

# CALCUL DU CHAMP MAGNÉTIQUE RAYONNÉ

## PAR DEUX FILS RECTILIGNES PARALLÈLES

### PARCOURUS PAR UN COURANT ELECTRIQUE

<b>1 -</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
1.1 -	But du document .....	2
1.2 -	Topologie des câbles de distribution du 230 V .....	2
<b>2 -</b>	<b>FORMULE DU CHAMP MAGNÉTIQUE RAYONNÉ PAR UN CABLE ISOLÉ.....</b>	<b>3</b>
2.1 -	Équation du champ magnétique rayonné par un fil linéaire .....	3
2.1.1 -	<i>Valeurs du champ magnétique rayonné par un fil linéaire dans des configurations repère ...</i>	3
2.2 -	Équation du champ rayonné par deux fils linéaires écartés.....	5
2.2.1 -	<i>Paramètres : .....</i>	6
<b>3 -</b>	<b>CALCUL DU CHAMP MAGNETIQUE CPL DANS DIVERSES CONFIGURATIONS.....</b>	<b>7</b>
3.1 -	Câbles rapprochés dans une rallonge électrique.....	7
3.1.1 -	<i>Vrillage de la rallonge : .....</i>	7
3.1.2 -	<i>Homologation du rayonnement du courant CPL LINKY dans une rallonge électrique : .....</i>	8
3.1.3 -	<i>Mesure expérimentale avec une rallonge électrique avec fils écartés de 2 millimètres : .....</i>	9
3.1.4 -	<i>Influence de l'écart entre fils .....</i>	9
3.2 -	Câbles aériens en vis-à-vis de chambre à l'étage d'habitations.....	11
3.3 -	Champ magnétique sur le trottoir sous les lignes électriques aériennes.....	12
3.4 -	Champs magnétiques rayonnés par le courant CPL dans l'habitat .....	13
3.4.1 -	<i>Champ magnétique émanant d'un radiateur électrique mural .....</i>	13
3.4.2 -	<i>Champ magnétique dans une pièce à vivre par prises murales.....</i>	14
	<i>Rayonnement sur les appartements dessus et dessous : .....</i>	15
	<i>Interrupteur Va et Vient : .....</i>	16
	<i>Estimation du courant CPL dans des ampoules basse consommation : .....</i>	16
3.5 -	Puissance électrique du signal CPL émis par chaque compteur Linky .....	17
3.6 -	Conversion des V/m et nanoteslas.....	18
<b>4 -</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>19</b>

## 1 - INTRODUCTION

### 1.1 - But du document

Depuis le début du déploiement du système Linky par ENEDIS, le Laboratoire de Recherches de Robin des Toits Midi-Pyrénées investit sur le courant CPL et tous ses effets possibles par des études théoriques et relevés sur le terrain.

A ce jour, de nombreux relevés dans les rues où le système CPL est activé nous montrent que la valeur crête du champ magnétique mesuré sur le trottoir à la verticale des lignes aériennes ou enterrées, atteint plusieurs nano teslas, et que les salves Linky circulent en permanence à raison de plusieurs dizaines de trames par minute.

### 1.2 - Topologie des câbles de distribution du 230 V

Les configurations électriques d'acheminement du réseau 230V aux utilisateurs sont multiples. Elles requièrent toujours deux fils, une phase et un neutre. La plupart du temps, ces fils sont quasi jointifs, configuration qui minimise le champ magnétique rayonné par le courant électrique qui circule.

Mais il existe de nombreuses situations locales, souvent dans la sphère privée, où les fils électriques s'écartent l'un de l'autre pour des raisons fonctionnelles. Dans ces cas défavorables, le champ magnétique de chacun des fils n'annule plus celui de son voisin et la résultante du champ magnétique émis augmente très fortement lors du passage d'un courant, 50 Hz et hautes fréquences du CPL LINKY.

Il est très important de se rappeler ici que le courant induit dans le corps humain, paramètre biologique essentiel à limiter au maximum, est **proportionnel à la fréquence du champ rayonné**. C'est pourquoi à courant identique, les hautes fréquences du LINKY, **65000 Hz**, le rendent **1200** fois plus agressif pour le vivant que le **50 Hz**.

Ce document a pour objet premier de déterminer l'expression scientifique de la valeur crête du champ magnétique émis par une paire de fils rectilignes dans les trois dimensions de l'espace autour, paramétrée par sa longueur, le courant qui y circule, et leur écartement. Nous partons pour cela de la formule connue du champ rayonné par un fil isolé.

Ce calcul est appliqué dans le cas des 3 fils de phases des câbles aériens de la distribution dans les rues de très nombreuses villes pour donner le champ magnétique qui sera émis sur la voie publique, et dans les habitations face à ces fils aériens.

Nous calculons aussi le champ rayonné par un courant CPL dans la configuration des fils qui a servi à homologuer le compteur LINKY. Nos calculs avec des fils jointifs dans les conditions officielles de l'homologation donnent un champ rayonné **100 fois** plus élevé que la valeur officielle. La rallonge utilisée pour l'homologation est une rallonge du commerce torsadée. La torsade minimise très fortement le champ rayonné, à l'avantage de l'homologation.

Par extension de notre mise en équation, nous prédisons alors dans la suite du rapport, la valeur du champ émis en habitat réel en situations où les fils de phase et neutre du 230 V s'écartent, et donc qu'une "boucle électrique" s'ouvre. Le courant haute fréquence du type courant porteur en ligne CPL\* (*acronyme de "Courant Porteur en Ligne"*) peut alors rayonner un champ magnétique.

Nous verrons que les topologies courantes dessous peuvent devenir très rayonnantes aux hautes fréquences du CPL LINKY.

- une rallonge électrique,
- un va-et-vient électrique,
- le réseau des prises murales dans une pièce,
- le champ reçu par l'appartement voisin,
- les appareils offrant une spire électrique, tels que couvertures électriques, radiateurs muraux.

## 2 - FORMULE DU CHAMP MAGNÉTIQUE RAYONNÉ PAR UN CABLE ISOLÉ

### 2.1 - Équation du champ magnétique rayonné par un fil linéaire

Nous souhaitons l'équation du champ magnétique émis par de deux fils parallèles parcourus par un courant électrique "i". Le courant parcourt le premier fil pour l'aller et revient dans le second fil.

L'équation du champ magnétique rayonné par un fil unique parcouru par un courant électrique est décrite dans un des cours de physique d'une école supérieure d'électronique :

[https://ics.utc.fr/Electricite/Electricite\\_formats\\_web/Electromagnetisme\\_web\\_webLatex/co/cours\\_08.html](https://ics.utc.fr/Electricite/Electricite_formats_web/Electromagnetisme_web_webLatex/co/cours_08.html)

Le calcul du champ magnétique  $\vec{B}$  rayonné à la distance normale  $d$  par un fil linéaire parcouru par un courant  $i_{CPL}$  sur une longueur finie entre  $a1$  et  $a2$ , est développé :

$$\|\vec{B}_{i_{CPL}}\| = \frac{\mu_0 \cdot i_{CPL}}{4 \cdot \pi \cdot d} * [\sin(\alpha_2) - \sin(\alpha_1)]$$

Le champ magnétique est normal au plan  $a_1$ -M- $a_2$ , strictement proportionnel au courant, et reproduit exactement le même contenu spectral que le courant qui l'engendre.

Un courant CPL pulsé rayonne un champ magnétique pulsé en M.

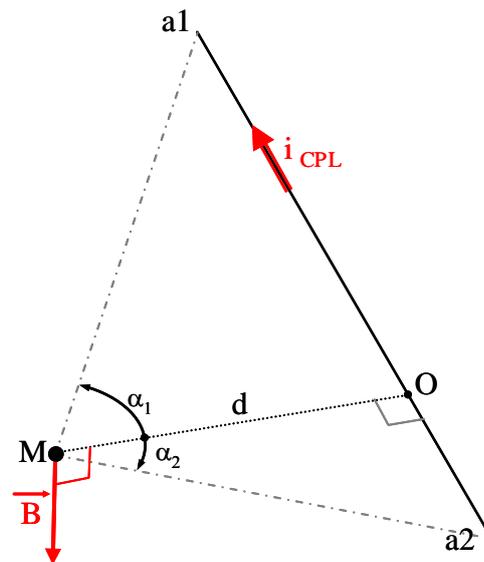


Fig. 1 : champ magnétique rayonné par un fil linéaire  $a1$   $a2$

#### 2.1.1 - Valeurs du champ magnétique rayonné par un fil linéaire dans des configurations repère

Nous calculons la valeur du champ magnétique rayonné par un fil isolé à toutes distances avec les paramètres :

##### 1 - Longueur du brin :

- longueur du brin 20m pour un fil aérien
- 3 mètres pour une rallonge électrique standard.

##### 2 – Position du point M pour le calcul :

- éloignement du fil  $d$
- distances entre le point O et les bouts du fil.

##### 2 - Courant :

- **127,8 mA** (CPL G1)
- **38,3 mA** (CPL G3)
- **500 mA**
- **1 Ampère**

Les deux premiers courants sont choisis comme étant respectivement ceux du CPL G1 et G3 dans des conditions définies par les organismes officiels. Notons qu'en réalité, nos mesures effectuées du courant CPL G1 dans **plusieurs appartements** approchent souvent **500 mA**.

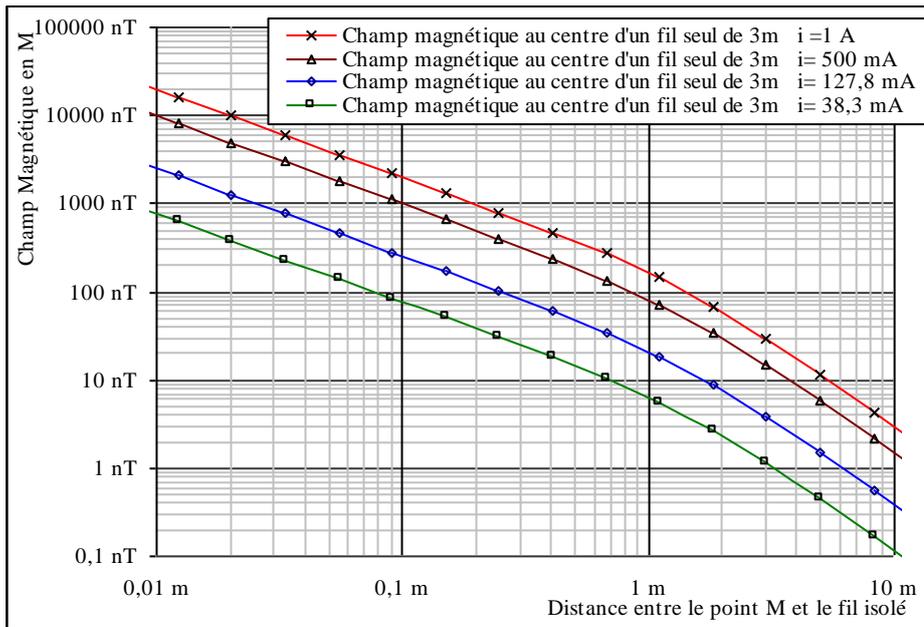


Fig. 2 : Champ magnétique rayonné par un fil isolé de 3 mètres fonction de la distance

Le champ magnétique obtenu à **1 mètre** avec un seul brin de **3 mètres** parcouru par **1 Ampère** est de **200 nT**. Il est très fort. Dans les calculs suivants, nous verrons que l'adjonction d'un fil parallèle de retour de courant diminue le champ résultant, d'autant plus que les fils se rapprochent.

Le second graphe montre la variation du champ rayonné par un brin isolé lorsque sa longueur passe de **3 à 20 mètres**. Avec l'allongement, le champ proche reste identique mais la portée du champ magnétique augmente.

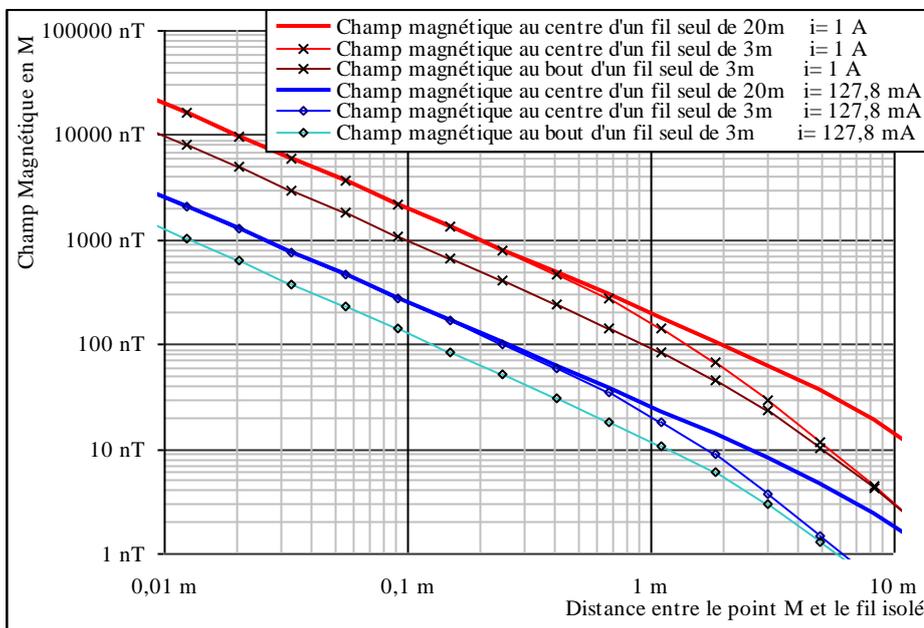


Fig. 3 : Champs magnétiques comparés fonction de la longueur du brin et du centrage de M sur le brin

Sur le brin de **3 mètres**, un décalage du point de mesure depuis le centre vers l'extrémité du brin diminue le champ proche alors que le champ lointain reste identique, ce qui est logique puisque l'angle solide du brin vu de M varie de moins en moins avec l'éloignement de M s'il va du centre à l'extrémité du brin.

## 2.2 - Équation du champ rayonné par deux fils linéaires écartés

Le calcul qui suit est applicable à toute configuration où deux fils rectilignes parallèles de longueur déterminée sont parcourus par un courant aller et retour identiques. La formule finale permettra de déterminer le champ magnétique théorique en tout point M de l'espace entourant une section de deux fils linéaires finis et espacés.

Connaissant la formule du champ magnétique rayonné par un brin de longueur défini à une distance et altitude d'un point M, (§2.1), nous calculons à ce point M la combinaison vectorielle des champs magnétiques créés par le courant aller du CPL dans un des fils de phase, et par son retour par le fil du neutre.

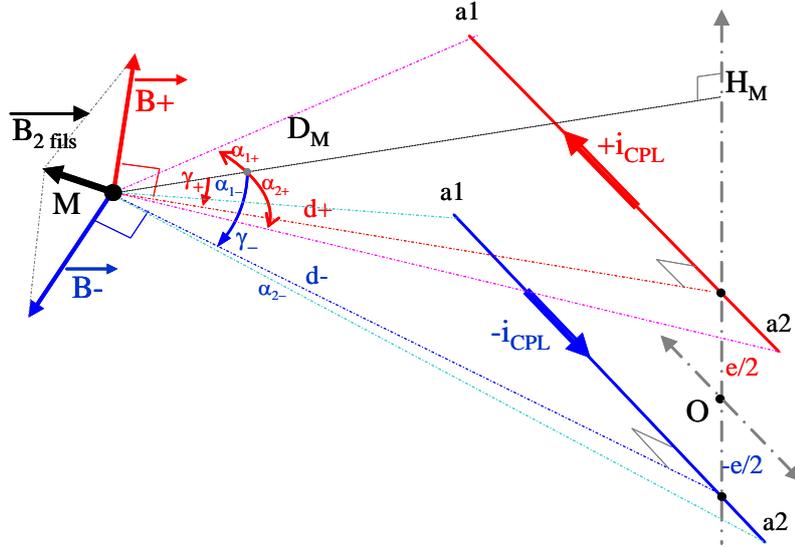


Fig. 4 : champ magnétique résultant de deux fils linéaires rayonnants

Sachant que

$$\begin{aligned} \|\vec{B}_{(+i_{CPL})}\| &= \frac{\mu_0 \cdot i_{CPL}}{4 \cdot \pi \cdot d_{(+)}} * [\sin(\alpha_{2+}) - \sin(\alpha_{1+})] \\ \|\vec{B}_{(-i_{CPL})}\| &= \frac{\mu_0 \cdot i_{CPL}}{4 \cdot \pi \cdot d_{(-)}} * [\sin(\alpha_{2-}) - \sin(\alpha_{1-})] \end{aligned}$$

Avec les éléments géométriques :

$$\begin{aligned} \sin(\alpha_{1+}) &= \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + \left(H - \frac{e}{2}\right)^2 + D^2}} \quad \text{et} \quad \sin(\alpha_{2+}) = \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + \left(H - \frac{e}{2}\right)^2 + D^2}} \\ \sin(\alpha_{1-}) &= \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + \left(H + \frac{e}{2}\right)^2 + D^2}} \quad \text{et} \quad \sin(\alpha_{2-}) = \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + \left(H + \frac{e}{2}\right)^2 + D^2}} \\ \gamma_+ &= \text{ArcTan} \left[ \frac{\frac{e}{2} - H}{D} \right] \quad \text{et} \quad \gamma_- = \text{ArcTan} \left[ \frac{-\frac{e}{2} - H}{D} \right] \\ d_{(+)} &= \sqrt{\left(H - \frac{e}{2}\right)^2 + D^2} \quad \text{et} \quad d_{(-)} = \sqrt{\left(H + \frac{e}{2}\right)^2 + D^2} \end{aligned}$$

### 2.2.1 - Paramètres :

- $a_1$  et  $-a_2$  : distance des extrémités des fils de phase et neutre qui parcourent la rue (20 à 100 m)
- $\alpha_{1\pm}$  et  $\alpha_{2\pm}$  4 angles  $a_{1\_M\_fil\pm}$  et  $a_{2\_M\_fil\pm}$  de M aux extrémités des fils phase et neutre pour les fils + et -
- $d_1$  et  $d_2$  : distance normale entre M et les fils de phase et neutre
- $e$  : écartement des fils de phase et neutre (20 à 80 cm)
- $D$  : position horizontale du point M par rapport au plan des fils (3 à 10 m)
- $H$  : position verticale du point M par rapport à O, milieu des fils. (0 à 10 m)
- $i_{CPL}$  : courant porteur en ligne maximal envoyé par le concentrateur dans chaque phase. (1 A normé)
- $\mu_0$  : perméabilité du vide ( $4.\pi.10^{-7}$ )

Comme les champs rayonnés par les deux fils sont contenus dans le plan normal aux 2 fils, une projection dans ce plan passant par M permet de calculer facilement la résultante du champ magnétique en M.

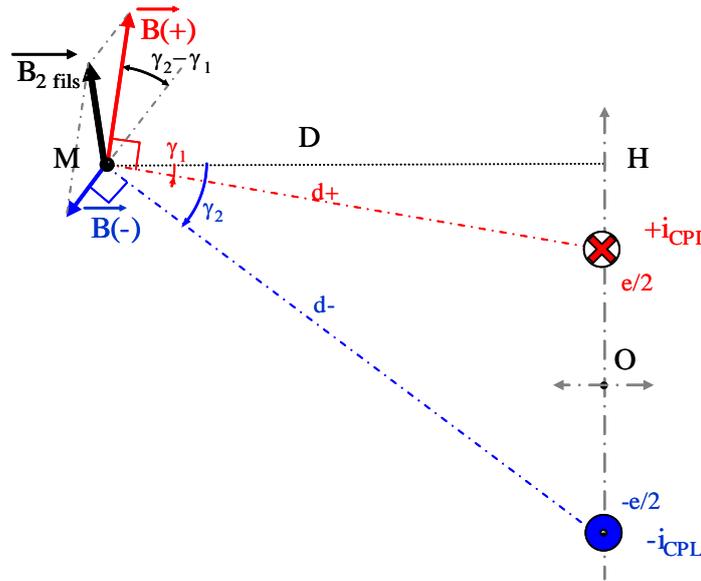


Fig. 5 : projection dans le plan M - O - H

La projection sur l'axe colinéaire à  $\vec{B}_-$  nous conduit à l'expression du module du champ magnétique  $\|\vec{B}_{(2\text{fils})}\|$  en M résultant du passage du courant  $i_{CPL}$  aller et retour.

$$\begin{aligned} B_{x(2\text{fils})} &= \|\vec{B}_{(+i_{CPL})}\| * \cos(\gamma_2 - \gamma_1) - \|\vec{B}_{(-i_{CPL})}\| \\ B_{y(2\text{fils})} &= \|\vec{B}_{(+i_{CPL})}\| * \sin(\gamma_2 - \gamma_1) \\ \|\vec{B}_{(2\text{fils})}\| &= \sqrt{B_{x(2\text{fils})}^2 + B_{y(2\text{fils})}^2} \end{aligned}$$

L'expression développée de  $\|\vec{B}_{(2\text{fils})}\|$  s'obtient en remplaçant les termes la composant par les éléments géométriques cités précédemment.

### 3 - CALCUL DU CHAMP MAGNETIQUE CPL DANS DIVERSES CONFIGURATIONS

#### 3.1 - Câbles rapprochés dans une rallonge électrique

Le CPL LINKY n'étant absolument pas arrêté par le compteur LINKY, les courants CPL haute fréquence provenant du réseau s'ajoutent à ceux du compteur local et se propagent dans tous les fils électriques, rallonges, fils dans les murs, interrupteurs, va-et-vient, appareils branchés de chaque logement.

Pratiquement tous les appareils modernes à alimentation à découpage présentent à leur entrée une charge capacitive importante qui est un court-circuit aux hautes fréquences. Lorsque connecté via une rallonge électrique, la capacité d'entrée absorbe pratiquement tout le courant CPL présent.

Etant dans le cas de la ligne bifilaire linéaire rayonnante, nous pouvons calculer le champ magnétique autour de la rallonge.

L'écart entre fils est fixé de **1 à 20 millimètres**, la longueur du câble à **3 mètres**, et le courant CPL à **1 Ampère**.

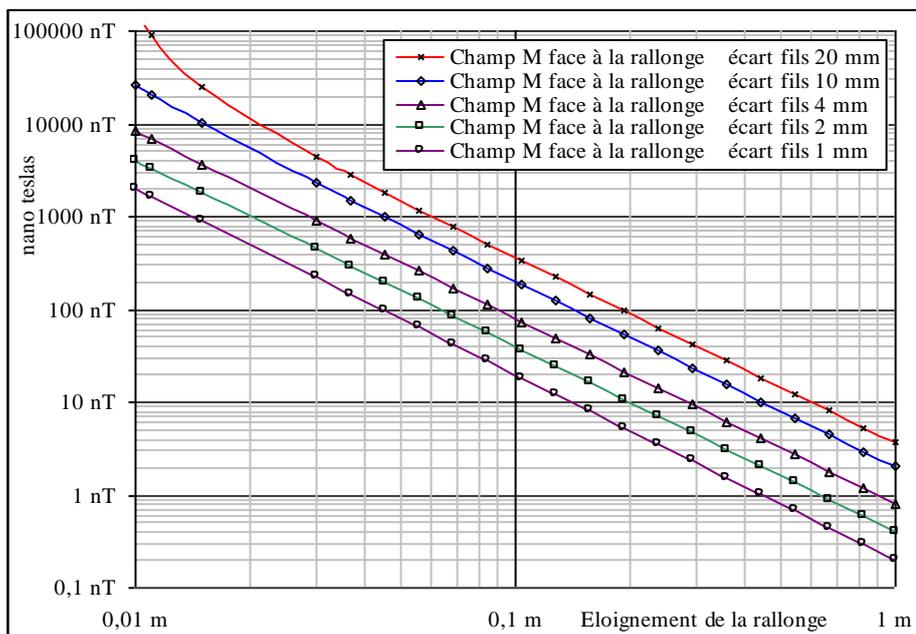


Fig. 6 : Champ magnétique face à une rallonge électrique fonction de l'éloignement avec 1 Ampère

Il apparaît que l'écartement des fils joue rapidement sur le champ magnétique rayonné par la rallonge. Le courant normalisé à **1 Ampère** provoque un champ proche extrêmement puissant jusqu'à au moins **10 centimètres**. Ce peut être le cas d'appareils au contact du corps (couverture chauffante électrique, rasoir électrique, appareils électroménagers et électroportatifs tenus à la main). Il décroît vite avec l'éloignement.

Le champ magnétique aux hautes fréquences du CPL induit dans les chairs un courant de même contenu spectral qui peut fragiliser les cellules, globules rouges, le sang, etc, dans la main par exemple.

#### 3.1.1 - Vrillage de la rallonge :

Une rallonge électrique n'est jamais plate. Elle est vrillée aléatoirement entre la prise secteur et l'appareil. Notre calcul dessous donne le champ magnétique sur les **360°** autour d'une paire de fils parallèles, à plusieurs éloignements.

L'exploration est calculée à plusieurs distances au centre des deux fils. L'écartement entre fils a été fixé à **3 millimètres**, valeur courante pour ce type d'article électrique, et à **1 Ampère** normalisé.

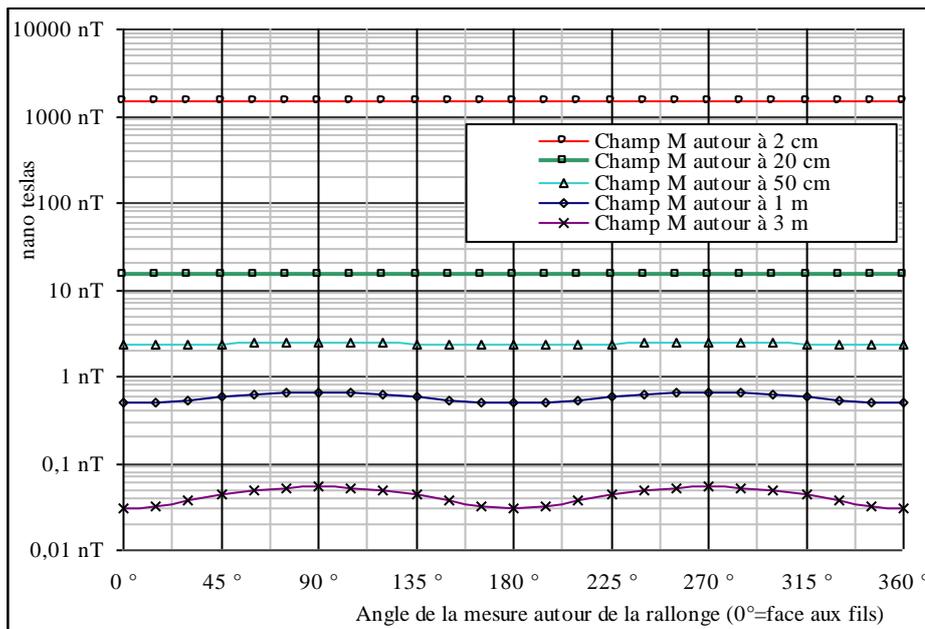


Fig. 7 : Champ magnétique autour d'une rallonge électrique à plusieurs distances à 1 Ampère

Ce calcul est effectué avec un écartement de fils de **3 millimètres** sur **3 mètres** de longueur. Le résultat montre clairement que le module champ magnétique est assez constant autour de la rallonge à une distance fixée. C'est l'orientation vectorielle du champ magnétique, qui n'a qu'un effet physiologique secondaire, qui tourne autour des fils. Son orientation spatiale détermine l'axe de la boucle de courant qui sera induite dans un corps vivant.

### 3.1.2 - Homologation du rayonnement du courant CPL LINKY dans une rallonge électrique :

La courbe calculée à **20 cm** en gras correspond au test officiel du rayonnement du compteur LINKY à travers une rallonge électrique standard. Il a été testé en **CPL G1** avec un courant de **123,8 mA**, et en **G3** à **38,3 mA**. Le résultat officiel dit que la mesure du champ magnétique est faite en pic. Nous ne savons pas si le courant annoncé est une valeur RMS moyennée ou pic instantané, ce qui change le résultat.

En revanche, le champ magnétique de la rallonge relevé par le CSTB est mesuré avec un analyseur de spectres NARDA SRM 3006 en bande d'analyse extrêmement étroite de 50 Hz. La valeur retenue du rapport du CSTB est le maximum constaté dans ce spectre. Or ce relevé **doit être** intégré sur l'ensemble du spectre du CPL pour correspondre à la valeur du champ résultant émis par la rallonge, ce qui n'est pas fait dans leur rapport.

Cette **erreur technique grave** minimise d'un facteur **au moins 4** la valeur du champ résultant pour le CPL G1, et plus encore pour le CPL G3, qui a un spectre plus étalé. (voir notre document "Analyse Rapport CSTB 2016-CRD-16")

Notre calcul du champ magnétique pic rayonné à **20 centimètres** par une rallonge électrique présentant un écartement de fils de **3 millimètres**, avec les courants officiels pris comme des valeurs pic instantané atteint :

pour le **G1** à **127,8 mA<sub>pic</sub>** : **1,9 nano teslas<sub>pic</sub>**  
 pour le **G3** à **38,3 mA<sub>pic</sub>** : **0,57 nano teslas<sub>pic</sub>**

Le champ magnétique du courant CPL LINKY est un champ pulsé haute fréquence. Les valeurs calculées ici créent un courant induit non négligeable de même contenu spectral dans le corps.

Le champ magnétique d'un fil isolé émet respectivement **127 et 38 nano teslas** à **20 centimètres** dans ces conditions. C'est la proximité du fil de retour du courant qui réduit le champ résultant.

### 3.1.3 - Mesure expérimentale avec une rallonge électrique avec fils écartés de 2 millimètres :

Afin de conforter nos résultats théoriques, une rallonge a été aplanie sur 4 mètres sur un sol en bois. Elle présente ainsi sur tout son long les mêmes fils à plat. Ses fils sont écartés de **2 millimètres**.

A une extrémité, elle est court-circuitée. A l'autre bout, un générateur sinusoïdal injecte un courant sinus constant de **60 mA pic**.

Dans ces conditions d'expérimentation, la valeur calculée donne un champ à **20 centimètres** de :

- > **0,59 nT** pic face à la rallonge
- > **0,60 nT** pic dans le plan de la rallonge

Les valeurs mesurées expérimentalement avec un nanoteslamètre non étalonné donnent :

- > **0,45 nT** pic face à la rallonge
- > **0,5 nT** pic dans le plan de la rallonge

Nous notons la très bonne concordance entre théorie et mesure. Sachant que la sonde de l'appareil mesure **4 centimètres** de large, elle entraîne une imprécision de localisation.

Par ailleurs, le calcul théorique du champ magnétique s'applique à des fils infiniment fins. Les deux fils de cette rallonge ont un diamètre de **0,5 millimètre**. La surface émissive de la rallonge est donc légèrement réduite par ce diamètre ce qui explique la diminution dans l'expérimentation par rapport à la théorie.

Les conditions d'homologation du rayonnement du courant CPL LINKY doivent pour être valides, considérer le champ pic rayonné par un courant pulsé, et non sa valeur moyenne, car c'est la valeur crête du courant induit dans le corps humain qui est physiologiquement dangereux.

Pour illustrer notre propos, une énergie de **1 joule** délivrée en **1 seconde** (1 Watt) est sans danger sur un objet de faible pouvoir dissipatif. Délivrée en **1 microseconde**, la puissance crête (1 méga Watt) peut le détruire.

### 3.1.4 - Influence de l'écart entre fils

Ici, nous fixons l'éloignement du point M de la rallonge pour le calculer champ magnétique rayonné par la rallonge parcourue par **1 Ampère** normalisé, en faisant varier l'écart des fils dans la rallonge.

Pour chaque éloignement du point de mesure, la présentation fonction de l'écartement des fils dans la rallonge montre que l'écartement des fils joue de façon importante. Le champ calculé est en effet affiché en logarithmique.

Aux plus petits écartements, si le diamètre du fil n'était pas considéré dans le calcul comme infiniment fin, il réduirait le champ émis. Cet effet, négligeable dans les situations analysées ici, n'est pas pris en compte.

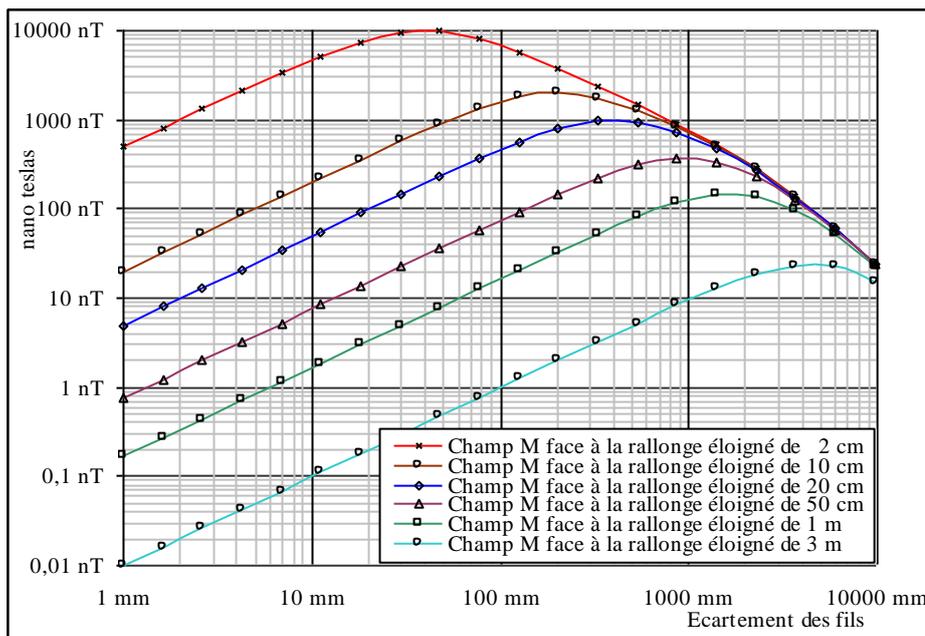


Fig. 8 : Champ magnétique en fonction de l'écartement des fils dans la rallonge électrique

Aux grands écartements, plus grands que ceux d'une rallonge, nous mettons en évidence l'importance de ce paramètre sur le champ émis, mais jusqu'à une certaine limite.  
En effet, nous constatons pour chaque éloignement fixé un maximum du champ magnétique lorsque l'écart entre fils grandit. C'est le résultat d'une influence contraire de la décroissance du champ de chaque fil par leur écartement, et l'augmentation simultanée de la combinaison vectorielle en M du champ des deux fils.  
A une distance fixée de la rallonge, le champ est maximum lorsque l'écart entre fils est le double de la distance.

### 3.2 - Câbles aériens en vis-à-vis de chambre à l'étage d'habitations

Nous nous intéressons aux lignes aériennes ENEDIS qui courent dans un très grand nombre de rues en ville. Elles sont composées de plusieurs fils tendus entre isolateurs de verre, chacun espacés de **20 centimètres** environ.



Fig. 9 : configuration courante de distribution du réseau 230 V 50 Hz en ville

Dans une configuration similaire aux photos dessus, il existe de nombreux logements où les chambres sont situées dans les étages juste devant les fils du réseau public. Parmi ces fils se trouvent les trois phases **230 V** et le retour par le neutre qui sont réparties sur un certain nombre de maisons du quartier.

Le concentrateur Linky du quartier émet indépendamment dans chaque phase un courant CPL radio fréquence pulsé pour le fonctionnement du système LINKY. Tous les trois reviennent au concentrateur par le neutre commun. Leurs **3** champs magnétiques rayonnés se superposent en tout point dans l'espace autour. C'est le champ le plus fort des trois qui sera prépondérant.

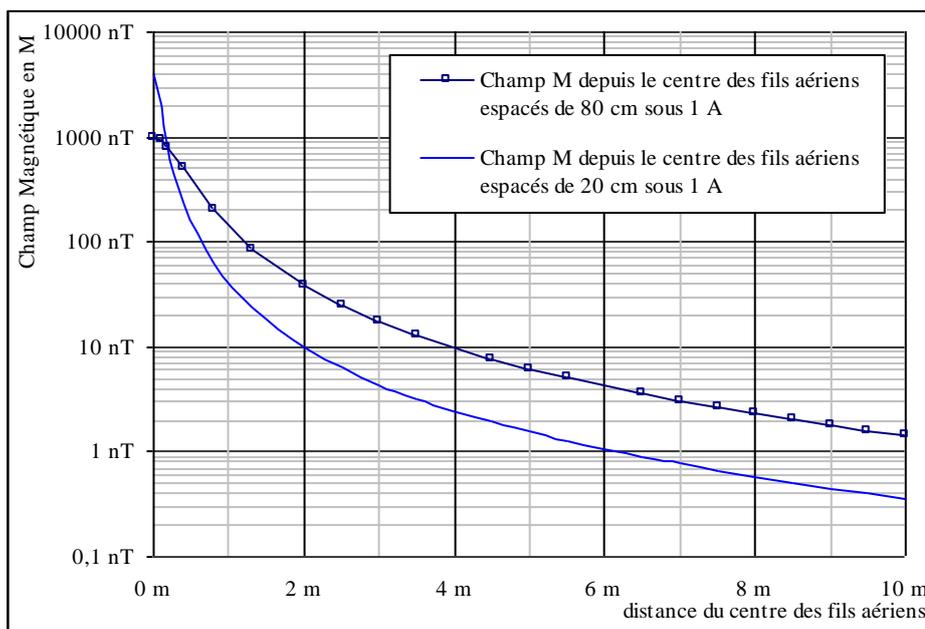


Fig. 10 : Champ magnétique face à une paire de fils aériens de 20 m espacés de 20 puis 80 centimètres

La courbe supérieure montre la décroissance en fonction de la distance du champ magnétique à hauteur de fils aériens de **20 mètres** de long. L'écartement maximal entre fil de phase et du neutre, **80 centimètres**, est le plus rayonnant. La seconde courbe montre le champ magnétique de ces fils aériens espacés de **20 centimètres** fonction de la distance.

Ainsi, à **3 mètres**, un courant de 1Ampère émet par les lignes aériennes un champ haute fréquence pulsé de **4 à 20 nano teslas** qui pénètre dans le logement en face des lignes.

*Important :*

Il faut savoir que le document "**SPECIFICATION DE LA COUCHE PHYSIQUE G3**" de ERDF stipule paragraphe 5.13 que le système CPL G3 LINKY est un système adaptatif qui ajuste puissance et fréquence de transmission selon la pollution haute fréquence sur le réseau en temps réel pour maximiser le débit de transmission. Les courants officiellement spécifiés pour les tests de rayonnement officiels ne sont pas les valeurs typiquement relevées sur le terrain et sont peut-être des valeurs minimales assurant le fonctionnement du système en environnement laboratoire.

Par ailleurs, les spécifications techniques de deux composants spécialisés pour les transmissions CPL indiquent qu'ils peuvent émettre un courant CPL de :

- le **APE031** - Texas Instruments -> **1,5 ampère crête**.
- le **ATPL250** - ATMEL -> **480 mA crête**.

Les courants CPL peut sembler faible en regard des courants alternatifs de dizaines d'ampères à 50 Hertz, mais la densité de courant induit J dans le corps humain est directement proportionnelle à la fréquence F et le courant i via le champ B, comme le mentionne explicitement la formule utilisée par l'**ICNIRP** :

$$J = \sigma \cdot \pi \cdot F \cdot r \cdot B$$

r correspond au diamètre de la boucle de courant dans le corps.

Ainsi 1 Ampère @ 50000 Hz - fréquence moyenne du CPL – induit la même densité de courant électrique dans le corps humain que 1000 A @ 50 Hertz (! 2,3 Méga Watts !)

### 3.3 - Champ magnétique sur le trottoir sous les lignes électriques aériennes

Le réseau de distribution électrique surplombe généralement les trottoirs en ville lorsqu'il est aérien. Nous savons calculer le champ magnétique rayonné sur les piétons par les lignes **230V** aux 4 écarts de fils existants, et en fonction du décalage horizontal sous les lignes aériennes. L'origine de l'axe x est le trottoir sous les lignes.

**10 mètres** sur l'axe **Ox** correspondent à un déplacement dans les jardins privés qui donnent sur la rue.

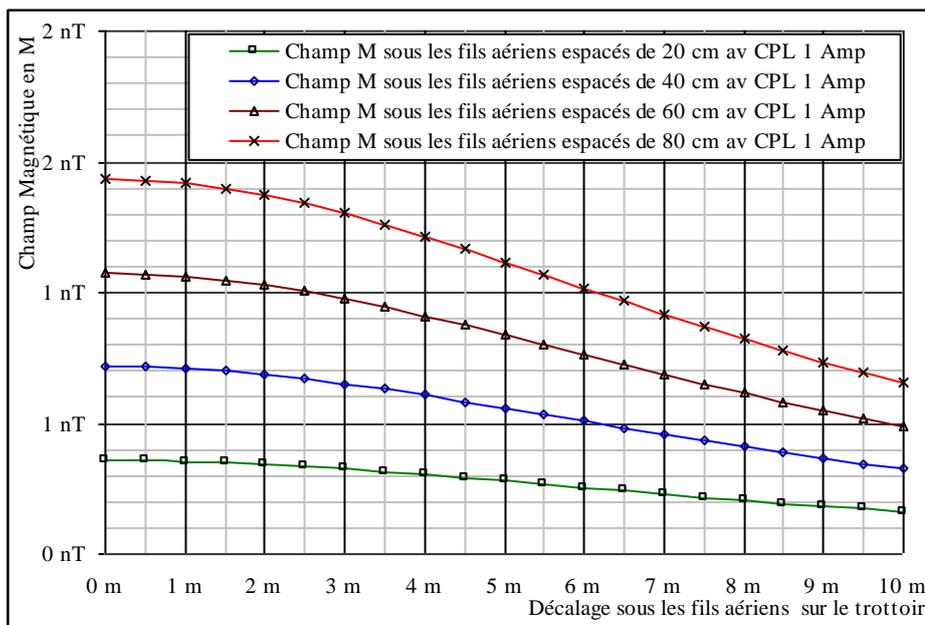


Fig. 11 : Champ magnétique sur le trottoir sous une paire de fils aériens espacés de 20 à 80 centimètres

Cette situation est la moins rayonnante de toutes celles analysées dans cette étude puisque dans tous les cas, le champ magnétique avec **1 Ampère** reste inférieur à **2 nano teslas**.

### 3.4 - Champs magnétiques rayonnés par le courant CPL dans l'habitat

Normalement, le câblage des fils neutre et phase dans les habitations doit courir dans la même gaine. Dans ce cas, les champs magnétiques des chemins aller et retour s'opposent fortement comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents.

Malheureusement, il existe fréquemment des situations dans les habitats où ces deux fils se séparent, par exemple pour les interrupteurs va-et-vient, certains radiateurs ou ventilateurs électriques qui présentent par leur conception même des boucles électriques de surface importante qui regardant la pièce à vivre, des prises électriques mal câblées, etc ...

Lorsque le courant CPL LINKY présent circule en empruntant ces boucles, de façon imprévisible puisque ces chemins dépendent des appareils branchés, les rayonnements magnétiques des fils aller et retour s'additionnent à lieu de se contrarier.

#### 3.4.1 - Champ magnétique émanant d'un radiateur électrique mural

Si un radiateur électrique mural est équipé d'une résistance en configuration interne enroulée et non en serpent, il forme une boucle. Or, un courant normalisé à **1 Ampère** dans une spire de **50 centimètres** de diamètre donne un champ magnétique calculé à son centre de **2513 nanoteslas**, ce qui est énorme. La formule du calcul est :

$$\|B_{SPIRE \text{ Diam. } \phi}\| = 4.\pi.10^{-7} x \frac{i_{CPL}}{Diam.}$$

La courbe dessous calcule le champ rayonné par un radiateur électrique compact de **70 centimètres x 40 centimètres** parcouru par un courant normalisé de **1 Ampère**.

Le champ magnétique devant le radiateur décroît dans la pièce avec la distance. Le calcul montre qu'il faut s'éloigner du radiateur de **4 mètres** pour descendre en dessous de **1 nanotesla**.

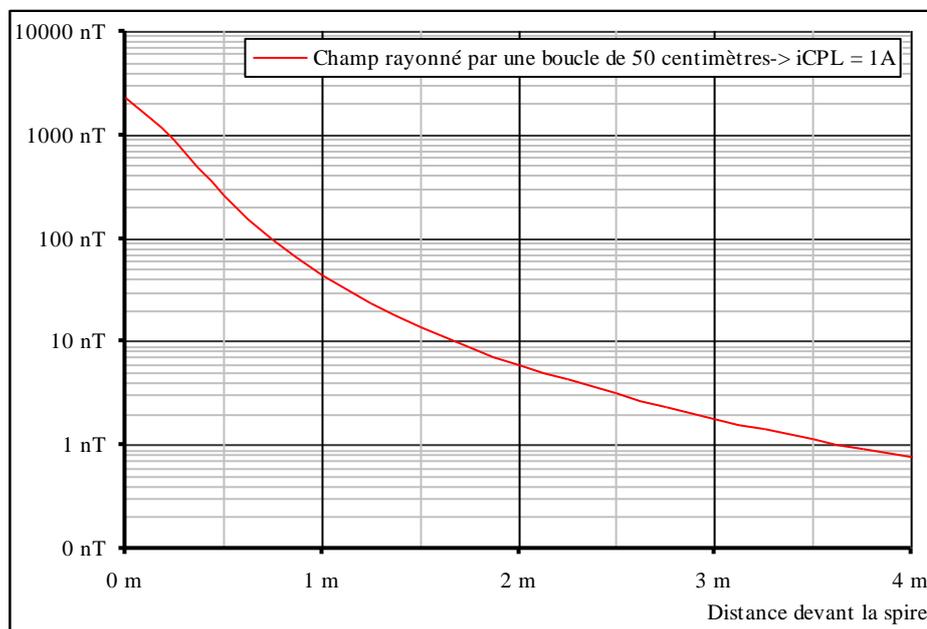


Fig. 12 : Champ magnétique rayonné par 1 Ampère dans un radiateur électrique câblé en spire

Même avec **100 milliampères** valeur officielle du courant LINKY G1, le champ magnétique rayonné dans le premier mètre atteint **5 nano teslas**. Les chambres à coucher où un radiateur est placé vers la tête de lit constituent une configuration extrêmement pathogène, surtout si c'est un enfant qui y dort.

De surcroît, nous rappelons que ce champ magnétique est à la même haute fréquence que le courant CPL pulsé qui le génère.

### 3.4.2 - Champ magnétique dans une pièce à vivre par prises murales

Il existe probablement de nombreux logements où une prise murale voit arriver ses fils neutre et phase par chaque coté de la pièce. Cette configuration, invisible pour l'habitant puisque les fils courent dans le mur, découle souvent d'un choix d'économie de fil que l'électricien a fait, comme par exemple les repiquages de prise murale entre pièces.

Lorsqu'un simple chargeur, de portable par exemple, équipé d'une capacité interne qui réalise un court-circuit aux radio fréquences du courant CPL, est branché à cette prise, le courant CPL venant du tableau électrique ou du compteur LINKY local passe sans atténuation par un coté de la pièce et revient par l'autre. La spire équivaut à la surface complète de la pièce.

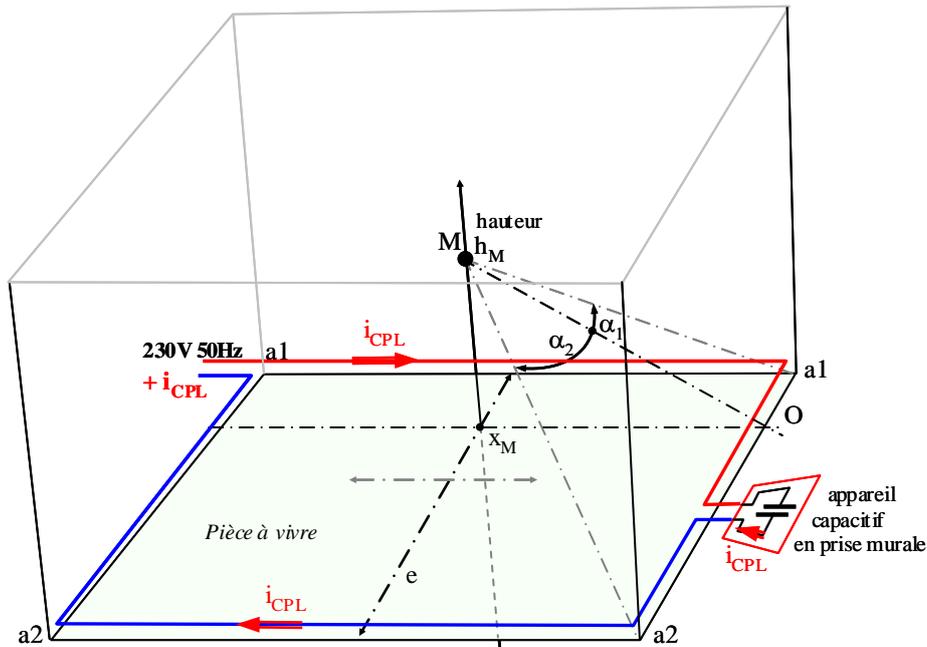


Fig. 13 : Pièce à vivre ceinturée par une boucle de courant

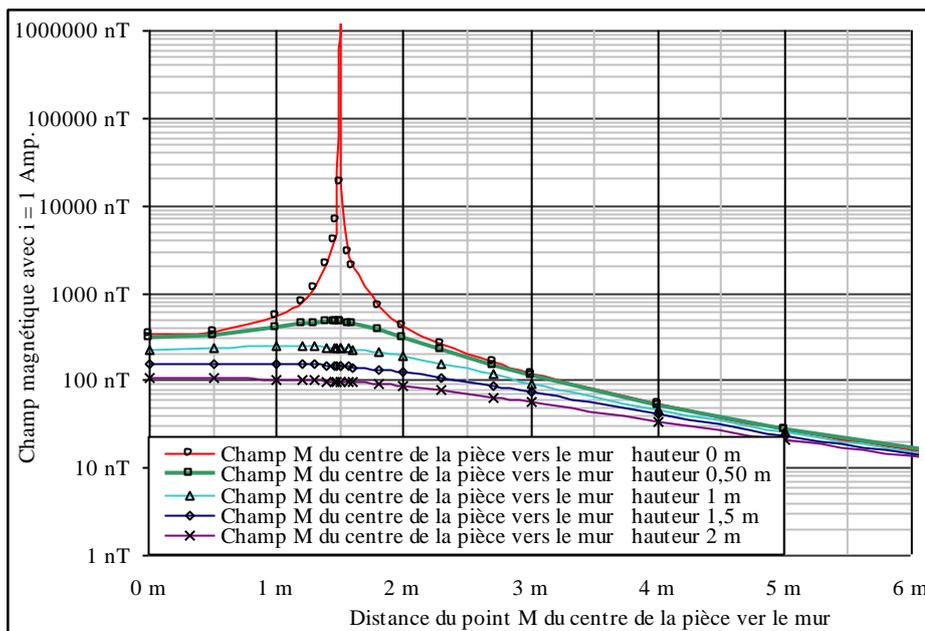


Fig. 14 : Champ magnétique créée par une boucle de courant murale dans une pièce à vivre par 1 Amp.

Nous avons calculé ici les champs magnétique rayonnés par les fils dans le mur d'une pièce à vivre parcourue par un courant de **1 Ampère normalisé**. Le réseau de courbes correspond à plusieurs hauteurs dans la pièce, qui partent du centre le long d'une ligne horizontale vers un mur.  
Les dimensions de la pièce est de **3 x 4 mètres**.

Le résultat de ce calcul montre que la situation aussi anodine qu'un câblage économique de prise murale engendre un champ magnétique énorme dans toute la pièce et à toutes les altitudes, fait a déjà été dénoncé sur internet, et que le calcul ici confirme.

Même un facteur de réduction de 3 sur le courant CPL, correspondant aux courants CPL mesurés expérimentalement dans les habitations équipées du LINKY de l'ordre de **350 mA pic**, ne suffit pas pour atteindre des valeurs acceptables de champ haute fréquence dans une pièce à vivre.

A titre de comparaison, les champs magnétiques rayonnés par les grandes stations de radio grandes ondes françaises dans ces fréquences sont de l'ordre de  $10^{-10}$  à  $10^{-11}$  teslas, au moins **1000 fois plus faible** que le résultat de cette configuration. Le brouillage possible de la réception radio en grandes ondes est une réalité que les stations nationales devraient considérer comme un manque à gagner pour leurs recettes publicitaires.

Il est normal que le champ magnétique devienne énorme au passage du mur sur la courbe calculée au sol puisqu'on passe sur le fil dans le mur. Le calcul du champ magnétique a été prolongé au-delà du mur à **1m50** pour visualiser le fait que la pollution magnétique reste également très forte dans les pièces adjacentes.

*Rayonnement sur les appartements dessus et dessous :*

Le béton et tous les matériaux de construction non métalliques laissent passer les champs magnétiques aux fréquences du CPL. Les militaires appellent d'ailleurs les fréquences sous **100 kHz** les "fréquences pénétrantes", car elles sont connues pour pratiquement tout traverser. Le champ magnétique aux fréquences du CPL ne peut être réduit que si les fils neutre et phase courent constamment accolés à travers tout l'habitat.

Ici les trois courbes indiquent le champ magnétique pour un courant normalisé de **1 Ampère**, le long de lignes verticales choisies à **3 distances du mur** : le centre de la pièce, à **40 centimètres** et **1 mètre** du mur.

La distance de **40 centimètres** du mur correspond typiquement à la distance entre le thorax d'une personne assise dans un canapé accolé au mur. On y séjourne longtemps sans bouger, pour regarder la télévision ou lire.

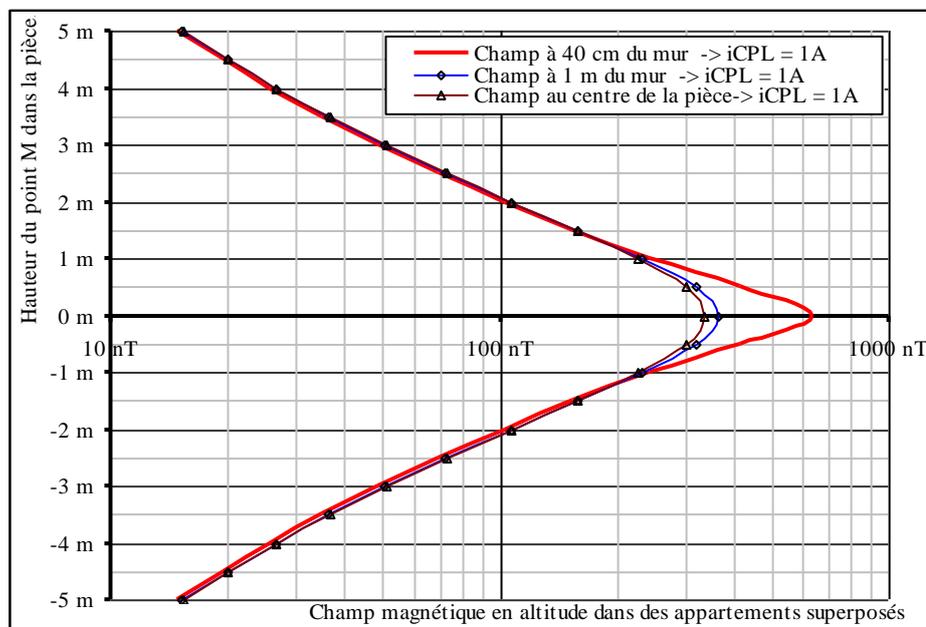


Fig. 15 : Champ magnétique créée par une boucle de courant murale le long de lignes verticales

Nous voyons clairement ici qu'un "câblage à l'économie" de prise murale engendre un champ magnétique énorme chez les voisins du dessus et dessous. Le voisin dessous sera impacté par le champ haute fréquences au niveau de la tête à la coordonnée **-1 m**, tandis que celui du dessus sera impacté au niveau des pieds, à l'altitude de **3 mètres** par rapport la boucle de courant émettrice.

### Interrupteur Va et Vient :

Une autre situation très fréquente où les fils de neutre et phase se séparent est le câblage des interrupteurs va-et-vient. Les configurations des câbles dans les murs dépendent là aussi de la géométrie de la construction et des gaines électriques. Tous les cas sont possibles et de façon peut-être encore plus fréquentes que les prises murales. Nous avons représenté dessous une topologie de fils qui est très ordinaire. Deux portes sur le même mur avec chacune un interrupteur pour la pièce conduit l'électricien à privilégier le chemin court pour la liaison entre interrupteurs.

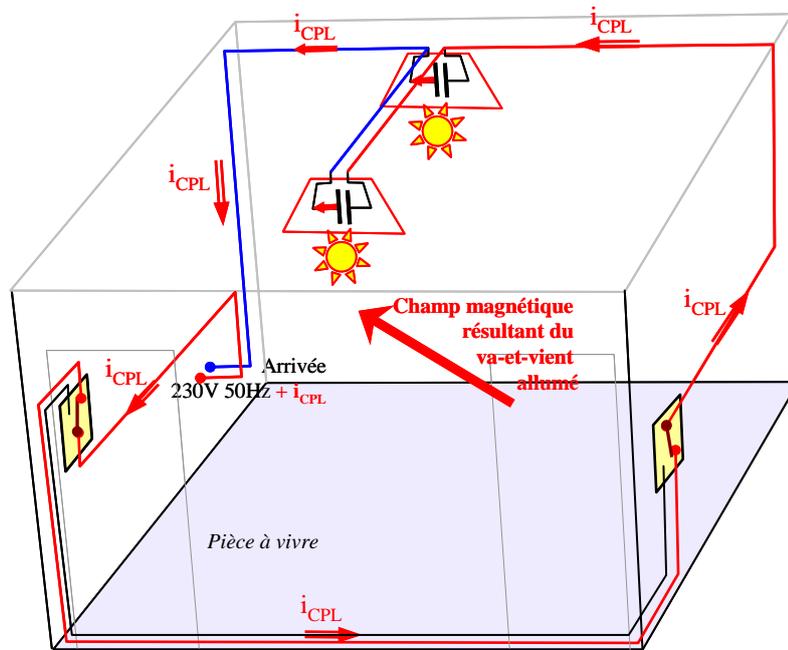


Fig. 15 : Champ magnétique créé par une boucle de courant fermée par le va-et-vient du plafonnier

Cette configuration est désastreuse en terme de pollution magnétique puisque dès l'allumage du plafonnier, elle ferme une boucle électrique de dimension considérable pour le courant CPL LINKY qui y circule. Nous ne l'avons pas calculé car la topologie des fils peut-être multiple et nécessite un calcul plus avancé, mais compte tenu de la grande surface de la boucle électrique, le champ résultant sera au moins aussi fort que celui rayonné par une prise murale "économique".

### Estimation du courant CPL dans des ampoules basse consommation :

Nous avons vu que le champ magnétique hautes fréquences émis est proportionnel au courant CPL LINKY circulant. Une estimation de ce courant avec des lampes modernes à diode basse consommation est abordée ici. Les lampes basse consommation ont une alimentation miniature à découpage constituée d'une capacité en entrée pour leur fonctionnement.

Même **100 nanofarads**, qui est une valeur plutôt faible pour ce type de circuits électroniques, constitue déjà aux fréquences du CPL – **50000 Hz**, une impédance de seulement **32 ohms**. Plusieurs lampes en parallèle fait diminuer au prorata cette valeur. Ainsi, **4 ampoules** présentent **8 ohms** d'impédance pour le signal CPL présent.

$$I_{CPL} = \frac{1}{2\pi \cdot F_{CPL} \cdot \text{Capacité}}$$

Dans des habitats équipé de **LINKY**, le **signal CPL** a une amplitude constatée de plusieurs volts, typiquement **1,5 Volt pic**. Un plafonnier de **4 ampoules basse consommation** allumées ferait circuler dans ces conditions un courant de **188 milliampères pic**.

Un calcul simplifié nous donne au centre de la pièce dessinée dessus, à **1 mètre** de hauteur, un champ magnétique CPL d'environ **50 nanoteslas**.

### 3.5 - Puissance électrique du signal CPL émis par chaque compteur Li.nky

Pour conclure ces investigations, nous aimerions souligner le fait que parler en **V/m** dans la promotion officielle du CPL occulte le fait que la valeur élevée du **courant CPL** émise par chaque compteur émet surtout un champ **magnétique** par les boucles que le courant CPL parcourt et non un champ électrique.

Le réseau **230 V** dans lequel est émis le "**courant**" (et non "voltage") CPL présente une très faible impédance aux fréquences du CPL, de l'ordre de **1 Ω**. La simple loi d'Ohm  $U = Z * I$  nous prédit que l'apparition d'une petite tension CPL demande un courant CPL important.

Sous **1 Ω, 1 Volt CPL** donne la valeur importante de **1 Ampère CPL**.

**La puissance CPL qui sera rayonnée par chaque compteur selon  $P = U * I$  peut atteindre de 1 Watt.**

Cette puissance radiofréquence sera rayonnée par les câbles auxquels il est relié. Un talkie-walkie de **1 Watt** avec une antenne accordée permet une transmission en champ libre de plusieurs kilomètres. À ces radiofréquences, et vu l'impédance du réseau électrique es, le courant CPL rayonne via les câbles du réseau un **champ magnétique**, jugé potentiellement cancérogène par l'OMS, bien plus qu'un champ électrique.

Les grandes longueurs des câbles du réseau urbain, ceux dans les murs de votre habitation, tous les appareils connectés au réseau, forment à eux tous une très grande antenne rayonnante pour ce signal CPL, sur tout le territoire Français. Sa qualité d'émission est extrêmement variable et imprévisible selon le passage des câbles électriques, leur longueur, altitude, les appareils connectés dessus, etc.

Enfin, nous avons vu dans le § **3.2** que les composants électroniques spécialisés pour la gestion du courant protocole CPL ont une capacité d'émettre un courant CPL de plusieurs centaines de milliampères en haute fréquence. Comme le système Linky est adaptatif, nous sommes obligés de prédire le rayonnement magnétique avec la puissance émissive maximale possible puisque les conditions de transmissions sont imprévisibles.

3.6 - Conversion des V/m et nanoteslas

Dans le Guide de l'ICNIRP pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, document INRS ND 214.-182-01, rédigé en vue de la rédaction de la recommandation 1999/519/CE puis le décret 2002-775, on lit que :

*En champ lointain, le modèle d'onde plane constitue une bonne approximation de la propagation du champ électromagnétique.*

*Les caractéristiques d'une onde plane sont les suivantes :*

- les fronts d'onde ont une géométrie plane ;
- les vecteurs  $E$  et  $H$  sont perpendiculaires à la direction de propagation ;
- les champs  $E$  et  $H$  sont en phase, et le quotient des amplitudes  $E/H$  est constant dans tout l'espace.

En champ libre :

$$\boxed{E_{V/m} = Z_{VIDE} * H_{A/m}}$$

avec :  $Z_{VIDE} = 377 \Omega = 120 * \pi$

*La densité de puissance  $S$ , puissance par unité de surface normale à la direction de propagation, est liée aux champs électrique et magnétique par les formules :*

$$\boxed{S_{W/m^2} = E_{V/m} * H_{A/m}}$$

et donc :

$$\boxed{S_{W/m^2} = Z_{VIDE} \Omega * H_{A/m}^2}$$

$$\boxed{S_{W/m^2} = \frac{E_{V/m}^2}{Z_{VIDE} \Omega}}$$

A partir d'une certaine distance, le champ magnétique émis par un fil linéaire parcouru par un courant alternatif, à une fréquence très éloignée de la résonance électrique du fil, voit sa divergence diminuer, et l'approximation de cette configuration au champ lointain dans l'air est acceptable.

L'excitation magnétique du champ électromagnétique, en A/m, est reliée au champ magnétique B, en Tesla, par :

$$\boxed{B_{(T)} = \mu_0 * H_{(A/m)}}$$

avec :  $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7} kg.m.A^{-2} .s^{-2}$  ou  $T.m.A^{-1}$

En utilisant les formules de l'ICNIRP, un champ annoncé en V/m est convertible en teslas, ce qui donne la formule pratique, en nanoteslas :

$$\boxed{B_{(T)} = \frac{\mu_0 * V/m}{Z_{VIDE}}}$$

$$\boxed{B_{(nT)} = 3,333 * V/m}$$

#### 4 - CONCLUSIONS

- ① L'expression scientifique du champ magnétique induit par deux fils parallèle est facile à déterminer. Elle nous permet de prédire le champ magnétique qui sera émis par le passage d'un courant CPL dans les fils de phase et neutre du réseau électrique 230 V-50 Hz dans diverses topologies courantes.
- ② Nous avons identifié plusieurs configurations de câblage du réseau de distribution, très défavorables et extrêmement courantes en habitat privé et sur le domaine public, où le passage du courant haute fréquence pulsé CPL LINKY G1 et G3 induit rapidement des champs magnétiques pulsés importants.
- ③ Aux fréquences du LINKY, il est très difficile de diminuer le champ magnétique par un écrantage, surtout dans un lieu de vie privé. À ces radiofréquences, il pénètre à coeur tout volume organique et induit dedans une circulation circulaire de courant réparti, augmentant linéairement avec la fréquence du champ magnétique. Le courant induit par le champ magnétique est exactement à son image en termes de contenu harmonique qui est un bruit spectral hautes fréquences, haché, à un rythme percussif  
Des expérimentations ont montré qu'un champ magnétique de **100 nT** induit dans un milieu conducteur électrique similaire à la matière vivante un courant électrique de quelques **ampères par m<sup>2</sup>**, pour les plus gros organes, comme le foie, le cerveau, le thorax.
- ④ Le système Linky utilise la technologie CPL\* (*acronyme de "Courant Porteur en Ligne"*) homologué par des organismes officiels. On peut lire sur l'information grand public :



Extrait d'un document grand public de Enedis, ERDF ANFR et le CSTB en 2016 sur le Linky.

Le rayonnement du courant CPL est exprimé en V/m. La correspondance avec les nanoteslas est donnée § 3.6.

- ⑤ Dans la brochure du CSTB, **0,1 V/m pic** correspond à un champ magnétique de **3.10<sup>-11</sup> Teslas pic**, valeur infirmée par nos calculs et vérifications expérimentales.  
Le calcul du champ magnétique émis par la configuration utilisée pour l'homologation du compteur LINKY aux courants nominaux du CPL G1 et G3 ne donne pas les mêmes résultats que celle-ci. Nous affirmons, et confirmons par des mesures expérimentales, que le champ rayonné par une rallonge électrique par ces courants CPL atteint **0,6 nT pic** pour le **G3**, et **2 nT pic** pour le **G1**.
- ⑥ Des mesures en appartements urbains équipés du LINKY du courant CPL s'écoulant dans les appareils présents montrent des valeurs constantes de l'ordre de **350 mA pic** en **G1**, soit **3 fois** la valeur officielle.
- ⑥ Le rythme des trames CPL est très soutenu toute la journée à raison de dizaines de trames par minute. Elles circulent de façon permanente, à raison de **20 à 35 %** du temps. Cette quantité de données pose clairement plusieurs questions de nature juridique.
  - a – La question du détournement de données privées est à mettre en regard de la "désagrégation des consommations" ou "NIALM" (*non intrusive analysis load monitoring*) à laquelle s'intéresse ENEDIS pour déduire finement le mode de vie des habitants avec le LINKY.
  - b - le système LINKY communique bi directionnellement. Certaines trames linky peuvent en temps réel reconfigurer un compteur précis avec son adresse IP sans que l'usager le voie.  
De ce point de vue, le compteur LINKY ne peut PAS être considéré comme un **appareil de métrologie**, qui lui, garantit la pérennité des mesures simultanément au distributeur et au client.

- ⑦ Le rapport de l'**Union Internationale des télécommunications UIT-R. SM.2158-3** "*Incidence des systèmes de télécommunication à courants porteurs en ligne sur les systèmes de radiocommunication fonctionnant au-dessous de 80 MHz*" signale clairement que très fréquemment, lorsqu'un CPL parcourt des câbles non prévus pour, il y a dépassement fréquent des normes de rayonnement électromagnétique, et de façon imprévisible selon la topologie des câbles.
- ⑧ Les champs magnétiques haute fréquences n'existent pas dans la nature. Seuls les éclairs d'orages émettent des pics magnétiques de quelques dizaines de nanoteslas. De ce point de vue, le champ magnétique occasionné par le courant CPL LINKY peut être considéré comme un "**tapage électromagnétique**", à des fréquences qui n'étaient pas présentes jusque là dans l'électrosmog occidental.