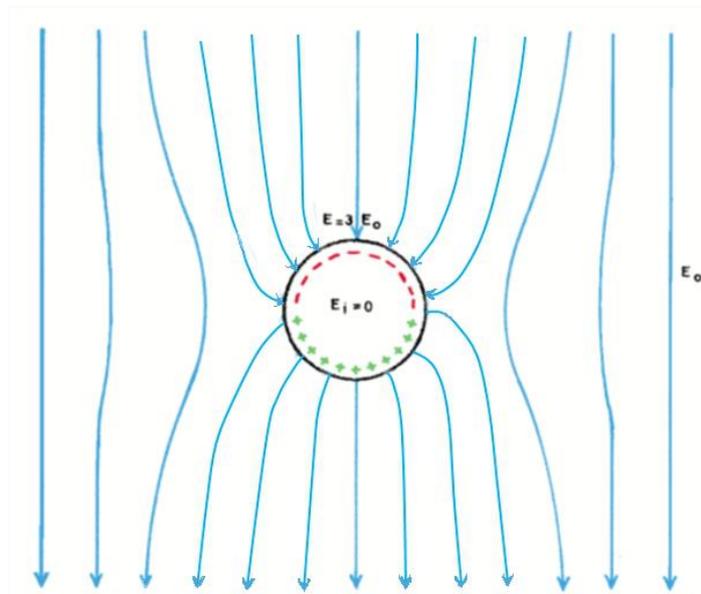


Figure 2-3: Sphère dans un champ électrique

Pour ces différentes raisons, le champ électrique interne est 100.000 à 1.000.000 fois moins important à l'intérieur de la personne qu'à l'extérieur. Le champ électrique interne suit de manière prépondérante la direction du champ électrique extérieur. Ainsi, si celui-ci est vertical, il induira un champ électrique plus poussé dans cette direction. La mise à la terre du corps fait pareillement varier la distribution des charges à la surface de celui-ci. Dans le cas où le corps est en lévitation (ou isolé du sol), on aura un champ électrique interne moins élevé qu'une personne ayant les deux pieds au sol (Figure 2-4).

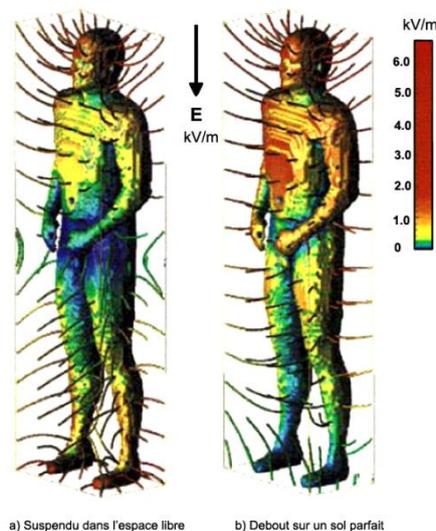


Figure 2-4: Corps humain plongé dans un champ électrique 1kV/m 60 Hz [OMS, 2007]

Lorsque le corps est parfaitement en contact avec le sol (Figure 2-4 b), le champ électrique est principalement déterminé par la morphologie du personnage et, dans une moindre mesure, par la conductivité des tissus. Ainsi, le champ électrique interne sera plus faible pour un enfant qu'un adulte (Figure 2-5).

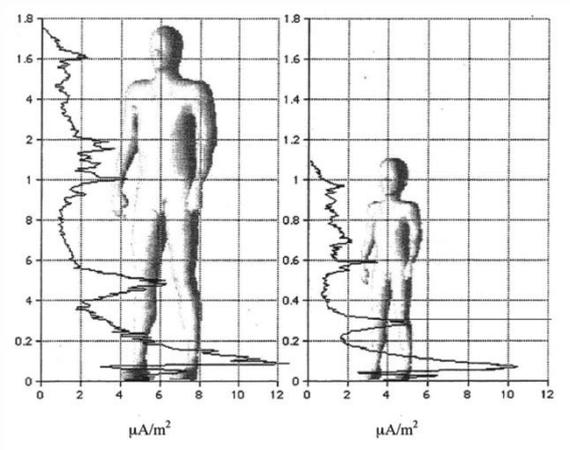


Figure 2-5: Densité de courant maximum en $\mu\text{A}/\text{m}^2$ à travers 1cm^2 pour un corps exposé à un champ électrique de $1\text{kV}/\text{m}$ à 60Hz [16]

Certaines zones possèdent une densité de courant plus élevée, ceci est dû à la différence de conductivité entre les organes. Elle varie entre $0,04$ et $3\text{S}/\text{m}$.

Tissus	Conductivité en S/m	Tissus	Conductivité en S/m	Tissu	Conductivité en S/m
Vessie	0,2	Yeux (extérieur)	0,25	Œsophage	0,5
Sang	0,7	Graisse	0,04	Pancréas	0,22
os	0,04	Matière fécale	0,5	Prostate	0,4
Moelle osseuse	0,05	Liquide intestinal	0,5	Rectum	0,5
Petit Intestin	0,5	Vésicule biliaire	1,4	La peau	0,1
Cerveau (matière blanche)	0,06	Glande	0,45	Moelle épinière	0,1
Cerveau (matière grise)	0,1	Cœur	0,1	Rate	0,1
Cartilage	0,18	Rein	0,1	Estomac	0,5
CSF	2	Foie	0,07	Thyroïde	0,5
Colon	0,1	Poumon	0,08	Urine	3,3
Yeux (liquide)	0,4	Muscle	0,35	Testicule	0,4

Tableau 2-1 : Valeurs des conductivités pour différents tissus S/M [29]

Les premières mesures du champ électrique interne ont été réalisées en 1985.

Pour ce faire, les chercheurs ont utilisé un mannequin rempli d'une solution saline correspondant à une conductivité moyenne des tissus. Ils l'ont ensuite exposé à un champ électromagnétique et ont pris les mesures à différents endroits du corps.

Les données actuelles sont beaucoup plus précises suite aux avancées techniques en matière de calcul.

VOICI LA PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTS RÉSULTATS OBTENUS POUR DES SIMULATIONS DE CORPS SOUMIS À UN CHAMP ÉLECTRIQUE.

Le corps des hommes, femmes ou enfants sont modélisés, c'est-à-dire qu'ils sont découpés en petits cubes ou tétraèdres appelés voxels. La précision de ces voxels varie en fonction des modèles et de la finesse des résultats que l'on veut obtenir. Ceux-ci sont généralement de 2mm comme le précise l'ICNIRP. Chaque cube ou tétraèdre représente une partie d'un tissu et les propriétés de celui-ci lui sont assignées.

	Modèle	Source extérieure	Effets
Dawson, 1997 [29]	Cubes de 3.6 mm pour un homme de 76kg, mesurant 1,77m	Champ E uniquement (60 Hz) 10 à 20 kV/m	1 mA/m ² de densité de courant (champ électrique interne aux alentours de 20 mV/m)
Dimbylov, 2005 [30]	"Naomi" (60 kg, 1,63 m)	Champ électrique de 1 kV/m	Champ électriques dans la moelle osseuse: Compris entre 3 et 56 mV/m
Cech, 2007 and 2008 [31] [32]	"SILVY" femme enceinte de 30 semaines (89 kg, 1,8 m)	Champ électrique de 5 kV/m	Le champ électrique interne dans la moelle osseuse du fœtus est d'environ 20 mV/m. (soit une densité de courant de 3,3 mA/m ²)

Tableau 2-2: Divers résultats de simulations sous un champ électrique

2.2. EXPOSITION D'UN CORPS HUMAIN À UN CHAMP MAGNÉTIQUE À 50-60 HZ

La perméabilité magnétique du corps est très proche de la perméabilité de l'air, le corps humain perturbe donc très peu le champ magnétique ambiant. L'interaction qui se produit avec le corps est due à la loi de Faraday, le champ magnétique va générer un champ électrique à l'intérieur du corps (Figure 2-6) en rapport avec la densité de courant dans les différents tissus.

La valeur du champ électrique interne va dépendre de :

- L'orientation du champ magnétique externe, (valeur maximum atteinte lorsque le champ va de l'avant vers l'arrière).
- Pour un champ magnétique donné, une personne plus corpulente sera le siège d'un champ électrique plus important.
- La distribution du champ magnétique est affectée par la conductivité des organes et des tissus.

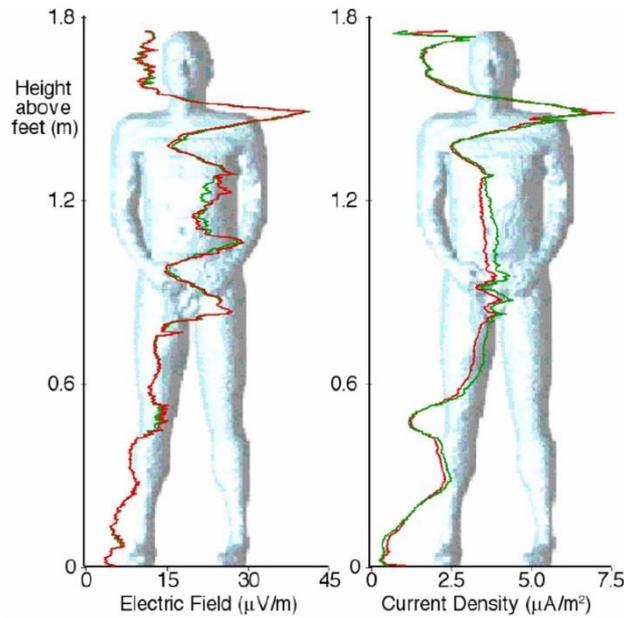


Figure 2-6: Champ électrique interne et densité de courant pour un champ magnétique de $1\mu\text{T}$ à 60 Hz [16]

Suite aux études épidémiologiques, les scientifiques se sont principalement focalisés sur les effets liés aux champs magnétiques. Un nombre important d'études in vitro et in vivo ont été réalisées à ce sujet. La circulation du champ électrique interne résultant de l'exposition du corps à un champ magnétique n'a pas du tout la même direction que dans le cas d'une exposition à un champ électrique. Le champ magnétique va créer un champ circulaire dans le corps humain en faisant des boucles plus ou moins grandes. Les résultats d'une exposition à un champ magnétique sont présentés ci-dessous :

	model	External source	Effect
Dawson, 1998		B-field only (60 Hz) $1\mu\text{T}$	about 10 mV/m in the bone marrow
Caputa, 2002	"Brooks man" (104 kg, 1, 8 m)	B-field only at $1\mu\text{T}$	internal E-field in the bone marrow : from 0.02 to 0.29 mV/m
Dimbylov, 2005	"Naomi" (60 kg, 1,63 m)	B-field only of 1 mT	internal E-field in the bone marrow : from 6 to 48 mV/m
Cech, 2007 and 2008	"SILVY" pregnant women 30 weeks (89 kg, 1,8 m)	B-field only of $100\mu\text{T}$	internal E-field in the foetal bone marrow about 3 mV/m. (current density of 0.6 mA/m^2)

Tableau 2-3: Résultats de différentes simulations pour une exposition aux champs magnétiques

Si l'on compare maintenant les données relatives à Naomi, on se rend compte que l'exposition à un champ électrique de 1 kV/m (grandeur fréquemment rencontrée à l'approche d'une ligne) et un champ magnétique de 1 mT (soit 10 fois plus que les recommandations des différents organismes), donne des valeurs entre 4.5 mV/m et 52 mV/m . Si on suppose un champ magnétique de $0.4\mu\text{T}$, le champ électrique interne résultant d'une telle exposition serait compris entre $1.8\mu\text{V/m}$ et $20\mu\text{V/m}$, soit complètement insignifiant (voir §2.3).

EN RÉSUMÉ, ON POURRAIT DIRE QUE SI ON SE BASE SUR LA VALEUR DU CHAMP ÉLECTRIQUE INTERNE AUX TISSUS HUMAINS D'UN CORPS À PROXIMITÉ D'UNE LIGNE HT, L'EFFET D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE TYPIQUE SERAIT 1000 FOIS PLUS IMPORTANT QUE CELUI D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE CORRESPONDANT À UNE CHARGE NOMINALE DE LA LIGNE!

Tissus	Champ électrique interne mV/m résultant de champ électrique de <u>1kV/m</u> (50Hz)			Champ électrique interne mV/m résultant d'un champ magnétique de <u>1mT</u> (50Hz)		
	Moyenne	99 percentile	Max	Moyenne	99 percentile	max
Moelle	5.72	49.4	88.8	11.6	50.9	166
Muscles	1.65	8.14	24.1	8.44	23	67.6
Cœur	1.29	3.98	5.83	9.62	28	42
Poumons	1.09	2.54	5.69	8.22	24.4	93.3
Pancréas	1.09	2.76	6.03	3.52	13.6	24.9

Tableau 2-4: Champ électrique interne pour différentes sources d'exposition [16]

2.3. EFFET D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE INTERNE SUR LE CORPS HUMAIN

Si un risque d'augmentation des cancers leucémiques a été observé suite à l'exposition au champ magnétique, aucun mécanisme biologique n'est à l'heure actuelle capable de justifier cette augmentation. Je vais, dans les quelques pages qui vont suivre, présenter différentes interactions physiques qui ont lieu lorsque le corps est parcouru par un champ électrique interne. Il est indispensable de rappeler que même si aucun mécanisme plausible n'existe, cela n'exclut en rien le fait qu'un effet biologique peut exister même à très faible exposition.

Les mécanismes que je vais décrire ici font tous appel à des lois physiques et des interactions physiques. J'exclue dans ce chapitre les effets biologiques qui peuvent survenir avec l'interaction de diverses protéines dans le corps humain.

On sait que celui-ci utilise l'électricité afin de faire transiter l'information à travers le corps et, ainsi, commander certaines actions. L'électricité sert également de déclencheur à certaines réactions chimiques notamment au niveau cellulaire. Tous ces mécanismes contribuent à l'activité électrique du corps humain et représentent son bruit de fond. Celui-ci se situe entre 1 et 5000 mV/m en fonction des zones et des mécanismes d'action. Si le rapport signal sur bruit est inférieur à un, il n'y aura pas de changement détectable dans les paramètres qui peuvent être attribués aux champs et, donc, pas d'effets biologiques qui pourraient lui être imputé. Par contre, si le rapport signal sur bruit est supérieur à un, des changements dans les paramètres peuvent être dus au champ et il est alors possible de lui voir attribuer des effets biologiques.

L'observation de plusieurs réponses cellulaires et membranaires, soumises à un faible champ ELF a permis de connaître l'ampleur de ces signaux électriques et de les comparer avec le bruit électrique intrinsèque des membranes cellulaires.

Les trois principales sources de bruit électrique dans les membranes biologiques sont [33]:

- Le bruit thermique électrique qui produit un changement de 3 microvolts, potentiels transmembranaires à des températures physiologiques
- Les décharges électrostatiques peuvent être une source importante de bruit électrique à travers les membranes.
- Le bruit rose « 1/f » associé aux flux de courant ioniques à travers les canaux membranaires produit généralement un décalage de 10 microvolts au niveau du potentiel transmembranaire.

D'après les simulations, les sources extérieures permettant de déclencher certains de ces mécanismes inopinément, seraient pour le champ électrique comprises entre 1 et 10 000kV/m et entre 600 et 40 000 μ T pour le champ magnétique [16].

Pour transiter l'information, le corps utilise des neurones myélines, ceux-ci sont chargés de transmettre l'information ; ce qui nous permet, par exemple, de lever le bras. L'excitabilité électrique des neurones résulte de la présence de canaux ioniques et de « voltage-gate-channels » constitués principalement de sodium, potassium, calcium et de chlore. Nous retrouvons à l'extérieur, dans des concentrations plus élevées, le sodium, les ions de calcium et le chlorure. A l'inverse, le potassium et les anions membranaires imperméables sont concentrés à l'intérieur. Il résulte, de cet effet, que l'intérieur du neurone est à un potentiel négatif par rapport à l'extérieur. Le potentiel de repos se situe généralement entre -60 à -75mV. L'application d'un champ électrique externe va modifier la concentration en ions et stimulera l'axone du nerf périphérique entraînant un ou plusieurs potentiels d'action. Si la dépolarisation de la membrane dépasse un certain seuil, les canaux ioniques peuvent se déployer suffisamment pour l'ouverture de la tension « gated » et permettre aux canaux sodiques de devenir autonomes. Pour de nombreux axones, l'action seuil de potentiel est d'environ -50 mV à -55 mV, quelques 10-15 mV au-dessus du potentiel de repos.

Les informations communiquent via un réseau entier de neurones (**Figure 2-7**), celui-ci peut aussi être perturbé par le champ électrique. L'activation des récepteurs par le neurotransmetteur peut alors causer une variété de réponses post-synaptiques. Il en résulte une altération de la probabilité qu'un type de canal ionique soit ouvert. Ces réseaux de neurones sont considérés comme ayant une dynamique non-linéaire réputée très sensible aux faibles tensions appliquées. En effet, ces tensions auraient pour conséquence la diffusion de mauvaises informations à travers les éléments du réseau. Ainsi, le cerveau d'une personne soumis à un champ magnétique 50 Hz de plus ou moins 3mT va éprouver des difficultés à réaliser des actions simples comme mettre le doigt sur son nez.

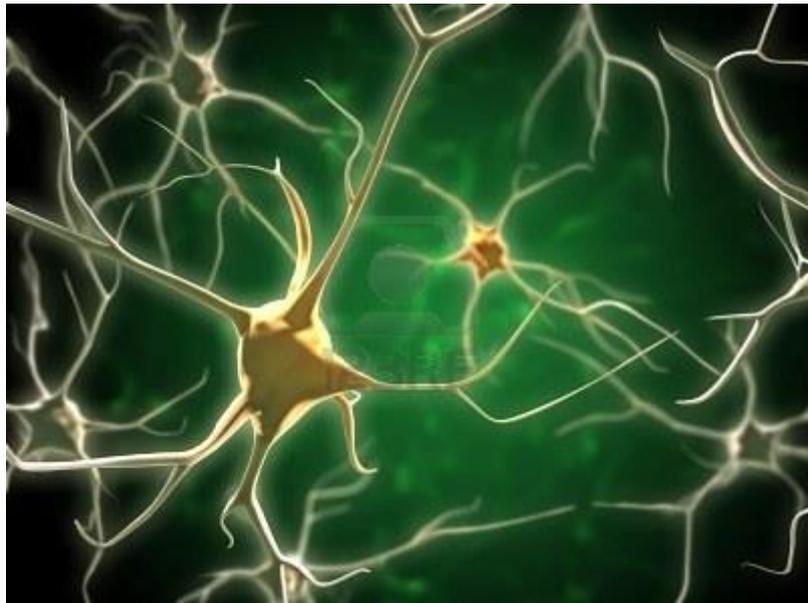


Figure 2-7: Réseau de neurones illustration numérique [34]

Résumons, le champ électrique interne dans certaines parties du corps comme la moelle épinière, peut atteindre des valeurs importantes mais celles-ci sont généralement comprises dans des zones où les cellules sont peu excitables. A l'heure actuelle, aucun de ces mécanismes n'a pu mettre en évidence un lien entre la leucémie et ces phénomènes physiques. La communauté scientifique continue de chercher un possible rapport. (Gardons à l'esprit que dans ce chapitre, seul l'aspect physique est abordé). Le corps est une mécanique complexe, il est donc important pour les chercheurs de travailler en équipe de manière à pouvoir coupler les différents mécanismes.

Ci-dessous, une brève représentation des différents effets détaillés.

Comparaison		Champ électrique à l'intérieur du corps mV/m	Correspondance en champ électrique extérieur V/m	Correspondance en champ magnétique mT
Bruit thermique	Volume de la cellule	20	10^4	0.600
	Sur la membrane complète	200	10^6	6
	Sur les éléments de la membrane	1000	10^9	4×10^4
Décharge électrique	Cellule type	100	5×10^4	3
	Cellule	10	6000	0.300
1/f			1×10^5	10
Niveau de simulation du nerf myéliné		5000		
Niveau de phosphorene		10-100		
Limite inférieure de l'estimation du réseau neuronal		1		

Source : [35] [36]

Tableau 2-5 : Tableau récapitulatif [16]

LE CHAMP ÉLECTRIQUE INTERNE JOUE UN IMPACT AU NIVEAU DE LA SIMULATION DES FIBRES NERVEUSES DES NEURONES MYÉLINES. D'APRÈS LES ÉTUDES SEULEMENT QUELQUES MILLIVOLTS PAR MÈTRE SUFFISENT À LES STIMULER. SUITE À CELA, UNE BORNE INFÉRIEURE DE 1 MILLIVOLTS PAR MÈTRE SUR LA DISCRIMINATION DU RÉSEAU DE NEURONES A ÉTÉ SUGGÉRÉE. MAIS, FONDÉES SUR DES PREUVES ACTUELLES, DES VALEURS DE SEUIL AUTOUR DE 10-100 MILLIVOLTS PAR MÈTRE SEMBLENT PLUS PROBABLES [16].

2.4. COURANTS DE CONTACT

Abordons, maintenant, les courants de contact. D'après certaines études, ce phénomène serait générateur d'un champ électrique à l'intérieur du corps humain. C'est la raison pour laquelle, à travers ce chapitre, je vais définir et détailler les causes et conséquences d'un tel courant sur le corps humain.

Dans certaines configurations, notre corps peut être parcouru par un courant causé par une différence de potentiel. Les causes sont variées, cela peut être dû à la charge et à la décharge d'une carcasse métallique à proximité d'une ligne haute tension ou dans une habitation, à des liens équipotentiels mal réalisés. En voici une représentation sous forme de schéma (Figure 2-9).



Figure 2-8: électrisation

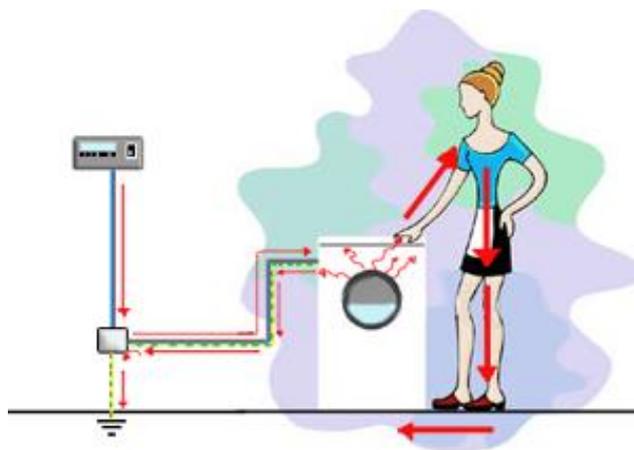


Figure 2-9: Personne parcourue par un courant de contact

Ce courant, représenté par les flèches rouges, n'est nullement un défaut électrique et montre une micro fuite de la carcasse de quelques μA . La conséquence est que, lorsqu'on touche la machine, ce courant de fuite va vouloir retourner à la terre en passant par notre corps. Tout comme le champ électrique et le champ magnétique, le passage de ce courant va générer, à l'intérieur du corps, un champ électrique interne¹⁴.

Les premiers résultats de champs électriques internes obtenus suite à l'exposition aux courants de contact sont les suivants :

Calcul du champ électrique mV/m induit par un courant de contact 60 Hz, $1\mu\text{A}$ dans la moelle osseuse d'un enfant		
Partie du corps	E moy.	E 99
Partie inférieure	5.1	14.9
Partie supérieure	0.9	1.4
Corps	0.4	3.3

Tableau 2-6: Résultats de simulations par courant de contact

D'autres études ont été réalisées, voici quelques valeurs de champ électrique en fonction de sources extérieures :

¹⁴Cette hypothèse a été mise en avant par Kavet aux USA dans les années 2000 [Kavet, 2000,2002].

I	Configuration	Exposition à 60 Hz	Moelle osseuse	Cœur	Référence
Champ magnétique	Uniforme, horizontal, perpendiculaire par rapport au corps	10 μ T	0.16 mV/m	0.14 mV/m	Dawson et Struchly, 1998
Champ électrique	Uniforme, vertical, mis à la terre	100mV/m	0.32 mV/m	0.13 mV/m	Struchly et al . 1998
Courant de contact	Courant injecté à travers les épaules	1 μ A	5.1 mV/m	/	Dawson et al.2000

Tableau 2-7: Comparaisons du champ électrique interne pour trois sources différentes

Tous les ordres de grandeur étant connus à présent, comparons les résultats avec le modèle d'un homme de 38 ans. Il se prénomme Joseph Paul Jernigan, il était condamné à mort dans l'état du Texas. Sur la suggestion de l'aumônier de la prison, Joseph a décidé de donner son corps à la science. Son cadavre, après une injection létale, a été congelé pour, ensuite, être découpé en tranche de 1mm d'épaisseur. L'analyse des données a notamment permis la correction de plusieurs ouvrages médicaux ainsi qu'une numérisation en 3D optimum (permettant d'être utilisée pour des calculs scientifiques). Le maillage de Joseph Paul (**Figure 2-10**) plus connu maintenant sous le nom de « Heeter » apparaît ci-dessous.

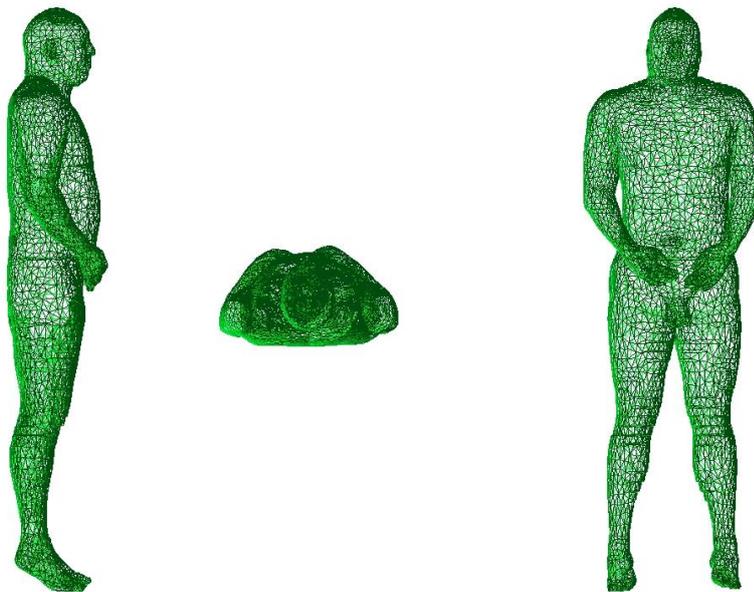


Figure 2-10: Maillage du corps humain

2.5. SIMULATION NUMÉRIQUE DU CORPS HUMAIN

Pour réaliser ces simulations, nous avons travaillé avec des outils informatiques. Ceux que nous avons utilisés sont GMSH¹⁵, et Get-dp¹⁶. Ce dernier est utilisé pour la solution numérique des équations intégro-différentielles permettant la résolution de problèmes physiques (électromagnétiques, thermiques, etc.) ainsi que des méthodes numériques (méthode des éléments finis, méthodes intégrales, etc.). Ce logiciel travaille sur différentes dimensions: 1D, 2D ou 3D.

La résolution du problème physique qui m'intéresse, à savoir le calcul du champ électrique interne d'un corps pouvant être soumis à trois sources extérieures (champ magnétique, champ électrique, courant de contact), est régie par les équations de Maxwell. Ces équations ont permis de résoudre le problème grâce à différentes hypothèses simplificatrices.

2.5.1. HYPOTHÈSES UTILISÉE

Cette partie du travail a été réalisée en collaboration avec l'équipe ACE de l'institut Montéfiore.

Lorsque le corps humain est soumis aux trois sources extérieures, nous savons qu'il apparaît un champ électrique à l'intérieur du corps.

Les interactions entre les contraintes extérieures et le corps humain peuvent être décrites à l'aide des équations de Maxwell.

Ce sont des équations différentielles qui régissent l'ensemble des phénomènes électromagnétiques classiques. Elles sont ici résolues à l'aide de la méthode des éléments finis appliqué à une géométrie complexe.

Pour résoudre un problème d'une telle envergure, il est intéressant que les conditions soient adaptées et que l'on fasse certaines hypothèses.

Dans notre cas, le corps humain est soumis à des sources à 50Hz. La longueur d'onde associée à cette fréquence est de 6000 km et est donc très grande en comparaison aux dimensions du modèle utilisé. Ceci nous permet de négliger le courant de déplacement par rapport au courant de conduction.

La deuxième hypothèse concerne la conductivité moyenne des tissus qui est faible, de l'ordre de 0.04 S/m. Cette hypothèse nous permet de négliger les courants induits résultant de l'effet du champ réactionnel.

Dans le cas où le corps humain est soumis à un champ électrique ou des tensions de contact, le problème que nous allons résoudre est un problème d'électrodynamique. Dans le cas où la source est un champ magnétique, nous allons résoudre un problème de magnétodynamique. Ces deux problèmes sont des cas particuliers des problèmes régis par les équations de Maxwell.

Les intensités que j'ai choisies pour ces différentes sources sont les valeurs suivantes : un champ magnétique de 100 μ T, un champ électrique de 10 kV/m et une tension de contact de 10 mV (appliquée entre la main droite et la jambe gauche) et un courant de contact de 500 mV, qui correspond au seuil de sensibilité du corps humain. Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau ci-dessous (**Tableau 2-8**).

¹⁵Programme de maillage.

¹⁶General environment for the treatment of DiscreteProblems développé à l'ULG au sein du service ACE de Montéfiore.

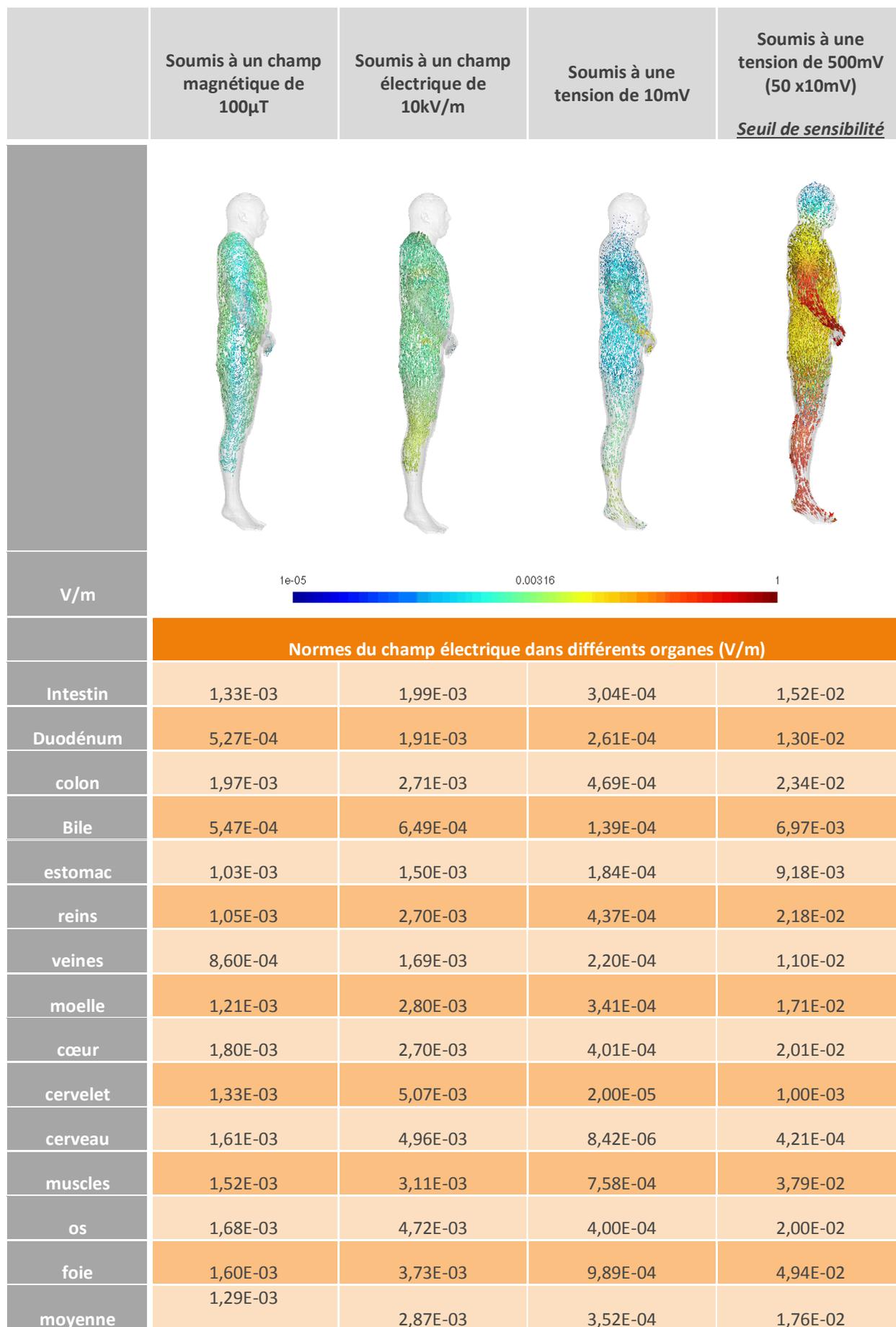


Tableau 2-8: Modélisation et calcul du champ électrique interne pour trois sources différentes

Je constate qu'un courant de contact imperceptible génère un champ électrique interne notable. En comparant les grandeurs, je remarque que l'exposition (en rapport avec les recommandations pour les champs électriques et magnétiques) génère un champ électrique interne plus faible que celui produit par un courant de contact. Il est donc impératif de savoir si le corps est soumis régulièrement à de faibles courants.

2.6. CONCLUSION:

Durant tout ce chapitre, j'ai pu déterminer quelle était l'interaction du champ électrique, magnétique et des courants de contact sur l'être humain. Je constate que le champ électrique interne est le seul paramètre physiquement capable de comparer les différentes sources. Je découvre, au fil du chapitre, que les modélisations des effets sont de plus en plus précises en permettant la connaissance des valeurs du champ électrique à l'intérieur de l'être humain. Je distingue que celui-ci varie de manière prépondérante avec la source extérieure. Cette partie de la thèse est d'une importance capitale. En effet, dans le chapitre suivant, je m'attarderai à l'étude des courants de contact dans le parc résidentiel belge puisque nous venons de le voir, ils sont capables de générer un champ électrique interne beaucoup plus grand qu'une exposition à un champ électrique ou magnétique. Il est donc capital de pouvoir les déterminer.

3.1. LES COURANTS DE CONTACT (CC)

L'hypothèse des courants de contact a été développée aux USA en 2002 [37]. Les courants de contact font partie des effets indirects possibles liés à la proximité d'une ligne HT comme nous le verrons plus loin.

3.1.1. INTRODUCTION ET DÉFINITION

Lorsqu'une personne touche simultanément deux objets qui sont à un potentiel différent, un courant de contact 50 Hz (en Europe) peut traverser le corps. Ce phénomène est régulier dans la vie de tous les jours mais nous ne pouvons le remarquer. En effet, la valeur du courant est tellement faible qu'elle est en dessous du niveau de perception proche de 0,5 mA [38] ; cf. chap 3.2. Le niveau des courants de contact incriminés se situe généralement entre 1 et 100 μA mais ils peuvent aller jusqu'au seuil de sensibilité.

Une différence de potentiel (à 50Hz) peut apparaître pour diverses raisons, celles-ci peuvent être dues à de (très) faibles courants de fuite qui, en s'écoulant par la prise de terre, élèvent (par rapport à l'« ambiance ») le potentiel d'un électroménager.

Lorsqu'une personne est soumise à cette différence de potentiel, généralement par un contact, elle est traversée par un courant (à 50 Hz), d'où l'appellation « courant de contact ».

Evitons de confondre avec une décharge électrostatique que l'on ressent, par exemple, en descendant d'une voiture. Elle se charge par le frottement des roues sur le sol et lorsqu'on en sort, au premier contact avec elle, les charges s'écoulent vers la terre à travers le corps. On appelle cela un phénomène transitoire.

Dans l'exemple ci-dessous (Figure 3-1), la dame est en contact avec une machine à laver à un potentiel V_1 , ses pieds touchent le sol et sont à un potentiel V_2 . La personne va donc être traversée par un courant contact dont l'intensité va être régie par la loi d'Ohm.

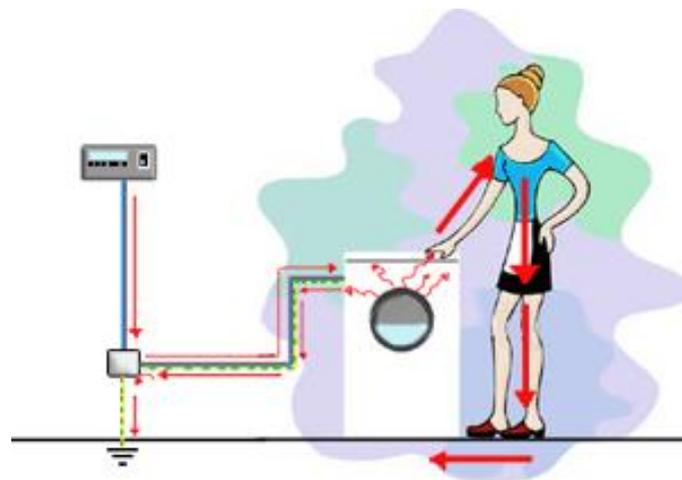


Figure 3-1: Exemple de courant de contact

L'impédance du corps humain étant comprise entre 500 et 3000Ω ¹⁷, une différence de 100 mV ($V_1 - V_2$) permettrait le passage d'un courant de 0,2 mA soit 200 μA lors du contact. La valeur du courant sera plus importante lorsque l'on prend son bain ou sa douche parce qu'un corps mouillé et sans chaussures, possède

¹⁷Voir chapitre Impédance du corps humain.

une impédance beaucoup plus faible. Ce courant circule à travers le corps en utilisant le chemin le moins résistif. Une partie de ce courant peut traverser la moelle osseuse, ce tissu est assez résistif mais moindre chez l'enfant que chez l'adulte. En effet, la conductivité de la moelle est de 0,07 S/m pour le jeune alors que chez l'adulte, elle est de 0,05 S/m. C'est pourquoi l'enfant est plus vulnérable [39].

Ce passage de courant à travers le corps génère une densité de courant et, donc, un champ électrique interne. (Cf. chapitre 2). Ce champ électrique interne peut être estimé (par exemple par calcul au niveau de la moelle osseuse) selon la source qui l'a fait naître, que ce soit un courant de contact ou un champ externe, électrique ou magnétique (Tableau 3-1).

Exposition aux champs magnétiques	Exposition aux champs électriques	Exposition aux courants de contact
100 μ T	10kV/m	20 μ A
1mV/m	10 mV/m	100 mV/m

Tableau 3-1: Comparaison de valeurs de champ électrique interne au corps humain (au niveau de la moelle osseuse) pour diverses causes

Les origines des courants de contact sont variées. Notre travail sur le terrain ainsi que diverses simulations m'ont permis de mettre en évidence certaines hypothèses :

- Influence des lignes HT sur les courants de contact.
- Influence possible des liaisons équipotentielles d'une installation électrique sur les courants de contact.
- Influence de l'effet capacitif des câbles électriques sur les courants de contact, une originalité qui sera développée dans cette thèse.
-

Ces hypothèses seront détaillées et explicitées tout au long de cette thèse.

Il est important de faire la différence entre un courant de contact et un courant dit « de court-circuit ». Les courants de contact sont indépendants de défauts majeurs potentiels de l'installation électrique qui déclencheraient les disjoncteurs. Les courants de contact sont un million de fois inférieurs à la valeur nécessaire au déclenchement du disjoncteur dans les pièces humides. Ils sont aussi largement inférieurs au seuil de différentiels (30 mA ou 30.000 μ A, pour les plus sensibles).

De manière à confronter nos différentes hypothèses, nous effectuons une campagne de mesures avec un protocole qui a évolué au fil du temps.

Les mesures ont été effectuées par une société de certification électrique SGS (Société Générale de Surveillance). Grâce à ses nombreuses interventions, SGS m'a permis d'alimenter notre base de données de façon capitale.

3.1.2. CAMPAGNE DE MESURES

Notre campagne de mesures vise à évaluer le niveau des courants de contact dans le parc résidentiel belge afin de comparer ces valeurs avec d'autres études réalisées dans d'autres pays dont les États-Unis. Nous évaluons ces niveaux dans divers endroits de l'habitation, principalement ceux où l'impédance du corps humain peut-être la moins élevée (espaces humides).

Notre échantillon de mesures se constitue de 150 habitations. Pour évaluer le courant de contact, deux mesures sont réalisées; l'une en circuit ouvert et l'autre en circuit fermé. Pour ce faire, nous utilisons une résistance de $1k\Omega$ pour simuler le corps humain. Cette valeur correspond au standard Américain. Elle sera l'objet de la prochaine section. Grâce à ces mesures, nous sommes en capacité de déterminer l'équivalent réseau : la force électromotrice et l'impédance (ici elle peut être résistive et /ou capacitive) de Thévenin. On en déduit le courant de contact (**Figure 3-2**).

Conjointement, nous avons effectué une campagne de mesures sur l'impédance du corps humain : les résultats seront présentés dans la section suivante.



Figure 3-2: Mesure en circuit ouvert (gauche); mesure en circuit fermé aux bornes d'une résistance de $1k\Omega$

Ci-dessous, un plan d'habitation qui permet de visionner les mesures réalisées dans une maison (**Figure 3-3**). Le protocole sera détaillé dans la section suivante.

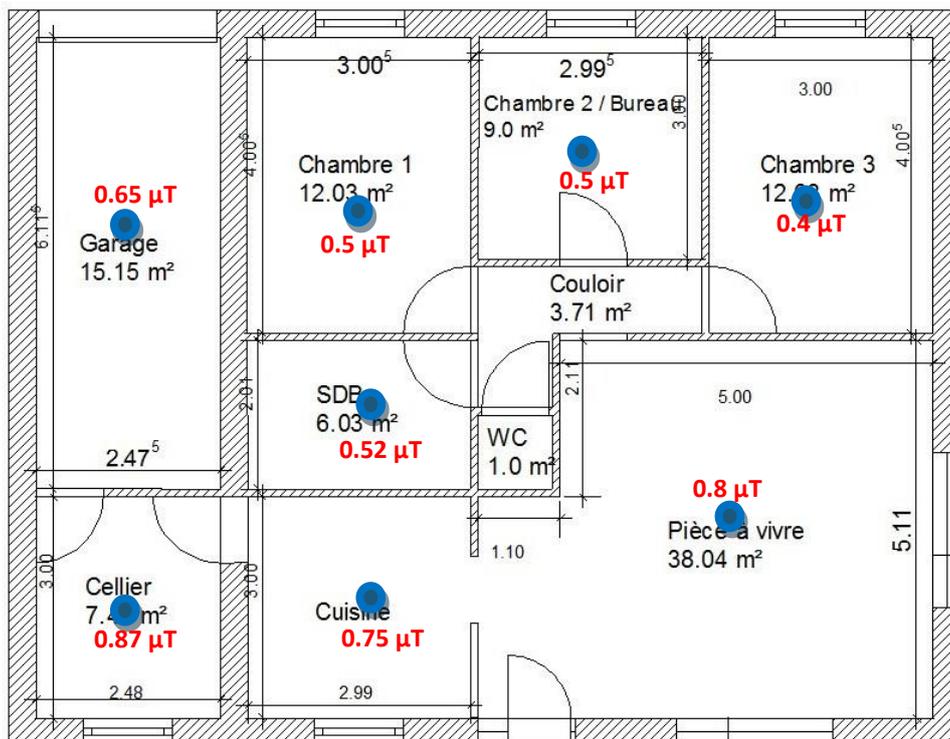


Figure 3-3: Endroits de mesures

Le plan comporte un nombre important de mesures de manière à repérer des corrélations qui justifieraient une augmentation ou une diminution du courant. Certaines de ces mesures ont, par la suite, été modifiées car elles n'aboutissaient à aucun lien. Au fur et à mesure, de nouvelles mesures les ont donc remplacées. Dans la même

optique, un répertoire des caractéristiques de l'habitation est complété ;détaillant, par exemple, le type de matériaux utilisés pour le raccord aux égouts ou le type de matériaux utilisé pour l'eau courante.

Nous mesurons également le champ magnétique ambiant afin de découvrir une possible relation entre le champ magnétique et les courants de contact.

3.1.2.1. ÉTUDE DU PROTOCOLE DE MESURES

Avant tout, il est nécessaire de rassembler des habitations représentatives. Tout un travail de triage s'opère pour parvenir à un répertoire pertinent de quartiers. Nous avons ciblé plusieurs blocs de maisons près de lignes à HT ; dans lesquels une inspection et une mesure du champ magnétique pourraient être effectuées. Ce biais forcé me servira à obtenir des valeurs de courants de contact pour différents niveaux de champ magnétique ambiant, jusqu'à quelques microteslas notons qu'en l'absence de structures à haute tension à proximité, il existe peu de probabilité d'atteindre un tel niveau.

Ensuite, les quartiers propices définis, j'ai invité les habitants à participer à notre enquête en déposant des toutes boites. Une annonce a également été placée sur le site du BBEMG afin de récolter des candidatures spontanées. Le bouche à oreille m'a permis d'avoir quelques maisons supplémentaires. Pour finir, le BBEMG m'a fourni une liste de personnes dites hypersensibles à l'électricité. Ces personnes font partie de l'étude de Marion Crasson [membre de l'équipe de psycho-neuro-endocrinologie du BBEMG].Avec leur accord, j'ai réalisé le même protocole de mesure dans leur habitation.

Concrètement, cela se déroule en plusieurs étapes : le contact se crée lorsque, intéressé par mon étude, l'habitant me téléphone. Nous fixons une date avec le technicien de la société de certification (SGS) afin de réaliser les mesures. Le jour de la visite, la démarche débute par la collecte d'informations autour de l'installation électrique et des caractéristiques du bâtiment. Le premier endroit inspecté est le compteur électrique. Il nous permet de connaître le type d'alimentation, le ou les types de protections, la tension d'alimentation et le type de SLT (Schéma de liaison à la terre).



Figure 3-4: Compteur électrique

Tout près du compteur, nous trouvons le sectionneur de terre. Celui-ci est prévu pour séparer la prise de terre (piquets ou boucles) du reste de l'installation électrique afin de tester sa résistance. A cet endroit, nous

mesurons la résistance de terre. Puis, nous vérifions l'existence ou non de courants de fuite à la terre à l'aide d'une pince ampérométrique.

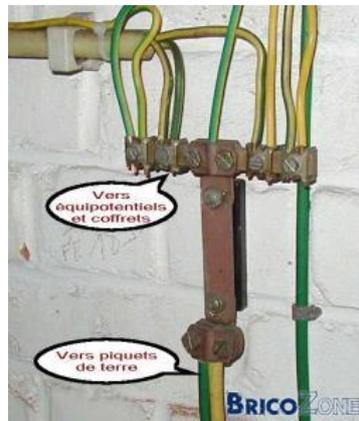


Figure 3-5: Sectionneur de terre

Dans un tableau électrique (TGBT), je me préoccupe uniquement de la barrette de terre se trouvant à l'intérieur. Elle représente l'équipotentielle de l'installation électrique de l'habitation. Même si la vérification de l'installation n'est pas notre but, la vérification du compteur ainsi que du sectionneur de terre, me permet d'avoir une bonne idée de son état général.



Figure 3-6: Exemple de branchement dans un tableau

Près de ces trois points d'inspection, nous trouvons généralement le compteur d'eau. La procédure s'oriente alors sur les canalisations d'eau puisqu'elles représentent un des vecteurs possibles de courants de contact. La mesure principale est de vérifier s'il est connecté ou non à la liaison l'équipotentielle de l'habitation. Si c'est le cas, l'eau étant conductrice, nous pouvons estimer que l'entièreté des canalisations est reliée à l'équipotential et, donc, à la terre.



Figure 3-7: Compteur d'eau

Une fois ces informations collectées, nous passons à une nouvelle étape: repérer et vérifier les endroits où des courants de contact peuvent apparaître et où une personne peut entrer en contact avec..

Nous commençons toujours près de la machine à laver et du lave-vaisselle, que nous appellerons "équipements humides", c'est-à-dire où des prises sont reliées à un différentiel de 30mA. Il est fréquent de les retrouver dans une buanderie qui constitue une pièce dite "humide" au même titre qu'une salle de bain.

Sur ces équipements, nous prenons une mesure de la tension de contact à vide et aux bornes d'une résistance de $1k\Omega$. Ceci dans le but de déterminer la force électromotrice et la résistance de Thévenin du circuit ainsi créé. Le point de mesure s'effectue sur la carcasse de l'appareil (ex: vis de fixation) et le point de référence est un piquet extérieur ayant servi pour la mesure de la résistance de la prise de terre. Nous mesurons aussi la tension entre l'équipement humide et l'arrivée d'eau (compteur d'eau). Ceci dans le but de savoir si une tension de contact peut provenir des canalisations.

Après les équipements humides, nous passons dans la cuisine pour mesurer la tension et le courant de contact dans l'évier. Les mesures sont prises entre le robinet et l'évacuation de celui-ci.

Pour terminer les mesures de tensions et courants de contact, nous passons à la salle de bain. Dans l'évier, la douche et/ou la baignoire, nous effectuons le même type de mesures que dans l'évier de la cuisine. A noter que cet endroit est notre zone de prédilection, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, c'est lorsque la personne est nue et humide que sa résistance est la moins importante.

Nous effectuons une mesure supplémentaire sur le robinet de la salle de bain. Cette mesure de tension me sert de vérification supplémentaire pour les liens équipotentiels de l'habitation avec le réseau de terre et les canalisations d'eau. Ceci termine les mesures sur l'installation électrique de l'habitation et sur les endroits pouvant accueillir des courants et des tensions de contact. Nous terminons l'inspection par la prise du champ magnétique dans chaque pièce et à l'extérieur de l'habitation, dans le but d'avoir l'exposition de l'habitation aux champs d'induction magnétique. Avant de partir, nous dessinons un plan schématisé de la maison inspectée pour me souvenir avec certitude où chaque mesure a été prise.

Le temps mis par les techniciens pour réaliser l'entièreté des mesures est estimé à deux heures sur place. La grille qu'ils doivent compléter apparaît ci-dessous (Figure 3-8).

Lors de la prise de mesures par le chercheur ou le technicien, chez les personnes hypersensibles, nous prenons généralement plus de temps en utilisant alors un protocole plus poussé qui prend facilement une heure supplémentaire.

Chez les personnes hypersensibles, les mesures de courants de contact sont quantifiées non plus avec une mais plusieurs résistances afin de vérifier si le courant diminue lorsqu'on augmente la résistance utilisée.

Lors de nos venues, nous n'utilisons pas uniquement un voltmètre pour mesurer la différence de potentiel mais également un oscilloscope double trace muni d'une probe HT pour le 220V. Sur une piste, nous visualisons la tension de l'habitation et, sur l'autre, on trace le courant de contact dans le but de voir si un déphasage existe entre les deux.

Nous mesurons également, de manière plus précise, le courant de fuite au niveau de la prise de terre en utilisant une résistance de $1k\Omega$ pour obtenir une mesure la plus exacte possible du potentiel de terre de l'habitation.

Ce temps de mesure allongé chez les personnes hypersensibles s'explique aussi par le fait que les personnes s'informent beaucoup plus autour de la nocivité des résultats que nous obtenons dans leur habitation.

Le détail des instruments de mesure et leur fonctionnement ainsi que leurs propriétés sont décrits dans l'annexe 3.

Projet tension de contact		Université de Liège - Institut d'Electricité Montefiore - Transport et Distribution de l'Energie Electrique / SGS Bureau Nivelles ASBL			
1. Données administratives		Remarques Supplémentaires			
Nom: XX	Heure In : 9h	KWh In : 012905,6	Pas de remarques supplémentaires		
Date: XX/XX/XX	Heure Out : 11h	KWh Out : 012908,7			
Adresse : XXXXXXXXXXXXX	Province : Liège				
Date des fondations : 1994	Région : Liège				
Date de l'installation électrique : 1994					
Photos de la maison en annexe :					
Tension d'alimentation : 1 x 230 V / 3 x 230 V / 1 x 400 V + N / 3 x 400 V + N					
Type de réseau : TT - TN - IT Distributeur : XXX					
Différentiel(s) : général : 300 mA supplémentaire(s) : 30mA					
Type d'alimentation : aérien nu / aérien torsadé / souterrain					
Utilités :					
Type de raccordement eau : PHD / plomb / acier / Cu / pas visible					
Type de raccordement gaz naturel : PHD / acier / pas visible					
Type de raccordement aux égouts : PVC / Béton / acier / pas visible					
2. Mesures					
2.1.1 Courant de fuite à la terre : 0,05		mA Si courant de fuite important (> 300 mA), faire une mesure des courants harmoniques de fuite			
2.1.2 Courant dans le neutre : /		2.1.3 Courant dans la boucle de terre : /			
		DDP (V)	DDP avec R=1,02	Pièce	
2.2. DDP entre <i>Indiquer le type de raccordement à l'égout: PVC / acier ainsi que le type de canalisations d'eau</i>	2.2.1. terre tableau et arrivée d'eau :	0,008		Garage	
	2.2.2. terre tableau et autres structures métallique (poutre, escalier, ...):	/			
	2.2.3 chauffage central et terre tableau (ou pico de terre)	0,022			
	2.2.4. terre tableau et piquets auxiliaires extérieures :	0,022			
	2.2.5 - arrivée d'eau et décharge à l'égout :	0,012	0,01	Garage	
	- arrivée d'eau (robinet) et évacuation d'eau de la douche :	0,123	0,01	Buanderie	
	- arrivée d'eau (robinet) et évacuation d'eau de la baignoire :	0,009	0,009	Salle de Bain	
	2.2.6. terre prise évier et robinet	0,015	0,009	Salle de Bain	
	2.2.7. arrivée d'eau et piquets auxiliaires extérieures :	0,23			
	2.2.8. égout principal et piquets auxiliaires extérieures :	0,12			
	2.2.9. Masse de la machine à laver et piquets auxiliaires extérieures :	0,027	0,02	Buanderie	
2.2.10. Masse du sèche linges et piquets auxiliaires extérieures :	0,095	0,025	Buanderie		
2.2.11. Masse du lave vaisselle et piquets auxiliaires extérieures	0,095	0,008	Buanderie		
3. Champ d'induction magnétique					
3.1. au centre de toute les pièces, à 1 m de haut (indiquer le nom des pièces sur le schéma d'implantation)					
hall :	0,15 µT	cuisine :	0,12 µT	garage :	0,12 µT
salle à manger :	0,14 µT	salon :	0,12 µT	bureau :	µT
salle de bain :	0,13 µT	chambre 1 :	0,11 µT	chambre 2 :	0,11 µT
chambre 3 :	µT	chambre 4 :	µT	chambre 5 :	µT
3.2. à l'extérieur, à 1 m de haut et à X m de la maison (perpendiculairement au milieu de la façade, et limité à la propriété) (indiquer en commentaire la présence éventuelle de lignes HT et la distance par rapport à la maison ainsi que leur orientation)					
2 m :	0,12 µT	5 m :	0,15 µT	10 m :	/ µT
4. Prise de terre et continuité		prise de terre : 8 Ω	équipotentielle principale : <1 Ω	équipotentielle supplémentaire : Ω	
mise à la terre par :		piquets <input checked="" type="checkbox"/>	boucle de fond de fouille <input type="checkbox"/>		
5. Commentaires :		6. Plan: Distance de l'habitation par rapport à la ligne: 50m			

Figure 3-8: Protocole de mesures

3.2. ETUDE DE L'IMPÉDANCE DU CORPS HUMAIN

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'impédance de l'être humain face aux faibles tensions. Afin de comprendre l'impact de nos courants de contact sur le corps humain, il est important de voir comment celui-ci réagit s'il est soumis à des tensions alternatives (50Hz) inférieures à 25V. Malheureusement, ces tensions étant infimes, peu d'études ont été réalisées. Il était donc nécessaire d'élargir mes connaissances face à cette impédance, ce qui me servira lors de mon protocole de mesures.

Dans le protocole de mesures (cf. section précédente), j'ai utilisé une résistance de $1k\Omega$. Cette valeur n'est pas arbitraire, elle correspond au standard américain qui sera expliqué plus loin. Dans cette section, je m'arrêterai également sur le standard européen qui a permis de mettre en avant les tensions de contact maximales admissibles en Europe. Je parlerai ensuite des normes existant en Belgique en les comparant avec les valeurs de tension de contact obtenues durant la campagne de mesures.

La résistance du corps humain n'est pas une constante, elle varie d'une personne à l'autre et dépend de son état d'humidité, de son stress, ... [40]. L'impédance, tout comme la sensibilité à l'électricité, est propre à chacun. Nous verrons que, lorsqu'une personne est soumise à un courant de contact, généralement, il se situe en dessous du seuil de perception. Le seuil de perception du courant est situé aux alentours des $500\mu A$ [41], valeur également obtenue lors de la campagne de mesures réalisée à l'ULG [42]. J'expliquerai aussi que les courants de contact sont très faibles comparés aux dangers relatifs à l'électrisation¹⁸.

Selon l'importance de l'électrisation, différents effets seront ressentis variant d'un fourmillement à l'arrêt cardiaque (Figure 3-9).

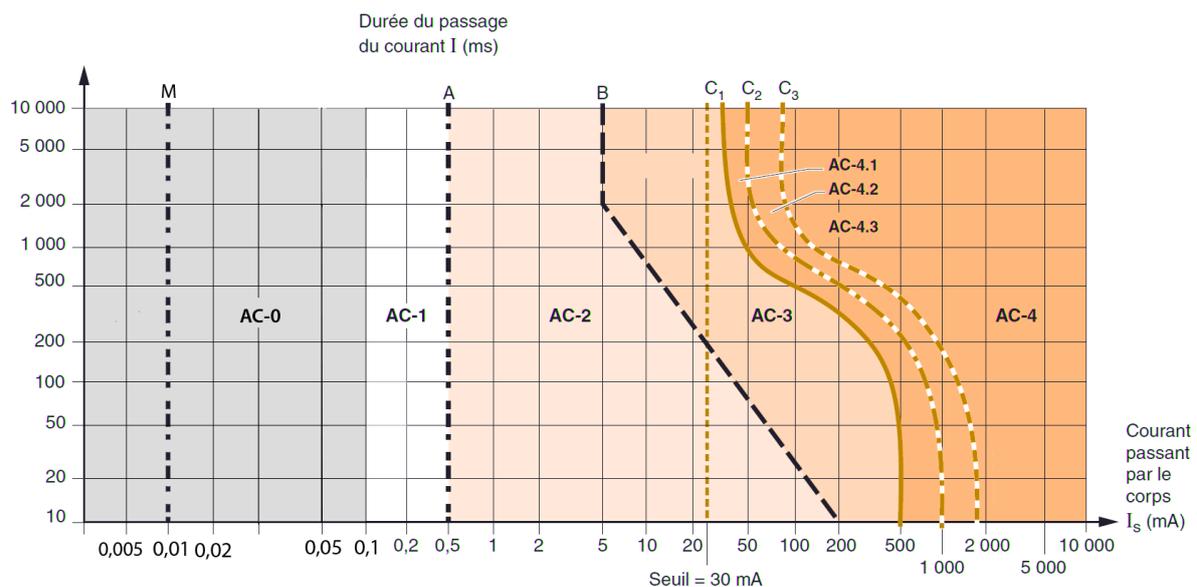


Figure 3-9 : Sensibilité du corps humain au courant électrique (50Hz)

- AC-0 : Zone des courants de contact (pas de réaction)
- AC-1 : Zone de perception du courant
- AC-2 : Contraction musculaire involontaire
- AC-3 : Difficultés de respiration
- AC-4 : Effets pathophysiologiques graves
- AC-4.1 : risque de fibrillations ventriculaires jusqu'à 5 %

¹⁸Rappelons qu'elle apparaît lorsqu'un corps est soumis à des courants relativement importants et peut mener à la mort de l'individu

- AC-4.2 : risque de fibrillations ventriculaires jusqu'à 50 %
- AC-4.3 : risque de fibrillations ventriculaires supérieur à 50 %

Même si j'étudie l'impédance du corps humain à 50Hz, il est intéressant de constater que celle-ci diminue lorsque la fréquence augmente (**Figure 3-10**), ainsi le corps possédera-t-il une impédance plus faible aux harmoniques du réseau.

Cette même figure extraite de la littérature me donne en borne inférieure des valeurs à 50 Hz. Ainsi, pour une tension appliquée de 25V, je relève une impédance de 5200Ω alors que, pour 1000V, j'ai une impédance de 775 Ω.

Remarque : Pourquoi utiliser dans notre protocole une résistance de 1kΩ alors qu'on constate ici une résistance au moins 5 fois plus élevée en très basse tension ? Est-ce que cette différence de grandeur a un impact sur notre étude ? Je répondrai à ces questions par la suite.

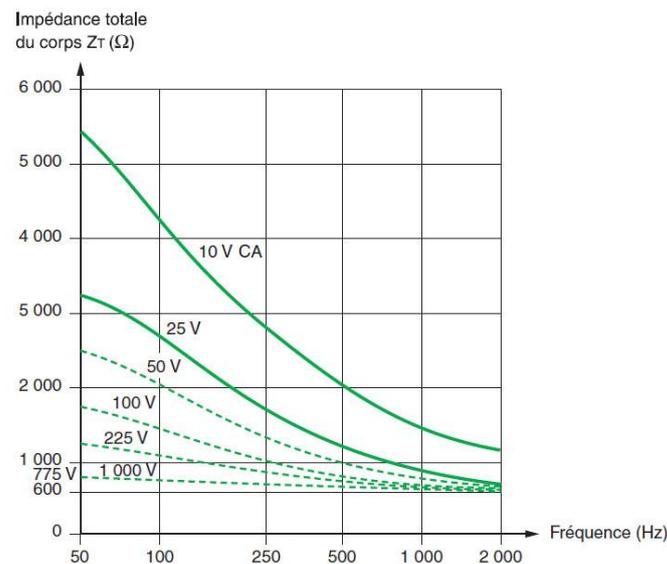


Figure 3-10: Impédance du corps humain en fonction de la fréquence [43]

3.2.1. LES DEUX GRANDS STANDARDS QUI DETERMINENT L'IMPEDANCE DU CORPS HUMAIN

Il existe deux grands standards pour déterminer l'impédance du corps humain, **le IEC 479-1** (*International Electrotechnical Commission*) et **le std 80** de l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronical Engineers*) aux USA. Tous deux visent à prévenir les risques liés à l'électricité. Différentes méthodes sont utilisées pour déterminer « la tension de contact » et « la tension de pas » maximale autorisée.

Aux USA, l'impédance du corps humain est considérée comme une constante, tandis qu'en Europe, l'impédance du corps va varier en fonction de la tension appliquée. Avant d'explorer un peu plus en profondeur ces deux standards, je vais définir la tension de contact ainsi que la tension de pas et les différences qui apparaissent entre ces deux normes.

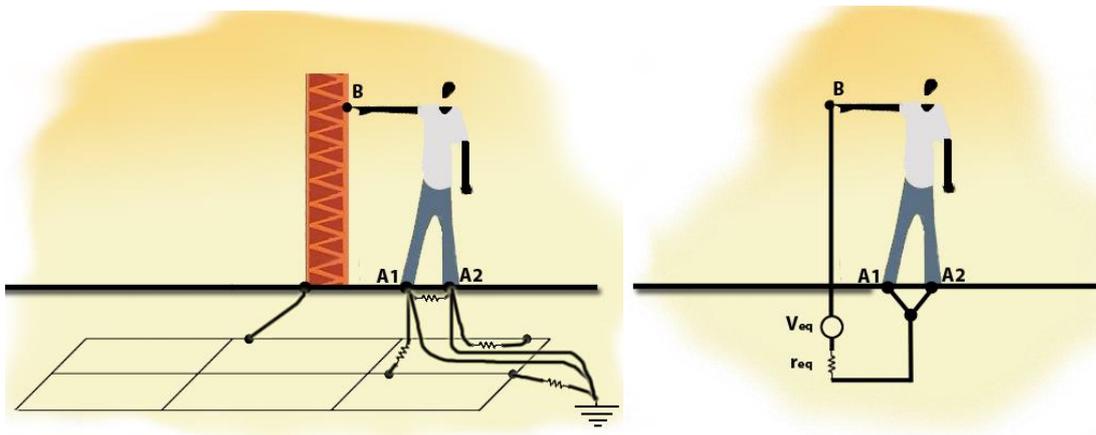


Figure 3-11: Tension de contact définition

Tension de contact (la force électromotrice) (V_{eq}) = la différence de potentiel entre une structure à la terre (B) et un potentiel de surface au point où la personne se trouve (Point A1 et A2).

Tension du corps = la tension à travers le corps humain entre les points de contact, c'est-à-dire entre le point B et les points A1 et A2. La tension appliquée au corps humain dépend de plusieurs facteurs comme la taille, les conditions, la pression de contact ...

Résistance de contact (la résistance de Thévenin) équivaut à la résistance du sol et des chaussures entre le point de contact du corps et le sol (points A1 et A2) et le système de mise à la terre (r_{eq}).

3.2.1.1. LE STD 80 IEEE

Le standard de l'IEEE a été révisé trois fois, en 1961, 1976 et 1986. Il est principalement utilisé aux USA. Ce modèle utilise une approche numérique pour estimer le courant admissible dans le corps. Le paramètre essentiel est la résistivité du sol. L'impédance du corps humain étant considérée comme un paramètre constant.

	Résistance du corps	Résistance de Thevenin	Tension de Thevenin	Courant admissible dans le corps humain
IEEE	1000 Ω	Tension de pas : $6c_s$ Tension de contact : $1,5c_s$	Obtenu grâce à la loi d'Ohm. $V = R I$ (R_{eq} et I_{body})	$0,116 / t^{1/2}$ pour personne 50 kg $0,157 / t^{1/2}$ pour personne 70 kg

Tableau 3-2 : Caractéristiques du Std 80 IEEE

En utilisant la loi d'Ohm, j'obtiens deux formules de tension admissibles en fonction du poids de la personne.

Les facteurs 1,5 et 6 sont des facteurs déterminés à partir de la surface des pieds d'une personne approximée à 200cm².

Tensions Admissibles

$$V_{T,perm} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (1.5c_s\rho_s + 1000)$$

$$V_{S,perm} = \frac{0.116}{\sqrt{t}} (6c_s\rho_s + 1000)$$

Où :

- ρ_s , résistivité du sol des couches inférieures
- O , (ohm .m)
- T , temps (s)
- c_s , est un facteur de réduction qui varie en fonction de la résistivité de la couche supérieure du sol (k) et de la

hauteur de celle-ci. On peut aisément déterminer la valeur du facteur grâce au graphique suivant (Figure 3-12).

- K , est déterminé de la manière suivante

$$k = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$$

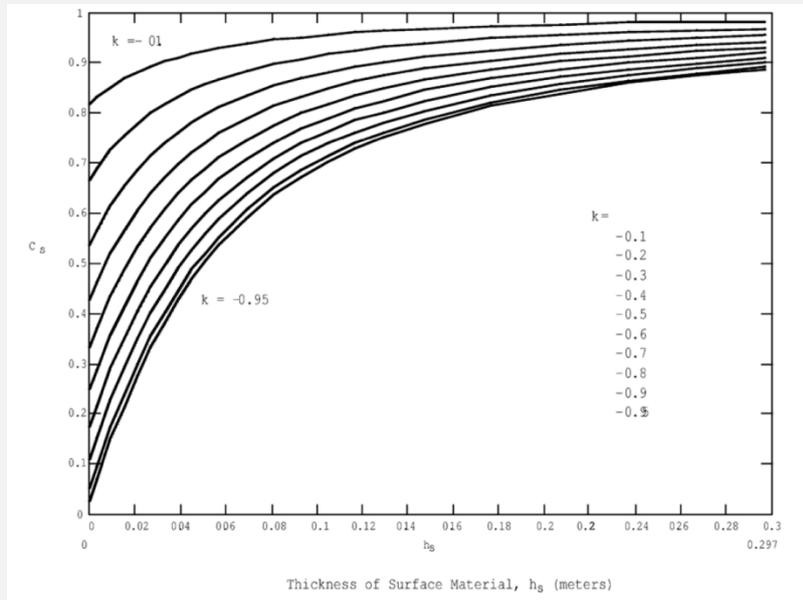


Figure 3-12: Courbe permettant de déterminer le facteur Cs

Les valeurs $0,116 / t^{1/2}$ et $0,157 / t^{1/2}$ représentent le courant maximum admissible avant qu'il y ait fibrillation ventriculaire. Ces valeurs ont été obtenues suite au développement numérique réalisé par Dalziel [44] et approuvé par AIEE 80 en 1963.

3.2.1.2. STANDARD IEC 479-1

La force électromotrice et la résistance de Thevenin ne sont ni explicitées ni utilisées dans la norme Européenne IEC 479-1.

Dans ce standard, l'impédance du corps humain n'est pas définie comme une constante et varie en fonction de la tension appliquée (Figure 3-14).

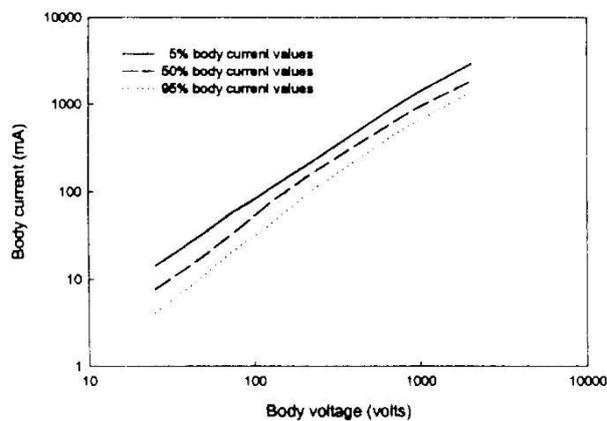


Figure 3-13: Tension appliquée au corps en fonction du courant

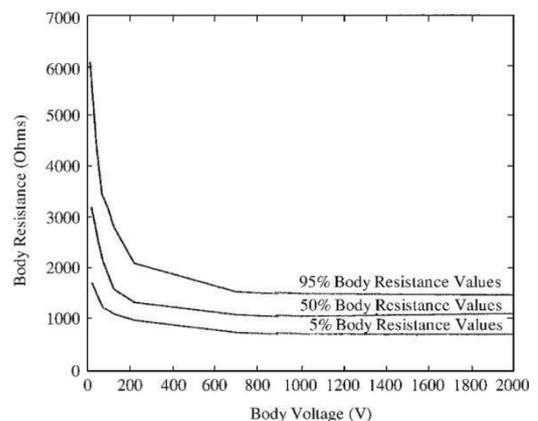


Figure 3-14: Impédance du corps humain en fonction de la tension

Dans le système IEC 479, les tensions de contact et les tensions de pas, sont déterminées à partir des équations suivantes :

Tension de contact et tension de pas:

$$V_{T,perm} = i_{b,perm}(t) [R_{bT,perm}(i_{b,perm}(t)) + R_{eq,T}]$$

$$V_{S,perm} = i_{b,perm}(t) [R_{bS,perm}(i_{b,perm}(t)) + R_{eq,S}]$$

Où :

- $V_{T,perm}$, la tension de contact admissible
- $i_{b,perm}(t)$, le courant de contact maximum admissible par le corps humain déterminé par la courbe C_1, C_2, C_3 (Figure 3-9).
- $R_{bT,perm}$, l'impédance du corps humain déterminée par la (Figure 3-14) représentant l'impédance du corps pour un courant entrant par la main et sortant par le pied et du courant admissible (Figure 3-13).
- $R_{eq,T}$, résistance pieds-sol pour des tensions de contact (pieds en parallèles)
- $V_{S,perm}$, est la tension de pas admissible
- $R_{eq,S}$, résistance pieds-sol pour des tensions de pas

3.2.1.3. COMPARAISON ENTRE LE STD 80 ET IEC 479-1

Le standard américain considère l'impédance du corps humain comme une constante et attache une plus grande importance à l'impédance du sol. Pour tenir compte de variations physiologiques du corps humain, deux formules sont utilisées. (Tableau 3-2)

Quant au standard européen, il « se focalise » sur l'importance de la variation de l'impédance du corps humain et à la durée à laquelle un corps peut être exposé.

Dans les graphiques suivants, je compare ces standards pour déterminer lequel permet des tensions de contact plus importantes.

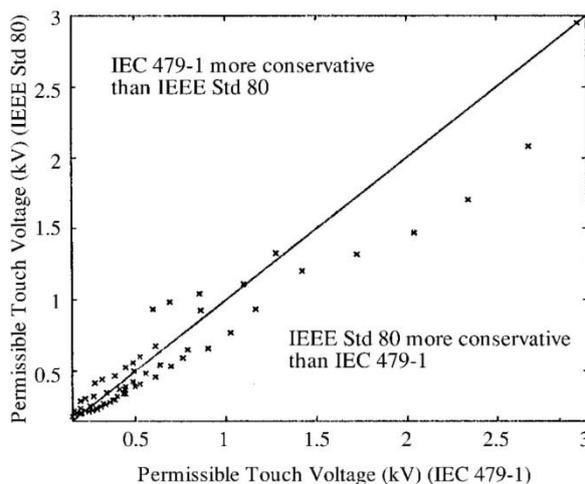


Figure 3-15: Tension de contact permise par le Std 80 et IEC 479-1, 50% de la valeur pour l'impédance du corps humain (main, et 2 pieds) et un courant permettant une probabilité de fibrillation ventriculaire de 0,5%.

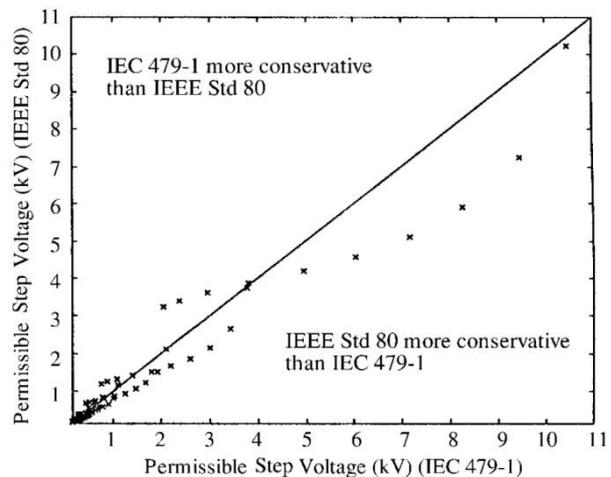


Figure 3-16: Tension de pas permise par Std 80 et IEC 479-1, 50% de la valeur pour l'impédance du corps humain (main, pieds) et un courant permettant une probabilité de fibrillation ventriculaire de 0,5%.

J'observe sur ces deux graphiques que la norme IEC-479 est plus conciliante pour les tensions admissibles. Selon les deux critères (cités précédemment, à savoir l'impédance du corps humain et la courbe de fibrillation), des tensions plus importantes apparaissent, jusqu'à plus ou moins 1kV, cela apportant une valeur moyenne de plus ou moins 1kΩ. Cette valeur représente, approximativement, la frontière à partir de laquelle le std 80 admet des tensions de contact plus importantes. Par contre, à partir 2 kV, la différence vient du courant admissible, déterminé par les courbes de fibrillation, qui permet une plus grande exposition aux tensions de contact.

3.2.2. VALEURS DE TENSION LIMITE EN BELGIQUE.

En Belgique, les tensions limites sont établies par le RGIE (Règlement général sur les installations électriques). Le RGIE détermine une tension limite conventionnelle absolue (UI) qui dépend de la résistance du corps humain. Je rappelle qu'elle dépend de certaines conditions comme l'humidité, la température ou encore la pression de contact. Le plus grand facteur influençant la résistance du corps humain est l'état du corps (humide, sec ou immergé). Pour définir ce facteur, trois valeurs de tension ont été attribuées en fonction de l'état du corps humain comme le mentionne le tableau ci-dessous (**Tableau 3-3**). Chacune d'elles est suivie d'un code commençant par BB et d'un chiffre.

Tension limite conventionnelle absolue en UI en volt				
Code	Etat du corps humain	Courant alternatif (C.A)	Courant continu non lisse (C.C)	Courant continu lisse (C.C.L)
BB1	Peau sèche ou humide par sueur	50	75	120
BB2	Peaumouillée	25	36	60
BB3	Peuimmergédansl'eau	12	18	30

Tableau 3-3: Tension limite conventionnelle UI (RGIE Art.31-31, p57)

La tension conventionnelle absolue ne tient pas compte d'un facteur important qui est la durée de contact. Pour cette raison, il a été défini une tension relative qui dépend du temps UI(t) (**Tableau 3-4**).

	Tension limite conventionnelle relative UI(t) en volt			
Temps de maintien maximum (t) en secondes	BB1		BB2	
	Courant alternatif	Courant Continu	Courant alternatif	Courant continu
∞	<50	<120	<25	<60
5	50	120	25	60
1	72	155	43	89
0,5	87	187	50	105
0,2	207	276	109	147
0,1	340	340	170	175
0,05	465	465	227	227
0,03	520	520	253	253
0,02	543	543	263	263
0,01	565	565	275	275

Tableau 3-4: Tension limite conventionnelle relative UI (t) (RGIE Art.31-31 ; P57)

L'ensemble des courbes formées à partir de tensions alternatives limites conventionnelles relatives UI(t) est appelé « courbe de sécurité » (Figure 3-17).

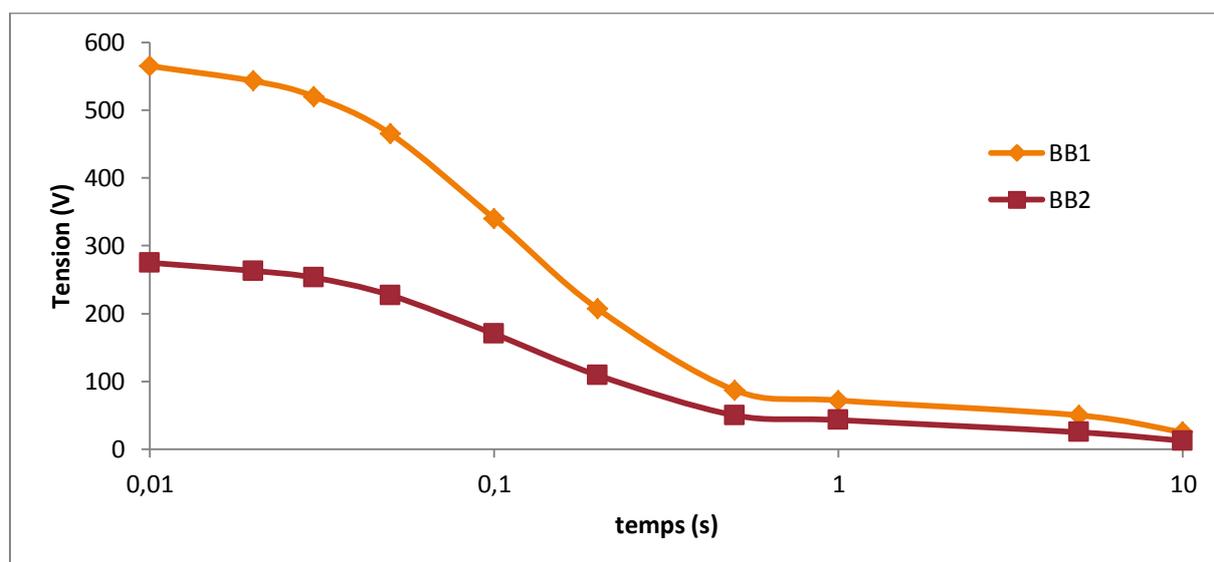


Figure 3-17: Courbe de sécurité

La protection contre les chocs électriques par contact direct est considérée comme assurée par l'utilisation de la très basse tension de sécurité¹⁹. Tout cela, sous réserve que la tension nominale maximale entre deux parties actives nues et simultanément accessibles ne dépasse pas la valeur mentionnée.

Etat du corps humain	BB1	BB2	BB3
Courant alternatif	25	12	6
Courant continu non lisse	36	18	12
Courant continu lisse	60	30	20

Tableau 3-5: Tension nominale TBT (RGIE Art. 32-32, p58)

Dans le point suivant, je détaillerai une expérimentation consistant à mesurer l'impédance du corps humain pour des courants très faibles. Etant donné que la norme Européenne utilise également cette méthode, je vais essayer d'approfondir le sujet en me penchant surtout sur les facteurs qui influencent ou pourraient influencer ces valeurs.

3.2.3. ETUDE DE L'IMPEDANCE DU CORPS HUMAIN POUR DES COURANTS DE CONTACT ALLANT DE 1 A 250 μ A.

Peu de données existent sur les valeurs de l'impédance du corps humain soumis à de très faibles courants. Mon but, en parallèle avec la campagne de mesures, est d'étudier le comportement de l'impédance du corps pour divers courants.

¹⁹La très basse tension (TBT) reprend les tensions alternatives inférieures à 50 Volts (cette définition découle d'une législation européenne).

Valeurs de l'impédance totale du corps humain (ohms) qui n'excède pas (le centile) de la population						
Tension de contact (V)	5%	Courant correspondant mA	50%	Courant correspondant mA	95%	Courant correspondant mA
25	1750	14.3	3250	7.7	6100	4.1
50	1450	34.5	2625	19.0	4375	11.4
75	1250	60	2200	34.1	3500	21.4
100	1200	83.3	1875	53.3	3200	31.3
125	1125	111.1	1625	76.9	2875	43.5
220	1000	220.0	1350	163.0	2125	103.5
700	750	933.3	1100	636.4	1550	451.6
1000	700	1428.6	1050	952.4	1500	666.7
Valeur Asymptotique	650		750		850	

Tableau 3-6: Impédance du corps humain pour différentes tensions (IEC 61201, TS, Ed. 2)

Je remarque que l'impédance est habituellement donnée pour une tension minimale de 25V, ce qui correspond à une résistance du corps de 3kΩ. Cela me donne un courant de 8mA, ce qui est (bien) au-delà de ce que je rencontre dans notre campagne de mesures.

Dans ce genre d'étude, l'utilisation de la loi d'Ohm n'est pas évidente : le corps humain est constitué de différents tissus dont les caractéristiques peuvent aisément changer. Les paramètres d'étude sont nombreux, nous pouvons mesurer l'impédance du corps humain entre les deux mains, les mains et les pieds, ... Les facteurs d'influences sources valeurs de résistance sont:

- Le type de source
- La magnitude de la tension de contact
- Le chemin du courant à travers le corps
- la surface en contact avec la peau
- Les conditions de surface de la peau (humide, sèche, salée)
- La durée du passage du courant

Il faut savoir que la résistance du corps humain est déterminée par la résistance des tissus et de peau. La peau change en fonction de la différence de potentiel qui passe à travers elle. Il varie également en fonction des zones d'expositions. Ainsi, la résistance d'un doigt est largement supérieure à l'impédance de la paume. En conséquence, le fait de mesurer l'impédance du corps humain à partir de la paume donnera une norme beaucoup plus conservative.

Durant les expérimentations, trois catégories de surface d'électrodes sont généralement utilisées.

- Large (82cm²)
- Medium (12,5cm²)
- Small (1cm²).

Plus les surfaces de contact sont grandes, plus l'impédance totale du corps humain va diminuer.

Les valeurs des courants ont été choisies en fonction des résultats obtenus lors de la campagne de mesures²⁰. Pour mesurer l'impédance du corps humain, j'utilise l'injecteur de courant²¹. J'ai décidé de la mesurer entre l'avant-bras et les mollets, ce qui me diffère des normes. J'ai opté pour cette méthode parce qu'elle a l'avantage d'être moins conservatrice ; étant donné que la peau est, à cet endroit, plus fine que sur une paume ou un doigt. La raison principale est que les électrodes de forme carrée sont plus faciles à coller sur l'avant-bras et le mollet, ce qui permet d'obtenir une assez bonne résistance de contact (c'est-à-dire le plus faible possible). J'ai également choisi de faire circuler le courant entre l'avant-bras droit et la jambe gauche, de manière à éviter à ces micro-courants de passer par le cœur. Les mesures ont été saisies en condition sèche par souci de simplicité dans la mise en place autant qu'au niveau de la sécurité. En effet, l'appareillage utilisé n'est pas conçu pour se trouver en milieu humide. De plus, il ressort de la littérature qu'il est encore plus difficile de connaître la résistance du corps humain humide car la présence du corps dans l'eau déforme les lignes de champs électriques. Une autre complication provient du nombre de voies d'entrée et de sortie possibles sur le corps, pour le courant, sur de très vastes zones de la peau.

3.2.3.1. MESURES EXPÉRIMENTALES

Le but de l'expérience est de connaître l'impédance du corps humain et pour ce faire, je vais injecter un courant à travers le corps, relever la tension aux bornes des électrodes pour, ensuite, connaître l'impédance du corps humain, en appliquant la loi d'Ohm.

Le dispositif expérimental que j'utilise est composé d'un boîtier d'alimentation, d'un injecteur de courant et d'électrodes. Le principe de notre injecteur est d'utiliser la carte son de l'ordinateur pour créer un signal 50 Hz et de l'envoyer à l'injecteur de courant alimenté par le réseau. Le signal 50 Hz est envoyé à travers le corps humain qui, grâce à son dispositif électronique (détaillé plus loin), permet d'avoir un courant constant à travers le corps. Il est à noter que la source possède donc une grande impédance interne. La construction et l'analyse de cet appareil a fait l'objet d'un DEA au sein de l'unité TDEE de l'ULG [42] où est expliqué le fonctionnement de l'ensemble des composants utilisés par cet injecteur.

²⁰ A savoir des courants allant généralement de 25 à 600 μ A

²¹ Développé à l'Ulg, il fera l'objet de la section suivante.

(A) EXPERIMENTATION:

Nous avons utilisé le dispositif décrit sommairement ci-dessus pour soumettre le corps humain à différentes valeurs de courant (**Figure 3-18**).



Figure 3-18: Dispositif expérimental

Les intensités de courant ont été choisies en fonction des résultats de la campagne de mesures. Je vais donc soumettre les personnes à des courants compris entre $25\mu\text{A}$ et $600\mu\text{A}$.

Les paliers pour ces courants sont de 25, 50 100, 140, 200, 250, 300, 350, 400, 500 et $600\mu\text{A}$. Les expérimentations sont réalisées en position assise pour éviter de soumettre les connections à trop de mouvements.

Une fois l'expérimentateur prêt, je commence à injecter un courant de $25\mu\text{A}$, j'attends que la tension se stabilise et je prends note de celle-ci. Ensuite, un court temps d'arrêt²² est pris avant de soumettre la personne à un second courant. Grâce aux tensions relevées et au courant injecté, je peux retrouver l'impédance du corps humain. Avant chaque expérimentateur, les électrodes sont changées et enduites de gel conducteur.

Il est arrivé qu'au cours des expérimentations, certaines personnes se soient avérées plus sensibles que d'autres. Dans ce cas de figure, les tests sont stoppés plus tôt.

²²Généralement entre 30 sec et 1min

(B) RESULTATS

La campagne de mesures d'impédance a été réalisée auprès de 30 jeunes âgés de 19 à 25 ans. Les résultats obtenus sont les suivants :

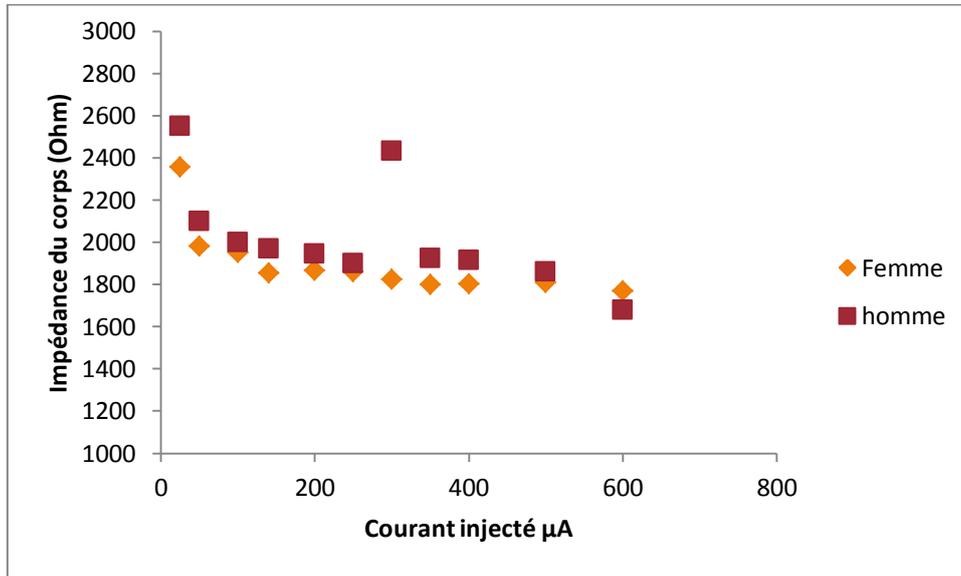


Figure 3-19: Résultats obtenus lors de l'investigation pour déterminer l'impédance du corps humain

Si je veux un point de comparaison, le passage d'un courant de 600µA à travers le corps ayant une impédance moyenne de 1800Ω équivaut à une tension de contact de 1V.

On constate un pic à normal qui s'écarte de la tendance uniquement pour les hommes et pour un courant injecté de 300µA.

3.1.2. SIMULATION PAR CALCUL

Lorsque le corps est parcouru par un courant important, il subit des lésions et modifie son comportement électrique. L'impédance de la peau retourne à son état d'équilibre si le courant qui la traverse n'est pas trop important et ne crée pas de lésion cutanée. Dans le modèle que je vais présenter et adapter à notre configuration de mesures, le corps est constitué d'une résistance en série avec une combinaison de résistances et de capacités simulant la peau (Figure 3-20).

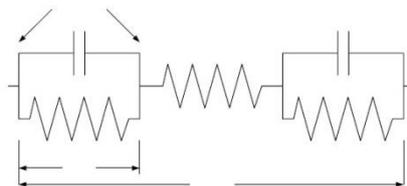


Figure 3-20: Représentation du corps pour une exposition main - main

Les résistances et capacités en parallèle représentent la peau en entrée et en sortie. Le reste des résistances, en série, représente la résistance interne du corps.

Avant de faire mes calculs et ma description des différentes résistances et capacités, je vais commencer par faire un certain nombre d'hypothèses.

Supposons que les conditions de la peau en entrée et en sortie sont identiques de manière à avoir un système symétrique.

Supposons également que la résistance des électrodes est négligeable par rapport à l'impédance de la peau.

La méthode de calcul référencée par L'IEC-479 est basée sur l'impédance du corps dans la configuration où une différence de potentiel est appliquée entre les deux mains de la personne. La mesure de l'impédance du corps humain commence à partir de 25V.

Le courant à travers les mains est donné par:

$$I_{h-h} = \frac{V_{t h-h}}{Z_{h-h}}$$

L'impédance interne :

$$Z_{h-h} = R_i$$

Déterminer l'impédance interne du corps humain entre les mains est une tâche difficile. Néanmoins, celle-ci peut être trouvée lorsque l'on soumet le corps humain à une tension très élevée, l'impédance du corps humain devient asymptotique. A très haute tension, l'impédance de la peau est fortement endommagée et ses caractéristiques sont alors court-circuitées. Ainsi pour une tension de 1000V, l'impédance du corps humain correspond à la résistance interne du corps et est égale à $\pm 550\Omega$.

Résistance de la peau

La valeur de la résistance de la peau est fonction du temps et est donnée par :

$$R_s(t) = R_s + (R_s(0) - R_s)e^{-t/0.05}$$

Capacité de la peau

L'estimation de la valeur d'impédance de la peau est nécessaire. Pour ce faire, l'estimation de la capacité de celle-ci C_s est nécessaire. Cette capacité est calculée à partir de la variation de la capacité par unité de surface de la peau C_s / S_c (à partir de 0,01 à 0,05 pF / cm²) et à partir de la surface de contact S_c :

$$C_s = S_c \times \left(\frac{C_s}{S_c} \right) \Bigg|_{C_s/S_c=0.01\mu F/cm^2}^{C_s/S_c=0.05\mu F/cm^2}$$

L'impédance de la peau sera donnée par :

$$Z_{s h-h}(t) = \frac{\left(\frac{1}{C_s} \right)}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \left[\frac{1}{R_s(t) \cdot C_s} \right]^2}}$$

L'impédance entre les bras est donnée par :

$$Z_{h-h} = \frac{R_{ih-h} \sqrt{(2\pi f)^2 + \left[\frac{R_{ih-h} + 2R_s}{R_{ih-h} \times 2R_s \times \frac{C_s}{2}} \right]^2}}{\sqrt{(2\pi f)^2 + \left[\frac{1}{2R_s \times \frac{C_s}{2}} \right]^2}}$$

f est la fréquence, dans notre cas, le 50Hz

R_s correspond à la résistance de la peau. Il faut que l'exposition soit assez longue pour permettre à *R_s* de s'ajuster à la valeur de la tension

Pour calculer la résistance électrique de la peau au temps 0, il faut se baser sur les résultats de l'IEC-479 et les extrapoler pour une tension de 0V (Figure 3-21). Etant donné que j'ai soumis le corps humain à de très faibles courants, les tensions sont comprises entre 0 et 25V.

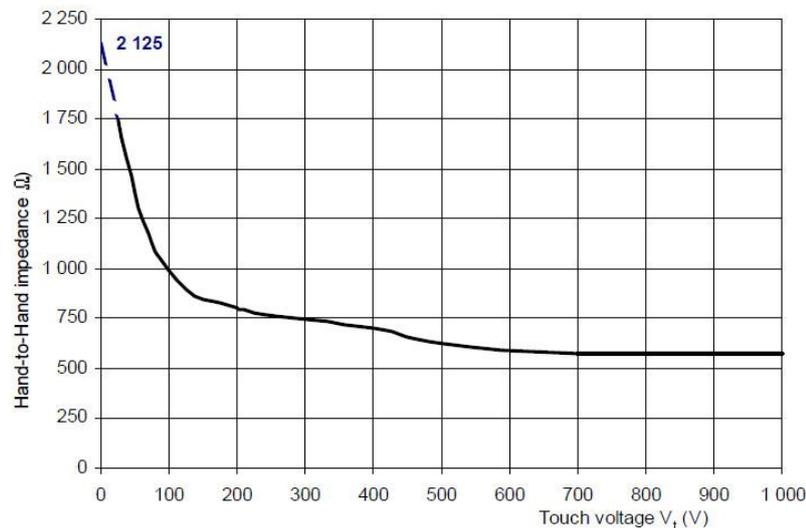


Figure 3-21: Extrapolation de l'impédance du corps humain pour un contact main-main avec des électrodes larges

L'impédance de la peau (entrée sortie) à 0 V est de **+ou- 1575Ω** correspondant à l'impédance totale donnée pour 0 V (2125Ω) diminuée de la résistance interne qui, nous l'avons vu, vaut +/- 550Ω.

Pour se rapprocher de nos résultats, je vais calculer la résistance entre une main et le pied. Celle-ci va légèrement augmenter étant donné que le passage va être plus long. Le corps humain peut être divisé en tronçons, tête, bras, torse, jambes, eux-mêmes subdivisés en plusieurs parties. Chaque section possède sa propre impédance. Elle est déterminée en pourcentage (Figure 3-22). On peut ainsi connaître aisément le rapport de pourcentage entre le cas main-main et le cas main-pied.

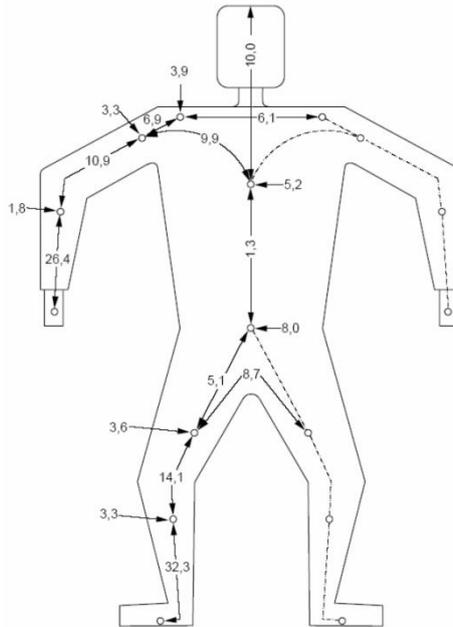


Figure 3-22: Représentation du corps humain en pourcentage

La portion du corps humain parcourue par un courant entre la main et le pied est 1.3 fois plus importante que entre les deux mains. La résistance interne est donc légèrement plus importante.

La résistance interne (main-pied) est donc donnée par :

La résistance interne

$$R_{ip-m} = 1,3 \times R_{im-m} = 550 \times 1,29 = 710\Omega$$

L'impédance totale entre le bras et le pied à 0 V vaut donc :

L'impédance totale vaut donc :

$$Z_{peau} + Z_{interne} = Z_{tot} = 1575 + 710 = 2285\Omega$$

J'ai donc négligé les résistances de contact, selon la littérature, la résistance de contact est obtenue par les peaux mortes où le contact a lieu. La résistance de contact à 50 -60 Hz est généralement entre 100 et 500 ohms pour une peau humide. Alors qu'elle peut atteindre les 100 kOhms pour une peau très sèche. Il faut être attentif en cas des lésions sur la peau car la résistance de contact devient nulle. Dans le cas où l'on veut mesurer la résistance, les électrodes sont enduites de gel conducteur, on peut donc estimer que la résistance de contact moyenne se situant aux alentours des 100Ω [45], [46], [47], [48]. Vu le caractère unique de la mesure (condition, personne, peau,...), donner une valeur précise est compliqué.

3.1.3. SIMULATION SUR LE CORPS HUMAIN

Pour cette dernière simulation, je vais utiliser Heeter, notre mannequin utilisé dans le chapitre sur la modélisation et l'estimation du champ électrique interne (cf Chap 2). Le but étant d'appliquer une tension à travers des électrodes afin de récolter des valeurs de courant aux bornes de celles-ci. Cela va me permettre, à l'aide de la loi d'Ohm, de récolter les valeurs de l'impédance de l'être humain.

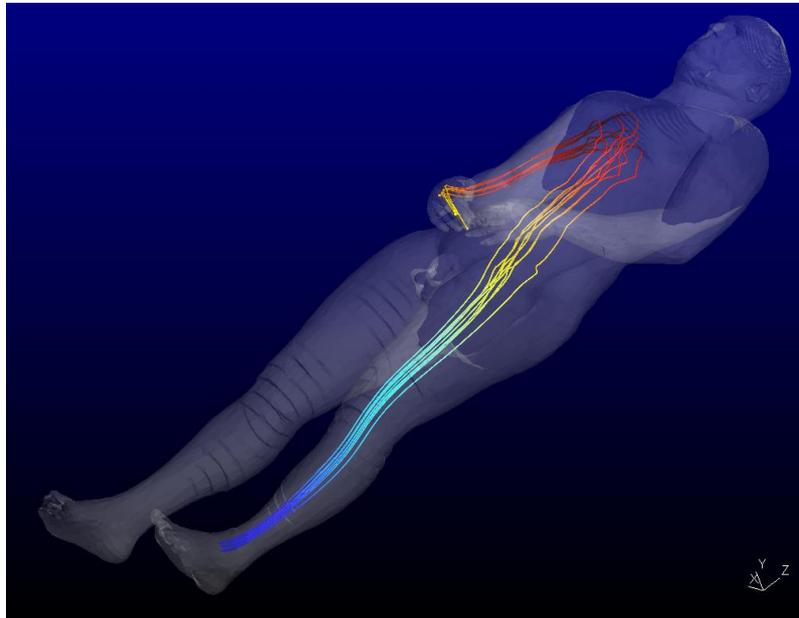


Figure 2-3-23: Parcours du courant à travers le corps lors de l'application d'une différence de potentiel

Etant donné que les éléments constituant le corps sont supposés linaires, une seule valeur suffit à me donner un aperçu de l'impédance du corps dans le cas du modèle de l'être humain.

Ainsi, si on applique une différence de 100mV, on obtient un courant de +/- 70 μ A circulant entre les deux électrodes. En utilisant la loi d'Ohm, j'arrive à une impédance de +/- 1300 Ω . Je constate que la valeur est plus faible. Dans le modèle numérique, les caractéristiques de la résistance de contact de peaux mortes sur peaux vivantes sont difficilement modélisables.

Suite à ces différentes modélisations et expérimentations, je me rends compte que l'impédance du corps humain, malgré sa variation, reste dans le même ordre de grandeur : de 1 à 3k Ω .

Pour la suite du document, j'ai choisi, pour simuler l'impédance du corps humain, une résistance de 1k Ω , ce qui est légèrement inférieur aux résultats trouvés mais qui ne changera pas les données de notre enquête.

3.1.4. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, j'ai donc entrepris d'étudier l'impédance du corps humain lorsqu'il est soumis à de faibles tensions ou de faibles courants.

Dans un premier temps, j'ai parcouru la littérature du sujet en détaillant d'une part, les risques liés à l'exposition de tensions élevées; d'autre part, les risques liés aux courants en se basant sur deux standards, l'un Américain, l'autre Européen. Dans le premier, l'impédance du corps humain est une constante qui vaut 1 kOhm. Dans le second, l'impédance varie selon la tension. J'ai également détaillé les valeurs de tension admissibles en Belgique, ces dernières étant déterminées par le RGIE.

J'ai ensuite présenté les résultats des mesures réalisées auprès de jeunes âgés de 19 à 25 ans. Ces dernières ont été réalisées avec un appareil développé à l'ULG. J'ai ainsi mesuré l'impédance du corps humain soumis à différentes intensités de courant allant de 25 à 600 μA . Les résultats de ces mesures m'ont donné une impédance du corps humain autour de 2500 ohms à 25 μA .

J'ai également utilisé les calculs issus de la norme IEC 479-1 pour déterminer l'impédance entre l'avant-bras droit et le mollet gauche. J'obtiens une impédance du corps humain de 2285 Ohm à 0V.

De même, les résultats obtenus suite aux simulations numériques me donnent une impédance totale du corps humain de 1339 Ohms.

Les résultats de ces différentes simulations et mesures expérimentales peuvent être rapportés dans le tableau ci-dessous.

	Littérature (à 25V)	Mesures expérimentales (10-600 μA)	Modèle physique	Modèle numérique (0,1V)
Résistance (Ω)	1750	1800	2654	1339

Tableau 3-7 : Synthèse sur l'impédance du corps humain

Au vu de ces résultats, on peut estimer que la résistance du corps avoisine les 2 k Ω .

Pour des raisons de facilité et pour être en accord avec l'étude réalisée sur les courants de contact aux USA ; j'ai décidé de simuler l'impédance de l'être humain avec une résistance de 1k Ω . De plus, cela nous évite de sous-estimer les courants engendrés lorsque la résistance du corps humain est égale à 1000 Ω . Cette dernière est légèrement plus faible que les valeurs obtenues suite à nos investigations. Nous verrons que l'impact de ce choix est minime dans la section 3.4 de cette thèse.

3.3 COURANTS DE CONTACT, RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE MESURES ET JUSTIFICATIONS

Dans ce paragraphe, je vais présenter les résultats ainsi que les différentes relations mises en avant dans notre enquête sous forme graphique. Je détaillerai mes diverses hypothèses pour justifier ces courants de contact. L'échantillon de mesures, s'élevant au total de 150, me permet d'avoir une relation statistique suffisante des courants de contact dans le parc résidentiel belge.

3.3.1. COURANTS DE CONTACT, RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE MESURES.

Premièrement, je vais exposer les valeurs des courants de contact, à mon avis, potentiellement les plus dangereuses. Je parle évidemment des valeurs recueillies dans les salles d'eau, où le corps est le plus apte à être soumis à des courants élevés à cause de sa faible impédance (Cf. chapitre 3.2.3). Dans un second temps, on étudiera les courants de contact auprès des électroménagers.

Les diagrammes ci-dessous (Figure 3-24) représentent le pourcentage d'habitations soumis à des courants de contact compris entre 0,1 et 1000 μA . Ceux-ci ont été pris entre les arrivées d'eau et les évacuations des douches ou des baignoires des maisons visitées (Cf : chapitre 3.1).

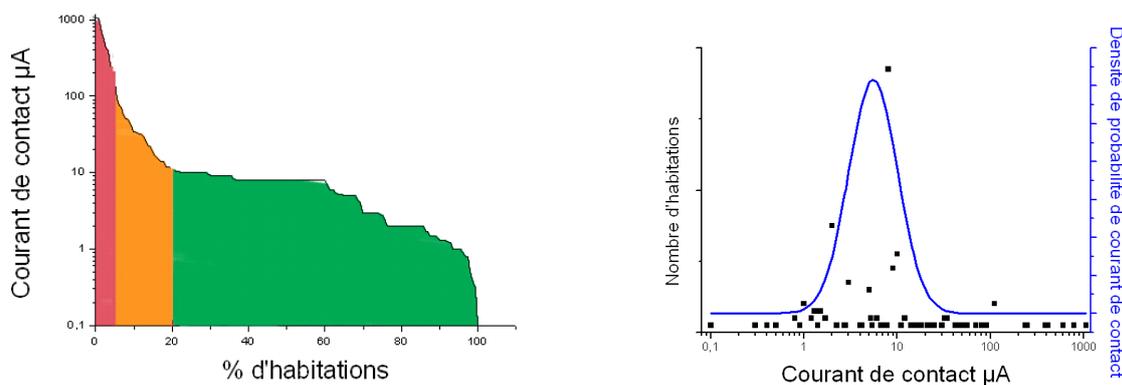


Figure 3-24 : Courant de contact dans les salles d'eau

Je constate que :

- 80% des maisons ont dans leur pièce d'eau des courants de contact inférieurs à 10 μA
- La moyenne des courants de contact est de 8 μA
- 20% des habitations ont des courants de contact supérieurs à 10 μA
- 5% des logements ont des courants de contact supérieurs à 100 μA

J'ai également mesuré les courants de contact près des électroménagers. (Figure 3-25) Pour rappel, cette mesure est prise entre la masse de l'appareil et un piquet enfoncé dans le sol à l'extérieur de l'habitation. Ce choix a été avancé dans le but de négliger la composition du sol qui nous donnerait une inconnue supplémentaire. Les résultats sont présentés ci-dessous:

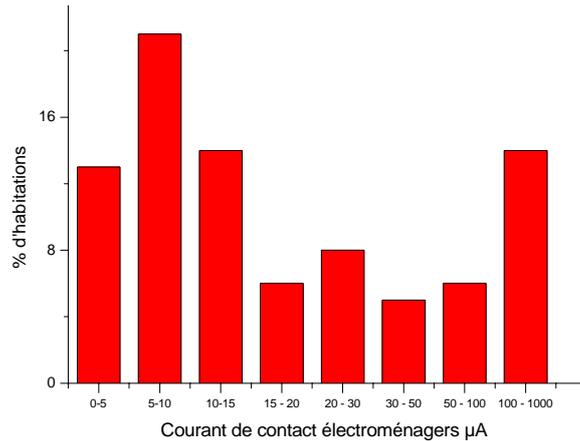


Figure 3-25: courants de contact avec les électroménagers

Je constate que :

- plus de 50% des habitations ont des courants de contact inférieurs à $20\mu\text{A}$
- 85% des maisons ont des courants inférieurs à $100\mu\text{A}$
- 15% des mesures sont supérieures à $100\mu\text{A}$

Je remarque également que les courants de contact à proximité des électroménagers sont plus importants que ceux mesurés dans la salle de bain. Je tenterai de justifier ce phénomène plus loin lors de mes modélisations.

Pareillement, j'ai mesuré le champ magnétique dans les habitations (Figure 3-26), les résultats indiquent la moyenne des mesures réalisées dans la maison. Pour rappel, celles-ci sont prises à une hauteur de 1,2 m du sol au centre de chaque pièce ; elles sont éloignées de toute source de pollution temporaire telle que le four à micro-ondes, l'ordinateur etc....

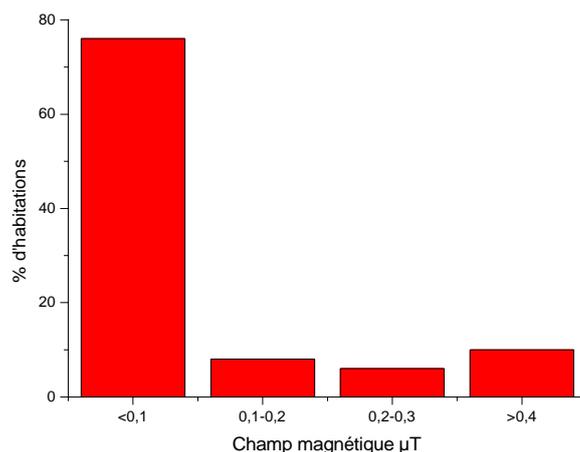


Figure 3-26: Champ magnétique moyen

J'observe:

10% des habitations visitées traduisent un champ magnétique supérieur à $0,4\mu\text{T}$. Ce pourcentage se justifie par le fait que j'ai ciblé les habitations possédant un champ magnétique élevé afin de découvrir si une corrélation existe entre ces deux grandeurs physiques, à savoir le champ magnétique et les courants de contact.

La valeur médiane du champ magnétique est de 0,02 μT et correspond également aux mesures réalisées par Gilbert Decat [49] lors de ses investigations.

Maintenant que j'ai exposé les valeurs des courants de contact rencontrés lors de notre enquête, je constate que, même si ceux-ci sont d'une faible intensité, ils peuvent générer un champ électrique interne important (Cf. Chapitre 3.2). Pour rappel, un courant de contact de 10 μA entre l'avant-bras et le pied peut générer un champ électrique interne compris entre 86E-3 et 5 mV/m, en fonction des organes. Soit, les valeurs rencontrées lors d'une exposition à un champ magnétique de 100 μT . Il est donc impératif de connaître l'origine de ces courants ! C'est ce que je tenterai de faire dans les pages qui vont suivre.

3.3.1.1. COURANTS DE CONTACT ET CHAMP MAGNÉTIQUE :

Dans un premier temps, je m'intéresserai au lien qu'il pourrait y avoir entre ces deux grandeurs. D'un point de vue physique, la circulation d'un flux magnétique à travers différentes boucles conductrices est capable de générer une tension qui peut apparaître en divers endroits de l'habitation où le circuit n'est pas fermé (ex: entre l'arrivée d'eau au robinet et une évacuation d'eau). Cette première hypothèse a d'abord été émise par Kavet aux USA dans les années 2000 [37] [50] comme étant un effet indirect du champ magnétique pouvant justifier l'augmentation des leucémies à proximité des lignes.

3.3.2. ÉTUDE DES COURANTS DE CONTACT PAR SIMULATION NUMÉRIQUE

De manière à modéliser l'influence des lignes HT sur une installation électrique, ils combinent deux méthodes, d'une part la méthode PEEC (Partiel elements equivalent circuit) et, d'autre part, la théorie des circuits.

Cette technique de modélisation PEEC est basée sur la notion d'éléments partiels : résistance, inductance propre et mutuelle. Elle se base, aussi, sur le fait qu'une boucle de courant peut être décomposée en éléments contribuant à l'impédance totale du système. La circulation du courant est décomposée pour chacun d'eux.

Les éléments constituant le modèle sont des fils fins dont la section est négligeable par rapport à leur longueur. La section est également minimale par rapport à la distance entre les fils. Grâce à ces deux hypothèses, ils utilisent la formulation de Neuman pour déterminer l'influence mutuelle entre deux fils.

Formulation de Neuman :

$$L_{pkm} = \frac{\mu}{4\pi} \iint \frac{d\vec{l}_k \cdot d\vec{l}_m}{rk_m}$$

L'ensemble des inductances propres et mutuelles leur a permis d'obtenir une matrice d'inductance partielle. En prenant en compte la résistance de ces éléments partiels, ils ont obtenu la matrice d'impédance totale du circuit équivalent. Les courants et tensions du circuit équivalent ont été déterminés avec la méthode des courants indépendants provenant de la théorie des circuits.

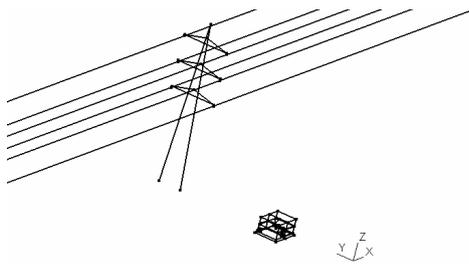


Figure 3-27: Représentation de l'habitation sous la ligne

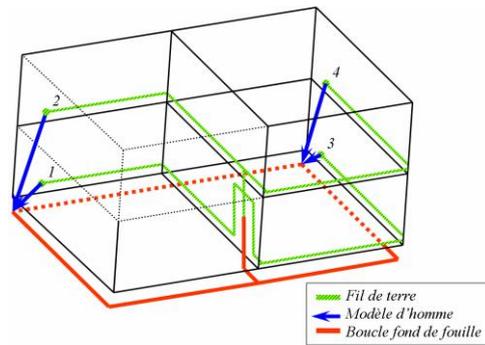


Figure 3-28: Représentation des liens et câbles dans l'habitation soumise à un champ magnétique

Grâce à ce modèle (Figure 3-27), ils ont pu estimer les courants de contact en deux points de l'habitation pour une configuration de la ligne (Figure 3-28). La ligne est composée de 2x3 phases avec un courant de 2140 Ampères par phase, ce qui représente un cas plus que critique. Nous verrons que dans le cas présenté ci-dessus, le type de mise à la terre joue également un rôle sur les valeurs de courant de contact.

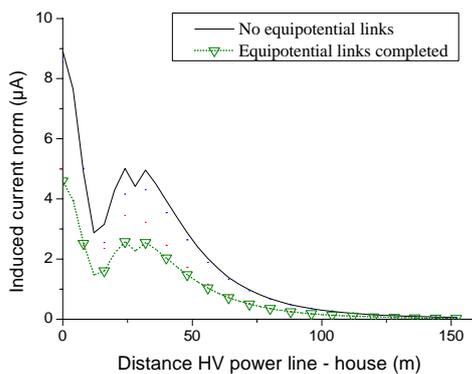


Figure 3-29: Courants de contact avec piquets de terre

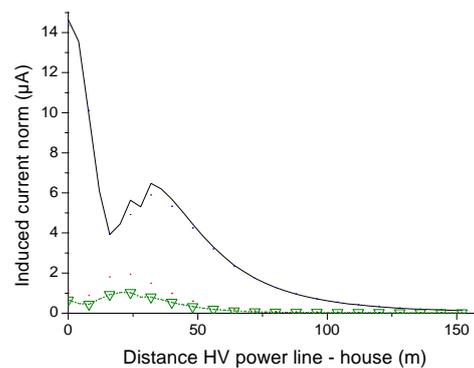


Figure 3-30: Courants de contact avec une boucle de fond de fouille

Les premiers résultats réalisés avec ce type de modélisation et de configuration montrent l'influence de la mise à la terre, à savoir le système de piquets (Figure 3-29) et de boucles de fond de fouille. Ils ont constaté que les courants de contact où la mise à la terre est réalisée à l'aide d'une boucle de fond de fouille sont d'un niveau plus élevés (Figure 3-30). D'après eux, c'est principalement dû au fait qu'il existe une boucle supplémentaire faisant apparaître une différence de potentiel plus importante et, donc, un courant de contact plus élevé. Durant la campagne de mesures, le système de mise à la terre est également stipulé. Nous pourrions ainsi vérifier si cette tendance apparaît dans notre étude.

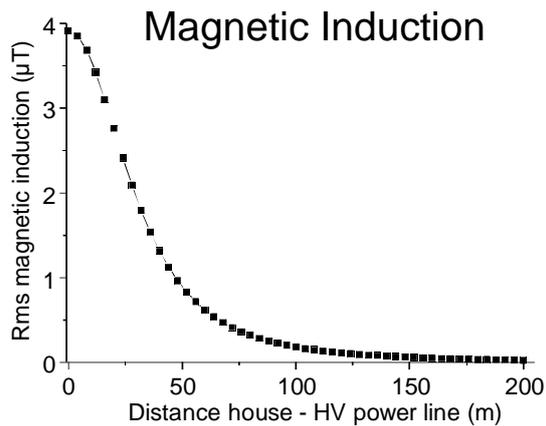


Figure 3-31: Diminution du champ magnétique lorsque l'on s'éloigne de la ligne

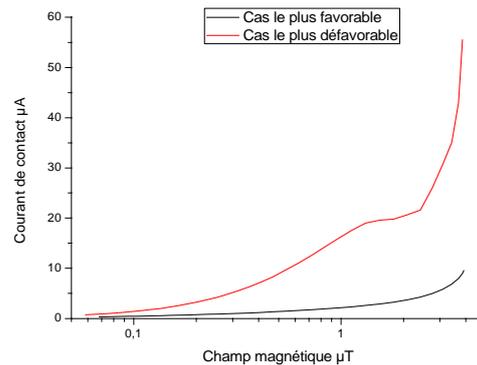


Figure 3-32: Courants de contact en fonction du champ magnétique

La ligne produit un champ magnétique qui décroît avec la distance (Figure 3-31). Dès lors, il m'est possible de connaître le courant de contact en fonction du champ magnétique (Figure 3-32).

3.3.3. COURANTS DE CONTACT ET CHAMP MAGNETIQUE RESULTAT DE LA CAMPAGNE DE MESURES

Le but de ce paragraphe sera de rechercher si un lien apparaît entre les courants de contact et le champ magnétique.

Comme nous l'avons vu précédemment, le champ magnétique à proximité des lignes 380kV est généralement supérieur à $0,4\mu\text{T}$ et ce, dans un rayon de plus ou moins 80 mètres de part et d'autre de la ligne (Ch. 1 §1.1).

Les simulations présentées ci-dessus montrent que les courants de contact peuvent varier de quelques μA à plusieurs dizaines de μA , dans les cas les plus défavorables, pour un champ magnétique supérieur à $0,4\mu\text{T}$. Le pourcentage d'habitations étant soumis à un champ magnétique relativement important, ($>0,4\mu\text{T}$) est approximativement de dix pourcent.

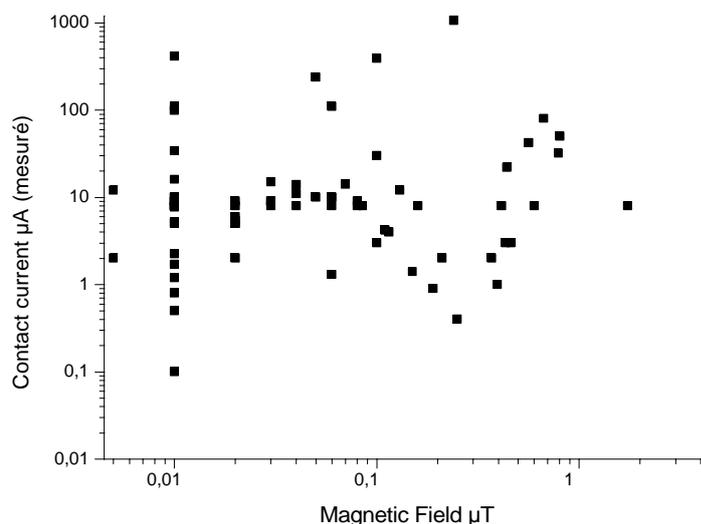


Figure 3-33: Courants de contact en fonction du champ magnétique résultats de la campagne de mesures.

Il semble difficile visuellement de constater une relation possible entre le champ magnétique et les courants de contact (Figure 3-33). Nous allons voir cela en détail en analysant les données d'un point de vue statistique.

En effet, je vais présenter le risque relatif approché (OR) ainsi que le risque relatif (RR) d'avoir des courants de contact en fonction du champ magnétique dans le parc résidentiel belge. Ces résultats sont présentés dans les figures (Figure 3-34). Ce choix de statistique a été motivé par l'étude réalisée par Rob Kavet, que nous détaillerons plus loin (0).

Pour un seuil de 10µA, je constate que l'OR est supérieur à 1, pour des champs magnétiques supérieurs à 0.3µT. Ce résultat n'est pas très significatif étant donné que la borne inférieure de l'intervalle de confiance est en-dessous de 1 et que le nombre de mesures dans cette catégorie est relativement faible. Il y a donc autant de chance que le phénomène soit significatif ou non. La même tendance se retrouve pour un seuil de 100µA (Figure 3-34).

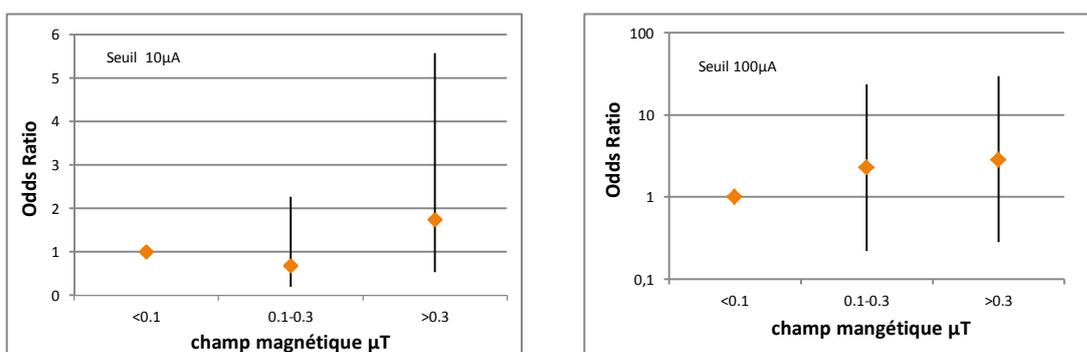


Figure 3-34: Odds ratio pour les seuils de 10µA et 100µA

Je reprends le même principe appliqué cette fois au risque relatif. Je constate qu'il est plus important. Il se situe dans le même ordre de grandeur que le risque relatif de développer la leucémie infantile. Là aussi, les bornes inférieures des intervalles de confiance sont inférieures à un. Il aurait été intéressant de réaliser de tels graphiques avec des seuils plus importants aux environs de 300 ou 500µA. Malheureusement, le nombre de données dans ces tranches est trop faible pour pouvoir les réaliser.

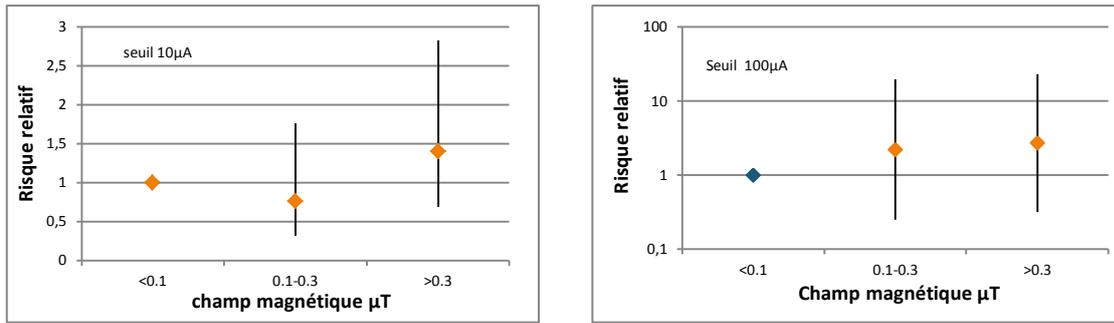


Figure 3-35: Risque relatif en fonction du champ magnétique

J'ai rencontré une difficulté pour tirer des conclusions en regard des résultats de la Figure 3-32. Or, je sais que les simulations réalisées dans le cadre du DEA de Raoul Lorphèvre donnent des résultats pour différentes valeurs du champ magnétique. Je vais donc ajouter ces résultats à cette figure.

Dès lors, je remarque que l'intensité des courants de contact simulés est, dans la plupart des cas, inférieure aux données mesurées dans les habitations (Figure 3-36).

De fait, ceux-ci augmentent avec le champ magnétique ambiant, seule source prise en compte dans ce calcul. Toutefois, leurs valeurs sont infimes dans toute la gamme mesurée (l'échelle verticale est logarithmique).

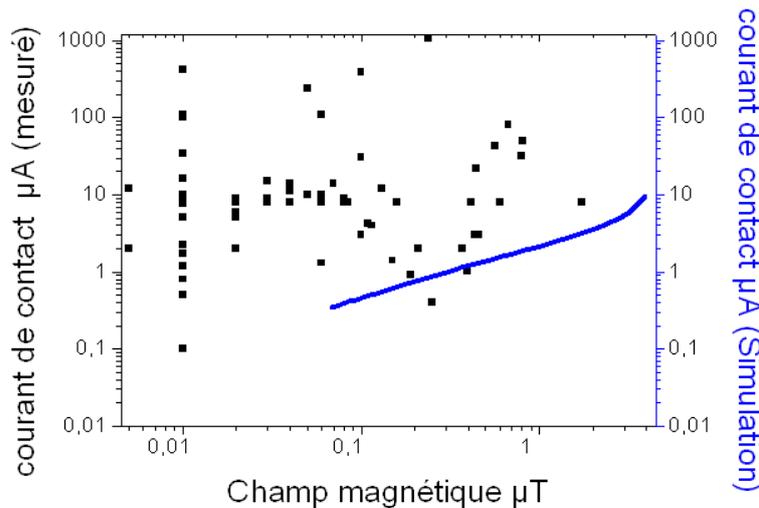


Figure 3-36: Courants de contact mesurés et courants de contact simulés, pour différentes valeurs du champ magnétique ambiant

La simulation des courants de contact et les statistiques sur nos mesures me laissent penser qu'il n'y a pas de lien significatif entre les courants de contact effectivement mesurés et le champ magnétique ambiant comme le stipule les deux points ci-dessous.

Les intervalles de confiance des risques relatifs et des risques approchés sont importants où les bornes inférieures sont en dessous de un.

Selon l'étude par simulation des courants de contact par l'équipe ACE, je constate que dans les cas critiques, les courants de contact simulés ne dépassent pas 10 μA. De plus, je constate que, dans toutes les tranches de champ magnétique, il apparaît des courants de contact dont l'intensité ne peut être justifiée par le champ magnétique.

3.3.4. COURANTS DE CONTACT ET LIENS EQUIPOTENTIELS

Toutes les habitations doivent avoir des liens équipotentiels. De tels liens sont utilisés pour relier toutes les parties et structures métalliques qui apparaissent dans nos maisons (par exemple : les tuyaux d'eau, les conduites de gaz, les tuyaux de chauffage, poutres métalliques etc...). Ils sont ensuite reliés à la terre afin d'éviter d'avoir des différences de potentiel entre les différentes structures (**Figure 3-37**).

Je sais que, si tous les liens équipotentiels de l'habitation sont bien réalisés, aucune différence de potentiel ne devrait apparaître entre les structures métalliques.

Je vais donc essayer de mettre en évidence une relation entre les courants de contact mesurés entre les évacuations d'eau et les liens équipotentiels.

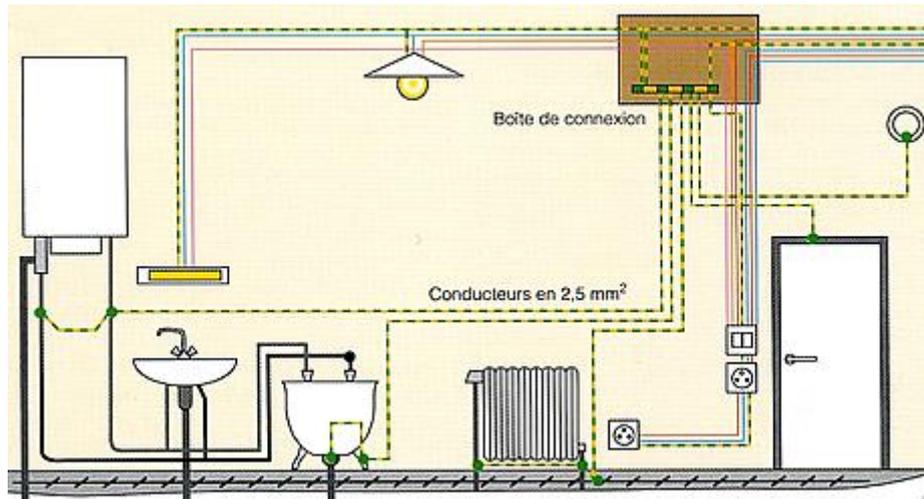


Figure 3-37: Liens équipotentiels dans l'habitation

3.4.1.1. RAPPEL DE LA LEGISLATION BELGE :

En Belgique, c'est le RGIE (règlement général des installations électriques) qui est la base de la réglementation dans nos installations. Il définit les systèmes de mise à la terre et les liens équipotentiels à réaliser dans les habitations à faible tension (plus précisément les articles 69-73, et l'article 86 pour les installations domestiques).

(A) ARTICLE 72 : LIEN EQUIPOTENTIEL PRINCIPAL ET LES CONNECTIONS BASSE TENSION.

Informations générales:

Lorsqu'une liaison équipotentielle principale est imposée, un ou plusieurs conducteurs principaux d'équipotentialité sont reliés à la borne principale de terre; y sont connectés :

- les canalisations principales d'eau et de gaz internes au bâtiment;
- les colonnes principales du chauffage central et de climatisation;
- les éléments métalliques fixes et accessibles qui font partie de la structure de la construction;
- les éléments métalliques principaux d'autres canalisations de toute nature

(B) L'ARTICLE 73. LES CONNEXIONS EQUIPOTENTIELLES SUPPLEMENTAIRES DANS LES HABITATIONS BASSE TENSION.

Informations générales:

Lorsqu'une liaison équipotentielle supplémentaire est localement imposée, elle relie :

- *toutes les parties métalliques simultanément accessibles, qu'il s'agisse des masses de machines et d'appareils électriques fixes ou d'éléments conducteurs étrangers;*
- *les conducteurs de protection de toutes les machines et appareils électriques; y compris ceux alimentés par des prises de courant.*

La liaison équipotentielle supplémentaire peut être assurée, soit par des éléments conducteurs tels que des charpentes métalliques, soit par des conducteurs, soit par une combinaison des deux.

3.4.1.2. RÉSULTAT DES COURANTS DE CONTACT ET LIENS ÉQUIPOTENTIELS

Je viens de faire un bref rappel sur la législation en rapport avec les liens équipotentiels, regardons maintenant s'il existe différents liens entre les courants de contact et les liens équipotentiels bien ou mal réalisés.

Sachant que la plupart des électroménagers rejettent sur la prise de terre un faible courant dit de fuite (cf. Chapitre 3.3.6), cela pose la conséquence d'une augmentation du potentiel de l'installation électrique. Ce potentiel équivaut donc à l'impédance de la mise à la terre multipliée par le courant de fuite. J'appellerai ce potentiel, le potentiel de terre (PT). Je vais maintenant présenter les résultats en relation avec les liens équipotentiels.

Durant la campagne, nous avons mesuré la résistance de terre. Celle-ci est un élément important de l'habitation car elle permet de protéger les personnes contre les risques d'électrisation qui pourraient se produire au sein d'une habitation. Le système de mise à la terre peut se faire de deux manières : par une boucle de terre ou à l'aide de piquets de terre. Dans le diagramme ci-dessous (Figure 3-38), sont présentées les valeurs des impédances de mise à la terre. Il faut savoir qu'en Belgique près de 40% des maisons et appartements ont une mise à la terre non-conforme²³.

²³Communication personnelle par SGS (Guy Lourtie). SGS Statutory Services Belgium ASBL/VZW Business Riverside Park, Boulevard International, 55/D, B-1070 Bruxelles - Belgium

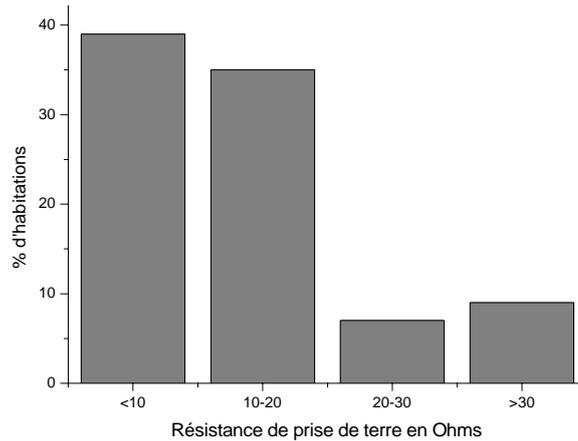


Figure 3-38: Valeurs des résistances de terre mesurées durant la campagne de mesures

Je rappelle que le RGIE stipule que nous devons avoir une résistance de terre inférieure à 30Ω . Or, dans notre campagne, je constate que près de 10% des maisons présentent des résistances de mise à la terre supérieures. Cependant, restons prudents, ce pourcentage dépend de l'échantillon choisi. En effet, d'après SGS (qui possède une banque de données nettement supérieure à la nôtre), ce pourcentage serait supérieur à celui constaté dans mon étude.

Afin de découvrir la valeur de la tension à l'origine des courants de contact, j'ai utilisé le théorème de Thévenin permettant de calculer la force électromotrice. La force électromotrice (EF) est donnée en Volt. Pour rappel, la force électromotrice de Thévenin permet de convertir un réseau complexe en un dipôle simple. Dans notre cas, je vais l'utiliser afin de découvrir la valeur de la tension à l'origine des courants de contact.

Je vais donc comparer la force électromotrice et le potentiel de terre (Figure 3-39).

Pour rappel : normalement, si tous les liens équipotentiels sont bien réalisés, toutes les structures métalliques doivent se trouver au même potentiel.

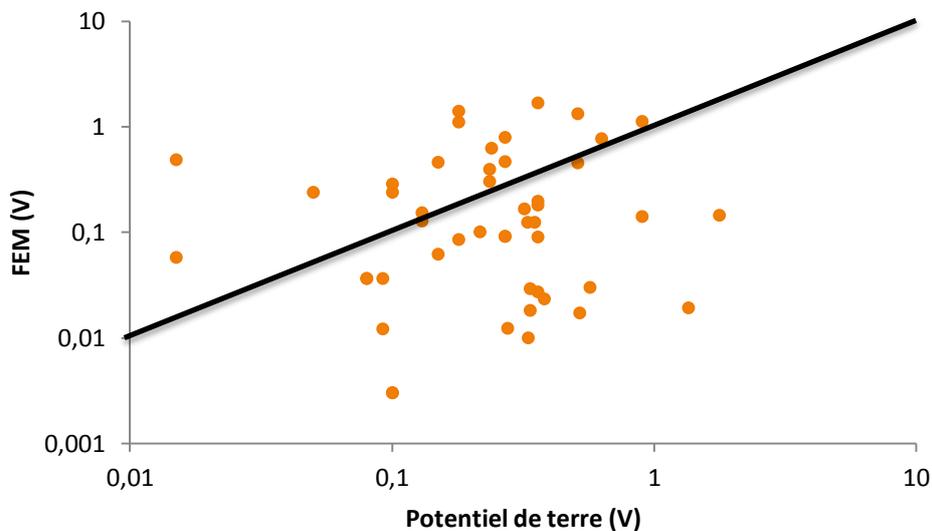


Figure 3-39: Comparaison entre le potentiel de terre et la force électromotrice déduite par calculs lors de la campagne de mesures.

Dans une situation standard, le rapport entre la force électromotrice et le potentiel de terre devrait être inférieur ou égal à un; malheureusement, je constate que beaucoup de points ne suivent pas une telle relation.

Une de nos idées fut alors de regarder, dans le cas où le rapport est supérieur à 1, si ce potentiel supplémentaire pouvait être dû au champ magnétique (Figure 3-40).

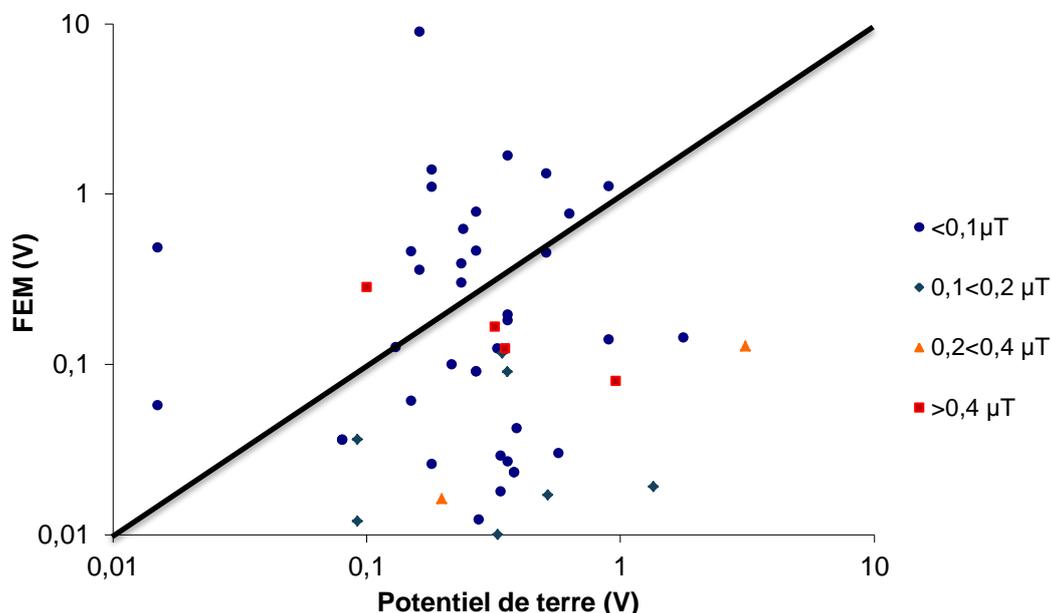


Figure 3-40: L'effet du champ magnétique sur les tensions observées résultats de la campagne

Je peux, ici, affirmer qu'aucun lien n'est visible entre le champ magnétique et l'augmentation de la force électromotrice. Ce qui signifie qu'il y a d'autres sources ou liens qui jouent un rôle dans l'apparition des courants de contact.

Pour cette raison, j'ai développé une nouvelle hypothèse qui est : « les courants de fuite (principalement capacitif) des câbles électriques ».

Généralement, les habitations contiennent plusieurs centaines de mètres de câbles électriques qui sont tous à une tension (entre phase et neutre) de 230V. Si le courant de fuite n'est que de quelques $\mu\text{A}/\text{m}$, la plupart des conduites métalliques qui se trouvent à proximité des câbles atteindraient facilement un potentiel plus élevé. Je vais donc poursuivre en calculant et mesurant ces courants de fuite pour étudier leur impact sur les installations électriques.

Auparavant, je vais décrire quelques-unes des différentes relations que j'ai tenté de mettre en avant, sans succès : en présentant ce qui aurait pu apparaître suite aux mesures prises dans l'habitation.

Les premiers résultats que je développe concernent les types de canalisations se retrouvant dans une habitation. Je tenterai d'observer si le fait qu'elles soient ou non conductrices engendre une différence dans les valeurs de courant de contact. Les canalisations sont généralement de quatre types, Plomb, Cuivre, Acier, PEX-AL-PEX²⁴ ou PVC. Pour chacune des catégories, j'ai calculé la moyenne des courants de contact, dans le but de

²⁴Les tubes multicouches PEX sont composés d'une couche d'aluminium entre deux couches de PE(X). La couche de métal sert de barrière anti oxygène, qui empêche la diffusion d'oxygène à travers la matrice polymère. Ainsi, aucune dissolution ne s'effectue dans l'eau à l'intérieur du tube, et les composants en métal ne subissent aucune corrosion. Le tube se courbe également mieux, car la mémoire de forme de PEX est compensée par l'Aluminium.

discerner si un type de canalisation bien particulier était capable ou à même de développer des courants de contact élevés.

Type	Plomb	cuivre	Pvc	PEX-AL-PEX
				
Courant de contact moyen mesuré dans les habitations (μA)	5.25 μA	7.35 μA	/	8.78 μA

Tableau 3-8 : Courant de contact en fonction du type de canalisation

La répartition est la suivante.

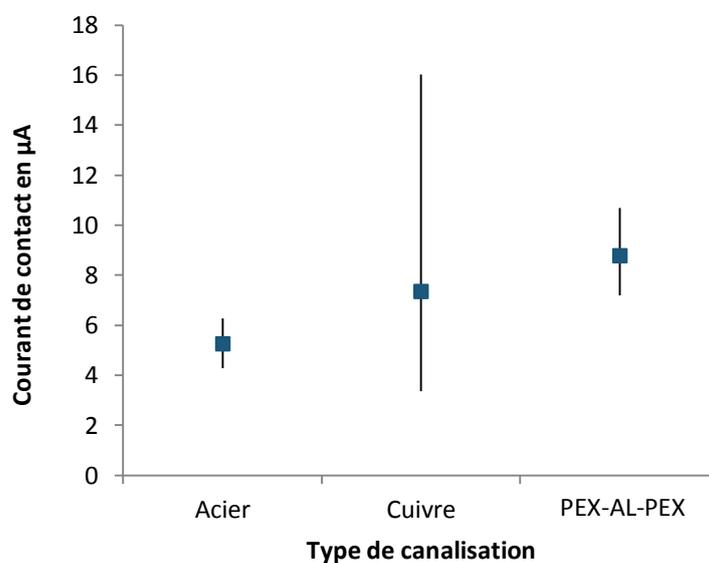


Figure 3-41: courants de contact en fonction des canalisations

Sachant que la moyenne géométrique de toutes les canalisations est de 8 μA , ce type de graphique ne met pas en évidence les courants de contact élevés. Ceux-ci étant peu nombreux, j'ai regardé le pourcentage d'habitations dans chaque catégorie où le courant de contact est supérieur à 30 μA .

Type (nbr de données)	Acier (49)	Cu (5)	PEX-al-PEX (51)
% d'habitation avec $i > 30\mu\text{A}$	8%	20 %	10 %

Tableau 3-9: Pourcentage d'habitations ayant des courants de contact supérieurs à 30 μA en fonction du type de canalisation

Au vu de ces résultats et du nombre restreint de canalisations en cuivre, il est difficile de tirer des conclusions. Ajoutons à ça que la plupart des canalisations mises en place possèdent une conductivité, excepté pour la plomberie en plastique.

On peut également se demander si l'âge de l'habitation est capable de jouer un rôle dans les niveaux de courants de contact. Pour creuser cette corrélation, j'ai réalisé un diagramme des courants de contact en fonction de l'âge de la maison.

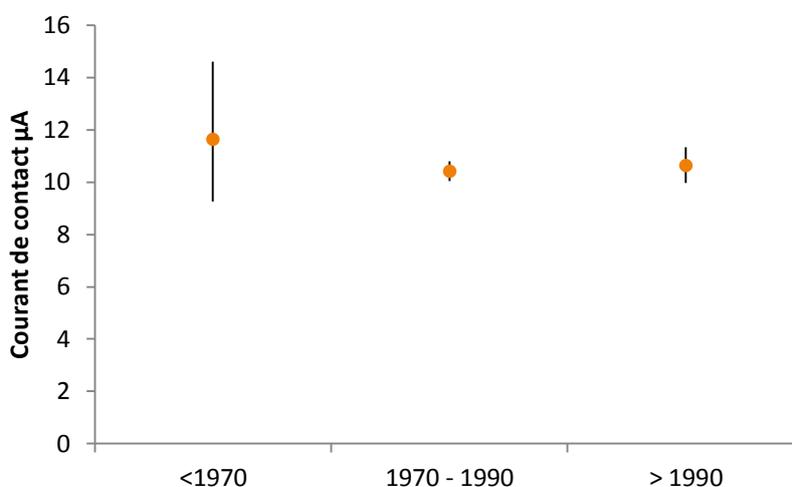


Figure 3-42 : Courant de contact en fonction de l'Age de l'installation électrique

Nous retrouvons dans le graphique ci-dessus, la moyenne géométrique ainsi que son écart type. On peut constater que les habitations plus anciennes ont un courant de contact légèrement plus important.

Ici aussi, ce graphique ne permet pas la mise en évidence des courants de contact élevés. Comme précédemment, j'ai donc pris le pourcentage d'habitations dans chaque catégorie où le courant de contact est supérieur à 30 μA .

Type (n°br de données)	<1970 (8)	1970-1990	>1990
% d'habitations avec $i > 30\mu\text{A}$	50%	8%	19%

Tableau 3-10: Pourcentage d'habitations ayant des courants de contact supérieurs à 30 μA en fonction de l'année de l'installation électrique

Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec précaution car le nombre d'habitations dans la catégorie <1970 ne sont que de 8.

Ces résultats m'inciteraient à dire que les vieilles installations sont potentiellement plus aptes à donner des courants de contact élevés.

Avant de terminer ce paragraphe, vérifions si le système de mise à la terre par piquet ou boucle de fond de fouille à un impact sur les niveaux de tension de contact.

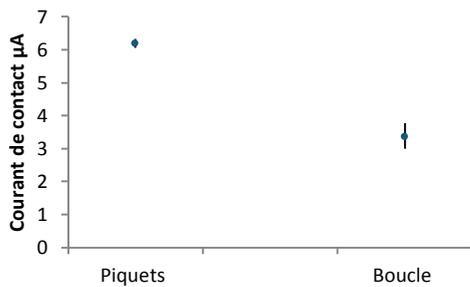


Figure 3-43 : Courants de contact en fonction du système de mise à la terre

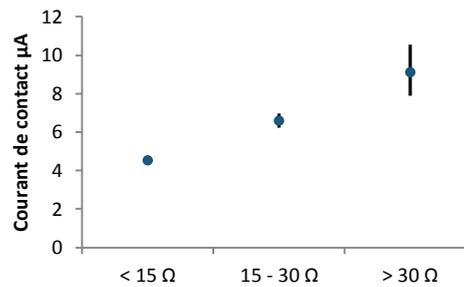


Figure 3-44 : Courants de contact en fonction de la résistance de terre

Je constate que le système de mise à la terre par une boucle de fond de fouille donne un courant de contact moins important. La moyenne géométrique obtenue dans ces deux cas est faible, en comparaison des valeurs observables dans certains cas. Si l'on regarde les valeurs moyennes de la résistance de terre, la mise à la terre par piquet (GM : 18Ω) démontre une résistance de terre beaucoup plus importante que par boucle de fond de fouille (GM : 7.7Ω) (Figure 3-43). De plus, j'observe (Figure 3-44) que les courants de contact ont tendance à augmenter lorsque l'impédance de mise à la terre augmente.

Encore une fois, afin d'avoir des pourcentages plus frappants, j'ai gardé ceux des habitations dont le courant de contact est supérieur à $30\mu A$.

Type (n°br de données)	Piquets (50)	Boucle (7)
% d'habitations avec $i > 30\mu A$	2%	0%

Tableau 3-11: Pourcentage d'habitation ayant des courants de contact supérieurs à $30\mu A$ en fonction du système de mise à la terre

Je distingue que le système de mise à la terre, d'un point de vue statistique, n'a pas d'impact car ici, je parle d'une maison sur cinquante. Je ne peux donc pas utiliser les résultats de la campagne de mesures pour confirmer ceux obtenus par simulation. Pour rappel, ces derniers montraient un accroissement des courants de contact pour les habitations possédant des boucles de fond de fouille.

Regardons maintenant les résultats liés à la résistance de mise à la terre. J'ai observé une légère tendance dans le graphique précédent (Figure 3-44) à savoir une augmentation des courants de contact lorsque l'impédance augmente. Cette dernière semble se confirmer avec 1/5 des maisons possédant des mises à la terre supérieures à 15Ω et ayant des courants de contact supérieurs à $30\mu A$. Là aussi, les résultats sont à prendre avec circonspection car le nombre d'habitations est relativement faible dans cette catégorie. Plus ou moins 30% des foyers visités possèdent des mesures fiables de résistance de mise à la terre.

Type (n°br de données)	<15Ω (22)	15 – 30 Ω (14)	>30Ω (11)
% d'habitations avec $i > 30\mu A$	0%	0%	18%

Tableau 3-12: Pourcentage d'habitation ayant des courants de contact supérieurs à $30\mu A$ en fonction de la résistance de terre

3.3.5. COURANTS DE CONTACT ET LES EFFETS CAPACITIFS

La dernière hypothèse, émise pour justifier les courants de contact, consiste à dire que ceux-ci seraient dus à l'effet capacitif des câbles électriques soumis à la tension du réseau (220V).

La suite de ce paragraphe va être subdivisée en 3 catégories : premièrement, une étude théorique pour évaluer le courant capacitif par calculs. Ensuite, je présenterai mes études expérimentales et, enfin, des simulations numériques.

Les calculs, les tests et les simulations sont réalisés avec deux types de câble généralement rencontrés dans la construction, câbles XVB et VOB. Les expériences ont été réalisées avec des câbles ayant une section conductrice de 2.5mm² (qui est le standard dans la construction).

L'appellation des câbles en Belgique est définie par le CEBEC (comité électrotechnique belge). Chaque lettre possède sa propre signification. La dernière lettre du code signifie que ces conducteurs sont sous l'appellation belge. Voici un tableau reprenant les différents acronymes.

Lettres	Significations	Exemples
X	Polyéthylène	XVB
V	Vinyle	VOB
O	Isolant ordinaire	VOBS
T	Transportable	VTMB
....

Tableau 3-13: Appellation des câbles définie par le CEBEC

Ainsi, les câbles XVB (Figure 3-45) possèdent une gaine isolante et protectrice en polyéthylène et un isolant pour les câbles en vinyle. Les fils VOB (Figure 3-45) sont des conducteurs simplement isolés. Dans les habitations, ils sont insérés dans une gaine en PVC de manière à faciliter le montage/démontage. Dans les vieilles installations, la gaine pouvait être métallique.



Figure 3-45: a) câble « XVB »



b) câble « Prefex VOB »

3.3.5.1. CALCUL THEORIQUE DES COURANTS DE FUITE DU CABLE.

L'isolant d'un câble électrique peut être représenté de la manière suivante, à savoir une capacité en parallèle avec une résistance d'isolement. En connaissant les épaisseurs et le type de matériaux, il m'est alors possible de calculer ces éléments. Ainsi, je peux connaître l'impédance totale de l'isolant. En pratique, on peut négliger l'influence de la résistance d'isolement pour un câble sain car sa valeur est énorme. Pour donner une première approximation, je me suis basé sur la théorie des câbles coaxiaux. Cette dernière se rapproche de la réalité lorsque la maison est réalisée en maçonnerie. En effet, il est admis dans la littérature que la maçonnerie pour les problèmes d'électrostatique est un bon conducteur [51].

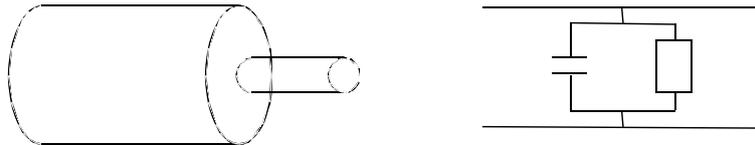


Figure 3-46: Représentation schématisée d'un câble électrique

Les formules permettant de calculer les courants de fuite sont les suivantes :

Calcul de la capacitance d'un câble électrique

$$C = \frac{\epsilon 2\pi h}{\ln\left(\frac{R_x}{R_1}\right)}$$

Où :

ϵ , est la permittivité

R_x , représente le rayon extérieur

R_1 , représente le rayon intérieur

h , la longueur du câble considérée égale à 1m

On peut généralement négliger la résistance transversale car elle est infime.

Ainsi, pour réaliser nos expérimentations, j'ai utilisé deux sortes de câble couramment employées dans la construction des habitations. D'une part, les câbles VOB, et d'autre part, les câbles de type XVB.

(A) POUR UN CÂBLE VOB :

Câble VOB :

Permittivité relative = **3.5**

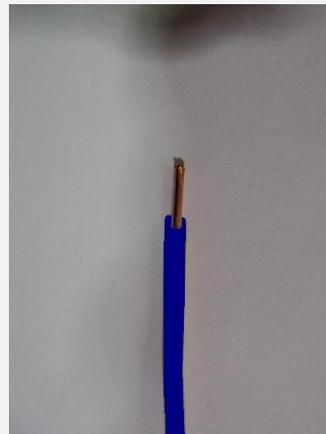
$R_x = 1000 \text{ mm}$ (rayon très grand)

$R_1 = 0.9 \text{ mm}$

La capacité calculée vaut +/- $3 \cdot 10^{-11} \text{ F}$

J'obtiens $Z_{\text{equivalent}}$ de **100M Ω**

Soit en appliquant la loi d'Ohm pour une tension de 220V à 50 Hz, nous obtenons un courant de l'ordre de : **2 $\mu\text{A/m}$**



Cette évaluation doit être validée par un test car de nombreuses incertitudes persistent sur le chemin de passage du courant de fuite. Celui-ci sera effectué un peu plus loin dans ce chapitre. Dans cette partie, ces résultats sont donnés pour un seul des trois câbles et son isolant, tout en faisant abstraction de l'air et de la gaine PVC.

(B) POUR UN CÂBLE XVB ON OBTIENT:

Câble XVB :

Résistivité isolant : $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$

Permittivité relative = 3.5

$R_x = 3,6 \text{ mm}$

$R_1 = 1,6 \text{ mm}$

$R_2 = 0,9 \text{ mm}$

J'obtiens $R_{\text{equivalent}}$ de 30 M $k\Omega$

Soit en appliquant la loi d'Ohm : 7 $\mu\text{A/m}$



3.3.5.2. MESURES EXPERIMENTALES DES COURANTS DE FUITE DU CÂBLE.

Le câble est préalablement enroulé d'aluminium pour que la gaine soit conductrice, évitant ainsi la perte de courant. La gaine d'aluminium est reliée à la terre par l'intermédiaire de la résistance R_1 . Le câble est mis sous tension à une différence de potentiel de 220 V. Le courant de fuite est déduit en mesurant la tension V_1 aux bornes de R_1 . Pour celle-ci, j'ai choisi différentes impédances afin d'estimer au mieux le courant s'échappant du câble. Pour vérifier que l'origine du courant est due au câble, j'ai réalisé des mesures sur sa demi-longueur

et comparé les résultats afin de m'assurer de bien obtenir un courant deux fois moins important. Je vais ensuite donner une valeur de courant de fuite par unité de longueur.

Celui-ci est déduit par calculs aux bornes de la résistance (R1 Figure 3-47). Etant capacitif, il doit être déphasé de 90° par rapport à la tension d'alimentation 220V.



Figure 3-47: Représentation du dispositif expérimental pour la mesure des courants de fuite

(A) POUR LE CÂBLE XVB ON OBTIENT :

Câble XVB (2.5mm) :

Longueur du câble : 5m

Tension d'alimentation : 220V

Courant de fuite :

10kΩ : V1 = 0,28 V Ifuite = 28 μA

47kΩ : V1 = 1,42 V Ifuite = 30,2 μA

100kΩ : V1 = 2,66 V Ifuite = 26,6 μA

Déphasage : 54 °

Longueur du câble : L/2 : 2,5m

Tension d'alimentation : V2 = 220V

Courant de fuite :

10kΩ : V1 = 0,16 V Ifuite = 16 μA

47kΩ : V1 = 0,64 V Ifuite = 13,6 μA

100kΩ : V1 = 1,42 V Ifuite = 14,2 μA

Déphasage : 50 °

Courant de fuite moyen par mètre de +/- 5 $\mu\text{A} / \text{m}$

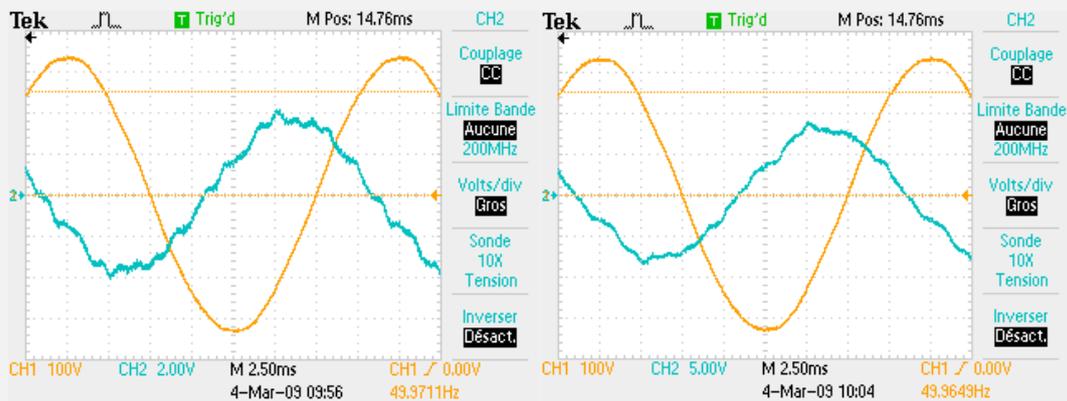


Figure 3-48: Exemple de déphasage lors d'expérimentations (orange = tension du réseau – Bleu = tension V1)

(B) POUR UN CÂBLE VOB SANS GAINÉ DE PROTECTION :

Le même test est réalisé pour un câble VOB.

Câble VOB

Longueur du câble : 3 m

Tension d'alimentation : $V_2 = 220\text{V}$

Courant de fuite :

10k Ω : $V_1 = 0,4 \text{ V}$ $I_{\text{fuite}} = 40 \mu\text{A}$

47k Ω : $V_1 = 1,84 \text{ V}$ $I_{\text{fuite}} = 39 \mu\text{A}$

100k Ω : $V_1 = 3,4 \text{ V}$ $I_{\text{fuite}} = 34 \mu\text{A}$

Déphasage : 90°

Soit un courant de fuite moyen de +/- 10 $\mu\text{A}/\text{m}$

Ces expérimentations m'ont permis de déterminer expérimentalement les courants de fuite maximums par mètre sur deux types de câbles couramment utilisés dans la construction. Un courant de l'ordre de 5 μA pour les câbles XVB et de l'ordre de 10 μA pour les câbles VOB sans protection. Le déphasage est de 90° dans le cas des câbles VOB, l'air étant fortement résistif, aucune contribution résistive n'est prise en compte. Dans le cas XVB par contre, le déphasage est de 50°, ce dernier peut être justifié par une composante résistive due à l'isolant mécanique.

3.3.5.3. SIMULATIONS NUMERIQUES DES COURANTS DE FUITE DU CABLES.

Pour simuler le courant de fuite, j'ai utilisé la méthode des éléments finis. La géométrie ainsi que les conditions aux limites ont été adaptées de manière à **coïncider avec les mesures expérimentales**. Voici le maillage que j'ai

utilisé, celui-ci a été réalisé à l'aide du logiciel GMsh (code du département Montéfiore, unité ACE). Comme cité plus haut, nous avons tenté de coller à l'expérimentation et non à la réalité du terrain qui est très fluctuante d'une habitation à l'autre. Nous allons résoudre un problème d'électrocinétique. Les conditions aux limites sont de type Dirichlet.

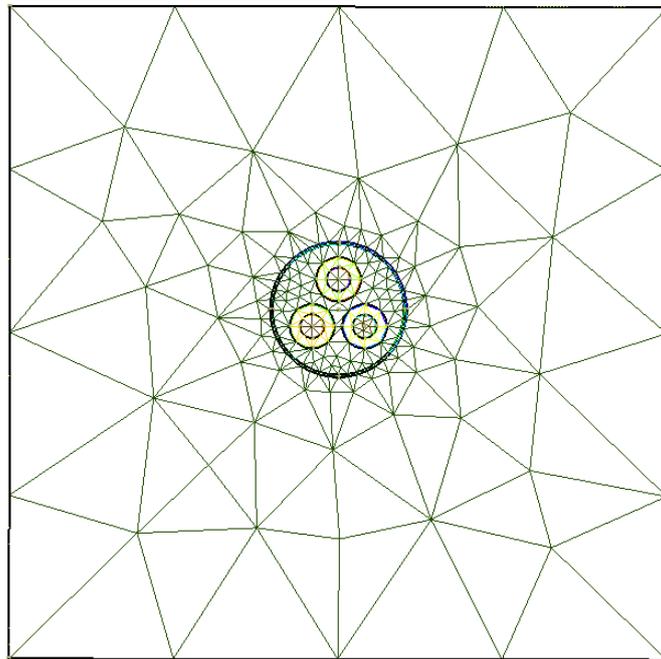


Figure 3-49: Maillage pour un câble XVB

(A) SIMULATION DES CÂBLES XVB:

Pour la simulation du câble XVB, la phase est mise à un potentiel de 220V, le neutre ainsi que le fil de terre sont fixés à 0V. La feuille d'aluminium étant reliée à la terre, son potentiel est également nul. On suppose également que le potentiel est nul à l'infini. Le calcul est effectué en 2D. Les valeurs obtenues sont dès lors valables par unité de longueur, soit par mètre. Je négligerai les aspects résistifs, ceux-ci sont très faibles comparés aux effets capacitifs. La dimension des différentes couches et leurs caractéristiques électriques sont les suivantes:

Caractéristiques du câble

- Résistivité de l'isolant : $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$
- Permittivité relative de l'isolant = 3.5
- R_2 (rayon de l'âme) = 0,9 mm
- R_1 (rayon de l'isolant + conducteur électrique) = 1,6 mm
- R_x (rayon extérieur du câble) = 3,6 mm

Caractéristiques de l'air

- Permittivité relative: 1
- Résistivité: >>>

Simulation électro-statique:

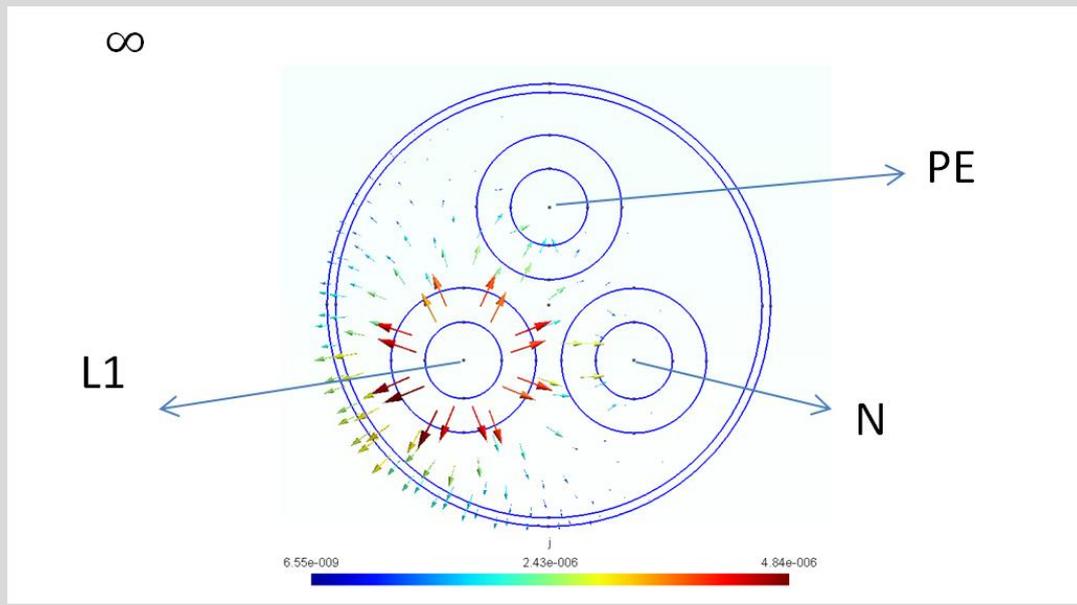


Figure 3-50: Répartition du courant de déplacement (C)

Les résultats de cette simulation donnent un courant capacitif de $\pm 7 \mu\text{A/m}$ s'échappant du XVB (et un courant résistif égal à 10^9 complètement insignifiant).

Grâce à cette simulation, je connais également la distribution du courant dans les différents câbles.

Phase vers la gaine extérieure(Aluminium)	Phase vers le câble de terre	Phase vers le neutre
$\pm 7 \mu\text{A}$	$\pm 2 \mu\text{A}$	$\pm 2 \mu\text{A}$

Tableau 3-14: Répartition des courants

(B) LES CÂBLES VOB SANS GAINE DE PROTECTION:

Les câbles VOB (2.5mm^2) ressemblent à des câbles monophasés, pour cette expérimentation, les trois câbles sont enroulés dans de l'aluminium. L'un des trois fils, la phase, est portée à un potentiel de 220V, les deux autres, le neutre et la terre sont fixés à 0V. Les caractéristiques du câble sont les suivantes :

Caractéristiques du câble

- Résistivité de l'isolant (première et deuxième couche): $10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$
- Permittivité relative (première et seconde couche)= 3.5
- $R1$ (rayon de l'âme)= 0,9 mm
- Rx (rayon du câble)= 1,6 mm

Caractéristiques de l'air

- Permittivité relative: 1
- Résistivité: >>

Tableau 3-15: Caractéristiques utilisés pour la simulation

Grâce à la simulation, je peux, comme précédemment, connaître la valeur du courant capacitif et du courant résistif, soit $10 \mu\text{A}/\text{m}$ pour le courant capacitif et $10^{-9} \mu\text{A}/\text{m}$ pour le courant résistif. La répartition des courants vers les différents câbles est donnée ci-dessous.

Phase vers la gaine extérieure	Phase vers le câble de terre	Phase vers le neutre
10 μA	2 μA	2 μA

Tableau 3-16: Répartition des courants

(C) CÂBLE VOB AVEC GAINE DE PROTECTION:

En tenant compte des réglementations, le câble VOB seul ne peut être utilisé comme tel dans les installations électriques. En effet, celui-ci doit impérativement être enfermé dans une gaine de protection.



Figure 3-51: Câbles VOB avec une gaine de protection

Dans les vieilles installations, on risque de les trouver en acier alors que dans les nouvelles maisons, ceux-ci seront en plastique (1cm de diamètre et une épaisseur de +ou- 2mm).

Pour cette simulation, j'ai toujours trois câbles électriques, un des trois est mis à la tension du réseau domestique (220V) et les deux autres se trouvent au potentiel de 0V. Les caractéristiques des câbles pour cette simulation sont:

Caractéristiques du câble
<ul style="list-style-type: none"> • Résistivité de l'isolant: $10^{20} \Omega \cdot \text{Cm}$ • Permittivité relative de l'isolant = 3.5 • R_2 (rayon de l'âme) = 0,9 mm • R_1 (rayon de l'isolant) = 1,6 mm • R_x (rayon extérieur du câble) = 3,6 mm
Caractéristiques de l'air
<ul style="list-style-type: none"> • Permittivité relative: 1 • Résistivité: >>>

Tableau 3-17: Caractéristiques utilisées pour la simulation

Le courant capacitif dans une telle configuration peut changer avec la position des câbles dans le tuyau de protection.

La distribution des courants est donnée pour une configuration aléatoire (Figure 3-52).

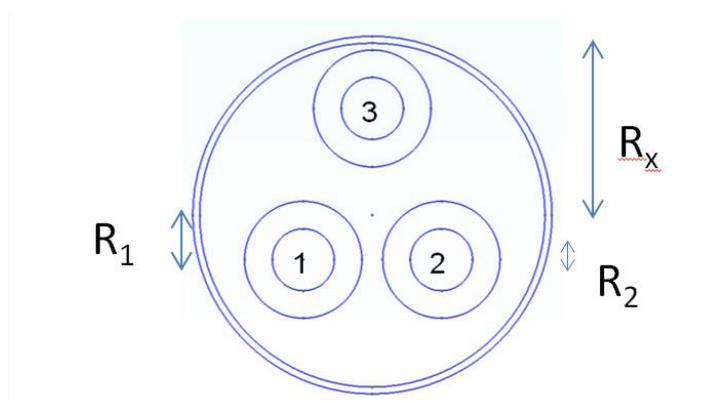


Figure 3-52 : Exemple de configuration pour trois câbles VOB enfermés dans une gaine de protection

Phase vers l'extérieur(Aluminium)	Phase vers la terre	Phase vers le neutre
1 mis 220 V		
3 μA	1 μA	< 1 μA
2 mis 220V		
3 μA	1 μA	<1 μA
3 mis 220V		
5 μA	<1 μA	< 1 μA

Tableau 3-18: Répartition des courants

3.3.5.4. COMPARAISON DES RESULTATS

Les câbles VOB ne sont jamais utilisés seul dans une installation, les résultats sont très proches pour la simulation (+/- 10 $\mu\text{A}/\text{m}$) et les mesures expérimentales (13 $\mu\text{A}/\text{m}$).

Je remarque que les résultats pour les câbles XVB sont similaires dans les deux approches :

Je constate que les résultats obtenus avec la gaine sont les plus faibles, ceci se justifie par la distance variable pour chaque conducteur vis-à-vis de la gaine, remplie d'air (qui est un excellent isolant). Le fait d'utiliser de telles gaines serait, si mon hypothèse s'avère exacte, l'un des moyens pour diminuer le risque de courant de contact dans l'habitation.

3.3.5.5. VERIFICATION DE NOS HYPOTHESES SUR LE TERRAIN

Les courants de fuite des câbles électriques sont une explication possible pour justifier les courants de contact dans les habitations. De fait, ces courants ont le même ordre de grandeur que les courants de contact mesurés dans les habitations. Les maisons étant parcourues par plusieurs centaines de mètres de ce type de câble, cette piste ne peut pas être ignorée.

J'ai décidé, lors de mesures chez les particuliers, d'utiliser un oscilloscope double trace de manière à voir le déphasage entre la tension de l'habitation et la tension de contact. Ci-dessous, une figure tirée de nos nombreuses mesures sur site (Figure 3-53) où on constate bien qu'il y a un déphasage de 90°, ce qui appuie notre hypothèse de départ.

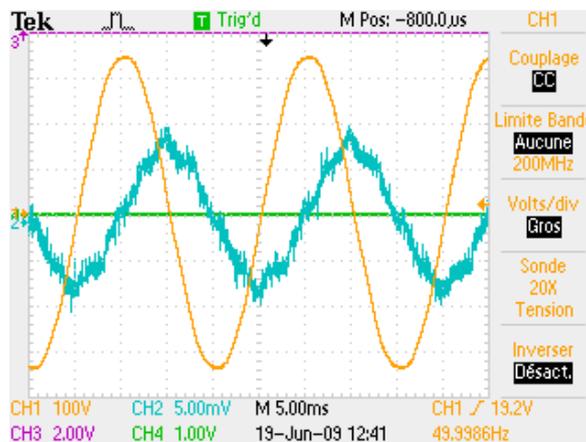


Figure 3-53: mesure du déphasage sur site (courbe orange = tension du réseau – Courbe bleue = tension de contact)

Tension de l'habitation (V crête)	Tension de contact cc (V crête)	Déphasage entre tension et tension de contact (°)
330	0,010	+/- 90°
330	0,20	+/- 90°
300	0,10	+/- 89°

Tableau 3-19: Exemple de données récoltées sur site

De manière à justifier mes hypothèses, je réalise une dernière campagne sur un faible échantillon. Pour valoriser ces effets capacitifs, je cherche un circuit électrique de l'habitation susceptible de créer un courant de

contact. De manière à isoler ce circuit, nous coupons un par un les disjoncteurs jusqu'à trouver celui qui génère le plus grand courant de contact. Ensuite, je branche un stabilisateur de tension afin d'observer comment varie le courant de contact pour différentes valeurs.

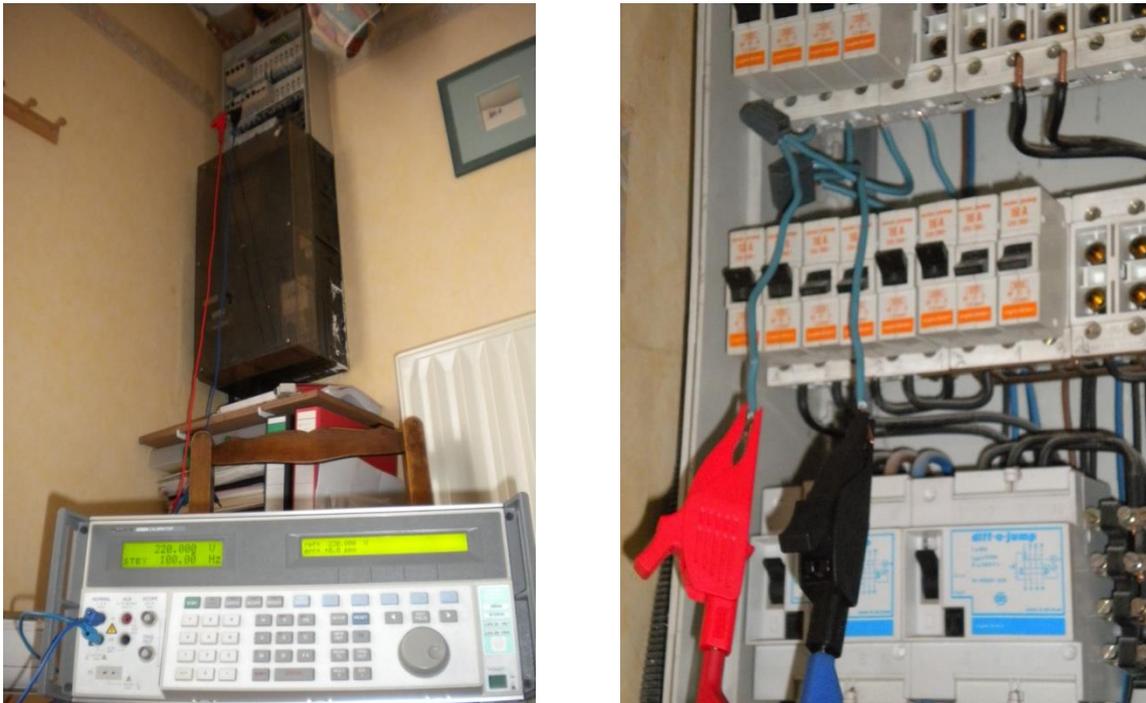


Figure 3-54 : mesures sur site

Dans un premier temps, je vois que le courant de contact mesuré dans les pièces d'eau, entre l'arrivée et l'évacuation d'eau, varie de façon linéaire avec la tension appliquée au câble. Afin de vérifier cet effet, différentes tensions ont été choisies, 100, 200 et 300 V à 50Hz. Les résultats concernant les courants de contact ont été ramenés à l'unité de manière à pouvoir les comparer aisément. Lors de l'expérimentation, les courants ont varié de quelques μA à plusieurs dizaines de μA .

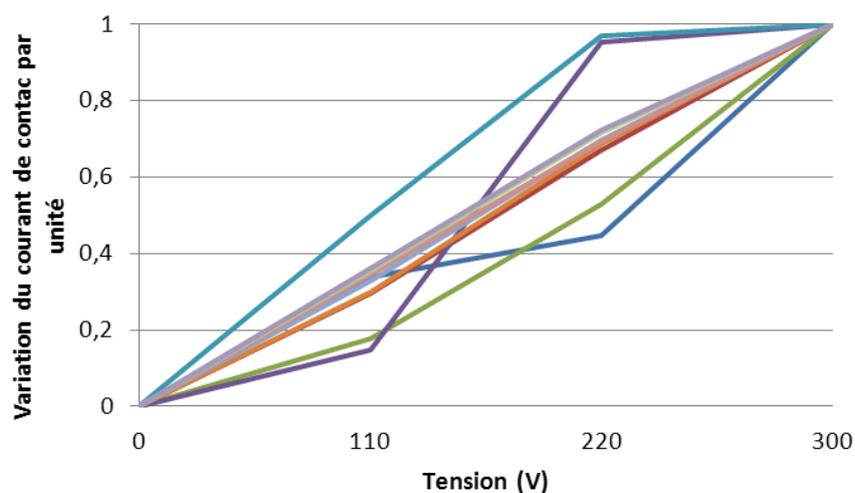


Figure 3-55: Variation du courant de contact avec la tension

J'observe que les courants de contacts (d'origine capacitive) augmentent linéairement avec la tension appliquée (Figure 3-55).

Dans notre hypothèse, les courants de contact sont capacitifs, l'impédance capacitive étant définie comme :

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}$$

Ce qui signifie que, en augmentant la fréquence, je vais diminuer l'impédance capacitive. La tension étant toujours de 220V, je vais donc avoir une augmentation du courant de contact. La figure ci-dessous reprend les différents résultats pour différentes fréquences.

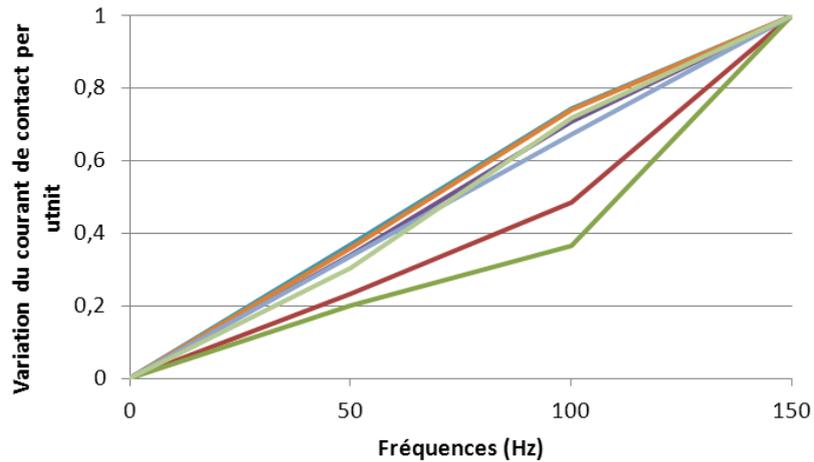


Figure 3-56: Variation du courant de contact avec la fréquence

J'OBSERVE ICI QUE LE COURANT DE CONTACT VARIE DE FAÇON LINÉAIRE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE, CE QUI EST EN ACCORD AVEC MON HYPOTHÈSE. CES DERNIÈRES MESURES SONT D'UNE IMPORTANCE CAPITALE AU VU DE LA RELATION ET CE, MALGRÉ LE FAIBLE ÉCHANTILLON, DANS DIFFÉRENTES HABITATIONS.

3.3.6. SIMULATION NUMÉRIQUE DES CABLES AVEC UNE EVACUATION

Supposons pour cette partie, un câble électrique avec une canalisation en PVC encastrée dans un mur pour différentes distances allant de quelques cm à 1m. Les conditions sont semblables aux simulations précédentes, à savoir, on va résoudre un problème d'électrostatique.

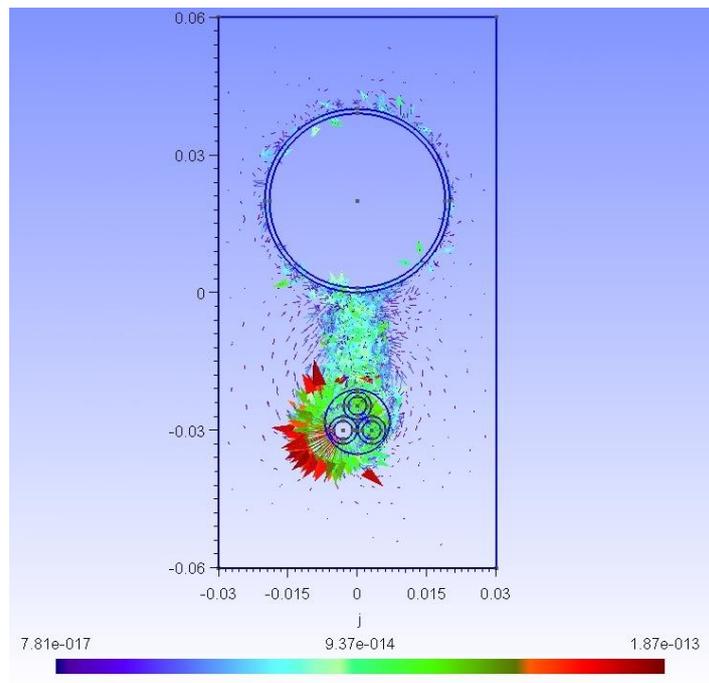
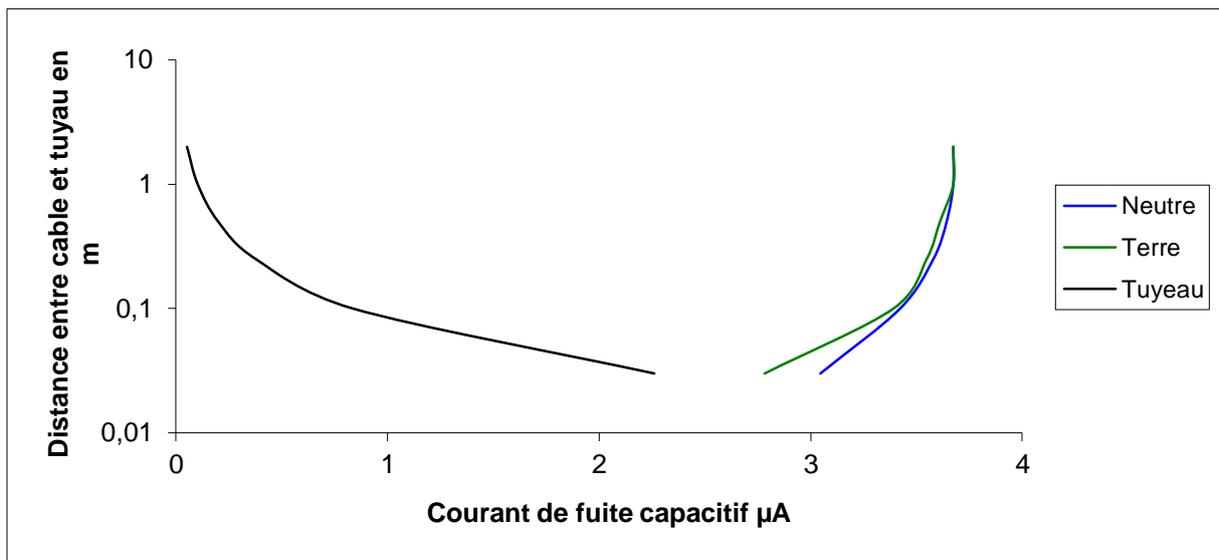


Figure 3-57: Simulation réalisée représentant un câble immergé dans un mur avec une conduite d'évacuation d'eau.

Nous constatons les résultats suivants :



Le courant capacitif s'échappant du câble électrique vers la conduite d'eau varie en fonction de la distance de 2 à quelques dizaines de microampères. Ce qui signifie bien qu'à courte distance, la maçonnerie, dans le cas d'un problème électrostatique, peut être considérée comme conductrice.

3.3.7. MESURE DES COURANTS DANS UNE MAISON PASSIVE UTILISANT DES CÂBLES À BASE DE FERRITE.

J'ai également réalisé des mesures dans une habitation utilisant des câbles à base de ferrite, matériaux servant à diminuer la pollution électromagnétique. Ces câbles sont réalisés par la câblerie d'Eupen et sont capables de réduire considérablement l'influence du champ magnétique généré par les installations électriques à 50 et 60 Hz.

3.3.7.1. COMMENT ÇA FONCTIONNE?

Le neutre, la phase et la terre sont encerclés d'une gaine conductrice qui est un film d'aluminium/polyester enroulé en hélice autour du câble. Il assure un blindage efficace pour le champ électrique. Ce blindage est mis à la terre par un drain conducteur. C'est donc bien la faradisation qui va annuler l'effet capacitif que nous avons observé. La ferrite (EMC/COM) est un matériau magnétique, ce qui a pour effet de diminuer le champ à l'intérieur du câble.

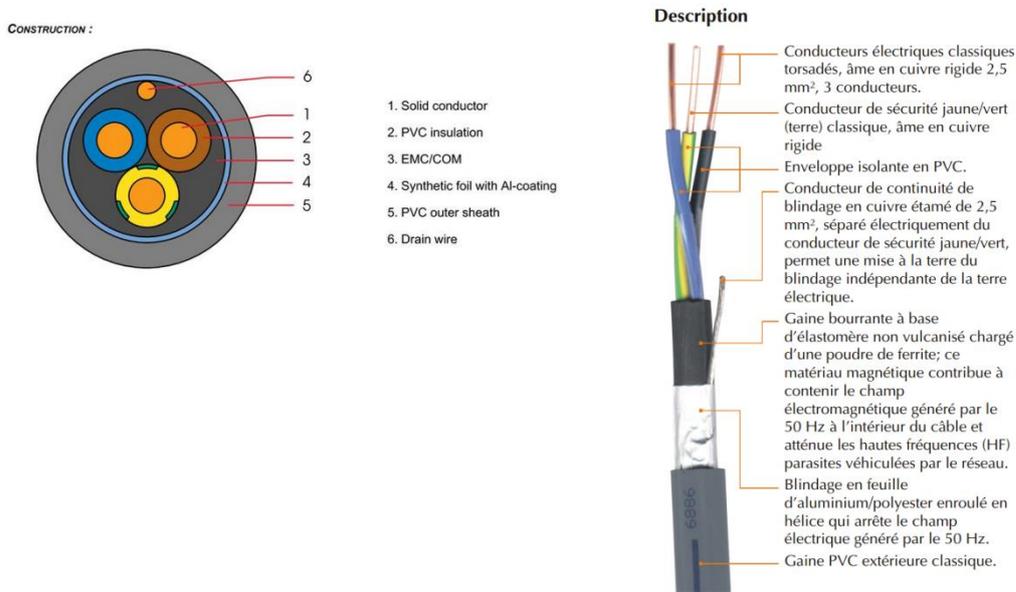


Figure 3-58: Câble utilisé pour diminuer la pollution électromagnétique

Nous avons été incapables de mesurer des courants de contact dans cette maison. Nous supposons donc que le fil de drainage, à lui seul, est capable d'annuler le courant de fuite du fil électrique.

Dans cette habitation, nous nous sommes particulièrement focalisés sur les courants s'échappant vers la prise de terre de l'ordre de 2 à 10mA. Nous avons donc pu observer l'importance de ces courants de fuite (pas de courant de contact) vers la terre. En effet, nous avons découvert que ce courant est dû à la présence de filtre RFI dans les électroménagers, ce dernier est utilisé dans le but d'éviter les surtensions et les interférences causées par les hautes fréquences. Ils sont obtenus en utilisant un ensemble de composants passifs arrangés de manière à autoriser le passage du courant 50Hz à travers le filtre et à atténuer les fréquences RF (Radio frequency). Un des composants est une capacité qui est placée entre la phase et la terre. Cette dernière permet donc le passage d'un courant vers le circuit de terre.

Néanmoins, malgré la présence de tels filtres, nous n'avons pas observé de courant de contact dans cette maison. Cette dernière était entièrement équipée de câbles à base de ferrite ayant une fonction drainante. Si l'on se place dans l'hypothèse que l'on vient de développer, à savoir que l'effet capacitif est responsable des courants de contact, il est naturel que nous ne parvenions pas à mesurer ces derniers. La fonction drainante de ces câbles supprime complètement le pouvoir capacitif de ceux-ci. La nullité des courants de contact avec de tels câbles est une preuve supplémentaire pour corroborer la thèse des courants capacitifs.

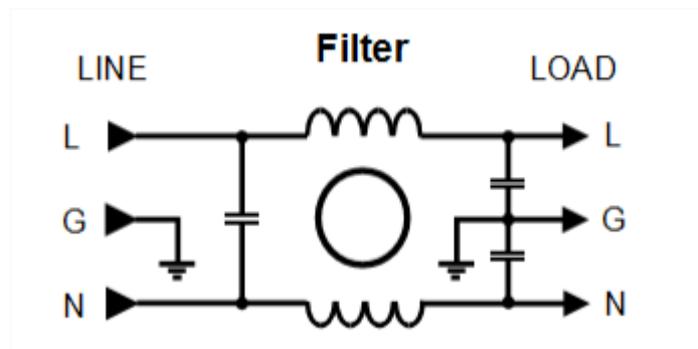


Figure 3-59 : filtre RFI

L'influence du filtre RFI se fait ressentir au niveau du potentiel de la prise de terre. Lorsque les électroménagers sont branchés, ils vont rejeter sur celle-ci quelques milliampères avec un déphasage de 90° étant donné que celui-ci passe à travers une capacité.

Remarque : Lors de l'étude des liens équipotentiels, aucune corrélation n'a été mise en avant entre le potentiel de terre et la force électromotrice de l'installation. Néanmoins, ce courant qui s'échappe des électroménagers est relativement important, de 1 à 2mA par appareil. Nous montrerons l'impact de ce dernier lors des simulations.

3.3.8. COURANT DE CONTACT ET PERSONNES ELECTRO-SENSIBLES

Il y a également des personnes dites électro-sensibles qui participent à nos enquêtes. Celles-ci représentent plus ou moins 15% de nos mesures. Avant de présenter les résultats, rappelons ce qu'est l'électro-sensibilité.

L'électro-sensibilité recouvre des symptômes qui sont attribués, par la personne qui en souffre, à la proximité ou à l'usage d'équipements électriques et qui résultent en des degrés variables d'inconfort ou de mauvaise santé perçue.

Dans certains cas, les personnes sont tellement affectées qu'elles s'isolent et sont amenées à cesser le travail et changer leur style de vie, alors que d'autres rapportent des symptômes moins sévères qui entraînent un évitement de certaines sources de champs électromagnétiques.

On parle également :

- d'hypersensibilité à l'électricité,
- d'hypersensibilité électromagnétique ou
- d'intolérance idiopathique environnementale avec attribution aux champs électromagnétiques

(BBEMG, site web)

Dans notre cas, je m'intéresserai plus à l'hypersensibilité à l'électricité. En effet, le corps est parcouru par un courant lorsque l'on est soumis à une tension de contact. Le but est de voir si ces personnes possèdent chez elles, des courants de contact plus élevés que chez les autres, ce qui pourrait justifier en partie leur intolérance.

Les valeurs des courants de contact sont présentées ci-dessous.

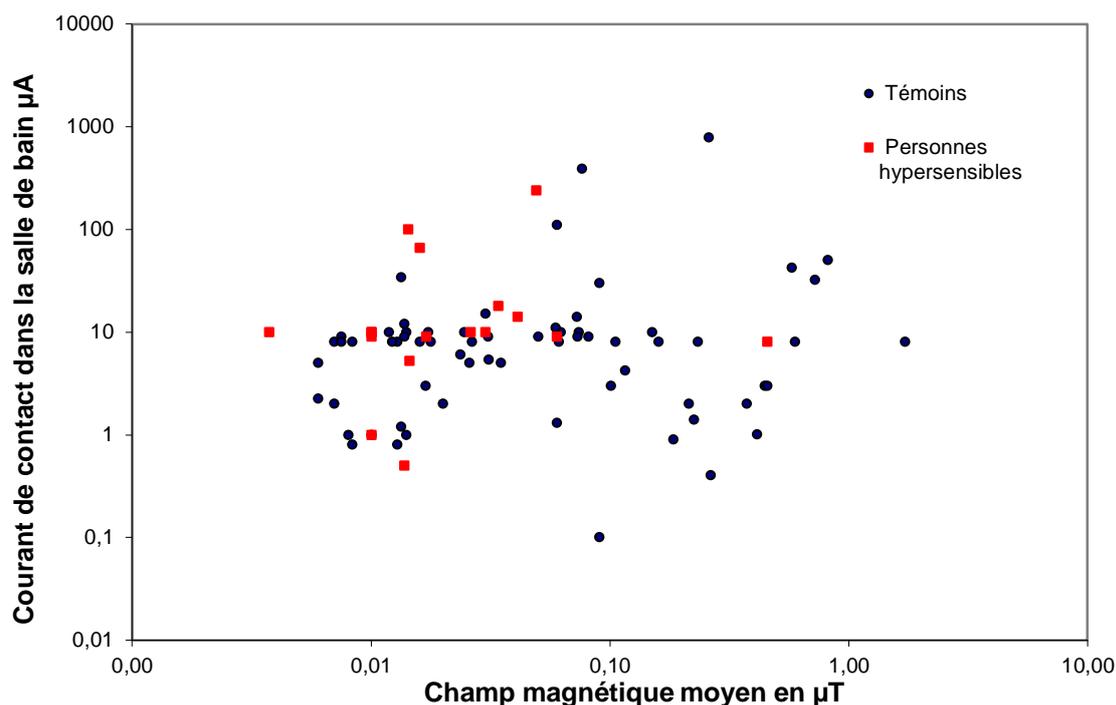


Figure 3-60: Courants de contact et hypersensibles

Je ne constate pas de différences en termes de valeurs sur l'exposition des hypersensibles aux courants de contact. L'idée dans ce paragraphe était de voir si les courants de contact pouvaient être une cause de leur mal-être. Nonobstant, il ne faut pas oublier que la perception de son environnement est propre à chaque être humain.

3.3.9. CONCLUSION

Dans un premier temps, j'ai exposé les résultats de l'enquête sur les courants de contact. J'ai constaté que dans les espaces humides, la valeur moyenne de ces derniers se situe vers les 8 µA. Environ 5 % des maisons visitées dévoilaient des valeurs importantes supérieures à 100µA. Je note la difficulté d'obtenir un nombre important d'habitations avec un champ magnétique supérieur à 0.4 µT en sachant que la moyenne du champ magnétique mesuré dans notre étude est de 0.02µT.

L'une des premières tâches que j'ai menée a été de comparer les valeurs de champ magnétique avec les courants de contact. Pour pouvoir estimer l'influence du champ sur ceux-ci, j'ai utilisé deux indicateurs, le risque relatif et l'Odds ratio et ce, pour deux valeurs seuil (10 et 100µA) et pour trois valeurs de champ magnétique (0-0.1 ; 0.1 -0.3 ; >0.3 µT). Les résultats ont montré un accroissement lorsque le champ magnétique est important (>0.3µT). La valeur obtenue pour le RR est de 1.74 [0.54-5.57] et de 2.86 [0.28 – 29.72] pour l'OR. Malheureusement, les intervalles de confiance sont tellement larges qu'il m'est impossible de tirer des conclusions. Dans le futur, l'une des pistes développable serait de recalculer ces intervalles de confiance pour des valeurs seuil plus élevées, de 300 ou 500µA mais l'échantillon devrait, dans ce cas, être plus conséquent car j'ai trop peu de valeurs avec de tels courants.

Toujours en relation avec le champ magnétique, j'ai superposé nos résultats de mesures sur site avec les résultats de simulation. En effet, les simulations ont montré un accroissement des courants de contact avec le champ magnétique. Seul, l'accroissement maximum observé sur les simulations a été de 10µA. Apparaît alors la

difficulté de mettre en évidence un effet significatif en sachant que la moyenne se situe à $8\mu\text{A}$ avec des valeurs pouvant atteindre plusieurs centaines de μA .

JE N'AI DONC PAS OBSERVÉ DE CORRÉLATION ENTRE LES COURANTS DE CONTACT ET LE CHAMP MAGNÉTIQUE. CETTE CONCLUSION M'A AMENÉ À DÉVELOPPER DE NOUVELLES HYPOTHÈSES.

Notre deuxième axe de recherche a porté sur la possibilité d'un lien entre les équipotentiels et les courants de contact. Les mesures sur site m'ont montré que la prise de terre n'était pas à 0V mais atteint généralement des valeurs plus importantes de quelques dizaines de mV à plusieurs volts. J'ai appelé ce potentiel, le potentiel de terre (due à la circulation du courant de fuite dans la résistance de mise à la terre). Je me suis mis en quête de voir si cette valeur pouvait avoir un lien avec les courants de contact.

D'un autre côté, à l'aide du théorème de Thévenin, il m'est possible de convertir un circuit complexe en un dipôle simple et de connaître ainsi la valeur de la force électromotrice. J'ai donc comparé la valeur de cette dernière avec le potentiel de terre. J'ai dessiné un graphique des forces électromotrices en fonction du potentiel de terre et obtenu un nuage de points. J'ai voulu alors savoir si cette disparité dans les résultats était due au champ magnétique. Une fois de plus, ce dernier n'a reflété aucun impact.

Ensuite, j'ai approché différentes pistes sans succès telles que l'impact des canalisations d'eau sur les courants de contact, l'âge de l'habitation et le système de mise à la terre.

Alors, j'ai émis une hypothèse novatrice : Les habitations possèdent un nombre important de câbles électriques portés à 220 V. J'ai délibérément postulé la possibilité qu'un courant capacitif puisse naître en ce conducteur et à travers les canalisations d'eau entourant l'habitation. Afin de démontrer ces dires, j'ai estimé dans un premier temps l'intensité du courant pouvant émaner des câbles. Il peut, en fonction du type, varier de quelques $\mu\text{A}/\text{m}$ à plusieurs dizaines $\mu\text{A}/\text{m}$. De façons à valider nos résultats j'ai mesuré ce courant de fuite sur différents câbles et terminé par une simulation numérique. J'obtiens un courant capacitif de plus ou moins $6.5\mu\text{A}/\text{m}$ pour des XVB et de l'ordre 3 à 5 $\mu\text{A}/\text{m}$ pour les câbles VOB entourés d'une gaine plastique.

J'ai ensuite transposé ces résultats obtenus en laboratoire sur le terrain. J'ai commencé par mesurer le déphasage du courant de contact par rapport à la tension du réseau. Selon mon hypothèse, ce dernier est de nature capacitive et donc déphasé de 90° . Les mesures sur site ont confirmé cette affirmation. J'ai ensuite réalisé une mini enquête dans quelques habitations. Toujours, selon notre hypothèse, une mesure supplémentaire ne pouvait être évitée. Cette dernière mesure consistait à faire varier la valeur de la fréquence du réseau de l'habitation. J'ai mesuré une augmentation des courants de contact, ce qui signifie une diminution de l'impédance capacitive.

J'AI ÉMIS UNE HYPOTHÈSE INNOVANTE SELON LAQUELLE LES COURANTS DE CONTACT SERAIENT DUS À UN EFFET CAPACITIF LIÉ AUX CÂBLES ÉLECTRIQUES. GRACE À DES MESURES EN LABORATOIRE ET SUR SITE , JE PEUX CONCLURE QUE, D'UN POINT DE VUE PHYSIQUE, LES COURANTS DE CONTACT PEUVENT ÊTRE JUSTIFIÉS PAR CETTE HYPOTHÈSE.

Afin de justifier cette hypothèse, des modèles de simulations ont été réalisés, les résultats de cette recherche se trouvent dans le chapitre suivant. Celui-ci sera dédié à la mise en place d'un modèle électrique capable de justifier les valeurs observées.

J'ai terminé ce chapitre en présentant les résultats obtenus auprès de personnes dites électro-sensibles. Il est malheureusement difficile de tirer des conclusions sur cette partie car la perception de son entourage est différente pour tout un chacun.

3.4. MODÈLE ÉLECTRIQUE DES COURANTS DE CONTACT PAR EFFET CAPACITIF.

3.4.1. INTRODUCTION

Je vais, dans ce paragraphe, réaliser un modèle électrique permettant de justifier les courants de contact. J'étudierai leur intensité, qui peut varier d'une habitation à l'autre, ainsi que le déphasage de 90° qui a été mis en avant lors de nos investigations.

Pour parer à toutes les situations rencontrées dans notre enquête, deux simulations vont être réalisées. D'une part, un schéma où le lien équipotentiel est existant et un modèle où il n'y a pas de lien équipotentiel.

Le modèle que j'ai imaginé part du poste de transformation le plus proche de l'habitation concernée pour aboutir à l'endroit où sont mesurés les courants de contact. Le cheminement de l'électricité jusqu'à cet endroit est particulièrement long. De plus, le nombre de paramètres influençant les courants de contact sur cette distance sont importants. Ceci peut amener à des divergences de conclusion pour des habitations d'aspect identique.

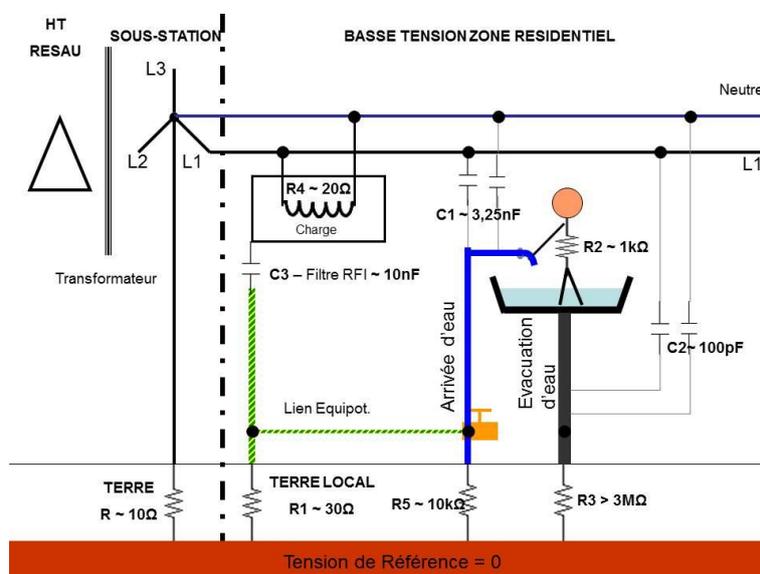


Figure 3-61: Schéma explicatif (réseau de type TT)

3.4.2. SIMULATION :

A partir du transformateur, la phase et le neutre sont acheminés dans l'habitation par voie aérienne ou par voie souterraine. Une fois dans la maison, le neutre et la phase sont distribués à travers celle-ci pour alimenter en charge les appareils électriques tels que les taques de cuisson, les radiateurs, sèche-cheveux, etc...

On constate que notre schéma possède un certain nombre de paramètres qu'il va falloir déterminer. J'ai donc entrepris de réaliser quelques mesures et calculs pour pouvoir estimer ces composants.

Comment déterminer les valeurs des capacités et des résistances :

J'ai montré dans le chapitre précédent (0) que les câbles électriques sont capables de générer un courant de fuite capacitif. Celui-ci peut naturellement se retrouver dans les canalisations et évacuations d'eau.

En effet, les évacuations les plus récentes sont généralement en matériaux non conducteurs comme le PVC. Par contre, au fil du temps, la conduction de celles-ci va être modifiée. En effet, elles vont progressivement se recouvrir d'une fine pellicule de calcaire et de matériaux organiques les rendant légèrement conductrices. C'est pour cette raison qu'elles sont modélisées dans le circuit.

Pour connaître les valeurs des capacités, je vais mesurer le courant qui circule à travers les conduites d'eau et les évacuations. Je pourrai ainsi déterminer leur impédance et par la suite, les capacités.

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$C = \frac{1}{j\omega Z}$$

Pour mesurer ce courant, on va raccorder les canalisations des éviers ou des évacuations d'eau à la terre via un piquet extérieur afin d'éviter toute influence venant de l'habitation (Figure 3-62). Je vais ainsi aisément pouvoir, à l'aide d'un ampèremètre ou un voltmètre en parallèle avec une résistance, déterminer le courant qui circule dans les conduites avec le lien équipotentiel déconnecté. J'aurai une bonne estimation du courant qui circule dans les conduites d'eau car la mise à la terre via un piquet extérieur est largement inférieure à celle des canalisations (Figure 3-62).

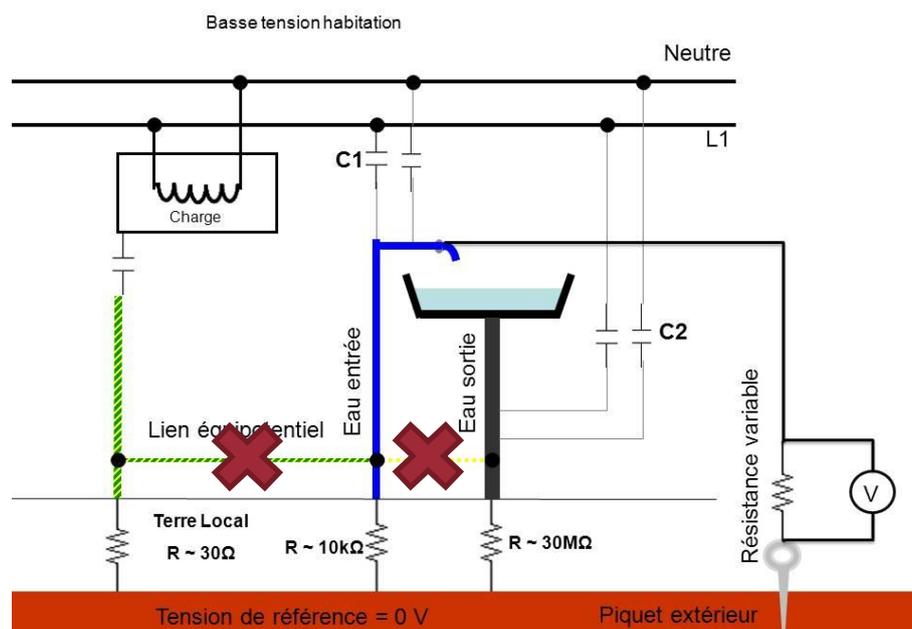


Figure 3-62: représentation des mesures des impédances capacitives

Je sais que la source de tension de la maison est le 220V. Ainsi, si je mesure un courant de 3μA avec le bon déphasage venant de l'évacuation, la capacité entre celle-ci et la phase sera de 43pF.

Grace à cette méthode, nous pouvons déterminer toutes les capacités de notre circuit.

Chaque valeur du tableau ci-dessous est une moyenne des résultats obtenus lors des mesures sur site.

Résistances Et capacités	Explications	Méthodes physiques pour déterminer les valeurs	Valeurs
C_1	Capacité parasite entre les câbles électriques et les conduites d'eau. Uniquement lorsque les canalisations d'eau ne sont pas reliées à la terre	Méthode explicitée plus haut	+/- 3 nF
C_2	Capacité parasite entre les câbles électriques et les évacuations d'eau	Méthode explicitée plus haut	+/-100pF
C_3	Capacité représentant le filtre RFI	Data sheet	+/-10 nF
$R_{\text{mise à la terre}} = R_1$	Résistance de mise à la terre de la maison	Norme qui impose une résistance de terre <30Ω	+/-30 Ω
$R_{\text{humain}} = R_2$	Résistance du corps humain	Selon standard américain	+/-1 kΩ
$R_{\text{évacuation}} = R_3$	Résistance de mise à la terre des évacuations	A l'aide d'un mesureur de terre	>3 MΩ
$R_{\text{charge}} = R_4$	Résistance de charge	/	+/-20 Ω
$R_{\text{compteur d'eau}} = R_5$	Résistance de mise à la terre du compteur d'eau	A l'aide d'un mesureur de terre	10 kΩ
$R_{\text{transformateur}}$	Résistance de mise à la terre du transformateur	Norme impose une résistance de terre <10Ω	+/-10 Ω

Tableau 3-20: Valeurs de résistances et capacités

Je vais maintenant utiliser ces valeurs dans un circuit (**Figure 3-63**) de manière à vérifier si nos hypothèses sont correctes et si les mêmes observations apparaissent.

SIMULATION NUMÉRIQUE

(A) SIMULATION SANS LE LIEN ÉQUIPOTENTIEL :

Voici le schéma lorsque ce lien équipotentiel est inexistant (**Figure 3-63**).

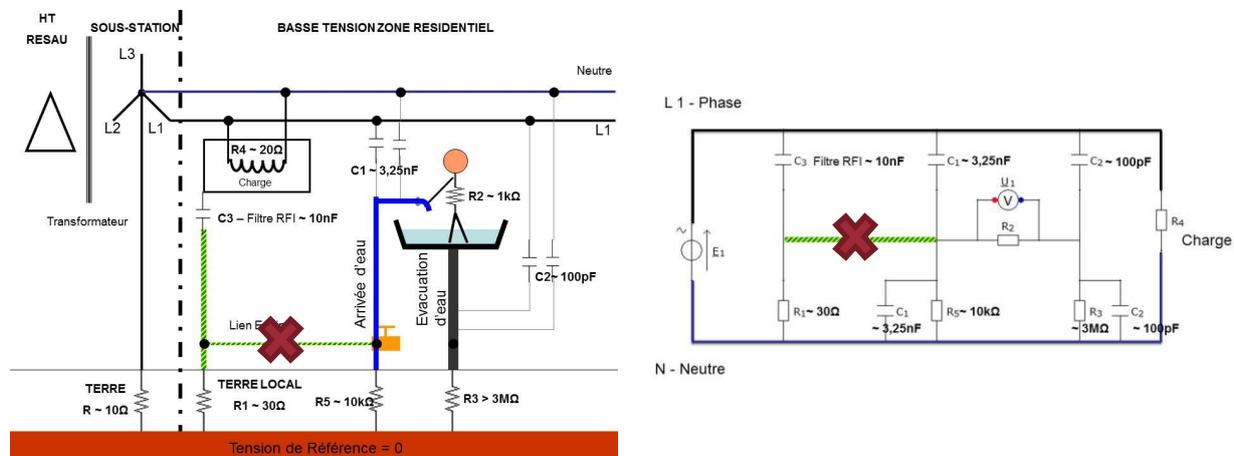


Figure 3-63 : a) Représentation Schéma

b) Représentation simulation

Pour rappel les valeurs utilisées pour les différents constituants sont :

	E1	U1	R1	R2	R3	R4	R5	C1	C2	C3
Description	Tension de l'habitation	Tension de contact	Résistance de terre	Impédance de l'être humain	Résistance de terre des évacuations d'eau	Charge	Résistance du compteur d'eau	Capacité entre les conduites d'eau et les câbles électriques	Capacité entre les évacuations d'eau et les câbles électriques	Filtre RFI
Valeurs	220 V	+/- 10 mV	30kΩ	1 kΩ	3MΩ	20Ω	10 kΩ	3 nF	100pF	10nF

Tableau 3-21: Valeurs des différents constituants

Pour simuler les circuits électriques, nous avons utilisé un logiciel libre « Solveelec » dédié à l'enseignement. Les résultats obtenus avec ce dernier ont été vérifiés à l'aide des lois de Kirchhoff.

(B) SIMULATION LORSQUE LE LIEN ÉQUIPOTENTIEL EST EXISTANT

Voici la représentation de cette simulation par un schéma et sa simulation (Figure 3-64).

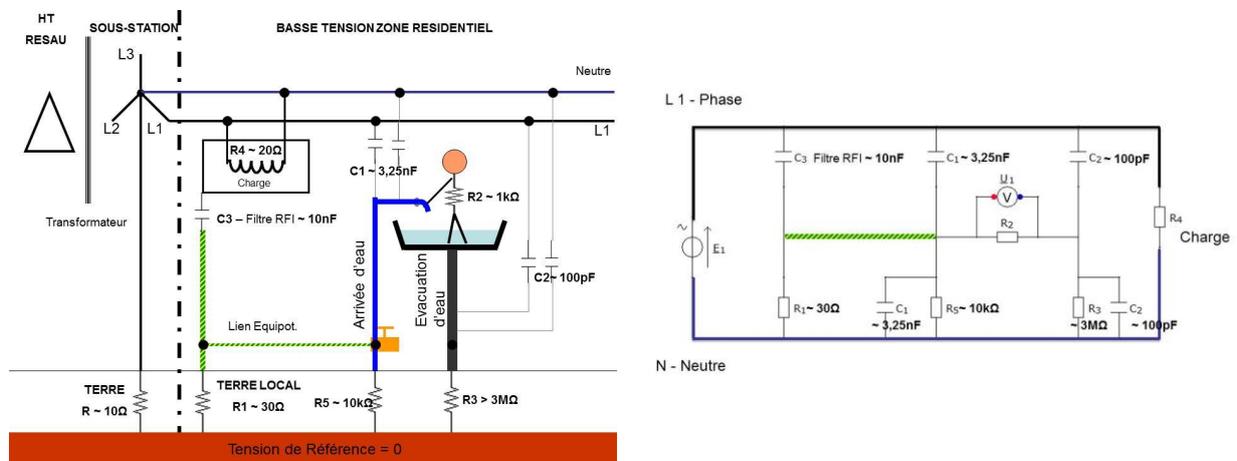


Figure 3-64: a) Représentation schéma

b) Représentation modélisation

Les valeurs des composants utilisés pour cette simulation sont :

	E1	U1	R1	R2	R3	R4	R5	C1	C2	C3
Description	Tension de l'habitation	Tension de contact	Résistance de terre	Impédance de l'être humain	Résistance de terre des évacuations d'eau	Charge	Résistance du compteur d'eau	Capacité entre les conduites d'eau et les	Capacité entre les évacuations d'eau et les	Filtre RFI
Valeurs	220 V	5 mV	30Ω	1 kΩ	3MΩ	20Ω	10 kΩ	3nF	100pF	10nF

Tableau 3-22: Valeur des composant utilisée pour la simulation

Pour un circuit utilisant les valeurs citées précédemment, j'obtiens un courant de contact de $\approx 5\mu\text{A}$. Mes résultats de simulation sont en accord avec les mesures sur site. De plus, j'obtiens un déphasage de 90° .

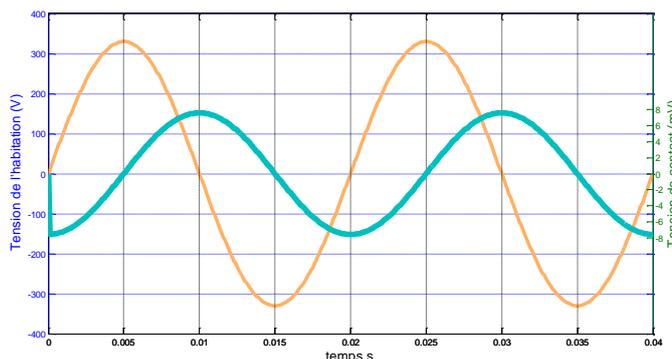
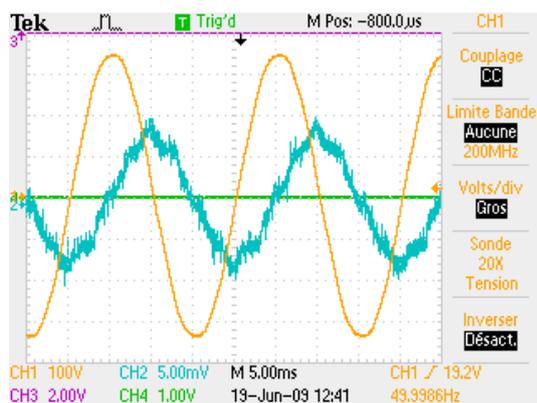


Figure 3-65 : Déphasage entre tension et courant de contact

ETUDE DE L'INFLUENCE DES PARAMÈTRES :

Pour les deux simulations, le paramètre principal à l'origine du courant de contact est la capacité C2. Le courant de contact varie de façon quasi linéaire avec la valeur de celle-ci. D'un point de vue expérimental, cette capacité est la plus difficile à déterminer car elle représente le courant circulant dans les conduites d'évacuation. C'est principalement le nombre de canalisations et leur proximité qui vont amener des courants plus ou moins importants.

INFLUENCE DU FILTRE RFI

De manière à quantifier l'influence du filtre RFI, sur l'installation électrique de l'habitation, je vais réaliser les mêmes simulations mais cette fois-ci en supprimant le filtre RFI du circuit. Nous obtenons un circuit équivalent à celui représenté ci-dessous.

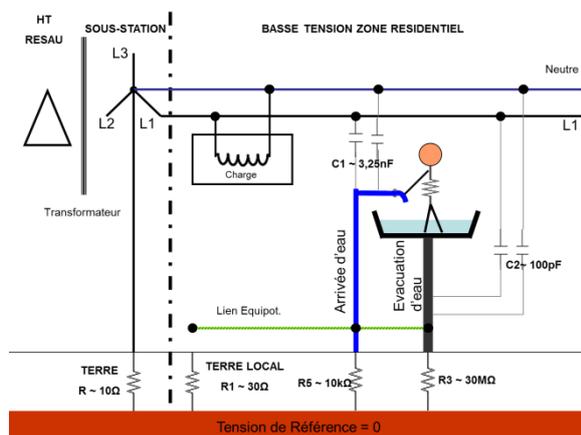
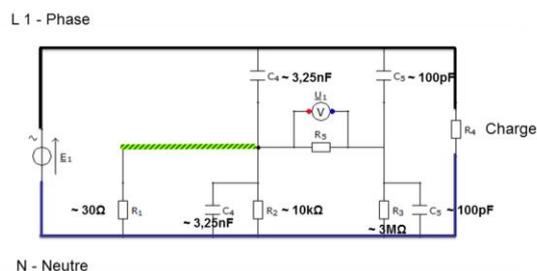


Figure 3-66: a) Représentation schéma



b) Représentation modélisation

Ce qui nous donne une valeur de courant de contact de +/- 10 μ A. Ceci nous conforte dans l'idée que les filtres RFI ont une faible influence sur les valeurs des courants de contact. Et que c'est bien l'effet capacitif qui est à l'origine de ce dernier.

(C) ETUDE DES COURANTS DE CONTACT AUPRÈS DES ÉLECTROMÉNAGERS

Le dernier point, que je vais aborder dans cette modélisation, est pourquoi les courants de contact auprès des électroménagers sont plus importants.

Le schéma n'est pas identique dans le cas de l'étude de la machine à laver. Le courant de contact est mesuré entre la carcasse métallique de l'électroménager, théoriquement reliée à la terre, et un piquet situé à l'extérieur de l'habitation ayant une résistance quasi nulle. Je peux donc modéliser cette situation de la manière suivante :

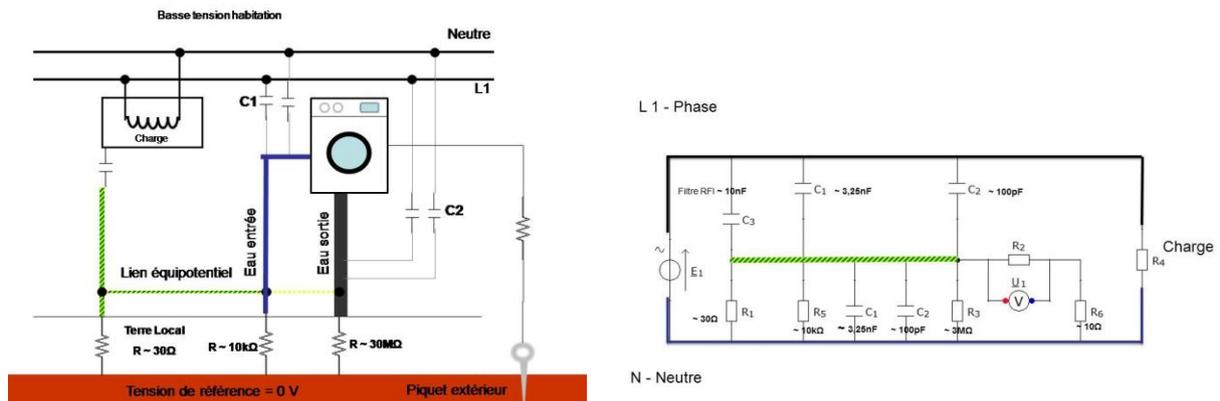


Figure 3-67: Schéma pour l'étude des courants de contact auprès des électroménagers

Dans cette situation, on se rend vite compte que l'intensité du courant de contact va dépendre des valeurs de mise à la terre et, principalement, celle de l'installation électrique. J'obtiens un circuit avec trois résistances en parallèle.

Ce qui me donne, en utilisant les valeurs de résistance et de capacité ci-dessous, une valeur de courant de contact de $59\mu\text{A}$, soit légèrement supérieure aux valeurs obtenues précédemment ([chap 3.3 §1](#))

	E1	U1	R1	R2	R3	R4	R5	R6	C1	C2	C3
Description	Tension de l'habitation	Tension de contact	Résistance de terre	Impédance de l'être humain	Résistance de terre des évacuations d'eau	Charge	Résistance du compteur d'eau	Résistance du piquet ext.	Capacité entre les conduites d'eau et les câbles électriques	Capacité entre les évacuations d'eau et les câbles électriques	Filtre RFI
Valeurs	220 V	30 mV	30Ω	1 kΩ	3MΩ	20Ω	10 kΩ	10Ω	3 nF	100pF	10nF

Tableau 3-23: Valeurs utilisées pour la simulation

Je constate que l'origine de ce courant de contact n'est pas le même que dans le cas des courants de contact dans les salles de bain. Néanmoins, le modèle présenté, aussi simple soit-il, est en accord avec les mesures sur site.

Remarque : Lorsque le lien équipotentiel est inexistant, le courant de contact peut atteindre des valeurs beaucoup plus importantes.

SOLUTION POUR SUPPRIMER LES COURANTS DE CONTACT

Une solution pour supprimer les courants de contact serait d'ajouter un lien équipotentiel supplémentaire comprenant les évacuations d'eau. Celui-ci serait bien évidemment difficile à mettre en place mais supprimerait définitivement les courants de contact. En voici la modélisation :

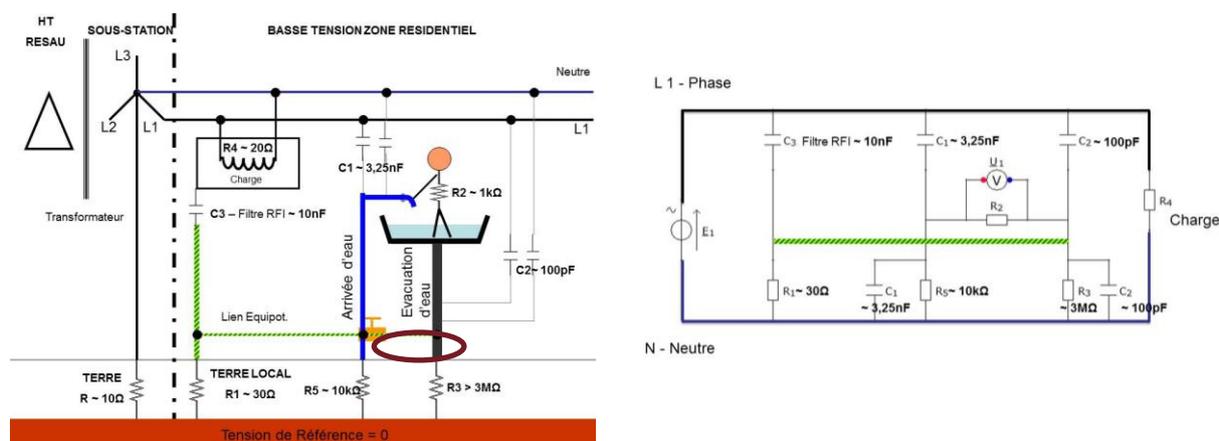


Figure 3-68: a) Représentation schématique

b) Représentation du modèle

POURQUOI DES COURANTS DE CONTACT SUPÉRIEURS À 10 μA ?

Si l'origine des courants est uniquement capacitive et liée à la coexistence de câbles électriques et d'évacuations ou amenées d'eau, on peut se demander pourquoi certaines habitations ont des courants beaucoup plus élevés que d'autres.

Une première hypothèse difficilement vérifiable à cause de leur localisation est la vieillesse ou la détérioration des isolants. Ceci aura pour effet de diminuer la permittivité du câble et diminuera la valeur des capacités. Il en résultera une augmentation des courants de contact.

La géométrie de l'habitation ainsi que la composition du mur et donc implicitement sa permittivité peuvent varier d'une habitation à l'autre et engendrer des courants de contact plus ou moins importants.

Une dernière justification possible concerne les immeubles à appartements parcourus par plusieurs centaines de câbles. Les gaines techniques utilisées pour distribuer eau, courant, ... à travers les immeubles sont concentrés dans des petits espaces où cohabite l'ensemble des câbles. La proximité entre toutes ces conduites et canalisations peut amener des courants de contact plus élevés par effet capacitif. Le type de logement n'a pas été demandé durant la campagne de mesures. Les habitations dont on est sûr que ce sont des appartements sont en nombres trop faible que pour pouvoir tirer des statistiques fiables.

3.4.3. CONCLUSION :

J'ai réalisé un modèle pour simuler les courants de contact. Ce dernier a l'avantage d'être simple et permet d'expliquer tous les cas rencontrés lors de la campagne de mesures. La détermination des paramètres est cruciale et est propre à chaque habitation. Dans mon cas, c'est une moyenne qui est utilisée.

En effet, toutes les maisons étant d'architectures différentes, elles vont obtenir des valeurs pour les paramètres différentes et ainsi des courants de contact différents. Les valeurs des composants mesurés sur site, insérés dans le modèle, concordent de manière remarquable avec les intensités des courants de contact mesurées dans l'habitation. Ce qui est logique vu qu'ils sont basés sur une moyenne. De plus, le modèle est en accord également avec les mesures effectuées auprès des électroménagers.

J'ai également proposé une solution pour supprimer les courants de contact, qui consiste à réaliser un lien équipotentiel entre les évacuations d'eau et les arrivées d'eau des différents points de puisage.

J'AI RÉALISÉ UN MODÈLE ÉLECTRIQUE EN ACCORD AVEC MON HYPOTHÈSE. CELUI-CI D'ARCHITECTURE SIMPLE PERMET DE JUSTIFIER L'ENSEMBLE DES CAS RENCONTRÉS SUR SITE.

3.5 DISCUSSION SUR LES COURANTS DE CONTACT

Durant mes investigations, je n'ai pas découvert de relation statistique entre le champ magnétique et les courants de contact. Mais qu'en est-il aux Etats-Unis ? C'est ce que je vais développer à travers ces quelques pages. Je présenterai les investigations faites aux USA.

Je vais également, dans ce chapitre, discuter des différentes hypothèses et liens mis en avant dans notre document et comparer ceux-ci avec les résultats et conclusions obtenus aux USA.

3.5.1 L'ÉTUDE AMÉRICAINE

Robert Kavet, durant une étude faite à St José dans le sud de la baie de San Francisco, [52] a trouvé une relation concordante entre les tensions de contact et le champ magnétique. Son travail consistait à analyser de manière temporelle les variations de tension et de voir si ces variations étaient provoquées par une variation du flux magnétique. Les mesures ont été réalisées toutes les minutes dans une quinzaine de maisons se situant à proximité de lignes HT. Lors de l'analyse de ses résultats, il a découvert une relation entre la tension de contact et le champ magnétique. Les variations étaient principalement marquées entre les jours de travail et le week-end. Cette étude, avec deux autres réalisées auparavant, lui a permis de conclure à une relation statistique suffisante entre la tension de contact et le champ magnétique.

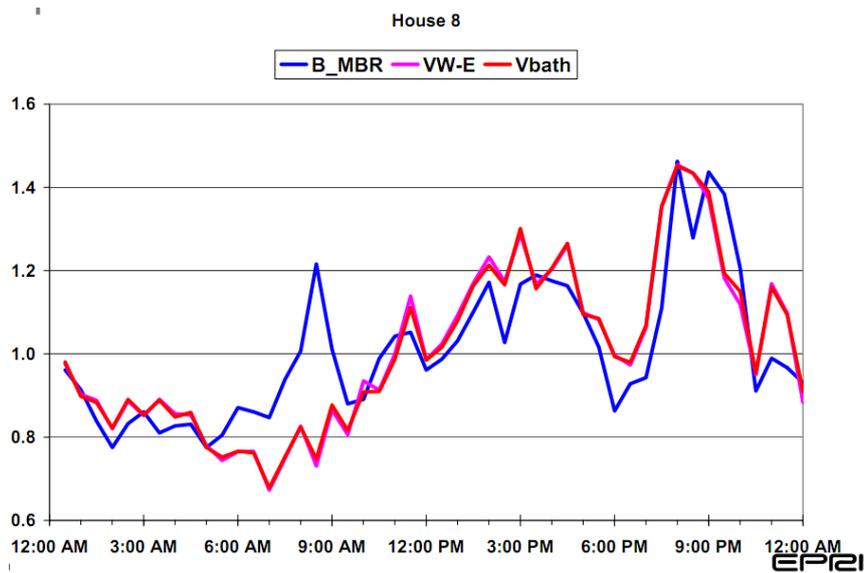


Figure 3-69: Relation entre le champ magnétique et le courant de contact aux USA

Depuis 2011 sont enfin apparues quelques études épidémiologiques en rapport avec les courants de contact et le risque de leucémie infantile. Une première étude est apparue en mars 2011 [53], celle-ci n'a montré aucune association. Cette étude californienne portant sur un total de 514 maisons, n'a relevé que 9 habitations avec un champ magnétique supérieur à $0.3\mu\text{T}$ et 6 avec une tension de contact supérieure à 100mV. Conclure sur de telles bases de données serait évidemment trop rapide. Une des explications sur le peu de maisons avec tension de contact significative pourrait être liée au fait que le nombre de maisons récentes dans cet échantillon est important. En effet, de par leurs canalisations faites principalement en matériaux non conducteurs, les tensions de contact relevées sont très faibles.

Kavet a par ailleurs réalisé une méta-analyse [54] reprenant un plus grand nombre d'habitations.

Les études reprises sont au nombre de quatre : « d'une part, l'étude de Californie du Nord sur la leucémie infantile (NCCLS) comportant 245 cas et 269 contrôles soit 514, une étude réalisée dans 15 habitations à San José, une autre réalisée à Denver, ont permis de récolter 191 résidences supplémentaires et pour terminer, une étude réalisée à Pittsburg ». Grâce à elles, les scientifiques ont maintenant une base de données de 756 résidences. Dans cet ensemble de mesures, 702 habitations possédaient des données pour la tension entre l'arrivée d'eau et l'évacuation d'eau, entre l'arrivée d'eau et une terre lointaine et pour terminer, le champ magnétique ambiant. Ils ont montré une association positive entre les tensions de contact et le champ magnétique ambiant.

L'Odds ratio pour des tensions au maximum, associées à un champ magnétique supérieur à $0.3\mu\text{T}$, est de 15.1 [CI : 3.6 – 61.0]. L'Odds ratio reste significatif lorsqu'ils suppriment de leurs données les valeurs égales à 0 mV. Dans ce cas précis, l'Odds ratio tombe à 8.3 [CI : 1.9 -37.0].

L'étude conclut qu'en utilisant les résultats de cette méta-analyse basée sur des données exclusives USA, visant à mesurer le champ magnétique et les tensions de contact, il est possible de dégager une relation statistique significative entre le champ magnétique moyen et les tensions de contact en terme de OR.

Kavet en conclut que, compte tenu du manque de plausibilité biophysique lié à l'exposition au champ magnétique, et l'association rapportée dans son étude, l'exposition au courant de contact dans le cas du toucher lors du bain a les caractéristiques d'expliquer l'association des champs magnétiques avec la leucémie infantile.

Je constate que les résultats obtenus aux USA ne sont pas en accord avec notre enquête. La question essentielle à se poser est de savoir pourquoi des divergences de conclusions sont observées entre ces deux études. C'est ce que je vais aborder en commençant par énoncer les différences techniques pouvant exister entre ces deux pays et voir quels sont les paramètres qui pourraient influencer les niveaux de courants de contact.

3.5.2 LES DIFFÉRENCES TECHNIQUES ENTRE LES DEUX ENQUÊTES :

Quels sont les facteurs qui permettent de conclure à deux observations contradictoires. Le tableau ci-dessous reprend les différences entre les deux systèmes électriques régissant ces deux pays.

	USA	Belgique
Schéma de mise à la terre	TN	TT
Fréquence	60 Hz	50 Hz
Tension d'alimentation	110 V et 220V	220 V
Système de mise à la terre	Boucle de fond de fouille et conduite d'eau	Boucle de fond de fouille ou piquet de terre

Table 3-1: Tableau récapitulatif en fonction des schémas de mise à la terre

Je vais maintenant décrire ces différences et expliquer en quoi cela pourrait intervenir dans les divergences de conclusion.

3.5.2.1 TENSION D'ALIMENTATION:

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, la tension du réseau résidentiel va affecter indirectement le champ magnétique ambiant (les appareils électroménagers ayant la même puissance), en l'absence de sources externes à celles de la maison. La moyenne du champ magnétique pour les pays étant alimentés en 110V est de $0,079\mu\text{T}$, pour $0,038\mu\text{T}$ en 220V (Cf.Chap1) Néanmoins, le seuil épidémiologique pour la leucémie infantile est insignifiant pour ces valeurs de champ magnétique.

D'un autre point de vue, si l'on se base sur les modélisations que j'ai réalisées précédemment en mettant en évidence une origine capacitive des courants de contact (CfChapitre 3.4), on a montré, pour la Belgique, une relation proportionnelle entre la tension d'alimentation et l'intensité des courants de contact. Une augmentation ou diminution de la valeur de la tension influence dans le même sens l'intensité de ces courants. Un courant de contact, si celui-ci est d'origine capacitive, serait donc deux fois moins important aux USA qu'en Belgique.

J'analyserai également l'influence du champ magnétique ambiant d'origine externe à la maison, sur l'intensité des courants de contact aux USA. Ce point sera vu en détail une fois tous les paramètres expliqués.

3.5.2.2 INFLUENCE DE LA FRÉQUENCE :

J'ai montré, dans le chapitre précédent (Chapitre 0), l'influence de l'effet capacitif sur les courants de contact. La question, que je vais me poser ici, consiste à savoir si une augmentation de la fréquence peut être à l'origine d'un accroissement de l'intensité du courant de contact.

J'ai démontré qu'il pouvait exister un couplage capacitif entre les câbles électriques et les conduites d'eau (évacuation, circuit d'eau). L'intensité du courant dépend de la valeur de la capacité ou plus simplement de son impédance. L'impédance étant dictée par :

$$Z = \frac{V}{I}$$

$$Z = \frac{1}{j\omega C}$$

Une augmentation de 20% de la fréquence va donc diminuer la valeur de l'impédance et laisser passer un courant plus grand.

3.5.2.3 SCHÉMA ET SYSTÈME DE MISE À LA TERRE :

La terre et le neutre sont étroitement liés bien qu'ayant des fonctions très différentes. Ils risquent tous deux d'avoir un impact sur les valeurs des courants de contact. La prise de terre fournit une liaison de faible impédance (typiquement 20 ohms ou moins) avec le potentiel de référence et ceci afin de prévenir l'apparition de tensions transitoires dangereuses sur des pièces conductrices. C'est un dispositif lié à la sécurité des personnes qui est installé par le consommateur. Par après, sa conformité devra être certifiée.

Le neutre, par contre, est un conducteur faisant partie du circuit électrique d'alimentation d'une charge. Il est fourni par le distributeur.

La règle de base d'un circuit de distribution, dans la plupart des pays européens, pour les particuliers, veut que le neutre soit indépendant de la terre côté charge (schéma dit TT). Ce n'est pas le cas aux USA où c'est le neutre qui fournit la terre côté charge. (Schéma dit TN ou ses variantes).

Par ailleurs, le distributeur relie souvent le neutre à la terre au poste de transformation et à certains pylônes qui alimentent le quartier.

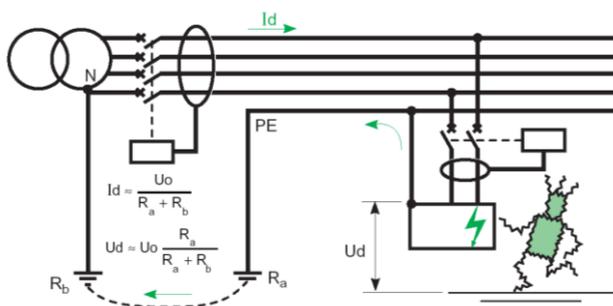


Figure 3-70: Courant et tension de défaut en schéma TT [43]

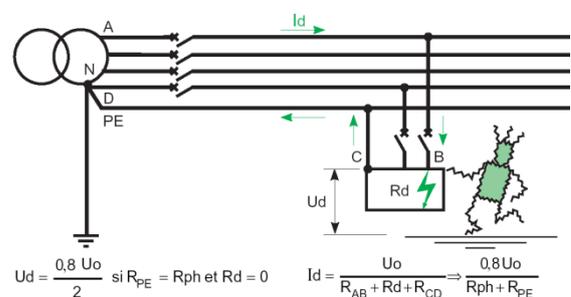


Figure 3-71 : Courant et tension de défaut en schéma TN [43]

Chaque fois que le neutre est mis à la terre, le courant circulant dans celui-ci peut se détourner de la ligne vers la terre et retourner au transformateur via un chemin différent afin de fermer le circuit (par exemple via des conduites d'eau). Tous les courants s'échappant du neutre, à l'intérieur de la maison, sont potentiellement susceptibles de générer des courants de contact. En effet, ceux-ci donnent lieu à une augmentation de la tension dans différents endroits de l'habitation (en particulier sur l'arrivée d'eau, les radiateurs, le circuit de terre, ...).

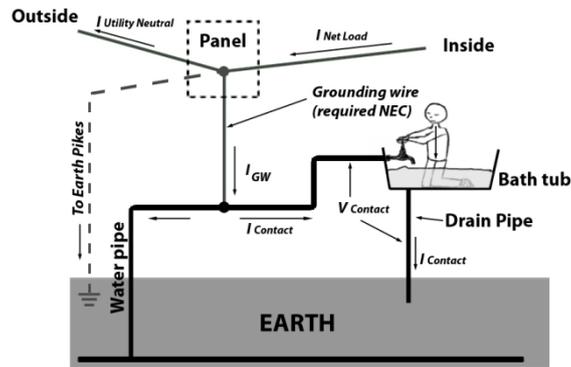


Figure 3-72: Neutre et terre au niveau du panneau électrique

Dans le cas du régime TT, un détournement significatif de courant vers la terre va forcer la protection différentielle à ouvrir le circuit, cette dernière étant généralement réglée à 30 mA pour les salles d'eau. Autrement dit, un courant de contact inférieur à 30 mA peut circuler librement n'importe où dans une installation, même certifiée, sans aucune action de la protection. Cette limite actuelle (30 mA) a été imposée dans la réglementation en tenant compte des aspects de sécurité liés à un risque de fibrillation ventriculaire (électrocution Cf. chapitre2). Etablir une limite inférieure n'est pas possible car toutes les installations ont des courants de fuite et une réduction du seuil de la protection différentielle pourrait causer des interruptions fréquentes dans les alimentations électriques résidentielles.

A fortiori, s'il n'y pas de différentiel dans l'installation, le courant de fuite ne sera plus limité, sinon par une limite supérieure liée à la dégénérescence du défaut partiel vers un court-circuit qui provoquera, dès lors, le fonctionnement des disjoncteurs ou fusibles de l'installation. Le diagramme électrique dans une maison étant alimenté par un régime TT sera le suivant :

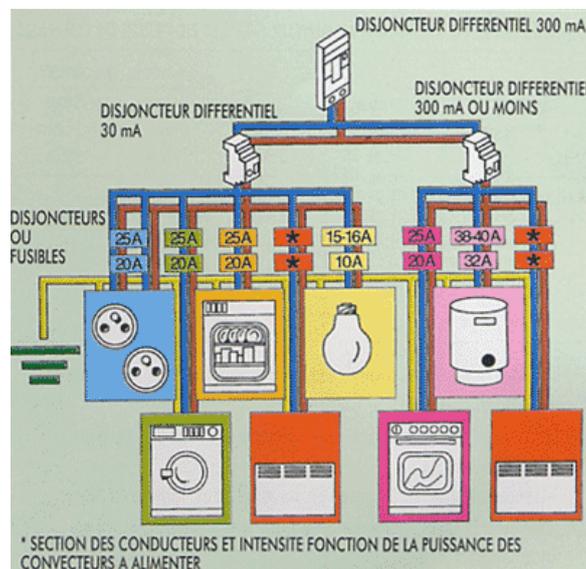


Figure 3-73: Représentation schéma électrique TT

Dans le cas d'un régime TN, les diagrammes électriques sont différents, les différentiels appelés « GFCI outlet, Ground fault current interrupt » ne sont pas placés en amont du circuit mais au niveau des prises. Et le nombre

de GFCI est déterminé par l'épaisseur des câbles. Les GFCI, pour la protection des personnes, sont limités à 4-6 mA et peuvent aller jusque 500mA pour les appareils.

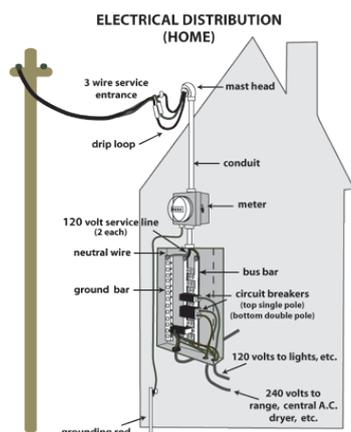


Figure 3-74 : Distribution électrique régime TN



Figure 3-75 : GFCI Outlet

En régime TN, afin de parer à une défaillance des connexions du conducteur de terre depuis l'origine de l'installation jusqu'aux récepteurs terminaux, lorsque le réseau est étendu, il est nécessaire de mettre à la terre le conducteur de protection en plusieurs points. Le NEC (national electric code) impose donc cette mise à la terre à l'entrée de chaque habitation mais, également, que toutes les prises de terres soient connectées entre elles afin de créer un réseau. C'est à cette fin que le neutre de chaque habitation est mis à la terre en le reliant aux conduites métalliques d'eau de la maison.

3.5.3 ORIGINE DES COURANTS DE CONTACT

Comme nous l'avons vu tout au long des chapitres, la source ayant le plus grand potentiel pour expliquer les courants de contact en Belgique est les courants de fuites capacitifs, provenant de câbles, mêmes sains. En effet, aucune corrélation statistique d'importance n'est observée entre le champ magnétique et les courants de contact.

A l'opposé de nos résultats, on constate, aux USA, une relation statistique suffisante entre ces deux valeurs. La piste la plus plausible pour expliquer cette différence est le niveau de tension (qui justifie une augmentation d'un facteur environ 2 sur les courants de contact) et d'autre part le système de mise à la terre. Si l'induction magnétique est la principale cause du courant de contact aux USA, la tension générée par le champ magnétique est, comme nous l'avons vu au début du document, proportionnelle à l'intensité du champ ainsi qu'à la taille de la boucle conductrice.

En régime TT, les boucles conductrices de l'habitation sont locales, réseau de terre local avec mise à la terre locale par boucle de fond de fouille qui représente le cas le plus défavorable (Cf. Chapitre 3.3) ou par piquet de terre. Les boucles étant de petites dimensions, l'influence sur les courants de contact est donc négligeable, sauf pour des valeurs de champ magnétique très élevées, de l'ordre de quelques dizaines μT , comme visualisé dans les simulations.

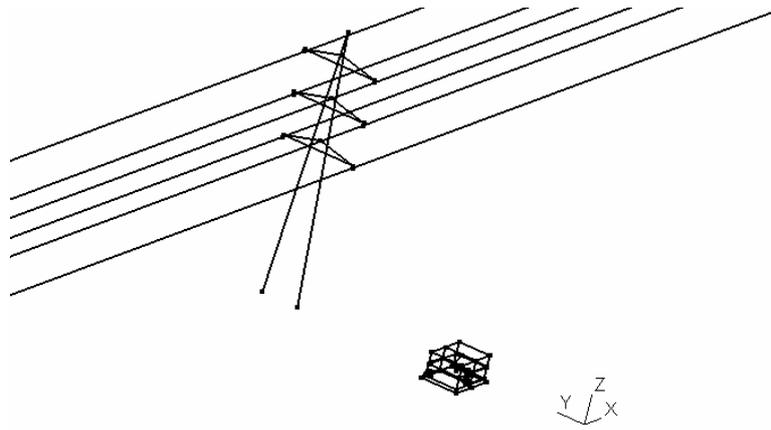


Figure 3-76: Modélisation d'une habitation sous une ligne à HT

Comme je l'ai expliqué plus haut, en régime TN, le neutre va être mis à la terre en plusieurs endroits, ce qui va former un réseau de boucles étendu le long de la ligne électrique, pouvant provoquer une tension de contact importante entre le réseau d'eau et la terre. De plus, dans une telle configuration, il n'est pas exclu qu'il y ait des interactions avec les autres habitations.

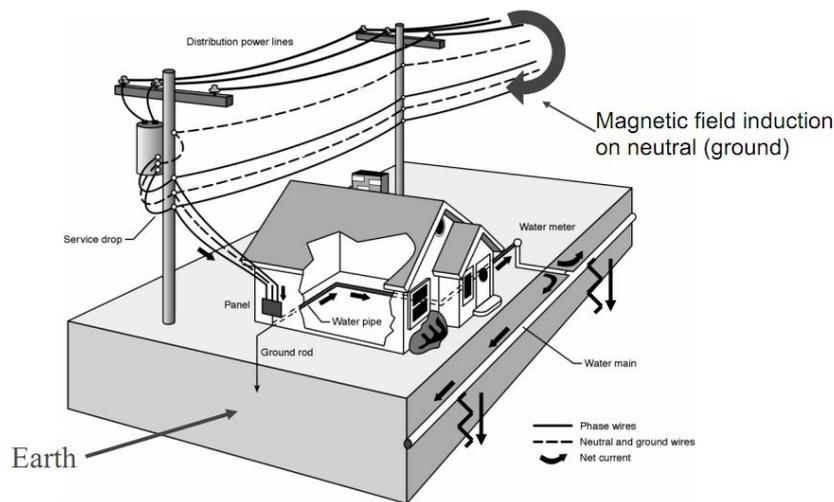


Figure 3-77: Induction magnétique dans le réseau de neutre et de terre

En connaissant le champ magnétique ambiant et le niveau des tensions mesurées dans leur enquête, je peux maintenant me demander quelle devrait être la taille de la boucle pour permettre une différence de potentiel susceptible de créer un courant de contact potentiellement dangereux.

Pour un champ magnétique supérieur à $0,3\mu\text{T}$, le risque relatif approché d'avoir une tension de contact de 30 mV est de 4,29 [0,81 -20,3] [50]. Calculons maintenant la taille de la boucle pour avoir une telle force électromotrice de 30mV.

$$e(t) = - \frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

ϕ = flux magnétique

$E(t)$ = force électromotrice

B = Champ magnétique

En réalisant les calculs, on se rend compte que la taille de la boucle doit être supérieure à plusieurs centaines de mètres carrés pour générer une telle force électromotrice. En Belgique, les boucles conductrices dans les habitations sont généralement inférieures à 100 m² et sont réalisées lors des fondations. Pour atteindre une tension de 100mV, la boucle devrait avoir une superficie supérieure à 1000m². Ce qui est facilement atteint avec la boucle du neutre aux Etats Unis (Figure 3-78 -79).

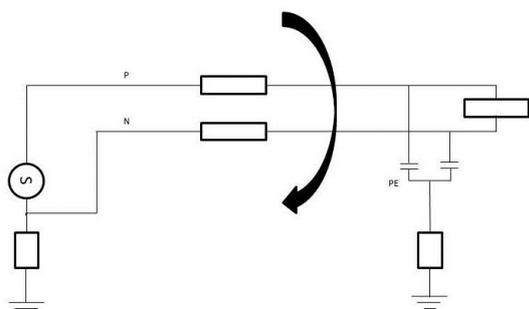


Figure 3-78: Schéma TT (Europe)

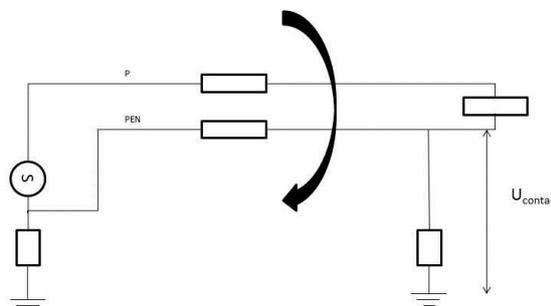


Figure 3-79: Schéma TN (USA)

On se rend bien compte que le système de mise à la terre joue un rôle dans l'origine des courants de contact. En effet, en régime TN, l'induction peut être à l'origine des courants de contact alors qu'en Belgique, l'influence est limitée à cause de la taille des boucles.

On pourrait maintenant se demander si le système de mise à la terre en TN (grande boucle) ou TT (petite boucle) à une incidence sur les risques de développement de leucémie infantile. En effet, les courants de contact sont une piste non négligeable et leur intensité est en relation directe avec le champ magnétique induit dans un système TN. Il est donc impératif de comparer les études épidémiologiques de divers pays ayant des systèmes de mise à la terre différents.

Je vais, dans ce tableau, indiquer les schémas de liaisons ainsi que les risques relatifs, les Odds ratio et leur intervalle de confiance respectif basé sur différentes études.

Pays	SLT	Risque Relatif de Leucémie pour un B>0.4μT (Ref< 0.1μT) basé sur l'étude Ahlbom (2000) [26]
Canada	TN – C	1.65 [0.68 – 4.0]
USA	TN – C	3.44 [1.24 – 9.54]
Suède		3.46 [0.84 - 14.3]
Finlande		6.79 [0.74 – 62.6]
Allemagne	TT et TN-C (avec prise de terre chez l'abonné<2Ω)	2.21 [0.29 – 16.7]
UK	TT et TN-C (15% en 1998 avec mise à la terre par l'opérateur)	0.88 [0.23 – 3.39]
		Autres études plus récentes :
Canada	TN-C	OR = 2.4 [1.3-4.2] pour B>0.4μT (Infante-Rivard et Deadlan, 2003)
Allemagne	TT et TN-C (avec prise de terre chez l'abonné<2Ω)	OR = 3.21 [1.33-7.80] pour B>0.2μT par rapport à B<0.2μT (Schuz et Al, 2001)
Italie	TT	OR = 4.21 [0.88-23.17] pour B>0.1μT (Bianchi et Al, 2000)

Tableau 3-24: Comparaison du RR pour un B>0.4 μT en fonction des systèmes de mise à la terre

Au vu de ce tableau, on constate que :

- La plupart des études faites hors Usa et Canada ne conduisent pas à un lien statistique vu que les bornes inférieures des OR sont inférieures à l'unité (sauf pour l'étude récente en Allemagne). Alors que le lien est établi statistiquement aux USA et Canada.
- les études en régime TT sont trop peu nombreuses et m'empêchent de faire une conclusion. Cela est dommage car une avancée drastique aurait pu être faite dans la relation entre les lignes à haute tension et la leucémie infantile. Ceci représente une piste non négligeable pour le futur.

3.5.4 CONCLUSION

Ce chapitre m'a permis de comparer cette étude avec celle réalisée aux Etats-Unis. J'ai remarqué des divergences de conclusion entre les deux études et j'en ai analysé les différences techniques qui pouvaient exister.

J'ai également montré que le système de mise à la terre est d'une importance capitale dans l'origine des courants de contact. Ainsi, le régime TN est plus sensible à l'induction magnétique que le système TT.

Je peux conclure en disant que la source à l'origine des courants de contact est complètement différente en Belgique et aux USA. Je peux également conclure que si le champ magnétique ambiant imposé par des

conditions externes (lignes à haute tension ou câbles souterrains) influence significativement les courants de contact aux USA, il n'en est rien en Belgique, ou du moins, cette influence est nettement moins marquée.

En Belgique, il semble bien que l'origine des courants de contact soit principalement liée au couplage capacitif entre câbles électriques, même sains, et canalisations conductrices. Il en résulte une recommandation évidente de contrôle des installations.

Enfin je recommande de mener une meta-analyse épidémiologique sur la leucémie infantile en séparant les pays à schéma résidentiel TT et TN.

CHAPITRE 4. ÉTUDE DU RADON À PROXIMITÉ DES LIGNES HT

Les résultats de l'enquête sur les courants de contact n'ayant pas été suffisamment probants, j'ai décidé d'élargir mon champ de recherche sous les conseils avisés de mon promoteur. Celui-ci m'a conseillé d'aller regarder du côté des résultats de certaines études épidémiologiques sur l'exposition au radon. Celles-ci donnaient un risque de développement leucémique avec des Odds ratio semblables à ceux obtenus pour l'exposition aux champs électromagnétiques. L'idée d'un lien causal entre le champ électrique et le radon m'est donc apparue d'où la rédaction de ce chapitre.

4.1. INTRODUCTION

Le Radon est un élément chimique du tableau périodique de symbole Rn et de numéro atomique 86. C'est un gaz rare, radioactif, d'origine naturelle. Il provient de la désintégration du radium-226 (Figure 4-1). Son isotope le plus stable est le Radon-222 qui a un temps de demi-vie de 3.8 jours.

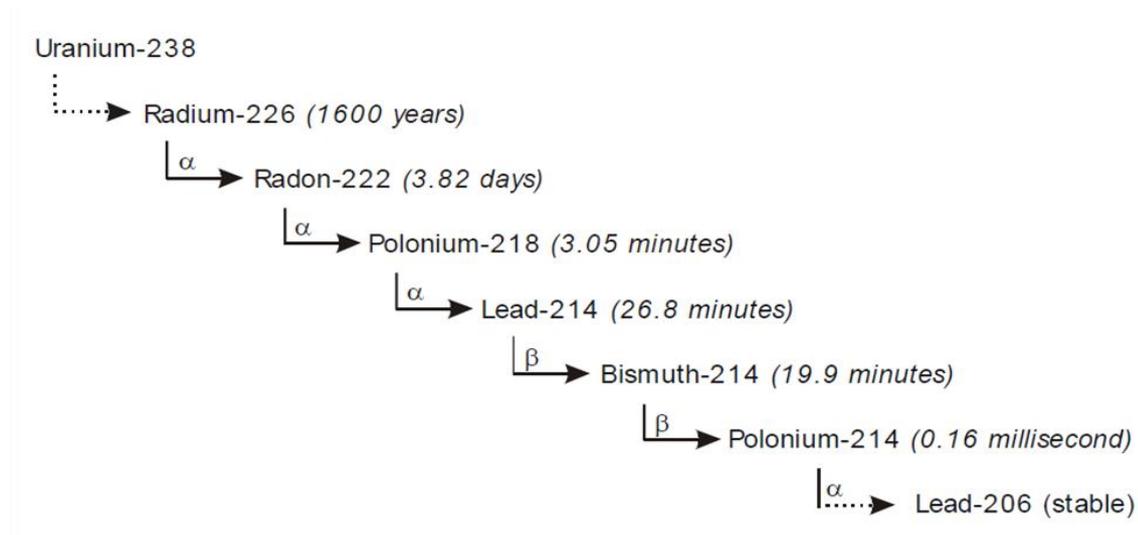


Figure 4-1: Désintégration de l'Uranium 238

C'est en 1900 que le Radon fut découvert par le physicien Friedrich Ernst Drom, il est le troisième élément radioactif à avoir été observé.

La concentration moyenne de ce gaz dans une habitation est de 39 Bq/m³ [55]. Celle-ci varie au cours de l'année et de l'endroit. On le trouve en plus grande quantité dans les régions granitiques, volcaniques et uranifères.

Les scientifiques ont commencé à s'intéresser à ce gaz dans les années 60 parce que les médecins constataient une augmentation du cancer du poumon chez les mineurs d'uranium.

Dans la vie de tous les jours, l'exposition au radon se fait principalement au domicile. La concentration va dépendre de plusieurs paramètres tels que :

- la quantité d'uranium présente dans le sol où la roche sur laquelle la maison est construite;
- des voies d'infiltration par lesquelles le radon pénètre dans les maisons (Figure 4-2);
- des échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur (Figure 4-2);
- L'habitude des résidents en matière d'aération et d'étanchéité des fenêtres.

Le Radon entre dans les maisons par:

- des fissures dans le béton à la jonction du sol et des murs;
- des trous dans le plancher;
- des petits pores dans les murs en brique;
- les puits et les égouts.

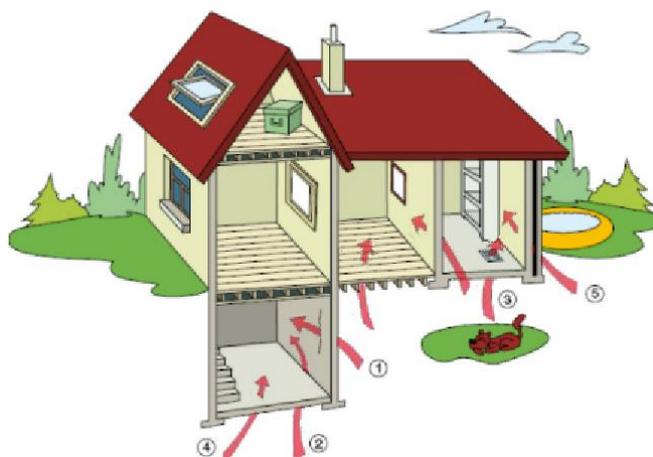


Figure 4-2: Infiltration de radons dans une habitation

Les concentrations en Radon sont généralement plus élevées dans les sous-sols, les caves et toutes structures en contact direct avec le sol.

Cette quantité peut varier suivant les jours et les heures, d'une maison à l'autre et, même, à l'intérieur de celle-ci. À cause de ces fluctuations, estimer la concentration moyenne annuelle en radon n'est pas aisée. Pour déterminer celle-ci, on procède généralement à des mesures pendant au moins trois mois au printemps ou en automne.

En matière de prévention, la plupart des pays ont adopté une concentration en radon maximum dans l'air de 200–400 Bq/m³. Au-dessus de ce niveau de référence, il convient de prendre des mesures pour diminuer la présence du gaz.

Pays	Moyenne arithmétique (Bq/m ³)	Moyenne Géométrique(Bq/m ³)
Australie	11	8
Autriche	99	15
Belgique	48	38
Canada	28	11
République Tchèque	140	44
Danemark	59	39
Nouvelle Zélande	22	20
Norvège	89	40
Pologne	49	31
Portugal	62	45
Suisse	78	51
Angleterre	20	14
USA	46	25
Moyenne dans le monde	39	

Tableau 4-1: Exposition au radon dans différents pays

4.2. LES RISQUES LIÉS À L'EXPOSITION AU RADON

Le radon constitue la deuxième cause de cancer pulmonaire dans de nombreux pays et serait responsable de 3 à 14% des cancers du poumon [55]. L'inhalation de ce gaz induirait plus facilement le cancer chez les fumeurs. Son impact n'étant pas neutre, cela a conduit à de nombreuses études épidémiologiques.

L'une d'elles a porté sur les mineurs d'uranium. Les résultats indiquent qu'ils auraient 7% de chances supplémentaires de développer un cancer [56]. Des études menées en Europe, en Amérique du Nord et en Chine ont également confirmé que des concentrations plus faibles, telles que celles que l'on trouve dans les habitations, présentent un risque cancérigène pour la santé [57], [58].

Suite à ces découvertes, l'exposition au radon a été classifiée comme cancérigène par l'OMS et l'IARC (International Agency for Research on Cancer) en 1988.

La relation dose-effet serait linéaire, ce qui signifie que le risque de cancer pulmonaire augmente proportionnellement avec l'exposition au radon (Figure 4-3). Ce qui se traduit par une augmentation de 16% par tranche de 100 Bq/m³ [55].

Le principal mécanisme d'interaction du radon avec le corps humain se fait par inhalation ou déposition sur la

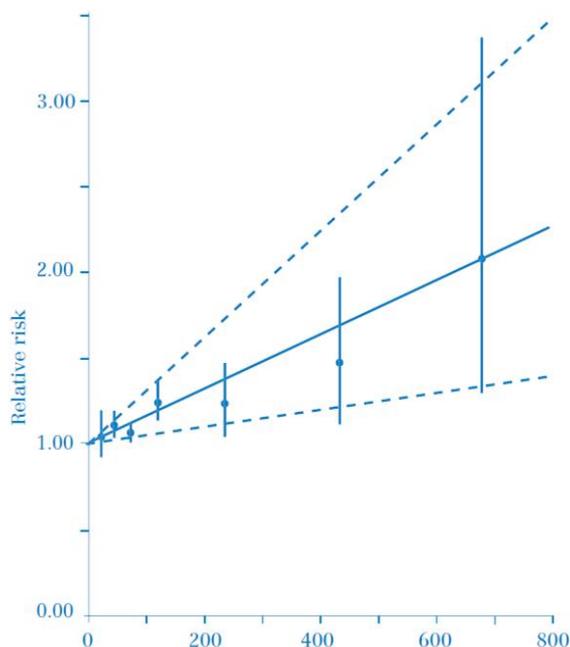


Figure 4-3: Risque de développement de cancer en fonction de l'exposition au radon

peau. Différentes études ont été réalisées de manière à connaître la quantité de particules susceptibles de franchir les barrières naturelles du corps et de terminer leur course dans les alvéoles pulmonaires. Le système respiratoire agit comme un filtre en fonction du diamètre des particules inhalées. Celles ayant un diamètre compris entre 0,5 et 0,7 μm , sont les plus aptes à parvenir au fond des poumons [59].

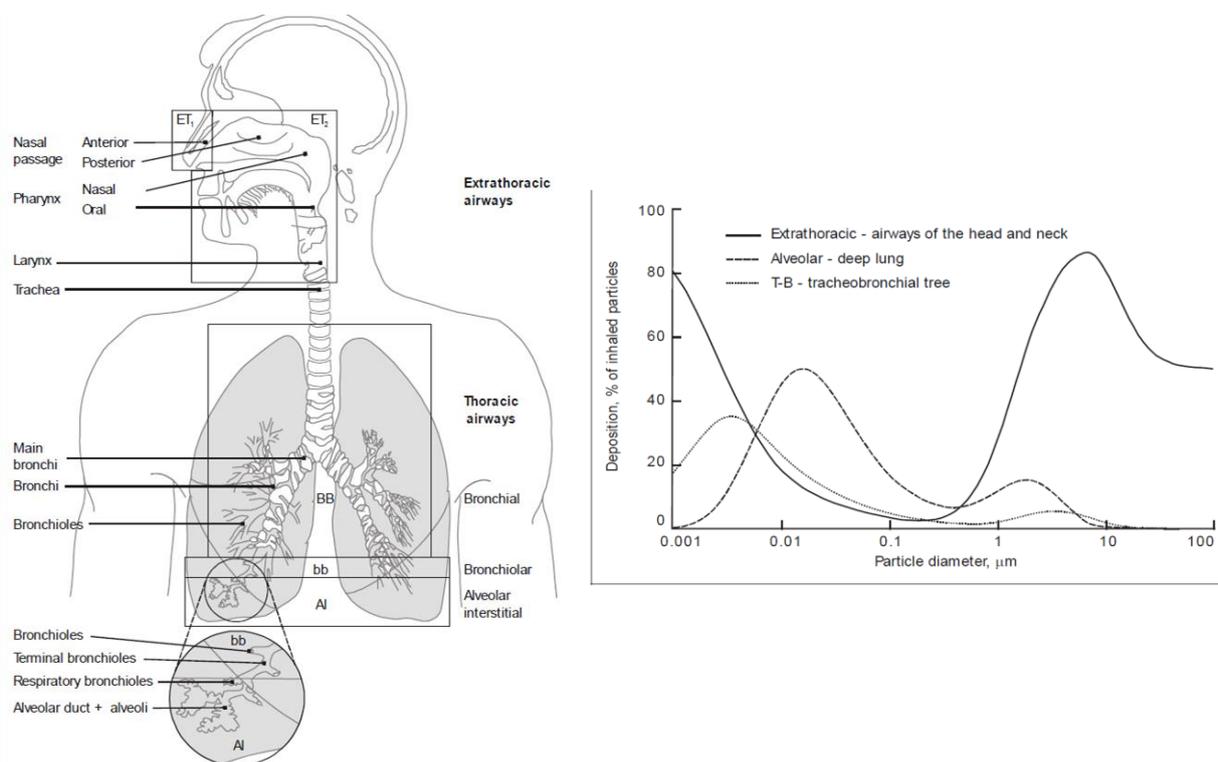


Figure 4-4: Système respiratoire et pourcentage de déposition des particules en fonction du diamètre

Lorsque le radon est inhalé, des particules alphas sont émises dans les poumons (suite à la désintégration du Radon 222 en polonium 218), ce qui peut provoquer des dommages à l'ADN.

Les deux thèmes qui vont suivre, « leucémie infantile et l'exposition résidentielle au radon » et « le radon et les champs électromagnétiques » constituent en quelque sorte, nos hypothèses de départ. C'est en visu de ces résultats troublants que j'ai décidé de creuser un peu plus le sujet et de développer ce chapitre novateur.

4.3. LEUCÉMIE INFANTILE ET L'EXPOSITION RÉSIDENTIELLE AU RADON

Pour mettre en relation le radon et la leucémie, l'un des mécanismes plausibles part du principe que lorsqu'une personne se trouve dans un environnement contenant du radon, le principal organe touché par les radiations sont les bronches. Les organes périphériques tels que la moelle osseuse et les reins sont également susceptibles de recevoir de faibles doses lors de la désintégration du Rn-222 [60].

Concernant les études épidémiologiques, certaines trouvent un effet positif alors que d'autres n'observent pas de telles relations. Ces conclusions ressemblent étrangement à l'influence des lignes HT sur le développement leucémique.

Dans les résultats positifs, citons une étude cohorte réalisée dans les mines d'uranium [55]. Des études épidémiologiques ont également mis en avant une augmentation du risque de leucémie infantile avec un Odds ratio allant jusqu'à 1,5 pour une concentration en Radon de 200Bq/m³ [61], [62].

A l'inverse, d'autres études ne retiennent aucune association entre l'exposition au radon et la leucémie infantile [57], [63]

La principale critique au sujet de ces études concerne la variabilité du niveau de référence en concentration. Par exemple, Henshaw prend comme indicateur 200Bq/m³ tandis que l'étude Kaletsch propose un seuil 70Bq/m³. Il est donc plausible que le choix des seuils implique une divergence au niveau des résultats.

4.4. LE RADON ET LES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Ces quelques lignes présentent un résumé de la littérature sur l'influence du champ électromagnétique sur le radon. Mon interrogation se porte sur la possibilité que le radon se trouve en plus grande quantité près des lignes HT

Dans une première étude réalisée par J.C.H Miles, ils ont tenté de démontrer la variation du radon en fonction de l'intensité du champ électrique. Ces expériences se sont déroulées dans une station de production électrique. A l'intérieur, ils ont comparé la quantité de radon émanant des zones à champ électrique important (~3kV) par rapport à la concentration dans les endroits où le champ électrique est faible. Les conclusions de cette enquête n'ont pas démontré l'influence du champ électrique sur la concentration du radon.

Une autre investigation, exécutée par Henshaw, a dévoilé que le champ électrique pouvait influencer la concentration en radon. En effet, la présence d'un champ électrique (50Hz) important dans une pièce est capable d'affecter la diffusion et la dérive de noyau fille du radon en le polarisant. La physique explique que les particules environnantes peuvent subir une polarisation et se fixent alors plus facilement sur le corps.

Des chercheurs ont observé une augmentation de la concentration de radon à proximité des tubes cathodiques lorsque ceux-ci sont éteints. Il existe un champ électrique négatif près de l'écran. Ce champ attire les charges positives comme le Radon. Celui-ci étant présent en plus grande quantité positive dans la nature [64].

Citons une dernière étude réalisée en 2007 montrant l'augmentation des charges ioniques principalement positives à proximité des lignes HT. Et cela de manière croissante en fonction du champ électrique 110-132kV et 220-330kV [65]

Suite aux résultats troublants montrant une possible influence du champ électrique sur le radon et l'influence de ce dernier sur la leucémie, il devenait indispensable de se forger sa propre opinion sur la question centrale: « **Est-ce qu'il existe un lien entre la leucémie infantile, la concentration en radon et le champ électrique ?** ». J'ai décidé de mener ma propre enquête.

J'ai lancé une campagne de mesures principalement en province de Liège et du Luxembourg où la concentration en gaz radioactif est la plus élevée. Mon investigation comporte 3 parties expérimentales :

- en collaboration avec l'AFCN²⁵ on a comparé la concentration à proximité et loin de la ligne
- Toujours en collaboration avec l'AFCN on a mesuré grâce à des détecteurs la concentration en radon le long de la ligne
- En collaboration avec l'IRM, nous avons exploré une troisième piste sur l'impact que peuvent avoir les coups de foudre sur la concentration en radon

²⁵Agence fédérale du contrôle nucléaire.

4.5. ETUDE DU RADON À PROXIMITÉ DES LIGNES À HT.

4.5.1 CONCENTRATION EN RADON AUX ABORDS D'UNE LIGNE HT

Dans un premier temps, j'ai pris contact avec l'AFCN. Cette agence comporte une cellule qui étudie principalement l'exposition au radon. Logiquement, elle détient parmi ses missions la réalisation de cartes de relevés de concentration du gaz. Dans ce but, ils mesurent le radon dans le sol, ce qui leur donne une valeur pour une coordonnée précise.

J'ai travaillé en étroite collaboration avec les membres de cette équipe pour observer si une relation existe entre la présence de radon et les lignes électriques. J'ai donc entrepris de mettre sur pieds un protocole. Afin de définir certains paramètres, je me suis basé sur les résultats des chapitres précédents (**Chapitre 1.3.2**). Je me souviens notamment que le risque de leucémie infantile est plus accru pour les personnes se trouvant dans un rayon de 200m que celles se trouvant à 600m de part et d'autre de la ligne²⁶. C'est ainsi que j'ai choisi ces deux valeurs comme limites pour déterminer des couloirs autour d'une ligne 380kV qui traverse une partie de la région liégeoise et luxembourgeoise. A l'aide du logiciel Google Earth²⁷, on a déterminé les coordonnées des différents pylônes électriques. En compilant ces coordonnées avec les données de l'AFCN, différentes cartes sont réalisées ainsi que des tableaux reprenant les mesures ponctuelles en radon dans ces limites (**Figure 4-5**).

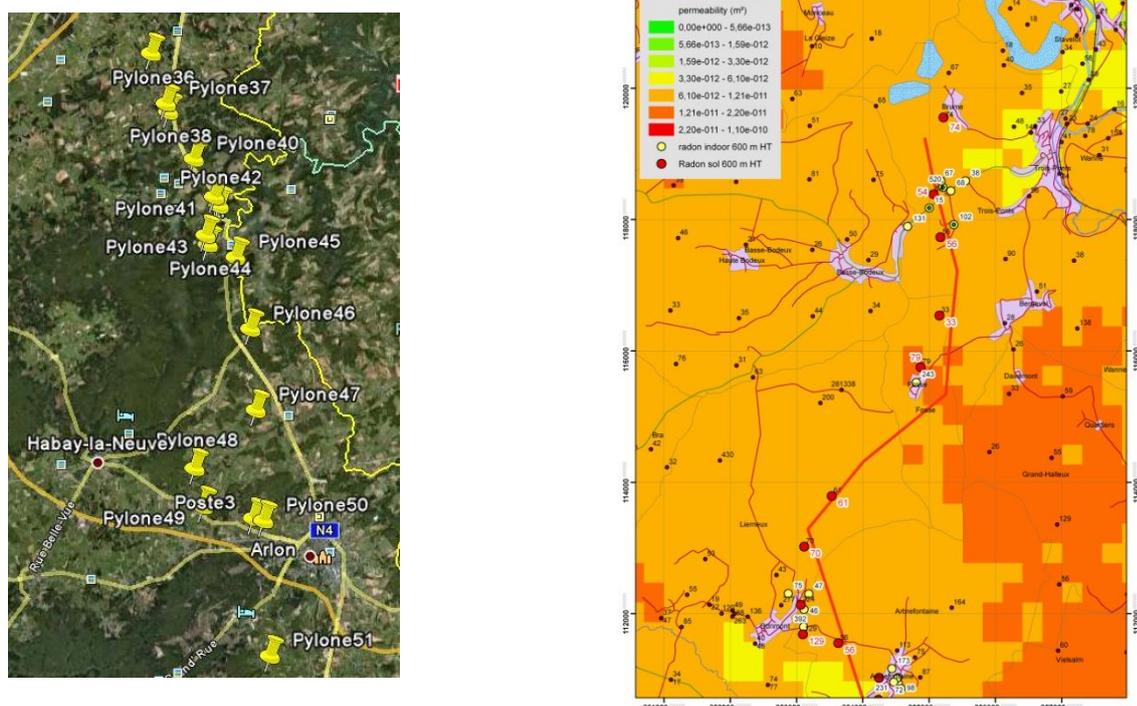


Figure 4-5: Carte de la ligne et exemple de carte contenant les données de concentration de radon dans un rayon de 200 et 600m de part et d'autre de la ligne

A l'aide de ces résultats, je vais réaliser des statistiques pour estimer l'influence de la ligne HT sur la concentration en radon.

²⁶ Cf. chap1.3.2.3 « Relation entre le champ magnétique et la leucémie »

²⁷ Google Earth est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaire.

J'ai décidé, comme pour l'exposition au champ magnétique, de calculer la médiane et la moyenne :

Mesures dans les habitations	200m (Bq/m ³)	600m (Bq/m ³)
Moyenne	46,6	297,9
Médiane	42,9	42,9
Mesures dans le sol		
Moyenne	46,6	56,2
Médiane	42,9	44,9

Tableau 4-2: Moyennes et médianes de la concentration en radon de part et d'autre de la ligne à HT

Je constate que la concentration en radon n'est pas plus importante dans un couloir de 200m que lorsque l'on se trouve plus éloigné de la ligne. Je tiens à signaler que, ici, les données sont prises pour l'ensemble de la ligne, sans tenir compte des différents types de roche ou de permittivité du sol.

Analysons ces deux situations :

- d'une part, l'ensemble des points pour une permittivité du sol plus ou moins identique
- d'autre part, le type de roche.

Voici les résultats obtenus pour les deux types de roche pour lesquels je possède le plus de données : le Grauwacke et le Schiste.²⁸

Les résultats suivants sont pris dans le sol.

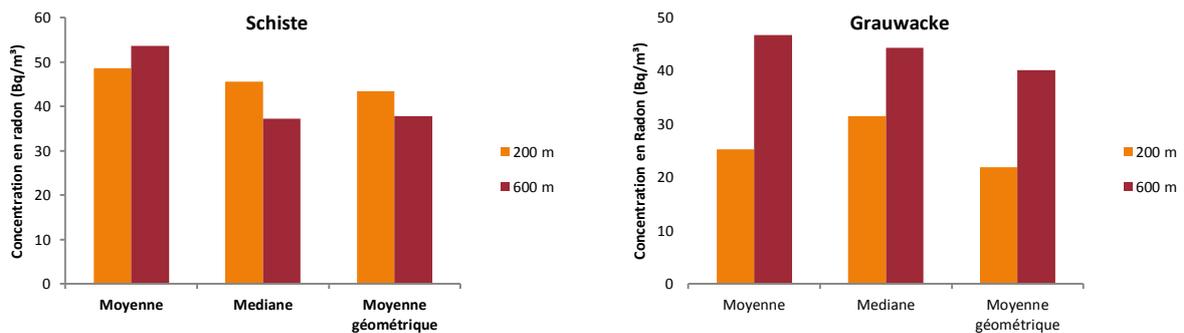


Figure 4-6: (a-b) Concentration en radon en fonction du type de roche

Je note que la distance par rapport à la ligne n'a pas d'influence sur la concentration en radon. Ce serait plutôt l'effet inverse en se fixant uniquement sur les résultats pour le Grauwacke. Néanmoins, je n'ose tirer aucune conclusion car l'échantillonnage est trop faible.

²⁸Pour rappel, le schiste est une roche d'aspect feuilleté, il peut s'agir d'une roche sédimentaire argileuse ou métamorphique. Le Graywacke est une roche uniquement argileuse d'origine marine.

J'ai ensuite regardé si la permittivité du sol avait une influence sur la concentration en radon. En rapport avec nos résultats, j'ai distingué trois catégories à analyser. D'une part, les permittivités relative <1, entre 1 et 100 et supérieures à 100.

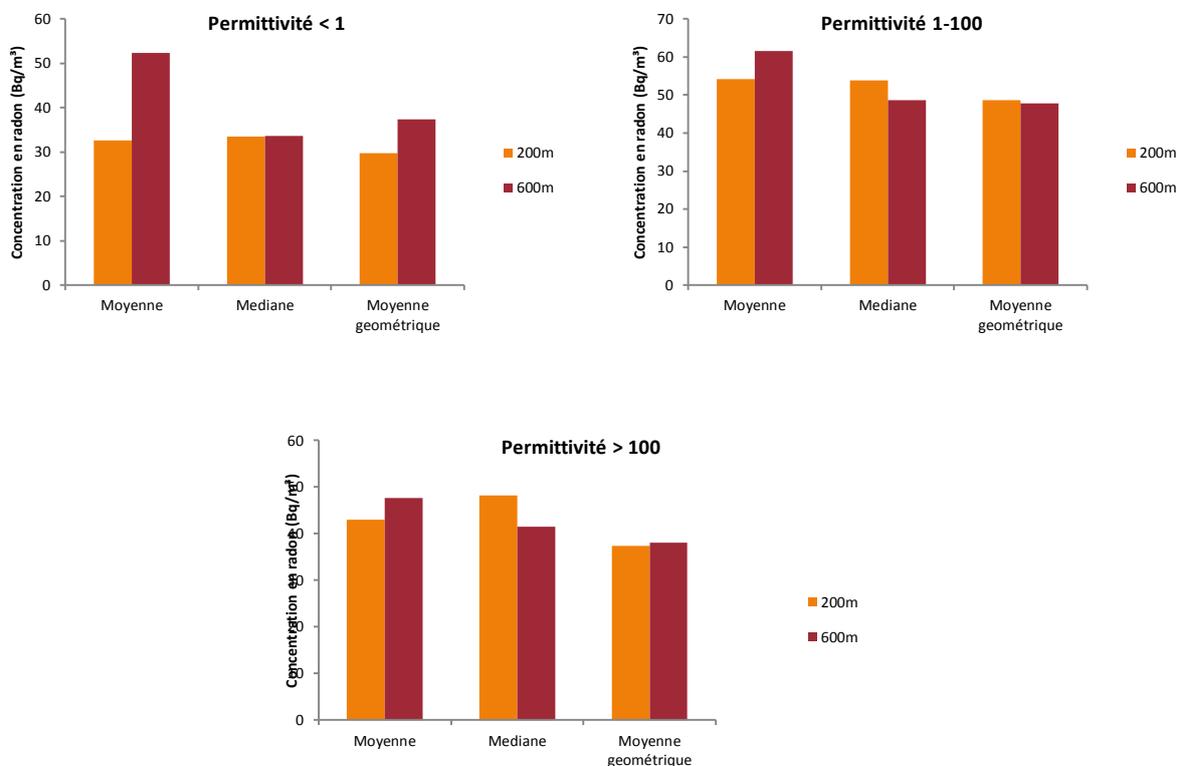


Figure 4-7: Concentration en radon en fonction de la permittivité

Je n'observe pas de lien entre la concentration en radon et la permittivité du sol pour une distance comprise entre 200 et 600m de part et d'autre de la ligne.

Je n'ai actuellement trouvé aucune relation entre la ligne à haute tension et la concentration en radon. Néanmoins, cela ne veut pas spécialement dire qu'il n'existe aucune corrélation. En effet, les paramètres d'influences sur la concentration sont nombreux et l'échantillon assez limité, il est donc difficile de d'émettre des certitudes, en l'état des connaissances.

Passons à la deuxième campagne de mesures.

4.5.2 MESURES DE LA CONCENTRATION EN RADON À PROXIMITÉ D'UNE LIGNE À HT

J'ai réalisé une mini campagne sur deux sites, visant à mesurer la concentration en radon dans le sol à proximité d'une ligne à haute tension.

Le principe de mes détecteurs est simple, supposons une boîte, type boîte de conserve, dans laquelle un petit trou est percé. Ce trou permet au radon d'entrer dans la boîte, ensuite on vient placer un filtre. Une fois à l'intérieur, lorsque le radon se désintègre, il émet une particule alpha qui est détectée à l'aide d'un film (style photographique) sur lequel vont venir s'imprimer les impacts du rayonnement. Ensuite, en comptant le nombre d'impacts, on détermine la concentration en radon.



Figure 4-8: Représentation graphique du système de mesures passif dans les habitations

J'ai déposé ces boîtes dans des trous creusés à plus ou moins 60 cm et les ai couvertes d'une autre boîte en métal pour éviter que le radon ne s'échappe. Pendant trois jours, les boîtes sont restées en place pour, ensuite, être envoyées pour analyse à l'AFCN.

Les sites que j'ai choisis sont dans des zones dégagées à proximité de ligne HT. D'après les cartes de l'AFCN, on sait que la concentration en radon y est élevée. Les deux endroits se trouvent en province du Luxembourg, l'un à Basse-Bodeux (lat : 50.362834- long : 5.847516) près d'un entrepôt, et le deuxième dans les bois rue de Lomré à Gouvy (Lat : 50.214948 - Long : 5.839791). J'ai disposé les boîtes perpendiculairement à la ligne.



Figure 4-9: Site de Basse-Bodeux

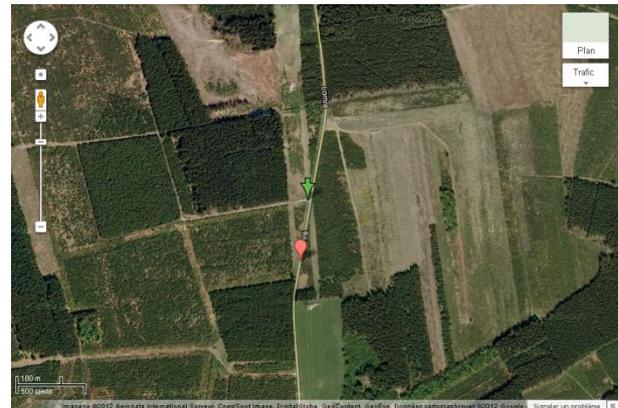


Figure 4-10: Site de Lomré

Elles ont été placées tous les 25 m et trois détecteurs ont été déposés au pied d'un pylône électrique. J'ai également, à chaque fois, mesuré le champ magnétique pour déterminer s'il existe une possible corrélation entre les deux grandeurs.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Site : Basse-Bodeux		
Distance par rapport à la ligne (m)	Champ magnétique (μT)	Concentration en radon (Bq/m^3)
0	0,41	502
25	0,2	1561
50	0,1	960
75	0,06	1213
100	0,03	657
Distance par rapport au pylône (m)		
0	0,2	410
25	0,2	1510
50	0,2	784
Site : Lomré		
Distance par rapport à la ligne (m)		
0	1,16	8778
25	0,63	5526
50	0,2	4473
75	0,07	7490
100	0,05	10165
125	0,02	8549
150	0,01	6076
Distance par rapport au pylône (m)		
0	0,4	8587

Tableau 4-3: Résultats pour le site de Basse-Bodeux et de Lomré

J'ai également transcrit les résultats sous forme de graphiques afin de visualiser s'il était possible de dégager un lien entre la ligne électrique et la concentration en radon (Figure 4-11) ou, en d'autres termes, la concentration en radon par rapport au champ magnétique (Figure 4-12). Je n'observe aucune tendance entre ces données.

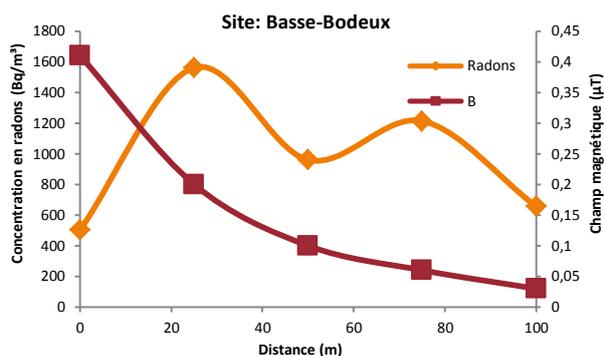


Figure 4-11: Concentration en radon site de Basse-Bodeux

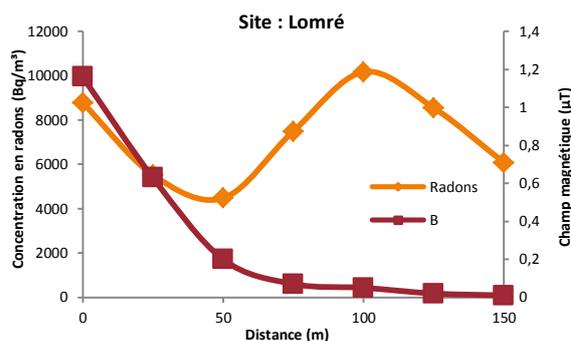


Figure 4-12: Concentration en radon site de Lomré

Je peux, dès à présent, entamer le dernier point de ce chapitre. Il a été mené en collaboration avec l'IRM. L'idée que j'ai voulu explorer est la suivante : « la foudre est généralement attirée par les objets élevés offrant au traceur descendant une distribution d'amorçage courte, ils font office d'entonnoir, collecteur conducteur. Les pylônes de lignes électriques offrent généralement une amorce de choix. Lors d'un impact sur la ligne, le courant va s'écouler vers la terre au niveau des pylônes d'encrage. Si les impacts sont plus nombreux aux abords de la ligne HT, leurs impacts pourraient créer des fissures dans la roche ! Le dégagement en radon pourrait être plus important. C'est dans un premier temps ce que j'ai voulu vérifier. »

4.5.3 IMPACT DE FOUDRE - LIGNE À HAUTE TENSION ET CONCENTRATION EN RADON

Lors de l'impact de foudre sur le sol, si l'impact est assez puissant, il va engendrer la fonte de la roche et former ce qu'on appelle des fulgurites. Les premières fulgurites furent découvertes dans le sable, à l'endroit où les éclairs fusionnent pour donner du verre pur.



Figure 4-13: Fulgurite trouvée dans le désert Lybique (WEB)

Des fulgurites peuvent également apparaître dans d'autres roches comme le schiste. La foudre étant capable de générer de tels phénomènes dans le sol, serait-elle capable d'avoir un impact sur la concentration en radon ?

La science a établi que la foudre est attirée par les objets en hauteur. De ce fait, les lignes électriques peuvent être un acteur de choix pour attirer les impacts.

Dans un premier temps, je me suis appliqué à récolter les données des impacts de foudre. Pour obtenir ceux-ci, j'ai fait appel à l'IRM. L'institut est en effet capable de me fournir avec précision les coordonnées des impacts ainsi que leur intensité.

Les limites choisies pour comparer les données sont les mêmes que précédemment c'est-à-dire, un couloir de 200 m de part et d'autre de la ligne par rapport à une zone de 600m. Je compare donc le nombre d'impacts de foudre au m² tout près de la ligne par rapport à ceux qui en sont plus éloignés.

Ensuite, si une différence significative apparaît, je me rends sur le site afin de mesurer la concentration en radon aux abords de quelques impacts pour vérifier l'hypothèse.

J'ai donc superposé les deux images (impacts et lignes) pour voir si l'on pouvait dégager une tendance statistique.

Le nombre total d'impacts de foudre et de coups de foudre dans un rayon de 600 m autour de la ligne est de 119. La répartition est la suivante :

Distance (m)	N°bre de coups de foudre
200	32
200 – 600	87

Tableau 4-4: Nombre de coup de foudre par rapport à la ligne haute tension

Ce qui nous donne 0,0076 coups par km² dans un couloir de 200m contre 0,0094 coups par km² entre 200 et 600 m de la ligne. Nous pouvons observer les impacts de foudre sur la carte ci-dessous.

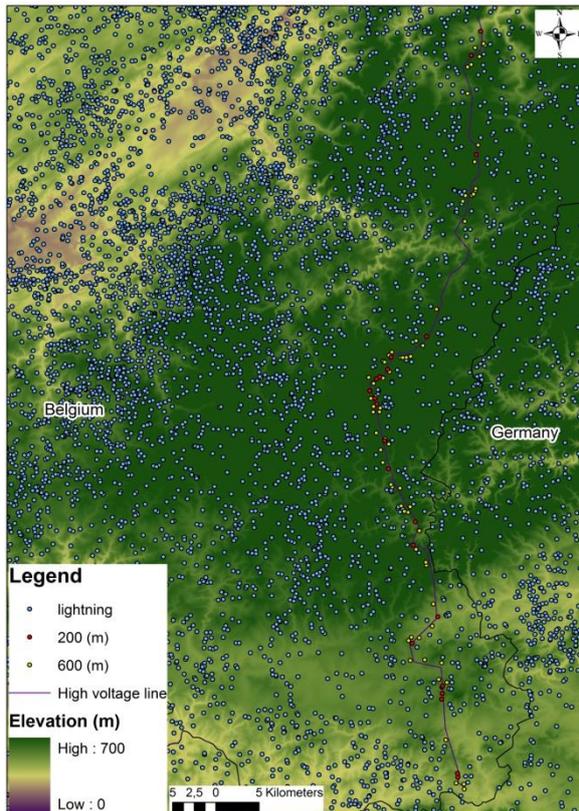


Figure 4-14: Impact de foudre le long de la ligne en fonction de l'altitude

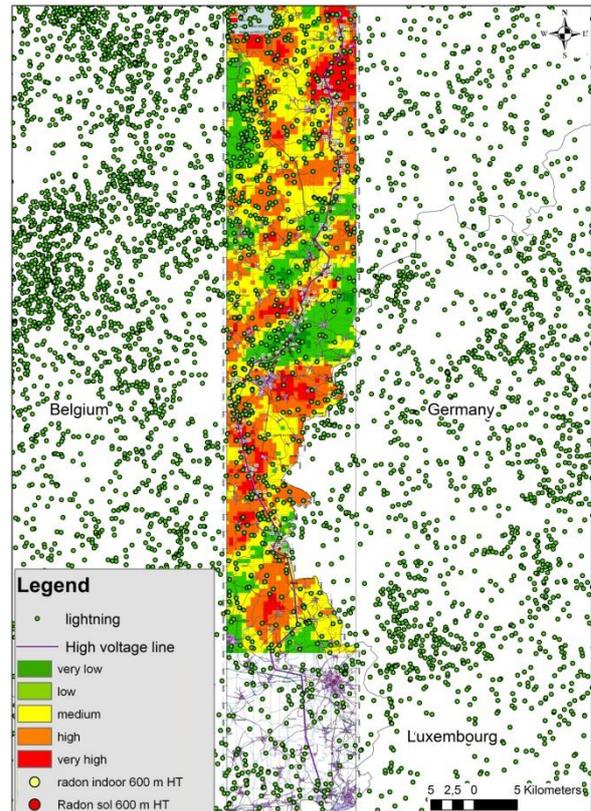


Figure 4-15: impacts de foudre le long de la ligne en fonction de la permittivité du sol

Les impacts de foudre sont donc moins nombreux à proximité de la ligne, ce qui ne corrobore pas mes hypothèses de départ. Je n'ai donc pas réalisé les mesures sur site. Cette hypothèse originale n'a donc pas donné de résultats. De plus, les fulgurites sont peu, voire pas du tout présentes dans nos régions, elles sont plus présentes dans les climats très chauds et sablonneux.

4.6 CONCLUSION

Ce chapitre se concentrait sur l'expérimentation et l'analyse pratique dans le but d'infirmer ou confirmer mes hypothèses. En ce qui concerne la première approche visant à évaluer la concentration en radon à proximité de la ligne (0 -200 m et 200 – 600m), mon expérimentation conclut que le radon dans les habitations et le sol, est à chaque fois plus élevé lorsqu'on est loin de la ligne. Mon hypothèse est donc invalidée.

En ce qui concerne la deuxième enquête, pour vérifier la corrélation entre le champ magnétique et la concentration, les résultats observés n'indiquent aucune diminution du gaz avec le champ magnétique. L'échantillon est faible. Dès lors, il m'est difficile de créditer cette expérience, statistiques à l'appui.

En ce qui concerne la troisième expérience, les données obtenues sont donc en désaccord avec les hypothèses initiales ; à savoir que les impacts seraient plus importants à proximité de la ligne. Or, d'après les mesures, ce fut l'inverse qui s'est révélé: 0,0076 impact par km² dans une zone de 200 m contre 0,0096 impact dans la zone comprise entre 200 et 600m.

Ce chapitre se voulait novateur en explorant de nouvelles pistes mais, il n'a malheureusement pas révélé de résultats concluants. Cela dit, ces pistes mériteraient sûrement de nouvelles investigations à plus grande échelle et plus de cas. Il est en effet difficile de tirer des conclusions probantes avec un faible échantillon.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Par la littérature épidémiologique, j'ai appris que la population infantile pourrait subir un risque légèrement accru de leucémie lorsqu'elle vit dans un champ magnétique supérieur à 0.4 μT . Au-delà des possibles biais de sélection (qui sont évités au maximum), l'augmentation faible du facteur de risque force les scientifiques du monde entier à trouver, s'il existe, un lien causal entre les champs magnétiques ambiants et la leucémie infantile. Faute de quoi, l'OMS ne pourra conclure à un effet réel sur la santé.

Depuis trente années, le monde scientifique est confronté à ces questionnements. De nouvelles hypothèses apparaissent. Parmi elles, j'ai approfondi celle des courants de contact ; puis, les résultats m'ont poussé à envisager une nouvelle option: l'hypothèse du radon. Afin de cheminer dans l'approfondissement désiré, j'ai dû recourir à de nombreuses techniques d'investigations. De cette manière, j'ai rapidement constaté l'importance de prendre en compte les installations électriques des particuliers. Vu les différences significatives entre l'Europe et les USA (à ce niveau, j'ai systématiquement mis en exergue les différences entre ces deux « mondes »), je me suis délibérément, et quasi exclusivement, orienté vers une valeur perturbatrice : le champ électrique interne à l'être humain.

Dans le premier chapitre, j'ai montré qu'en Europe, l'exposition aux champs magnétiques dans les habitations, est deux fois moins importante qu'aux Etats-Unis (en dehors d'influences externes) mais elle reste faible (quelques dizaines de nanoteslas). La seule source réelle de champ magnétique ambiant supérieur à 0,2 microtesla ne peut provenir que de sources extérieures telles des lignes à haute tension ou des câbles souterrains.

Dans le deuxième chapitre, je me suis attaqué à l'impact que pouvait avoir les sources externes (lignes à haute tension et câbles souterrains) de champs électriques, de champs magnétiques et des courants de contact sur le corps humain. J'ai également abordé le fait que les courants de contact étaient potentiellement les plus dangereux. En effet, ils sont capables d'induire un champ électrique interne 10 à 100 fois plus grand qu'un champ externe électrique ou magnétique typique à proximité d'installations à haute tension.

Le chapitre trois est le corps de cette thèse, pour plus de clarté il a été subdivisé en cinq sous-chapitres. Ils portent sur la mesure et la justification des courants de contact dans le parc résidentiel Belge et leur incidence sur la population. C'est la première fois qu'une telle étude est réalisée en Belgique, voire en Europe. Les cinq subdivisions sont les suivantes ;

1. Le protocole de mesures et la collecte d'informations ;
2. L'étude de l'impédance du corps humain ;
3. L'analyse des résultats et la justification des valeurs rencontrées ;
4. La modélisation électrique des courants de contact;
5. Discussion sur les courants de contact (comparaison avec les Etats-Unis).

Le protocole de mesure et la collecte d'informations

Celui-ci m'a permis d'avoir mon échantillon de base (150 maisons à travers la Belgique) et m'a permis de vérifier s'il existait une corrélation statistique entre les courants de contact et le champ magnétique.

L'étude de l'impédance du corps humain

L'impédance du corps humain n'étant pas constante et variant selon de nombreux paramètres (tension appliquée, humidité, état de la personne), j'ai entrepris de comparer ces différentes valeurs et d'évaluer cette valeur à très basse tension (~ 1 V). J'ai donc recensé les valeurs présentes dans la littérature, réalisé des modèles électriques, des simulations numériques et une campagne de mesures sur des personnes. La

compilation de l'ensemble de ces résultats m'a permis de donner une valeur moyenne de 2 kΩ. Ce qui est assez proche de la valeur de référence prise dans le protocole qui sera utilisé pour mon enquête.

Analyse des résultats et justification des valeurs rencontrées

J'ai estimé l'exposition de la population aux courants de contact et corrélé celle-ci avec le champ magnétique. Pour cela, différentes moyennes sont calculées. Ainsi, 80% des habitations ont des courants de contact inférieurs à 10μA et 5 % des habitations ont des courants supérieurs à 100μA. La moyenne se situant à 8μA.

Afin de vérifier la corrélation entre le champ magnétique et les courants de contact, j'ai calculé le risque relatif approché pour trois classes de champs magnétiques (<0.1μT ; 0.1- 0.3μT ; >0.3μT) et sur deux seuils (10μA et 100μA). J'observe une infime augmentation des courants de contact en regard du champ magnétique mais les intervalles de confiance sont tellement larges qu'aucun crédit ne peut être donné à ces résultats.

Du point de vue des simulations numériques, un faible accroissement des courants de contact apparaît lorsque le champ magnétique augmente. Comme cité précédemment, je n'ai pas retrouvé cette tendance dans la campagne de mesures.

CES DIFFÉRENTS RÉSULTATS M'ONT PERMIS DE DIRE QU'IL N'Y A PAS DE CORRÉLATION MAJEURE ENTRE LES COURANTS DE CONTACT ET LE CHAMP MAGNÉTIQUE (DU MOINS EN BELGIQUE).

C'est principalement cette conclusion qui m'a amené à poser une nouvelle hypothèse : celle de **l'effet capacitif des câbles électriques**. J'ai montré que les câbles de notre habitation sont capables, par effet capacitif, de faire circuler un courant dans les canalisations d'eau (arrivées d'eau et évacuations). Ce courant peut se retrouver en divers endroits de la maison notamment où l'on mesure notre courant de contact. J'ai réalisé des calculs théoriques, des simulations numériques ainsi que des mesures sur site afin d'estimer l'impact de ce courant capacitif. Des courants de fuite compris entre 5 et 15 μA/m (de canalisations électriques) ont été estimés en fonction du type de câble utilisé. Ces courants peuvent ensuite circuler « librement » dans la maison évidemment par des chemins de moindre impédance.

J'ai également montré que les courants de fuite qui se retrouvent entre l'arrivée et l'évacuation d'eau sont, en grande partie, responsables des courants de contact significatifs.

La modélisation électrique des courants de contact

J'ai, dans cette partie, réalisé un schéma électrique en rapport avec les résultats obtenus durant la campagne de mesures. J'ai constaté que la configuration de l'installation électrique va influencer les valeurs à encoder dans le modèle. Néanmoins, celui-ci, de conception simple, permet par de petits changements de justifier l'ensemble des valeurs rencontrées dans la campagne de mesures.

Discussion sur les courants de contact

Dans ce chapitre, j'ai exposé les différences entre les deux continents (USA et Europe) comme le schéma électrique, la fréquence du réseau, la tension d'alimentation et le système de mise à la terre. J'ai conclu que ces différences pouvaient, à elles seules, justifier en grande partie les différents résultats des deux enquêtes. En effet, les courants de contact peuvent être deux fois moins importants aux USA grâce à l'utilisation du 110V. Par contre, cette tension d'utilisation augmente indirectement d'un facteur deux le champ magnétique ambiant et favorise ainsi les corrélations statistiques obtenues au Etats-Unis. Leur système de mise à la terre avec de grandes boucles est, lui aussi, un facteur prépondérant dans cette étude.

Je conclus donc cette recherche par la mise en évidence des courants de contact comme facteur significatif (bien plus d'ailleurs que le champ magnétique ambiant) de création de champ électrique interne au corps humain. L'origine des courants de contact est, dans notre pays, liée aux pertes capacitives de nos installations électriques, même saines ; alors qu'elle n'est pratiquement pas liée au champ magnétique ambiant. J'ai pu

justifier que, très probablement, l'origine des courants de contact est très différente aux USA où, dans leur situation, ils sont liés au champ magnétique ambiant !

Malheureusement, ceci ne permet pas d'expliquer la faible augmentation observée de risque de leucémie infantile dans les méta-analyses épidémiologiques existantes sur base d'exposition moyenne au-delà de 0,4 μT . Il est vrai que je me suis concentré sur une seule variable influente : le champ électrique interne au corps humain, grandeur citée dans tous les documents modernes sur ce sujet.

J'ai terminé cette thèse par un chapitre que j'ambitionnais innovant. En effet, je trouvais important d'émettre une nouvelle hypothèse capable d'expliquer l'augmentation des leucémies infantiles à proximité des lignes HT. Des études épidémiologiques ont montré une augmentation de leucémies infantiles avec les mêmes facteurs que ceux liés aux lignes à haute tension, en fonction de la concentration en Radon. Dès lors, j'ai cherché à savoir s'il existait un lien entre ce phénomène et les lignes HT. Les résultats de mon enquête n'ont démontré aucun lien entre ces deux facteurs.

ENRICHISSEMENT PERSONNEL

Ce travail, sur une période de six années, a été particulièrement enrichissant. J'ai pu en effet, travailler avec des personnes de disciplines complètement différentes et m'intéresser à des domaines que je maîtrisais moins tels que la biologie ou la modélisation. J'ai pu, aux longs de ces années, côtoyer la communauté scientifique de près en assistant à différents meeting ou workgroup. J'ai également eu la liberté de pouvoir développer mes propres hypothèses.

Je conclurai cette thèse par une citation du physicien le plus connu Albert Einstein :

« Un problème sans solution est un problème mal posé. »

Cette citation a été choisie en regard du travail accompli et se justifie par l'approche que j'ai utilisée tout au long de cette thèse à savoir que lorsque l'on est dans une impasse, le fait de poser le problème autrement, aide à débloquer la situation et nous permet de rebondir sur de nouvelles hypothèses. J'ai pu, grâce à cette approche, justifier l'origine des courants de contact dans le parc résidentiel belge et pouvoir avancer différentes conclusions.

La solution au problème de leucémies infantiles pourra peut-être trouver réponse dans un autre problème ...

Suite à la rédaction de cette thèse, il me paraît important de conclure par les perspectives qui peuvent découler de ce travail.

D'un point de vue strictement sécuritaire pour les habitations possédant des courants de contact élevés, j'ai démontré que ces derniers peuvent être en partie supprimés par l'ajout d'un lien équipotentiel (**chapitre 3.4**). Il peut facilement être intégré aux éviers et baignoire et rendre insignifiant le courant de contact dans ces zones particulièrement vulnérables.

Je propose dès lors,

DE RENDRE PLUS CONTRAIGNANTES LES CERTIFICATIONS D'INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES DONNANT UN POIDS SIGNIFICATIF À L'EXISTENCE ET LA RÉALISATION CORRECTE DES LIENS ÉQUIPOTENTIELS (VOIR CORPS DU TEXTE). CES RECOMMANDATIONS SUPPRIMERAIENT LES COURANTS DE CONTACT SIGNIFICATIFS.

Comme je l'ai suggéré dans le chap 3.3 « Courants de contact, résultats de la campagne de mesures et justifications », il me semble important d'explorer plus en détail l'impact de la mise à la terre sur les courants de contact. En effet, la négativité de l'incidence du champ magnétique sur les courants de contact en Belgique et le lien positif obtenu aux USA peuvent être justifiés par le système de mise à la terre. Des investigations plus poussées peuvent donc être réalisées dans les pays comme l'Allemagne ou l'Angleterre où cohabitent les deux réseaux.

Dès lors, je propose

AUX ÉPIDÉMIOLOGISTES DE REFAIRE CERTAINES MÉTA-ANALYSES EN SÉPARANT LES RÉGIONS DU MONDE SELON LE TYPE DE SCHÉMA DE MISE À LA TERRE CHEZ LES PARTICULIERS (TN ET TT PAR EX).

Un dernier point pourrait faire l'objet d'éclaircissements comme l'exposition au radon en sachant que mes investigations n'ont révélé aucune corrélation. Mais les valeurs obtenues pour ce gaz dans les études épidémiologiques sont très proches des résultats obtenus avec le champ magnétique. Pour ces raisons, il est utile que la communauté scientifique ne perde pas de vue un possible lien causal entre ces deux valeurs.

- [1] Synergrid, "Statistiques," 2013. [Online]. Available: <http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=16898>.
- [2] ELIA, "Charge du réseau et prévisions de charge," [Online]. Available: <http://www.elia.be/fr/grid-data/consommation-previsions-de-charge>. [Accessed 04 décembre 2013].
- [3] J.L. Lilien and Al., "Effects of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF) on human beings. An electrical engineer viewpoint," *Revue E tijdschrift*, vol. 124, no. 3, septembre 2008.
- [4] J. Hoeffelman, "Assessment of the Electric and Magnetic field levels in the vicinity of the HV overhead power lines in Belgium," CIGRE session papers Group C3, Paris, 2009.
- [5] CIGRE, "Mittigation techniques of power-frequency mangetic fields originated from electric power systems," 2009.
- [6] EPA, Magnetic Field Measurements of Everyday Electrical Devices, Office of Radiation, 1992.
- [7] Web. [Online]. Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Weltkarte_der_Netzspannungen_und_Netzfrequenzen.svg.
- [8] A. Straume, "ELF-magnetic flux densities measured in a city environment in summer and winter," *Bioelectromagnetics*, vol. 29, no. 1, 2008.
- [9] WT.Kaune , LE. Zaffanella, "Assessing historical exposures of children to power-frequency magnetic fields," *J Expo Anal Environ Epidemiol*, vol. 4, no. 2, pp. 149-170, 1994.
- [10] CJ. Merchant, DC. Renew, J. Swanson, "Exposures to power-frequency magnetic fields in the home," *J Radiol Prot*, vol. 14, no. 1, pp. 77-87, 1994.
- [11] F. Perry, "Environmental power-frequency magnetic fields and suicide," *Health Phys*, vol. 41, no. 2, pp. 267-277, 1981.
- [12] M. Silva, "Power-frequency magnetic fields in the home," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 465-478, 1989.
- [13] UKCCSI, "Exposure to power-frequency magnetic fields and risk of childhood cancer," *Lancet*, vol. 354, 1999.

- [14] N. Wertheimer, E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer," *Am J Epidemiol*, vol. 109, no. 3, pp. 273-284, 1979.
- [15] D. Savitz, "Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields," *Am J Epidemiol*, vol. 128, no. 1, pp. 21-38, 1988.
- [16] WHO, Extremely Low Frequency Fields, Spain: the International Labour Organization, the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, and the World Health Organization., 2007.
- [17] S. London, "Exposure to residential electric and magnetic-fields and risk of childhood leukemia," *Am J Epidemiol*, vol. 134, no. 9, pp. 923-937, 1991.
- [18] LE. Zaffanella, GW. Kalton, "Survey of personal magnetic field exposure. Phase II: 1000-person," Lockheed Martin, Oak Ridge, 1998.
- [19] T. Dan Bracken, "The EMDEX project: residential study, final report," Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1994.
- [20] RE. Tarone, WT. Kaune, MS. Linet, EE. Hatch, RA. Kleinerman, LL. Robison, JDJr. Boice, S. Wacholder, "Residential wire codes: reproducibility and relation with measured magnetic fields," *Occup Environ Med*, vol. 55, pp. 333-339, 1998.
- [21] BG. Armstrong, JE. Deadman, G. Thériault, "Comparison of indices of ambient exposure to 60 Hertz electric and magnetic fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 11, no. 4, pp. 337-348, 1990.
- [22] PS. Marvada, P. Jutras, "Caractérisation des champs électrique et magnétique dans différents milieux," *Hydro-Québec*, no. IREQ: 91-035, p. 76.
- [23] B. Mfoihaya, *Thèse de Doctorat: Spécialité physique: Etude de l'exposition de la population française au champ magnétique 50 hertz*, Paris: Université Paris XI, 2010.
- [24] G. Thériault, M. Goldberg, AB. Miller, B. Armstrong, P. Guénel, J. Deadman, E. Imbernon, T. To, A. Chevalier, D. Cyr and C. Wall, "Cancer Risks Associated with Occupational Exposure to Magnetic Fields among Electric Utility Workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970–1989," *American Journal of epidemiology*, vol. 139, no. 6, pp. 550-572, 1994.
- [25] G. Draper, "Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: A case control study," *Br Med J*, vol. 330, no. 7503, p. 1290, 2005.
- [26] Ahlbom A. and al., "A pooled analysis of magnetif fields and childhood leukemia," *BR J Cancer*, vol. 83, no. 5, pp. 692-698, 2000.

- [27] C. Chantrain, "Epidémiologie des cancers de l'enfant," *Centre du cancer cliniques universitaires Saint-Luc*, vol. 12, pp. 4-6, Juin 2010.
- [28] J. Lambrozo, M. Souques, I. Magne, "Champs magnétiques de très basses fréquences 50-60 Hz : quelles valeurs limites d'exposition retenir, Environnement Risque et Santé," *John Libbey Eurotext*, vol. 7, main - juin 2008.
- [29] TW. Dawson, K. Caputa, MA. Struchly, "A comparaison of 60Hz uniform magnetic and electric induction in the human body," *Phys med Biol*, vol. 42, no. 12, pp. 2319-2329, 1997.
- [30] P. Dimbylow, "Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of the induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields," *Phys Med Biol*, vol. 50, no. 6, pp. 1047-1070, 2005.
- [31] R. Cech, N. Leitgeb, M. Pediaditis, "Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure," *Phys Med Biol*, vol. 7, pp. 177-186, 2008.
- [32] R. Cech, N. Leitgeb, M. Pediaditis, "Fetal exposure to low frequency electric and magnetic fields," *Phys Med Biol*, vol. 52, pp. 879-888, 2007.
- [33] H. Leuchtag, "Do sodium channels in biological membranes undergo ferroelectric-superionic," *Applications of Ferroelectrics*, pp. 279-283, 1990.
- [34] WEB1. [Online]. Available: http://fr.123rf.com/photo_6818877_reseau-de-neurones-dans-le-cerveau-humain-illustration-numerique.html.
- [35] P. Dimbylow, "Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution anatomically realistic model of the body," *Phys Med Biol*, vol. 43, no. 2, pp. 221-230, 1998.
- [36] P. Dimbylow, "Current densities in a 2mm resolution anatomically realistic model of the body induced by low frequency electric fields," *Phys Med Biol*, vol. 45, no. 4, pp. 1013-1022, 2000.
- [37] R. Kavet, LE. Zaffanella, "Contact voltage measured in residences: implications to the association between magnetic fields and childhood leukemia," *Bioelectromagnetics*, vol. 23, no. 6, pp. 464- 474, 2002.
- [38] N. Leitgeb, J. Schroettner, "Electric current perception study challenges electric safety limits," *J Med Eng Techno*, vol. 26, no. 4, pp. 168-172, 2002.
- [39] R. Chiu and M. Struchly, "Electric fields in bone marrow substructures at power-line frequencies," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 52, no. 6, pp. 1103-1109, 2005.

- [40] IEC, Use of conventional touch voltage limits - Application guide, 2007.
- [41] N. Leitgeb, J. Schroettner, "Electric current perception study challenges electric safety limits," *J Med Eng Technol*, vol. 26, no. 4, 2002.
- [42] B. Mattivi, DEA: Etude de la sensibilité des êtres humains au passage du courant, ULG, 2006 - 2007.
- [43] J. Schonek, "Les protections différentielles," *Cahier technique*, vol. 114, 2006.
- [44] C. Dalziel, "Electric shock hazard," *IEEE Spectrum*, vol. 9, no. 2, pp. 41-50, 1972.
- [45] R. Schmitt, Electromagnetics explained : a handbook for wireless/RF , EMC and High-speed electronics, Elsevier Science, 2002.
- [46] R. Jones, J. Jones, Electrical Safety in the Workplace, Quincy: Librabry of congress, 2000.
- [47] G. Kenneth Mastrullo, RA. Jones, JG. Jones, The Electrical Safety Program Book, Sudbury: Jones an Bartlett Publishers, 2003.
- [48] CK. Dyer, Patrick T. Moseley, Zempachi Ogumi, David AJ. Rand, Bruno Scrosati, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [49] G. Decat, I. Van den Heuvel, L. Mulpas, "Monitoring survey of the 50 Hz magnetic field for the estimation of the proportion of Belgian chilfren exposed to the epidemiological cut-off point of 0.2, 0.3, and 0.4 μ T," Flemish Environnemental Agency, Erembodegem, 2005.
- [50] R. Kavet and al., "Association of residential magnetic fields with contact voltage.," *Bioelectromagnetics*, vol. 19, no. 5, 2004.
- [51] F. Kind-barkauskas, S. Polonyi, J. Brandt, B. Kauhsen, Construire en béton: conception des bâtiments en béton armé, Presses Polytechniques et universitaire Romandes, 2006.
- [52] R. Kavet, "Residential magnetic fields and measures of neutral-to-earth voltage: variability within and between residences.," *Health Phys*, vol. 97, no. 4, pp. 332- 342, 2009.
- [53] M. Does, "Exposure to Electrical Contact Currents and the Risk of Childhood Leukemia," *Radiat Res*, vol. 175, no. 3, pp. 390-396, March 2011.
- [54] R. Kavet, C. Hooper, P. Buffler, M. Does, "The relationship between residential magnetic fields and contact voltage: a pooled analysis," *Radiation Research*, vol. 176, no. 6, pp. 807 - 815, December 2011.

- [55] World Health Organization, WHO handbook on indoor radon: a public health perspective, Genève: WHO Press, 2009.
- [56] Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Health Effects of Exposure to Radon: BEIR VI, Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.
- [57] S. Darby, "Radon: A likely carcinogen at all exposures," *Annals of Oncology*, vol. 12, no. 10, pp. 1341-1351, 2001.
- [58] D. Krewski, "A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer.," *J Toxicol Environ Health*, vol. 69, no. 7, pp. 533 - 597, April 2006.
- [59] NRPB, "Committee on Health Risks of Exposure to Radon, Board on Radiation Effects Research, Commission on Life Sciences, National Research Council," National Radiological Protection Board, Chilton, Didcot, Oxfordshire, 2004.
- [60] GM. Kendall and TJ. Smith, "Doses to organs and tissues from radon and its decay," *Journal of radiological protection*, vol. 22, no. 4, pp. 389-406, 2002.
- [61] B. Smith, "Iowa radon leukaemia study: a hierarchical population risk model for spatially correlated exposure measured with error," *Statistics in Medicine*, pp. 4619- 4642, 2007.
- [62] D. Henshaw, "Radon and childhood cancer," *British Journal of Cancer*, vol. 87, no. 11, pp. 1136-1338, 2002.
- [63] U. Kaletsch and Al., "Childhood cancer and residential radon exposure - result of a population-based case-control study in Lower Saxony (Germany)," *Radiat Environ Biophys*, vol. 38, no. 3, pp. 211-215, 1999.
- [64] J. Ziegler, "Video display terminals and radon," *PUBMED*, vol. 65, no. 3, pp. 252 - 264, September 1993.
- [65] FO. Fatokum and Al., Airbone particules and ion concentration levels in the environment of a strong corona ion emitting source, Salzburg, Austria, 2007.
- [66] David A. Grimes, Kenneth F. Schulz, "Making Sense of Odds and Odds Ratios," *Obstetrics & Gynecology*, vol. 111, no. 2, pp. 423-426, February 2008.
- [67] F. Jauzein, "Différentes façons d'exprimer un résultat d'étude épidémiologique," 08 03 2010. [Online]. Available: http://acces.ens-lyon.fr/acces/ressources/sante/epidemiologie/niveau_preuve/expression_risque. [Accessed 09 05 2013].

- [68] L. Ollivier, R. Michel, A. Spiefiel and JP. Boutin, "Les mesures d'association en épidémiologie," *Med Trop*, vol. 63, pp. 75-78, 2003.
- [69] ICNIRP, Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0-100kHz), ICNIRP, 2003.
- [70] d. C. Elia, "Elia Facts & Figures 2012 fr," Juin 2013. [Online]. Available: <http://www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/facts-and-figures/FactsFigures2012FR.pdf>. [Accessed 04 décembre 2013].
- [71] ICNIRP, Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0 - 100 kHz), Oberschleissheim, 2003.
- [72] "The Visible Human Project," [Online]. Available: http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.
- [73] Stat. [Online]. Available: http://www.farm.ucl.ac.be/tpao/portail_stat/cours_stat/des_indu/Incertitude/documents/incertitude/incertitude.pdf.
- [74] SGS, Règlement Général sur les Installations Electriques, Liège: EdiPro, Edition 2008 - 2009.
- [75] Anne Perrin, Martine Souques, Champs électromagnétiques, environnement et santé, Paris: Springer, 2010.
- [76] IARC, Part 2: some internally deposited radionuclides, 2002, pp. 1 -559.
- [77] J. Juutilainen, Measurements of 50 Hz Magnetic Fields in Finnish Homes, Imatran voima, 1989.
- [78] INRS, Le calcul d'incertitude dans les méthodes de mesurage de l'exposition professionnelle, 2005, p. Fiche G/V01.
- [79] I. N. d. s. p. d. Québec, Exposition aux champs électromagnétiques: Mise à jour des risques pour la santé et pertinence de la mise en œuvre du principe de précaution, Québec: Institut National de santé publique du Québec, 2006.
- [80] B. Marcheterre, Physique Générale 2 Electricité et magnétisme, Québec: DeBoeck Université, 1997.
- [81] R. Kavet, "The possible role of contact current in cancer risk associated with residential magnetic fields," *Bioelectromagnetic*, vol. 21, no. 7, 2000.

- [82] K. Caputa, "Modelling fields induced in humans by 50/60 Hz magnetic fields: Reliability of the results and effects of model variations," *Phys Med Biol*, vol. 47, no. 8, pp. 1391-1398, 2002.
- [83] J. Brix, "Measurement of the individual exposure to 50 and 16 2/3 Hz magnetic fields within the Bavarian population," *Bioelectromagnetics*, vol. 22, no. 5, pp. 323-332, 2001.
- [84] C. SaintBlanquet, "La matière en présence d'un champ électrique," [Online]. Available: http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/claude_saintblanquet/synophys/23macel/23macel.htm. [Accessed 17 05 2013].
- [85] C. Gary, "Effets biologiques d'un champ électrique Que peut dire l'électricien à ce sujet?," *Revue générale d'électricité*, pp. 5-18, juillet 1976.
- [86] RW. Cognill, J. Steward, A. Philips, "Extra low frequency electric and magnetic fields in the bedplace of children diagnosed with leukemia: a case-control study," *Eur J Cancer Prev*, vol. 5, no. 3, pp. 153-158.
- [87] D. Drolet, N. Goyer, B. Roberge, J. Lavoué, M. Coulombe, A. Dufresne, "Stratégies de diagnostic de l'exposition RAPPORT R-665," IRSST - Direction des communications, Montréal, 2010.
- [88] T. Dawson, "Induced electric fields in the human body associated with 60Hz contact currents," *IEEE TRans Biomed Eng*, vol. 48, no. 9, pp. 1000-1026, 2001.
- [89] DI. Gauv, E. Ngamga Djeutcha, P. Levallois, Exposition aux champs électromagnétiques, Québec: Institut national de santé public Québec, 2006.
- [90] KE. Donnelly, D. Agnew, "Exposure assesment methods for a childhood epidmiology study," Ontario Hydro Health and safety division, Pickering, 1991.
- [91] G. Claude, "Effets biologiques d'un champ électrique Que peut dire l'électricien à ce sujet?," *RGE*, pp. 5-18, 7 1976.
- [92] G. Dhatt, G. Touzot, Une présentation de la méthode des éléments finis, Quebec: Maloine S.A., 1981.
- [93] D. Henshaw, "Radon and Leukemia," *Lancet*, vol. 335, p. 1339, 1990.
- [94] JCH. Miles and RA. Algar, "Measurements of radon decay product concentrations under power lines," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 74, no. 3, pp. 193-194, 1997.
- [95] M. Kabuto, "Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan," *Int J Cance*, vol. 119, no. 3, pp.

643-650, 2006.

- [96] W. Kaune, "Residential magnetic and electric fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 8, no. 4, pp. 315-335, 1987.
- [97] W. Kaune, "Development of a protocol for assessing time-weighted-average exposures of young children to power-frequency magnetic fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 15, no. 1, pp. 33-51, 1994.
- [98] R. Kavet, "Evaluation of biological effects, dosimetric models, and exposure assessment related to ELF electric- and magnetic- field guidelines," *Appl Occup Environ Hyg*, vol. 16, no. 12, 2001.
- [99] R. Kavet, "Contact current hypothesis: summary of results to date," *Bioelectromagnetics*, vol. 26, no. 7, 2005.
- [100] R. Kavet, JM. Silva, D. Thornton, "Magnetic field exposure assessment for adult residents of Maine who live near and far away from overhead transmission lines," *Bioelectromagnetics*, vol. 13, no. 1, pp. 35-55, 1992.
- [101] N. Leitgeb, J. Schroettner, R. Cech, "Electric current perception of the general population including children and the elderly," *J Med Eng Technol*, vol. 29, no. 5, 2005.
- [102] P. Levallois, D. Gauvin, S. Gingras, J. St-Laurent, "Comparaison between personal exposure to 60 Hz magnetic fields and stationary home measurements for people living near and away from 745 kV power line," *Bioelectromagnetic*, vol. 20, no. 6, 1999.
- [103] M. Linet, "Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children," *New Engl J Med*, vol. 337, no. 1, pp. 1-7, 1997.
- [104] D. Mader, "A simple model for calculating residential 60-Hz magnetic fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 11, no. 4, pp. 283-296, 1991.
- [105] M. McBride, "Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada," *Am J Epidemiol*, vol. 149, no. 9, pp. 831-842, 1999.
- [106] M. Cucherat, "Interprétation des essais cliniques," [Online]. Available: <http://www.spc.univ-lyon1.fr/polycop/>. [Accessed 9 Mai 2013].
- [107] J. Michaelis, "Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany," *Cancer Causes Control*, vol. 8, no. 2, pp. 167-174, 1997.
- [108] J. Michaelis, "Combined risk estimates for two German population-based case-control studies on

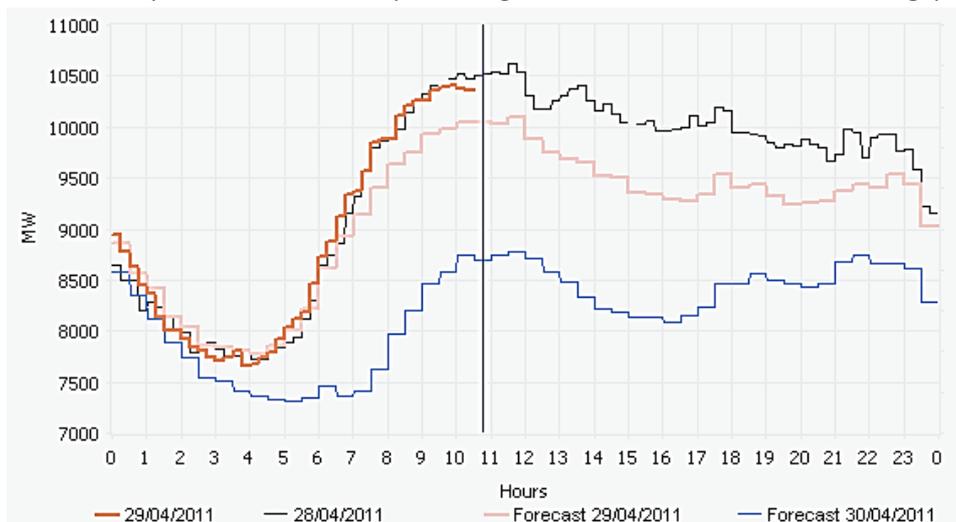
- residential magnetic fields and childhood acute leukemia," *Epidemiology*, vol. 9, no. 1, pp. 92-94, 1998.
- [109] ML. McBride , RP. Gallagher, G. Thériaul, BG. Armstrong, S. Tamaro, JJ. Spinelli, JE. Deadman, S. Fincham, D. Robson and W. Choi, "Power-Frequency Electric and Magnetic Fields and Risk of Childhood Leukemia in Canada," *American Journal of Epidemiology*, vol. 149, no. 9, pp. 831-842, 1999.
- [110] A. Preece, "Domestic magnetic field exposures in Avon," *Phys Med Biol*, vol. 41, no. 1, pp. 71- 81, 1996.
- [111] J. Schüz, "Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukaemia: Results from a German population-based case-control study," *Int J Cancer*, vol. 91, no. 5, pp. 728-735, 2001.
- [112] S. Darby, E. Whitley, P. Silcocks, B. Thakrar, M. Green, P. Lomas, J. Miles, G. Reeves, T. Fearn, R. Doll, "Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study.," August 1998. [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2063032/>.
- [113] N. Wertheimer, E. Leeper, "Adult cancer related to electrical wires near the home," *Int J Epidemio*, vol. 11, no. 4, pp. 345-355, 1982.
- [114] KH. Yang, N. Ju, SH. Myung, "Sample of Korean's occupational and residential," *Bioelectromagnetics Society*, vol. 114, no. 10, pp. 188-189, 2004.
- [115] L. Zaffanella, "Survey of Residential Magnetic Field Sources. Final Report TR 102759 (2 volumes)," Prepared by the High Voltage Transmission Research Center for the Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif, 1993.
- [116] T. Rion, *TFE: Modélisation stochastique des courants induits dans le coprs humain*, ULG, 2010.
- [117] ICNIRP, *Icnirp guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)* , Health Physics, 2010.
- [118] R. Kavet, LE. Zaffanella, "Contact voltage measured in residences: implications to the association between magnetic fields and childhood leukemia," *Bioelectromagnetics*, vol. 23, no. 6, 2002.
- [119] C. d'Eupen. [Online]. Available: <http://www.eupen.com/cable/>.
- [120] R. Lorphèvre, "Les méthodes numériques en électromagnétisme (NUMELEC 2008)," <http://orbi.ulg.ac.be//handle/2268/22986>, Liège, 2008.

ANNEXE 1 : RÉPARTITION DES LIGNES ÉLECTRIQUES EN BELGIQUE

Répartition des lignes ci-dessous (Tableau 0-1).

Longueur géographique du réseau à haute tension (en km) (situation au 28/05/2010)			
Tension	Lignes aériennes	Câbles souterrains	Total
380 kV	891	0	891
220 kV	297	0	297
150 kV	2008	415	2423
70 kV	2388	282	2670
36 kV	8	1928	1936
30 kV	22	140	162
Total	5614	2765	8379

Tableau 0-1 : Répartition des tensions pour les lignes aériennes et souterraines en Belgique [2]



Valeurs				
	Consommation 29-04-2011	Consommation 28-04-2011	Prévision 29-04-2011	Prévision 30-04-2011
Minimum :	7665 MW (04:00)	7719 MW (04:30)	7777 MW (04:15)	7312 MW (05:15)
Maximum :	10401 MW (10:00)	10618 MW (11:45)	10098 MW (11:45)	8773 MW (11:45)
Valeur actuelle :	10357 MW (10:30)	10468 MW (10:30)	10041 MW (10:30)	8747 MW (10:30)

Figure 0-1 : exemple d'un diagramme de charges journalières [2]

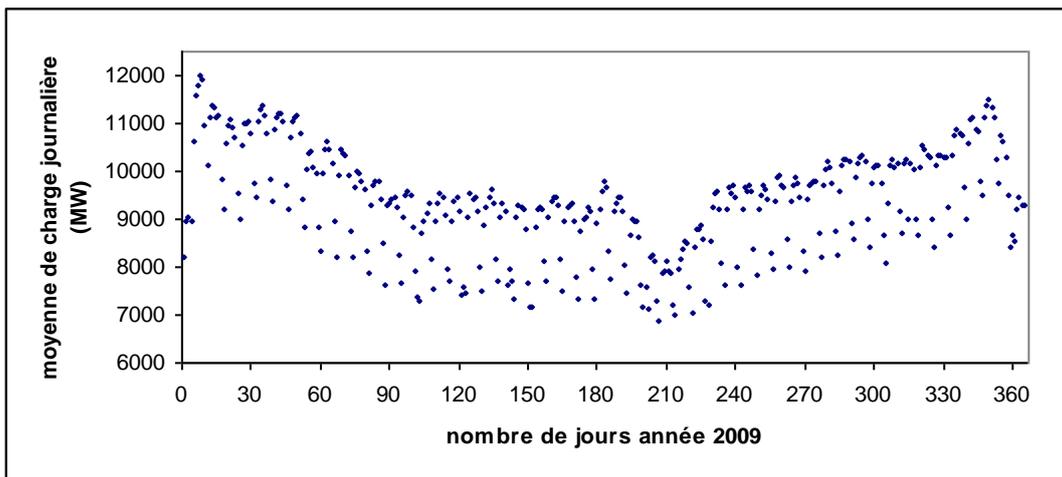


Figure 0-2: Répartition de la charge moyenne au cours de l'année 2009 [2]

ODDS RATIO ET RISQUE RELATIF

Dans toute enquête, différents moyens statistiques sont utilisés pour vérifier des liens de causalité. Le premier facteur que je vais décrire est l'Odds ratio (OR) : il permet de déterminer la puissance d'une association entre des variables aléatoires qualitatives. Ainsi, si l'on suppose que la probabilité de développer une maladie dans un groupe A de cas est « p », et que la probabilité est de « q » dans le groupe de témoins B, l'Odds ratio est donné par :

$$OR = \frac{p * (1 - q)}{q * (1 - p)}$$

Exemple : Prenons, un groupe de 100 enfants allant à la crèche, dont 50 ont développé la rougeole, de l'autre, un groupe témoin de 100 enfants n'allant pas à la crèche dont seulement 10 ont contracté la rougeole, l'Odds ratio sera de :

$$OR = \frac{0.5 * (1 - 0.1)}{0.1 * (1 - 0.5)} = 9$$

L'OR est toujours supérieur à 0. S'il est compris entre 0 et 1, cela signifie que le risque de se développer augmente dans le groupe témoin. Dans le cas où il est plus élevé que 1, le risque est accru dans la population étudiée. Celui-ci est d'autant plus important que l'Odds ratio est grand.

Il ne faut pas confondre l'OR avec le risque relatif RR. Le risque relatif est exprimé comme un multiple d'un groupe par rapport à l'autre. Dans le cas cité ci-dessus, le risque relatif serait de :

$$RR = \frac{p}{q} = \frac{0.5}{0.1} = 5$$

Sur base de l'exemple proposé, cela signifie que les enfants qui vont à la crèche ont 5 fois plus de chance d'attraper la rougeole que les autres.

L'Odds ratio donne une meilleure approximation du danger que le risque relatif dans la configuration où l'un des deux groupes exposé est largement en minorité (< 10 %) ([66] [67] [68]). Dans les cas qui nous intéressent, nous verrons que c'est bien l'OR qui est le plus souvent utilisé.

EVALUATION DE L'EXPOSITION: LES MOYENNES, LES ÉCARTS-TYPES ET INTERVALLES DE CONFIANCE.

Lors de l'étude de l'exposition de la population aux champs magnétiques, les métriques d'évaluation comprennent généralement la moyenne arithmétique et la moyenne géométrique. Pour chaque estimateur, j'introduirai son écart type ainsi que sa médiane.

Bien connue du public, la moyenne arithmétique indique le rapport entre la somme d'une distribution d'un caractère statistique quantitatif discret par le nombre de valeurs dans la distribution.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

L'écart type dans le cas où l'on suppose une distribution normale des résultats peut être déterminé par :

L'écart type

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Où

- x_i : la $X^{\text{ème}}$ valeur, obtenue sur une série de n mesures d'un échantillon
- \bar{x} : la valeur moyenne, sur la série de n mesures
- n : nombre de mesures

L'intervalle de confiance sera déterminé par :

$$x_i \pm ts$$

- t , le coefficient de Fisher-Student.

La moyenne géométrique quant à elle s'exprime par :

$$\ln(M_G) = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i)}{n}$$

L'écart type géométrique est donné par :

$$\ln(s_G) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \ln(M_G)]^2}{n - 1}}$$

Et l'intervalle de confiance sera exprimé par :

$$\ln(IC) = \ln M \pm t \left[\frac{\ln(s_G)}{\sqrt{n}} \right]$$

Où

- M : est l'estimateur de la moyenne arithmétique donné par

$$M = M_G \times S_G^{\frac{1}{2} \ln(s_G)}$$

La médiane est représentée comme étant la valeur centrale lorsque les données sont triées par ordre croissant ou décroissant.

Les résultats seront donnés avec un intervalle de confiance (par ex. 95%). Je vais faire en sorte d'appréhender ce paramètre et ainsi déchiffrer l'influence qu'il peut avoir sur l'interprétation des résultats. En effet, dans les paragraphes qui vont suivre, je donne généralement le risque relatif ou l'Odds ratio avec son intervalle de confiance.

Pour rappel, si le risque relatif est supérieur à 1, le phénomène a le plus de chance de se produire dans l'échantillon. Ainsi, dans le cas où un intervalle de confiance à 95% donne une fourchette de valeurs du risque relatif dont la borne inférieure est plus petite que 1 et la borne supérieure plus grande que 1 ; cela signifie que le phénomène a autant de chance d'être non significatif que significatif. Dès lors, Ces résultats sont statistiquement insignifiants.

Exemple : Dans le cas d'un test sur l'efficacité d'un médicament sur un échantillon, on remarque une diminution non significative du risque avec un OR de 0,86 (IC = [0,72- 1,25]). Il apparaît clairement que ce résultat non significatif n'autorise pas à conclure à l'absence d'effets. Ce résultat est compatible avec une « réduction » relative importante, borne inférieure à 0,72. Mais, l'intervalle est également très large. D'autant qu'il possède une borne supérieure à 1,25 qui renforce la possibilité de l'inefficacité du médicament. Il m'est donc impossible de conclure à un effet positif ou négatif du médicament.

Multimètre à affichage digital

Le multimètre utilisé pour la mesure des tensions est le multimètre digital de chez Facom 711.



Figure 0-1: multimètre Facom

Spécifications	
	Multimètre à affichage digital Facom 711
Circuits protégés par fusible	0,4 A HPC - 600 V; 12 A HPC - 600 V.
Tension continue et alternative	0,1 mV à 600 V
Courant continu et alternatif	10 _A à 10 A
Résistances	0,1 à 40 M
Fréquences	0,01 Hz à 200 kHz
Capacité	1 pF à 40 _F
Test diode	
Test de continuité	
Touche Hold pour blocage de l'écran	
Ecran rétro-éclairé	
Arrêt automatique	
Bargraph	
Conformité aux normes	double isolation CEI 1010-1
Indice de protection	IP50
Alimentation	2 piles 1,5 V (type R6)
Dimensions	177 x 64 x 42 mm
Poids	0,575 kg

Tableau 0-1: Caractéristiques du multimètre

Mesureur de terre

Principe de la mesure de la résistance de terre

Avant de voir comment on mesure la résistance d'une prise de terre, voyons comment on mesure la résistivité de la terre. Les deux valeurs, résistivité et résistance d'une prise de terre, sont liées. La méthode de mesure aussi.

Quatre électrodes sont disposées en ligne sur le sol, équidistantes d'une longueur a .

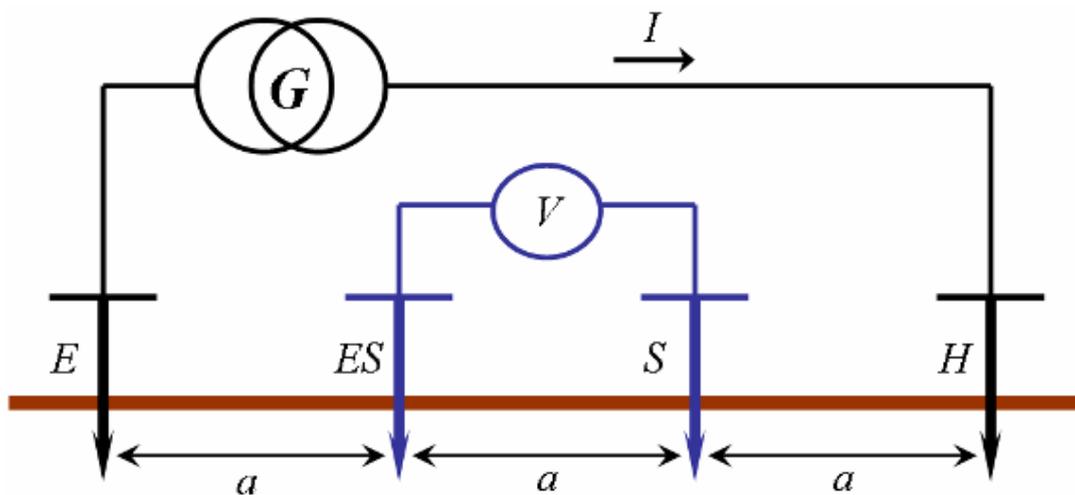


Figure 0-2: Technique de mesure de la résistance de terre

Entre les deux électrodes d'extrémité (E et H), on injecte un courant de mesure I grâce à un générateur. Entre les deux électrodes centrales (S et ES), on mesure le potentiel V grâce à un voltmètre.

L'appareil de mesure utilisé est un Ohmmètre de terre classique qui permettra l'injection d'un courant et la mesure de V .

Mesure de résistance d'une prise de terre existante:

Dans le cadre de cette campagne de mesures, nous nous positionnons dans le cas où la prise de terre existe déjà. Nous voulons vérifier sa résistance et si elle correspond aux normes de sécurité. Le RGIE (Règlement général des installations électriques) demande une résistance de terre inférieure à 30. E est la prise de terre à mesurer. On fait circuler à l'aide du générateur approprié G , un courant alternatif I constant à travers la prise auxiliaire H dite "prise d'injection courant", le retour se réalisant par la prise de terre E .

On mesure la tension V , entre les prises E et le point du sol où le potentiel est nul au moyen d'une autre prise auxiliaire S dite "prise de potentiel". Le quotient de la tension V ainsi mesuré par le courant constant injecté I , donne la résistance recherchée :

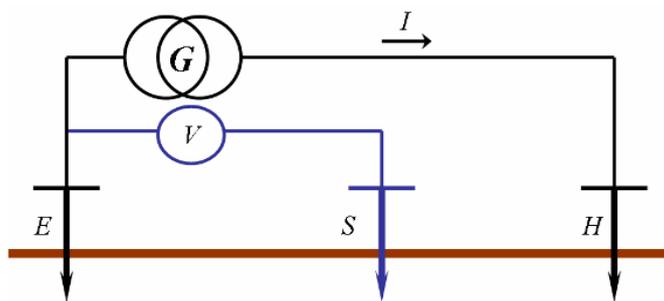


Figure 0-3: Mesure de la résistance de terre

Remarque importante :

Il ne faut pas oublier d'ouvrir le sectionneur de terre pour la mesure sinon on va injecter un courant dans le réseau de terre de l'installation inspectée avec tous les risques pour les appareils et les utilisateurs que cela comporte. Sans oublier les courants de fuite ou de défaut pouvant venir perturber la mesure.

Metrix MX435B



Figure 0-4: Appareil de mesure de terre Metrix MX435B

Appareil multifonction destiné aux organismes de contrôle, installateurs, artisans et services de maintenance. Le MX435B dispose des fonctions essentielles pour vérifier la sécurité des installations électriques selon les normes en vigueur.

Spécifications	
	Contrôleur d'installation multifonction
Contrôlable par ordinateur	Non
Méthode de mesure de terre	Avec piquet
isolement minimum	500 kΩ
isolement maximum	199,9 MΩ
Tension d'essai	500 V
Mesure de tension max	600 V
Test différentiel	30, 500, 650 mA
Niveau de sécurité	CAT III
Surtension sécurité	CAT III 300V
Caractéristiques supplémentaires	Continuité, courant AC et courant de fuite
Dimension	s 19,5 x 9,7 x 5,5 cm
Poids	500 grammes

Tableau 0-2: Caractéristiques du mesureur de terre

Emdex II

EMDEX II est un puissant système de mesure des champs d'induction magnétique, basé sur l'enregistreur d'exposition à ces champs de chez EPRI (Electric Power Research Institute). L'EMDEX II et son logiciel EMCALC peuvent être utilisés pour l'évaluation d'une exposition, pour des projets de recherche et des mesures générales de champs d'induction magnétique. L'ordinateur de bord de l'EMDEX II enregistre ce champ sur le terrain, avec les paramètres définis par l'utilisateur. On peut ensuite, télécharger les résultats sur un PC pour réaliser l'analyse.

L'EMDEX II peut collecter jusqu'à vingt ensembles de données distincts sur une période de plusieurs jours avant de devoir télécharger les données enregistrées. Le système comprend un câble d'interface avec le logiciel EMCALC pour le transfert, le stockage et l'analyse des données sur un ordinateur et un manuel de l'utilisateur. Le tableau ci-dessous (Tableau 0-3) nous donne les caractéristiques techniques de l'EMDEX II.



Figure 0-5: Appareil servant à la mesure du champ magnétique

Spécifications	
Caractéristiques	
Mesureur multifonction de champ magnétique	
Enregistrement	Oui
Données collectées	Mesures en cours
Plage de mesure	0,1 à 3 mG (0,01 à 300 μ T)
Résolution	0,1 mG(0; 01 μ T)
Précision	+ /- 1%
Fréquence Plage de mesures :	40 - 800 Hz
Harmoniques :	100 - 800 Hz
Taux d'échantillonnage	1,5 Secondes
Mémoire interne	156 Kb ou 512 Kb
Affichage	(mG ou mT) Alphanumérique 8-Charactères
Méthode de mesure	True RMS
Temps de vie de la batterie	Alcaline : jusqu'à 7 jours Lithium : jusqu'à 21 jours
Dimensions	16,8 x 6,6 x 3,8 cm
Poids	341 grammes

Tableau 0-3: Caractéristiques du mesureur de champ magnétique

Fluke 175

Multimètre polyvalent de terrain ou de banc.

Ce multimètre intègre toutes les fonctionnalités nécessaires à l'identification de problèmes électriques, électromécaniques, de chauffage et de ventilation. Très simple d'utilisation, il permet la mesure des valeurs efficaces vraies (TRMS).



Figure 0-6: multimètre de terrain

Spécifications	
Fonctions	Maximum
Résolution	
Multimètre polyvalent	
Tension DC	1000 V 0,1 mV
Tension AC	1000 V 0,1 mV
Courant DC	10 A 0,01 mA
Courant AC	10 A 0,01 mA
Résistance	50 M 0,1
Capacité	10000 _F 1 nF
Fréquence	100 kHz 0,01 Hz
Température	- 40 _C/ +400 _C 0,1 _C
Temps de vie de la batterie	Alkaline : jusqu'à 200 h
Dimensions	19 x 8,9 x 4,5 cm
Poids	420 grammes

Tableau 0-4: Caractéristiques du multimètre de terrain

Oscilloscope TPS 2024:

Cet oscilloscope à l'avantage d'avoir 4 canaux isolés. De plus, ce modèle peut fonctionner sur accumulation, ce qui est adapté pour nos mesures sur terrain. Il peut également être utilisé avec une probe HT.

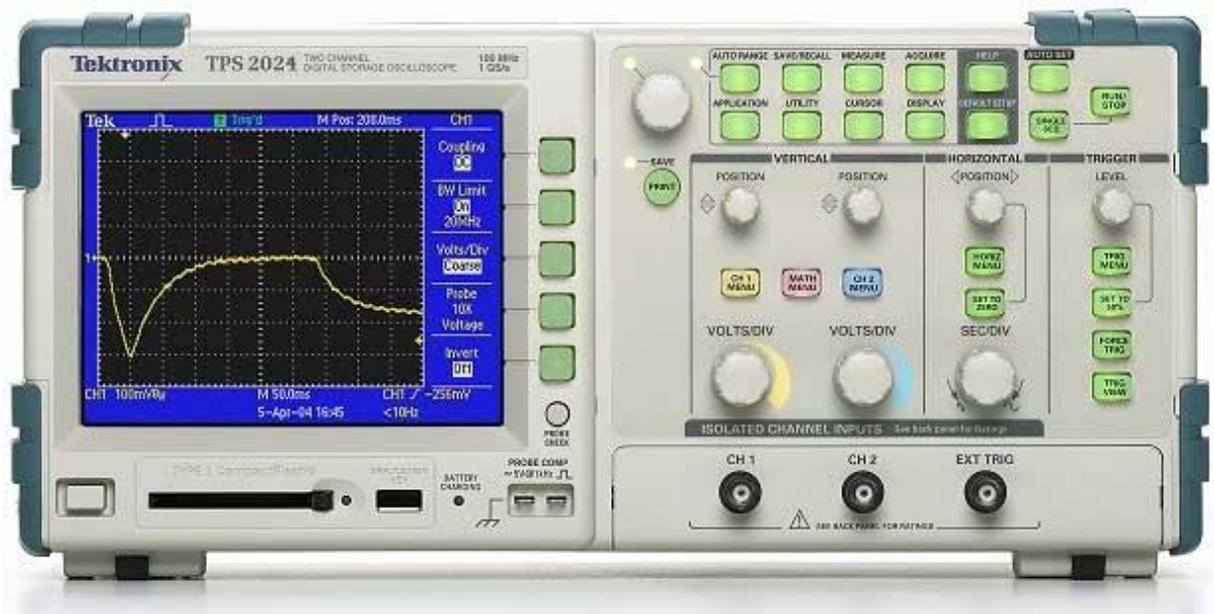


Figure 0-7: Oscilloscope double trace

Spécifications	
Isolated Channels	4
Bandwidth*2 (MHz)	200
Sample Rate (GS/s) per Channel	2.0
Isolated External Trigger Input (Impedance isolated)	Oui
Vertical Resolution	8 bit
Vertical Sensitivity	2mV à 5V
DC Vertical Accuracy	+/- 3 %
Max Input Voltage (1 M Ω)	300 VRMS CAT II at BNC signal to BNC shell / II, 1000 VRMS CAT II at probe tip to earth ground with optional P5120 passive
Position range	2 mV to 200 mV/div ± 2 V / >200 mV to 5 V/div ± 50 V
Linear Dynamic Range	± 5 div
Time Base Range	2.5 ns to 50 s/div
Time Base Accuracy	50 ppm
Input Impedance	1 M Ω $\pm 2\%$ in parallel with 20 pF

Tableau 0-5: Caractéristiques de l'oscilloscope

Probe HT – P5120 :

Cette probe passive à l'avantage de réaliser des mesures isolées de la terre et d'autres tensions. De plus elle est adaptée aux mesures de tension rencontrées dans la campagne.



Figure 0-8: Probe Haute Tension

Spécifications	
Bande passante	DC to 200 MHz
Tension AC	1,000 VRMS CAT II
Tension AC	Floatable up to 600 VRMS CAT II or 300 VRMS CAT III
Atténuation	20X
Compensation	15 to 25 pF Compensation Range

Tableau 0-6: Spécifications de la probe utilisée dans les mesures de déphasage