

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| INTRODUCTION..... | 1 |
| CHAPITRE 1 DESCRIPTION DU SYSTÈME..... | 9 |
| 1.1 Capteurs de courant..... | 10 |
| 1.1.1 Capteurs à effet Hall..... | 12 |
| 1.1.2 Calculs effectués par le microcontrôleur..... | 14 |
| 1.1.3 Gestion de l'énergie..... | 15 |
| 1.1.3.1 Scénarios de prise de mesures..... | 16 |
| 1.1.3.2 Autres moyens utilisés pour une meilleure gestion de l'énergie | 19 |
| 1.2 Unité centrale de traitement..... | 20 |
| 1.2.1 Fonctions à remplir..... | 21 |
| 1.2.2 Réalisation matérielle..... | 23 |
| 1.3 Conclusion..... | 26 |
| CHAPITRE 2 CONCEPTION ET FABRICATION DU BLINDAGE MAGNÉTIQUE | 27 |
| 2.1 Méthodologie..... | 28 |
| 2.2 Résultats du blindage..... | 30 |
| 2.3 Conclusion..... | 37 |
| CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION DES CAPTEURS..... | 39 |
| 3.1 Variabilité des mesures..... | 39 |
| 3.2 Variation des mesures selon le calibre du fil..... | 42 |
| 3.3 Variation des mesures en fonction du capteur utilisé..... | 44 |
| 3.4 Variation des mesures en fonction de la distance par rapport au disjoncteur..... | 46 |
| 3.5 Variation des mesures lors de rotations dans le panneau de disjoncteurs..... | 47 |
| 3.6 Sensibilité des capteurs à la proximité d'un fil chargé..... | 49 |
| 3.7 Mesure de la puissance de transmission reçue en fonction de la distance..... | 53 |
| 3.8 Conclusion..... | 58 |
| CONCLUSION..... | 61 |
| ANNEXE I SOUS-ÉCHANTILLONNAGE D'UNE ONDE SINUSOÏDALE..... | 63 |
| ANNEXE II ERREURS DE MESURES AVEC ET SANS LE BLINDAGE MAGNÉTIQUE..... | 67 |
| ANNEXE III PLAN DU LABORATOIRE DU LACIME..... | 69 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES..... | 70 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--------------|--|
| Tableau 2.1 | Résultats du blindage magnétique du capteur 8093 33 |
| Tableau 2.2 | Résultats du blindage magnétique du capteur 8094 34 |
| Tableau 2.3 | Résultats du blindage magnétique du capteur 8095 34 |
| Tableau 2.4 | Résumé des résultats des blindages magnétiques de trois capteurs 35 |
| Tableau 3.1 | Variabilité des mesures du capteur 8093 40 |
| Tableau 3.2 | Variabilité des mesures du capteur 8094 40 |
| Tableau 3.3 | Variabilité des mesures du capteur 8095 40 |
| Tableau 3.4 | Résultats du changement de diamètre des fils avec le capteur 8093 42 |
| Tableau 3.5 | Résultats du changement de diamètre des fils avec le capteur 8094 42 |
| Tableau 3.6 | Résultats du changement de diamètre des fils avec le capteur 8095 42 |
| Tableau 3.7 | Résultats lors de changements de capteur et de courant pour une même position 45 |
| Tableau 3.8 | Résultats du capteur 8090 lors de changements de la distance par rapport au disjoncteur 46 |
| Tableau 3.9 | Résultats du capteur 8093 lors de changements de la distance par rapport au disjoncteur 46 |
| Tableau 3.10 | Résultats du capteur 8094 lors de changements de la distance par rapport au disjoncteur 47 |
| Tableau 3.11 | Résultats lors de rotations du capteur 8093 48 |
| Tableau 3.12 | Résultats lors de rotations du capteur 8094 48 |
| Tableau 3.13 | Résultats lors de rotations du capteur 8095 49 |
| Tableau 3.14 | Résultats de sensibilité du capteur 8090..... 52 |
| Tableau 3.15 | Résultats de sensibilité du capteur 8093..... 52 |
| Tableau 3.16 | Résultats de sensibilité du capteur 8094..... 52 |

LISTE DES FIGURES

| | | Page |
|-------------|---|------|
| Figure 0.1 | <i>Smart CircuitTM</i> Tirée de Watts up meters (2012) | 2 |
| Figure 0.2 | Systèmes s’installant devant la prise électrique | 2 |
| Figure 0.3 | Système de <i>Current Cost</i> Tirée de Current Cost (2013) | 3 |
| Figure 0.4 | Système de <i>TED</i> Tirée de Energy Inc. (2012) | 3 |
| Figure 0.5 | Schéma global du système Adaptée de Levasseur <i>et al.</i> (2012, p. 2)..... | 4 |
| Figure 0.6 | Système installé dans un panneau électrique | 5 |
| Figure 0.7 | Composants du système | 5 |
| Figure 1.1 | Schéma global du système Adaptée de Levasseur <i>et al.</i> (2012, p. 2)..... | 10 |
| Figure 1.2 | Schéma d’un capteur de courant Adaptée de Levasseur <i>et al.</i> (2012, p. 2) .. | 11 |
| Figure 1.3 | Capteur de courant | 11 |
| Figure 1.4 | Champ magnétique autour d’un fil Adaptée de Stannered (2007)..... | 12 |
| Figure 1.5 | Principe des capteurs à effet Hall Adaptée de Wen (2012, p. 6) | 13 |
| Figure 1.6 | Principe des transformateurs de courant Tirée de Biezl (2009)..... | 14 |
| Figure 1.7 | Courants électriques consommés par divers appareils ménagers Tirée de Weiss <i>et al.</i> (2012) | 18 |
| Figure 1.8 | Schématisation de la prise de mesure en présence de bruit | 22 |
| Figure 1.9 | Schéma électrique de l’alimentation des ports USB du <i>Raspberry Pi[®]</i> Tirée de Raspberry Pi [®] (2012, p. 3) | 24 |
| Figure 1.10 | Assemblage de l’UCT (vue de devant) | 24 |
| Figure 1.11 | Assemblage de l’UCT (vue de dessus) | 25 |
| Figure 2.1 | Principe d’auto-interférence | 28 |
| Figure 2.2 | Essais de blindages internes | 29 |
| Figure 2.3 | Essais de blindages externes..... | 30 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figure 2.4 | Blindage externe | 30 |
| Figure 2.5 | Positions de mesures 1 à 5..... | 31 |
| Figure 2.6 | Intérieur d'un disjoncteur Adaptée de Harris (2002)..... | 32 |
| Figure 2.7 | Mesures du capteur 8095 | 36 |
| Figure 3.1 | Distribution des données du capteur 8093 | 41 |
| Figure 3.2 | Distribution des données du capteur 8094 | 41 |
| Figure 3.3 | Distribution des données du capteur 8095 | 41 |
| Figure 3.4 | Variation de l'amplitude mesurée relative en fonction du calibre de fil utilisé et du courant appliqué avec le capteur 8093 | 43 |
| Figure 3.5 | Variation de l'amplitude mesurée relative en fonction du calibre de fil utilisé et du courant appliqué avec le capteur 8094 | 43 |
| Figure 3.6 | Variation de l'amplitude mesurée relative en fonction du calibre de fil utilisé et du courant appliqué avec le capteur 8095 | 44 |
| Figure 3.7 | Résultats lors de changements de capteur et de courant pour une même position | 45 |
| Figure 3.8 | Positions de mesure dans le panneau de disjoncteurs | 48 |
| Figure 3.9 | Schéma du montage pour la prise de mesure | 50 |
| Figure 3.10 | Résultats lorsqu'un fil chargé est approché du capteur 8090 | 50 |
| Figure 3.11 | Résultats lorsqu'un fil chargé est approché du capteur 8093 | 51 |
| Figure 3.12 | Résultats lorsqu'un fil chargé est approché du capteur 8094 | 51 |
| Figure 3.13 | Panneaux de disjoncteurs..... | 53 |
| Figure 3.14 | Valeur moyenne du RSSI en fonction de la distance Sans boîtier | 55 |
| Figure 3.15 | Valeur moyenne du RSSI en fonction de la distance Petit boîtier métallique | 55 |
| Figure 3.16 | Valeur moyenne du RSSI en fonction de la distance Grand boîtier métallique | 56 |
| Figure 3.17 | Pourcentage de paquets radio perdus en fonction de la distance Sans boîtier..... | 56 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 3.18 | Pourcentage de paquets radio perdus en fonction de la distance Petit boîtier métallique | 57 |
| Figure 3.19 | Pourcentage de paquets radio perdus en fonction de la distance Grand boîtier métallique..... | 57 |

Rapport-Gratuit.com

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|--------|---|
| ADC | Convertisseur analogique numérique (<i>Analog to Digital Converter</i>) |
| AWG | <i>American Wire Gauge</i> |
| CT | Transformateur de courant (<i>current transformer</i>) |
| ÉTS | École de technologie supérieure |
| IC | Circuit intégré (<i>integrated circuit</i>) |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| LACIME | Laboratoire de communications et d'intégration de la microélectronique |
| PWM | Modulation de largeur d'impulsion (<i>pulse width modulation</i>) |
| RMS | Valeur efficace (<i>root mean square</i>) |
| RSSI | <i>Received signal strength indication</i> |
| UCT | Unité centrale de traitement |
| USB | <i>Universal serial bus</i> |

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

| | |
|-------|-----------------------------|
| A | Ampère |
| A/m | Ampère par mètre |
| f_s | Fréquence d'échantillonnage |
| Hz | Hertz |
| mA | Milliampère |
| MHz | Mégahertz |
| Mo | Mégaoctet |
| ms | Milliseconde |

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, la consommation d'énergie, ou plutôt la surconsommation d'énergie, est un problème auquel plusieurs groupes environnementaux et entreprises tentent de remédier. Pour ce faire, plusieurs systèmes ont été développés afin d'informer les usagers de leur consommation d'énergie électrique résidentielle. Ce travail fait partie d'un large projet qui s'inscrit dans ce courant technologique. Ce projet consiste à concevoir, analyser, caractériser et fabriquer un nouveau système de capteurs mesurant la consommation électrique. Afin de mieux situer l'état de l'art dans ce domaine, il est opportun de décrire sommairement cinq modèles ayant du succès commercialement :

1. Le fabricant *Watts up ?* offre un système qui s'installe dans un panneau séparé du panneau électrique et dans lequel est installé un ensemble de *Smart CircuitTM*, tel qu'illustré à la figure 0.1. Chacun de ces *Smart CircuitTM* est relié à l'Internet par un câble Ethernet et possède aussi un port USB pour un réglage sur place à partir d'un ordinateur. Ces composants coûtent près de 200\$ l'unité sans compter l'installation. Avec ce système, l'utilisateur peut, à distance, alimenter ou couper le courant sur un ou plusieurs circuits. Il a aussi accès à 18 paramètres (puissance consommée, facteur de puissance, fréquence, rapport cyclique, tension, courant, etc.) concernant les circuits qui sont contrôlés.
2. Les compagnies *UPM Marketing* et *P3 International* offrent des appareils qui se branchent dans une prise de courant entre l'appareil à mesurer et le mur. Avec les deux produits, il est possible de visualiser la consommation énergétique de même que certaines autres informations (tension, courant, puissance, facteur de puissance, etc.), et ce, directement sur l'écran ACL tel que montré à la figure 0.2. Ces capteurs n'offrent aucune possibilité d'accès à distance et sont offerts pour moins de 30\$ chacun.
3. Les compagnies *Current Cost* et *The Energy Detective (TED)* offrent des systèmes de mesures plus complets. Chaque compagnie vend un système comprenant un ou plusieurs transformateurs de courant (CT) pour mesurer précisément le courant total consommé, un affichage portable ainsi que le nécessaire pour effectuer la communication entre les



Figure 0.1 *Smart Circuit*TM
Tirée de Watts up meters (2012)



(a) EM130
Tiré de UPM Marketing
(2010)

(b) Kill A WattTM
Tiré de P3
International
Corporation (2013)

Figure 0.2 Systèmes s'installant devant la prise électrique

composants tel que montré par les figures 0.3 et 0.4. Le système de *Current Cost* utilise le protocole C², basé sur la norme IEEE 802.15.4, pour transmettre l'information d'un composant à un autre. Ce fabricant offre aussi la possibilité d'ajouter des moni-

teurs individuels d'appareils (Individual Appliance Monitors (IAMs)) afin de cibler un appareil directement et de connaître précisément sa consommation. Chez *TED*, ils ont opté pour la communication par courants porteurs en ligne (power line communication), c'est-à-dire qu'ils communiquent en envoyant leurs données sur le réseau électrique déjà en place dans la maison. Finalement, en ce qui concerne le coût d'acquisition, le système de base de *Current Cost* est disponible pour environ 80\$ tandis que celui de *TED* coûte au minimum 240\$.



Figure 0.3 Système de *Current Cost*
Tirée de Current Cost (2013)



Figure 0.4 Système de *TED*
Tirée de Energy Inc. (2012)

En se basant sur les avantages et inconvénients de ces produits, le système présenté dans ce document a été conçu et réalisé. L'objectif était d'avoir un produit peu dispendieux offrant un portrait détaillé de la consommation électrique en temps réel.

Le produit final est un réseau de capteurs sans-fils pour mesurer la consommation électrique résidentielle (voir figure 0.5). Un capteur est installé sur chaque fil sortant d'un disjoncteur dans le panneau électrique de la maison (voir figure 0.6). Ce capteur effectue une lecture du courant circulant dans un fil grâce à un capteur à effet Hall et communique ses lectures à une unité centrale de traitement (UCT) située à proximité (voir figure 0.7). Cette UCT est reliée à l'Internet par un câble Ethernet ou par WiFi ce qui permet à l'utilisateur d'accéder à ses informations en tout temps à partir de n'importe où. Avec ce système, l'usager a accès à sa consommation totale d'énergie de même qu'à la répartition de cette consommation dans sa maison. Il est ensuite de sa responsabilité d'apporter les correctifs à ses habitudes de vie afin de diminuer cette consommation et ainsi réduire son impact sur l'environnement. Selon Darby (2006, p. 3), en ayant connaissance de la distribution dans sa maison, un usager tend à réduire sa consommation de 5 à 15%.

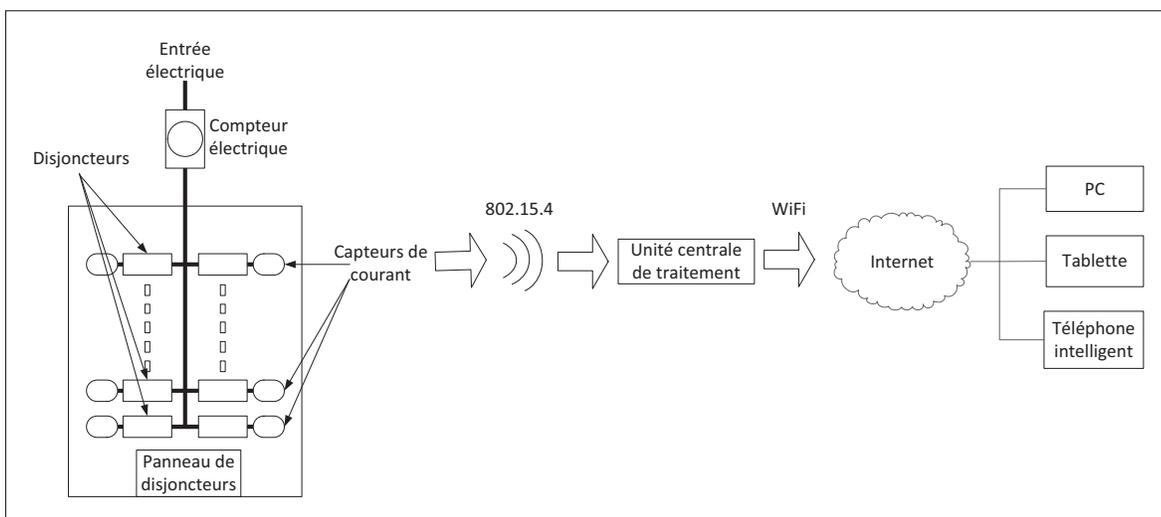


Figure 0.5 Schéma global du système
Adaptée de Levasseur *et al.* (2012, p. 2)



Figure 0.6 Système installé dans un panneau électrique

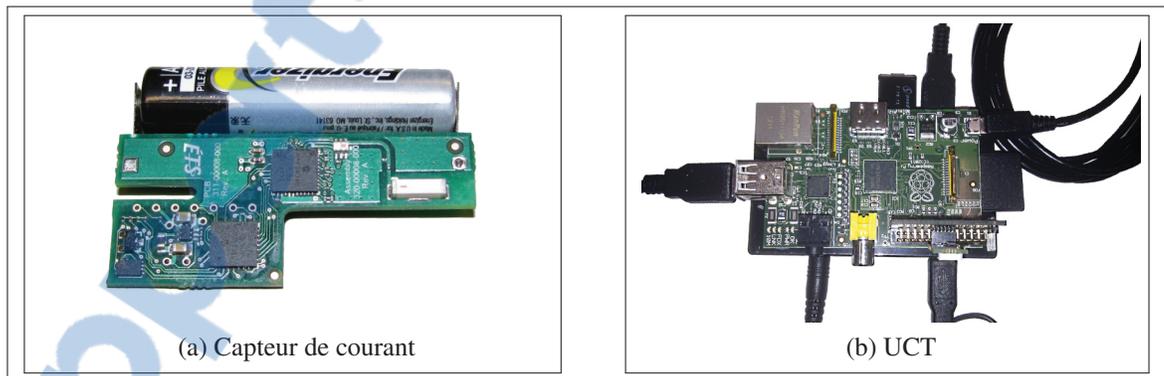


Figure 0.7 Composants du système

Ce travail de recherche a pour objectif, dans le cadre de ce projet, de décrire chaque composant constituant le système de même que leur méthode de fonctionnement. Cela inclut la description de l'UCT ainsi que des capteurs de courant. Le chapitre 1 sera dédié à cette description.

Lorsqu'en présence d'autres champs magnétiques ou lorsqu'ils changent d'orientation, les capteurs sont trop sensibles et leurs mesures fluctuent considérablement. Une des tâches à accomplir a donc été de concevoir un blindage magnétique afin de réduire l'impact des champs magnétiques externes et des rotations et, ensuite, de valider l'impact de ce blindage tel que présenté dans le chapitre 2.

Enfin, aucune donnée sur les performances du système n'était accessible ou même connue. Il fallait créer cette base de connaissances. Le chapitre 3 sera donc consacré à cette tâche de caractérisation. Plusieurs facteurs influençant les performances des capteurs seront vérifiés et analysés.

Contributions au projet

J'ai apporté les contributions suivantes dans le cadre de ce projet :

- conception et optimisation du blindage magnétique. Une diminution de plus de 50% des variations a été atteinte ;
- publication d'un article (voir Levasseur *et al.* (2012)) lors de la conférence *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE 2012)* ;
- préparation et installation des systèmes pilotes. Plus de 250 capteurs ont été assemblés et calibrés en préparation pour les installations de pilotes ;
- caractérisation détaillée des capteurs de courant. Une multitude de tests ont été effectués sur les capteurs afin de déterminer précisément leurs performances :
 - évaluation de l'écart-type des mesures des capteurs ;
 - observation des variations de mesures en fonction du calibre de fil ;
 - comparaison entre plusieurs capteurs dans des conditions identiques ;
 - mesure de la variation des mesures en fonction de la distance par rapport au disjoncteur ;
 - étude de la sensibilité des capteurs à la proximité d'un fil chargé ;

- analyse des variations de mesures lorsque les capteurs changent d'orientation par rapport au fil ;
- détermination de la distance limite entre les capteurs et l'UCT dans différentes conditions.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DU SYSTÈME

Dans ce chapitre, une description complète du système analysé est présentée. Ce projet consiste en un système de mesure de la consommation électrique de bâtiments résidentiels de manière non intrusive dans le but d'offrir des mesures précises et détaillées de la consommation de la maison avec une installation simple. Pour y parvenir, le système discuté dans ce texte comprend un seul type de capteurs, installés directement dans le panneau de disjoncteurs. Un capteur est attaché sur chaque fil sortant des disjoncteurs. De cette manière, la consommation précise de chaque circuit est connue et la consommation totale est calculée en effectuant la somme de tous les capteurs. Comme les appareils les plus énergivores (réfrigérateur, cuisinière, laveuse, sècheuse, aspirateur, lave-vaisselle...) sont habituellement seuls sur un disjoncteur, la lecture de la consommation de ces appareils est très précise. Pour les plus petits appareils (grille-pain, micro-onde, téléviseur, lumières...), le système permet de connaître la consommation d'un ensemble de ces appareils, souvent regroupés par pièce. Un autre objectif du projet est de concevoir un système à un prix compétitif. Ainsi, son coût d'acquisition sera vite remboursé par les économies effectuées grâce aux changements apportés aux habitudes de vie de l'utilisateur.

Le système présenté dans ce document est composé de plusieurs composants tels que montrés à la figure 1.1. Comme illustré, un capteur de courant est installé sur chacun des fils sortants des disjoncteurs du panneau électrique de la maison. Ces capteurs communiquent leurs données par le protocole de communication IEEE 802.15.4 à un module chargé d'agréger les données de tous les capteurs, de les manipuler mathématiquement et ensuite de les transmettre sur Internet (voir section 1.2.1). Une fois sur Internet, les données peuvent être consultées partout sur un ordinateur, une tablette ou un téléphone intelligent permettant ainsi à l'utilisateur de connaître sa consommation d'énergie et de poser des gestes concrets pour la réduire.

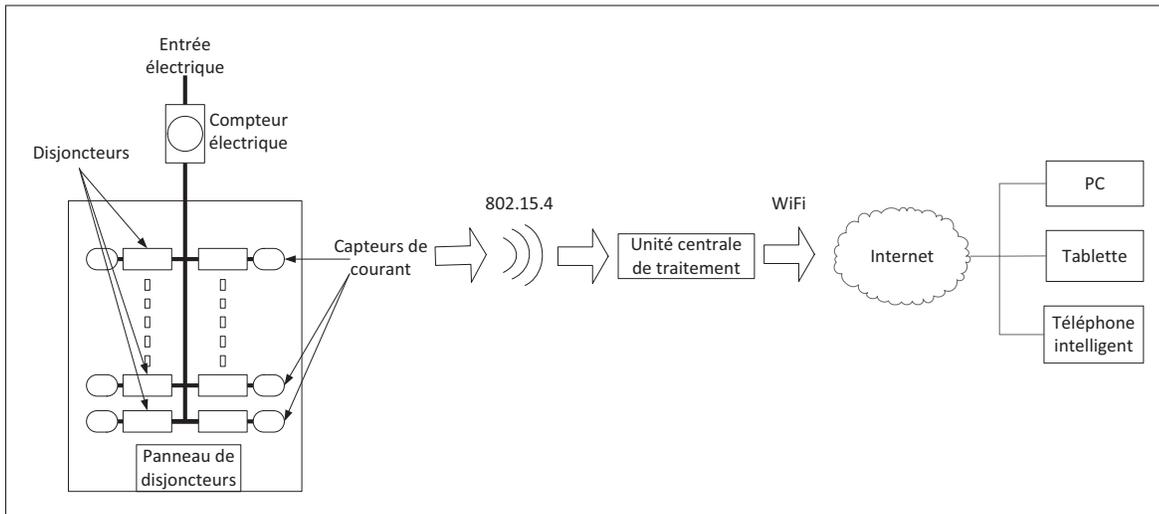


Figure 1.1 Schéma global du système
Adaptée de Levasseur *et al.* (2012, p. 2)

1.1 Capteurs de courant

Les capteurs de courant ont la fonction, comme leur nom l'indique, de mesurer le courant circulant dans le fil auquel ils sont rattachés. Pour effectuer cette tâche, chaque capteur est constitué de plusieurs éléments. La figure 1.2 représente l'architecture interne des capteurs. Chaque capteur est alimenté à partir d'une pile AAA qui lui offre une autonomie d'environ deux ans. Afin de pouvoir mesurer le champ magnétique du fil auquel le capteur est rattaché, l'effet Hall est utilisé. Pour convertir la sortie analogique du capteur à effet Hall en valeur numérique, un convertisseur analogique numérique (ADC) est employé. Ce convertisseur est intégré à l'intérieur du microcontrôleur. Ce dernier effectue quelques opérations mathématiques avec les données, gère la consommation d'énergie de chaque composant afin d'économiser la pile et finalement achemine les données au module de transmission radio. Le module radio prépare le paquet pour la transmission et envoie ce dernier à l'antenne.

Chacune de ces composantes est assemblée sur un circuit imprimé tel qu'illustré à la figure 1.3. Ce circuit imprimé est ensuite inséré dans un boîtier de plastique spécialement conçu afin de pouvoir s'accrocher sur un fil électrique à l'aide de deux crochets, et aussi d'assurer une distance fixe par rapport à ce fil. Finalement, la dernière composante des capteurs de courant

est le blindage magnétique. Ce dernier sert à diminuer les effets des changements de position par rapport à la position de calibration de même que les problèmes de diaphonie (*crosstalk*) dus à la proximité des autres fils. Il est constitué d'une tôle de mumétal découpée selon le gabarit déterminé à la section 2.1 et est installé sur le pourtour du boîtier de plastique.

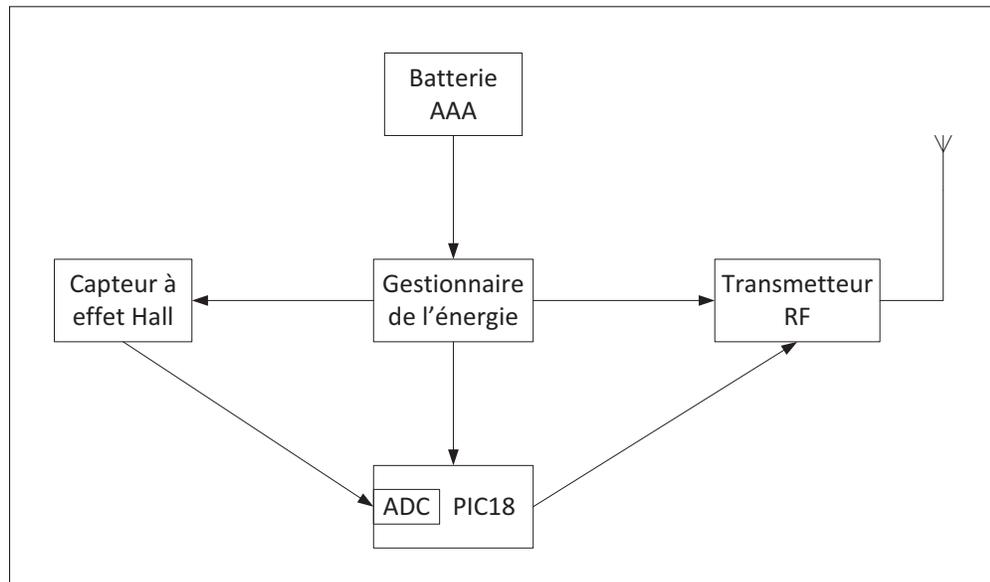


Figure 1.2 Schéma d'un capteur de courant
Adaptée de Levasseur *et al.* (2012, p. 2)



Figure 1.3 Capteur de courant

1.1.1 Capteurs à effet Hall

Les capteurs à effet Hall ont été sélectionnés dans ce projet pour plusieurs raisons. Cette section explique les raisons qui ont orienté ce choix. Leur principe de fonctionnement est décrit ainsi que leurs avantages et inconvénients en comparaison avec les transformateurs de courant (CT) dans le cadre de ce projet.

D'abord, lorsqu'un courant électrique circule dans un conducteur, un champ magnétique est généré autour de ce conducteur, tel qu'illustré à la figure 1.4.

En considérant un conducteur de longueur infinie et en utilisant le théorème d'Ampère, l'intensité de ce champ magnétique est exprimée comme suit (Brander *et al.* (2009, p. 18)) :

$$H = \frac{I}{(2 \cdot \pi \cdot r)} \quad (1.1)$$

où H représente le champ magnétique en A/m , I représente le courant circulant dans le fil et r représente la distance entre le centre du fil et le capteur. C'est ce champ H que les capteurs à effet Hall mesurent.

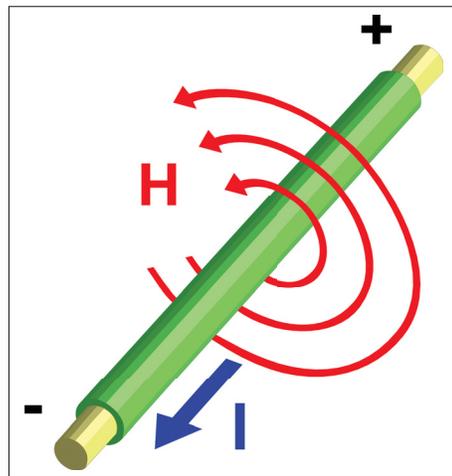


Figure 1.4 Champ magnétique autour d'un fil
Adaptée de Stannered (2007)

L'effet Hall peut être décrit de la manière suivante : lorsqu'un champ magnétique traverse une plaque métallique dans laquelle circule un courant électrique, une différence de potentiel apparaît entre les extrémités de cette plaque, orthogonalement au champ magnétique et au courant tel que montré à la figure 1.5. Les capteurs Hall étant basés sur ce phénomène, ils détectent les variations de tension qui se produisent aux bornes de leur cœur métallique. Les capteurs à effet Hall peuvent avoir une petite taille et peuvent être intégrés dans des circuits intégrés (IC). Ceci représente le premier avantage des capteurs à effet Hall par rapport aux CT. En effet, les CT sont constitués d'un cœur ferromagnétique et de bobinage qui font généralement le tour du fil duquel ils mesurent le champ magnétique (voir figure 1.6). Cela implique donc une taille largement supérieure à celle des capteurs à effet Hall. Ils ne peuvent donc pas être insérés dans un IC. Ceci représente donc des coûts de fabrication plus élevés et une économie d'échelle moins profitable. Les capteurs à effet Hall étant créés à partir de silicium dopé, ils peuvent être intégrés dans des IC et ainsi, en grande quantité, les coûts de fabrication sont faibles.

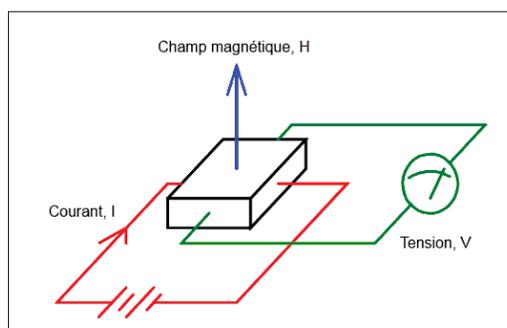


Figure 1.5 Principe des capteurs à effet Hall
Adaptée de Wen (2012, p. 6)

Avec le modèle sélectionné, c'est-à-dire le modèle A1393SEHLT-T (voir Allegro MicroSystems inc. (2011)), plusieurs autres composantes sont intégrées dans le circuit intégré afin d'offrir une sortie linéaire en fonction de l'intensité du champ magnétique qui le traverse.

Un autre avantage majeur est la facilité d'installation liée à la taille. Dans plusieurs cas, l'espace disponible est insuffisant dans le panneau de disjoncteurs pour installer des capteurs

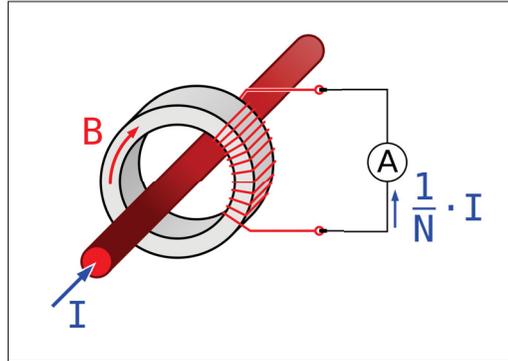


Figure 1.6 Principe des transformateurs de courant
Tirée de Biezl (2009)

de type CT. Parmi ces raisons, l'avantage de la taille a été déterminant dans le choix de la solution à retenir.

En contrepartie, les capteurs à effet Hall n'ont pas la précision des CT. En effet, les CT étant placés tout autour des fils, ils capturent la quasi-totalité du champ magnétique à mesurer et offrent ainsi une mesure précise. Par leur design, ils sont aussi insensibles aux champs magnétiques générés par des sources externes. Ce n'est pas le cas des capteurs à effet Hall. Ces derniers sont sensibles à tous les champs magnétiques auxquels ils sont soumis, pourvu que ce champ magnétique soit perpendiculaire au plan de leur cœur métallique. En raison de cela, un travail supplémentaire a dû être fait pour contrer les champs magnétiques nuisibles (voir section 2.1). Malgré tout, avec une calibration satisfaisante et un blindage magnétique, les données recueillies sont suffisamment précises (voir chapitre 3) pour obtenir une bonne indication de la consommation électrique pour cette application.

1.1.2 Calculs effectués par le microcontrôleur

Le capteur à effet Hall mesure la valeur instantanée du courant dans le fil auquel il est rattaché (idéalement un sinus à 60Hz). Les mesures effectuées par celui-ci sont de nature analogique. Les capteurs à effet Hall envoient une tension proportionnelle au champ magnétique qu'ils mesurent. La première étape pour pouvoir manipuler ces données est de convertir ces valeurs analogiques en valeurs numériques. Le microcontrôleur possède un ADC de 10 bits

sur quelques-unes de ses entrées, qui permet d'échantillonner et de convertir la tension à ces entrées en nombre binaire. Une fois le signal analogique converti en signal numérique, le microcontrôleur peut effectuer les calculs nécessaires.

Avant de transmettre les mesures faites par le capteur Hall, le microcontrôleur doit effectuer quelques opérations mathématiques sur celles-ci. Sachant que la valeur efficace (RMS) d'un signal échantillonné est (Nilsson et Riedel (2008, p. 355)) :

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^N I_n^2 \right)} \quad (1.2)$$

où N est le nombre d'échantillons par transmission et I_n représente chaque valeur mesurée, le capteur doit effectuer quelques-unes des opérations nécessaires à ce calcul.

Pour ne pas introduire d'erreurs dans le calcul de la valeur RMS, le capteur ne peut pas simplement transmettre la somme des mesures à l'unité centrale de traitement (UCT) ; il se doit d'envoyer chaque valeur I_n indépendamment, la somme des carrés des mesures ou encore la valeur I_{rms} calculée. Tel que mentionné dans la section 1.1.3, les transmissions étant très coûteuses en énergie, il n'est pas envisageable de transmettre chaque valeur mesurée. Aussi, le calcul de la valeur RMS nécessitant le calcul d'une racine carrée, cette opération mathématique est aussi très coûteuse en énergie. Il est donc préférable d'effectuer le calcul de la somme des carrés et de transmettre cette information vers l'UCT :

$$I_{tx} = \sum_{n=1}^N I_n^2 \quad (1.3)$$

Ainsi, les deux opérations mathématiques les plus énergivores, soient la division et la racine carrée, sont effectuées dans l'UCT, ce qui économise la pile des capteurs.

1.1.3 Gestion de l'énergie

Un point critique dans la conception des capteurs est la quantité limitée d'énergie. En effet, les capteurs étant alimentés par batterie, la quantité d'énergie disponible est finie et, par consé-

quent, la durée de vie. Afin d'optimiser la gestion de cette énergie dans le but de maximiser la durée de vie des capteurs, plusieurs actions ont été posées. Tout d'abord, au niveau du principe de fonctionnement, un travail a été fait afin de minimiser le rythme de prises de mesures et donc leurs transmissions. De plus, le microcontrôleur se charge d'éteindre le maximum de composants lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

D'abord, la consommation globale du circuit est connue pour chaque phase de fonctionnement. En effet, selon Levasseur *et al.* (2012, p. 3), la consommation du système est la suivante : 21 μA en phase de sommeil, 5 mA lors d'une mesure et enfin 27,8 mA lors d'une transmission. De plus, la durée de ces deux dernières étapes est connue : 18 ms pour prendre une mesure et 4,3 ms pour transmettre un paquet de données. Selon le fabricant (Energizer (2012)), une pile AAA alcaline possède environ 1200 mAh lorsque déchargée constamment à un rythme de 25 mA. Connaissant ces données, les scénarios suivants ont été élaborés.

1.1.3.1 Scénarios de prise de mesures

Dans cette section, trois scénarios de prise de mesures et de transmission des données sont abordés et décrits : suréchantillonnage constant, suréchantillonnage en salves et sous-échantillonnage constant. Le dernier scénario est celui qui a été implémenté dans le projet final.

Scénario 1

Tout d'abord, le scénario le plus intuitif à concevoir est celui où un suréchantillonnage constant est effectué. En effet, en respectant le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon :

$$F_s > 2 \cdot F_H \quad (1.4)$$

où F_s est la fréquence d'échantillonnage et F_H est la composante fréquentielle la plus élevée du signal continu désiré, la reconstruction parfaite du signal original est assurée. (Bose (2004, p. 7))

Dans le cas présent, en supposant des variations occasionnelles sur le signal de 60 Hz, en sélectionnant une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz, plusieurs harmoniques du signal seront capturées et l'évaluation de la consommation électrique sera pratiquement parfaite.

Par contre, ce mode de fonctionnement n'est pas envisageable en raison de sa trop forte consommation en énergie. En échantillonnant à cette vitesse, la pile ne fera fonctionner le capteur que très peu de temps. D'autres concepts ont donc été testés.

Scénario 2

En se basant sur le premier scénario, dans l'optique d'obtenir des résultats précis et rapidement, le scénario 2 effectue un suréchantillonnage en salves, à intervalles réguliers de cinq secondes. Le taux de suréchantillonnage a été fixé à 20 de manière à être très précis durant la prise de mesure. Cela veut donc dire que 20 échantillons sont prélevés durant un cycle de 60 Hz toutes les cinq secondes.

Le principal problème de ce scénario est lorsqu'il y a des variations momentanées dans la consommation de courant. En effet, les appareils électriques utilisés dans une maison n'ont pas tous une consommation constante. La figure 1.7 montre la consommation électrique de trois appareils électriques fréquemment utilisés dans une maison. Dans le cas du fer à repasser, la consommation est sans variations. Cela est idéal pour ce scénario. Par contre, dans le cas de la télévision ACL ou de l'aspirateur, plusieurs crêtes de courant sont présentes sur les graphiques. Si ces crêtes se produisent toutes dans des périodes de sommeil du capteur de courant, ou qu'à chaque mesure il y a une crête de courant, une grande erreur apparaîtra entre la mesure et ce qui a été réellement consommé.

Scénario 3

La troisième possibilité considérée consiste à sous-échantillonner le signal de 60 Hz. La valeur RMS d'un sinus sous-échantillonné est la même, lorsque le nombre d'échantillons est grand ou lorsqu'un nombre entier de cycles est complété (voir annexe I). En effectuant un sous-échantillonnage à 3,08 Hz, il est possible d'observer les variations qui se produisent sur le courant consommé tout en économisant l'énergie de la pile. Par contre, le fait de sous-

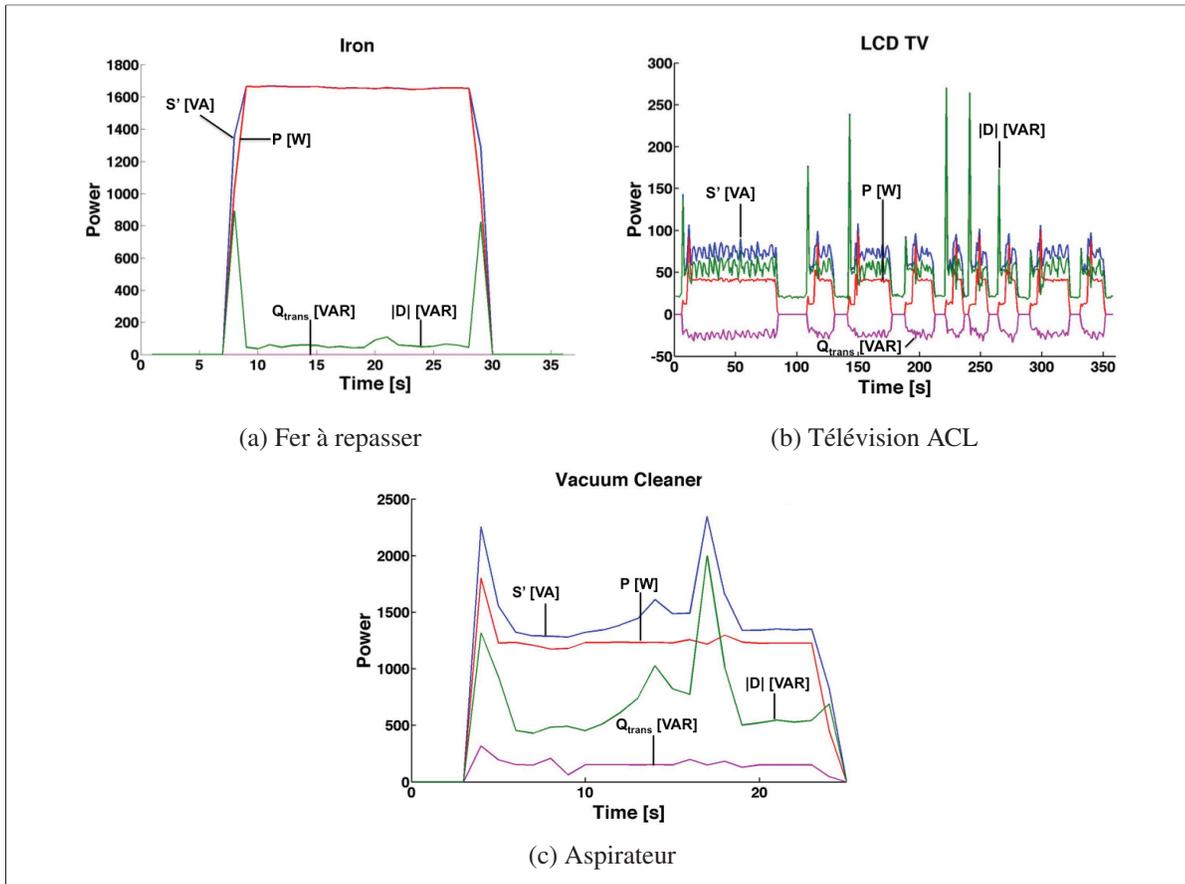


Figure 1.7 Courants électriques consommés par divers appareils ménagers
Tirée de Weiss *et al.* (2012)

échantillonner introduit une latence dans le circuit. La valeur RMS du signal ne peut être connue avant d'avoir effectué plusieurs cycles de mesures. Comme mentionné à l'annexe I, pour obtenir la valeur RMS exacte du signal mesuré, il faut attendre un minimum de 25 secondes. Pour réduire ce délai et obtenir une estimation du courant consommé plus rapidement, une transmission est effectuée à tous les 18 échantillons, soit un peu plus de six secondes. Cela permet à l'utilisateur d'avoir accès à sa consommation électrique pratiquement en temps réel. Il s'agit, évidemment, d'un compromis. Le calcul de la valeur RMS avec seulement 18 échantillons introduit une oscillation sur les mesures. Par contre, la valeur moyenne de la valeur RMS à long terme est exacte et, par conséquent, le calcul de l'énergie sur une longue période aussi.

Bien entendu, si certains appareils causent des variations de courant plus rapide que de l'ordre de la seconde, la fréquence d'échantillonnage choisie de 3,08 Hz introduira une erreur dans la mesure. Étant donné que ce projet vise une estimation de la consommation électrique et non pas une mesure parfaite, ces erreurs entrent dans la tolérance générale du projet, fixée à $\pm 10\%$. Cette fréquence d'échantillonnage permet d'obtenir une autonomie suffisante avec les piles (autonomie qui est estimée à environ deux ans).

1.1.3.2 Autres moyens utilisés pour une meilleure gestion de l'énergie

Lorsque le système ne prend pas de mesures, le microcontrôleur se met en veille et se charge d'éteindre le maximum de composants sur le circuit imprimé. Ainsi, il coupe l'alimentation de l'ADC, du capteur à effet Hall, du module radio et de l'ensemble du microcontrôleur à l'exception du *watchdog*. Cela permet de réduire la consommation électrique totale du circuit. Le *watchdog* est le mécanisme interne au microcontrôleur qui permet le réveil de ce dernier à intervalles réguliers. Cette fréquence de réveil est réglable tel que mentionné dans Microchip Technology inc. (2010b, p. 308) et expliqué à l'annexe I.

Afin de réduire la consommation d'énergie lors des transmissions, il n'existe pas de liens bidirectionnels entre les capteurs et l'UCT. Les capteurs envoient leurs paquets radio sans attendre d'accusé-réception. En raison de cela, il est probable que des paquets ne parviennent pas à destination dû à des collisions avec d'autres paquets envoyés par d'autres capteurs. Les capteurs ayant une puissance d'émission plus faible que les autres sont écrasés par ceux plus forts et donc, de longs délais peuvent se produire entre deux réceptions de paquets radio de ces capteurs. Dans l'implémentation originale des capteurs, ces délais pouvaient durer plusieurs heures. Cela étant non désirable, une solution a été trouvée et implémentée dans la solution actuelle. Ces délais ont été réduits à quelques minutes tout au plus.

Comme les capteurs transmettent leurs données sans s'assurer de la réception de ces derniers, si tous les capteurs sont synchronisés, il y a beaucoup de conflits et plusieurs paquets radio sont corrompus. Pour tenter de diminuer les occasions de collisions, une pause de durée aléatoire est ajoutée après chaque transmission. La durée de cette pause est égale à 15 ms multipliées

par un nombre aléatoire, contenu entre 1 et 31, qui est fonction de la valeur contenue dans l'accumulateur de valeurs du capteur :

$$t_{off} = ((1 + acc) \& 31) \cdot 15ms \quad (1.5)$$

où t_{off} est la durée de la pause aléatoire et acc est la valeur contenue dans l'accumulateur de valeurs RMS transmises. En effectuant un "ET" logique avec le nombre 31, seuls les cinq bits les moins significatifs sont conservés, ce qui génère un délai maximum de 465 ms, soit la multiplication de 31 et de 15 ms. Suite à cette pause, le capteur se remet en veille jusqu'à la prochaine prise de mesure, c'est-à-dire 325 ms plus tard.

En ayant cette pause de durée aléatoire, le réveil de plusieurs microcontrôleurs en même temps est très peu probable. Cela survient tout de même, mais de manière beaucoup moins fréquente et, plus important, la probabilité de deux collisions subséquentes est diminuée de façon significative.

Pour réduire l'impact lors de la corruption de paquets radio, en plus de transmettre la somme des carrés des valeurs de courant mesurées au cours des derniers 18 échantillons, chaque capteur transmet également le numéro d'identification de cette transmission (valeur qui débute à zéro lors de l'insertion de la pile et qui incrémente d'un à chaque transmission) ainsi que la somme de toutes les valeurs transmises jusqu'à présent. Cela permet à l'UCT de combler les trous lors de collisions des paquets radio (voir section 1.2.1).

1.2 Unité centrale de traitement

L'unité centrale de traitement (UCT) est le cœur de ce système. Elle est principalement réalisée à l'aide d'un *Raspberry Pi*[®], un mini ordinateur fonctionnant sous Linux. Elle agit comme interface entre les capteurs dans le panneau électrique et l'utilisateur, où qu'il soit. Dans cette section, les fonctions de l'UCT sont détaillées ainsi que la manière dont elle a été réalisée.

1.2.1 Fonctions à remplir

La communication avec les capteurs s'effectue en utilisant le protocole IEEE 802.15.4. Ce protocole n'est pas utilisé dans sa totalité afin de réduire la consommation électrique des capteurs. Comme mentionné dans la section 1.1.3.2, la communication se fait à sens unique, c'est-à-dire que les capteurs envoient leurs données, mais que l'UCT ne répond pas lorsqu'elle les reçoit. Elle n'envoie pas d'accusé-réception. Cela implique que si les données du capteur ne sont pas reçues correctement, le capteur ne le sait pas et ne retransmet pas ses informations. Il y a donc une perte d'information. Afin de réduire l'impact de ces pertes de données, le mécanisme présenté dans le prochain paragraphe est utilisé.

L'UCT s'assure qu'elle n'a pas manqué de paquets en provenance d'un capteur à l'aide des index de transmissions. S'il lui manque un ou plusieurs paquets, l'UCT effectue une interpolation linéaire pour la durée de la panne de communication en se servant de la somme des mesures actuelles et de la somme du dernier paquet reçu avant l'interruption. Ces erreurs sont majoritairement dues aux conflits entre deux ou plusieurs capteurs qui transmettent en même temps. Ensuite, l'UCT complète le calcul de la valeur RMS entamé par les capteurs en effectuant la division par le nombre d'échantillons puis la racine carrée (voir section 1.1.2). Elle applique aussi les facteurs de correction pour la pente et l'ordonnée à l'origine de la relation linéaire entre la tension mesurée et le courant réel (calculées lors d'une phase de calibration) et transmet ces données sur Internet.

Une autre tâche essentielle de l'UCT est de faire la liaison avec le monde extérieur. Elle doit agir comme interface de communication entre le panneau électrique et l'utilisateur. Pour y parvenir, l'UCT est connectée à Internet soit avec un câble Ethernet ou encore à l'aide d'une clé USB WiFi qui se lie avec le routeur principal de la maison. Avec cette connexion Internet, l'UCT envoie ses données à un serveur qui accumule les données et héberge un site Web pour afficher les résultats. Ce site affiche les données en temps réel, de même qu'un historique horaire, quotidien, mensuel et annuel. En plus de fournir les données à ce site, l'UCT gère sa propre interface Web. En se connectant sur le port 80 de l'UCT, l'utilisateur a accès à toutes les données recueillies par l'UCT en provenance des capteurs.

Afin d'obtenir des résultats plus représentatifs, un traitement supplémentaire est effectué sur les données recueillies. Malgré le fait que l'ordonnée à l'origine et la pente soient ajustées pour chaque capteur, il reste une erreur à corriger. Dans ce traitement, le bruit de chaque capteur est en partie corrigé. En effet, chaque capteur a des erreurs de bruit thermique qui lui sont propres. Ce bruit thermique est additif aux échantillons temporels du courant mesuré (voir la figure 1.8). Comme la valeur RMS est calculée, le bruit contribue à cette valeur RMS - i.e. la valeur moyenne du bruit, après calcul RMS, n'est pas nulle. Ceci a pour effet de faire augmenter constamment (de façon erronée) la mesure de l'énergie consommée par un appareil. Il faut donc tenir compte de ce bruit et le soustraire à chaque mesure prélevée par les capteurs tel que décrit ci-dessous.

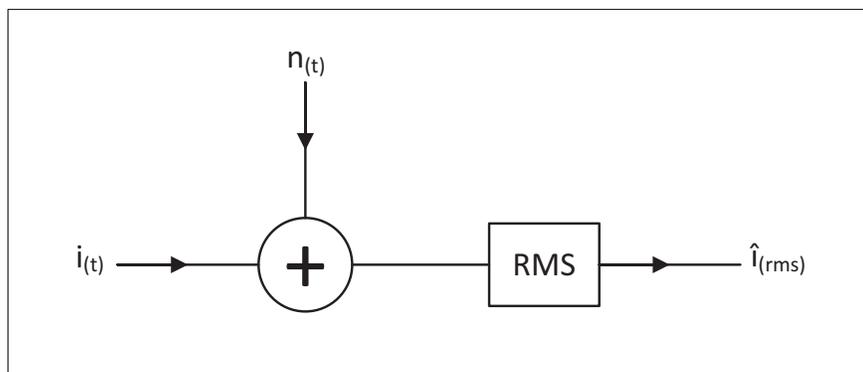


Figure 1.8 Schématisation de la prise de mesure en présence de bruit

Afin de déterminer la valeur du bruit de chaque capteur, lors de la phase de calibration, une série de mesure est prise lorsqu'aucun courant ne circule dans le fil à mesurer. La valeur RMS de ces mesures est calculée. Cela donne le plancher de bruit.

Sachant que la puissance d'un signal est égale à la valeur RMS de ce signal au carré (voir Selik *et al.* (2004)), en se basant sur la figure 1.8, il est possible de retrouver la valeur réelle du courant mesuré à l'aide de l'équation suivante :

$$i_{rms} = \text{sgn} \left(\hat{i}_{rms}^2 - n_{rms}^2 \right) \cdot \sqrt{\left| \hat{i}_{rms}^2 - n_{rms}^2 \right|} \quad (1.6)$$

où sgn retourne le signe de l'expression qu'il évalue, i_{rms} est la valeur réelle du courant, \hat{i}_{rms} est la valeur mesurée du courant et n_{rms} est la valeur moyenne du bruit mesuré. Dans cette figure, le courant réel traversant le fil à cet instant est additionné à la valeur du bruit du capteur. Ensuite, le système prend la mesure RMS de cette somme. Pour retrouver la valeur du courant de départ, il faut donc procéder à l'envers tel que démontré par l'équation 1.6.

1.2.2 Réalisation matérielle

L'UCT est réalisée à l'aide d'un *Raspberry Pi*[®]. Ce petit ordinateur offre tout le nécessaire en terme de performance, de taille et de coût pour remplir les tâches requises pour ce projet. Se détaillant à 35\$ et offrant deux ports USB, 512 Mo de mémoire vive, un processeur ARM à 700 MHz et une sortie vidéo HDMI (*Raspberry Pi*[®] (2013)), cet appareil convient parfaitement aux besoins du système. En plus du *Raspberry Pi*[®], un concentrateur USB a dû être ajouté afin de respecter les standards USB en terme de courant offert en sortie. Le *Raspberry Pi*[®] étant limité à un courant de sortie de 140 mA par design (voir les fusibles réarmables *miniSMDC014* sur la figure 1.9), un concentrateur USB a été ajouté afin de hausser ce courant à 500 mA et ainsi permettre à l'antenne WiFi USB de fonctionner. Avec l'ajout du concentrateur USB, non seulement le courant maximal d'alimentation des périphériques USB est augmenté, mais, en plus, il est maintenant possible de brancher deux appareils USB supplémentaires, ce qui est pratique lors des périodes de tests. L'assemblage final est montré aux figures 1.10 et 1.11. Sur ces images, il est possible de remarquer, dans le coin inférieur droit, un petit circuit se connectant sur le port parallèle du *Raspberry Pi*[®] et servant d'antenne et de décodeur radio pour la communication avec les capteurs. Il est constitué de la même antenne ainsi que du même module radio que les capteurs.

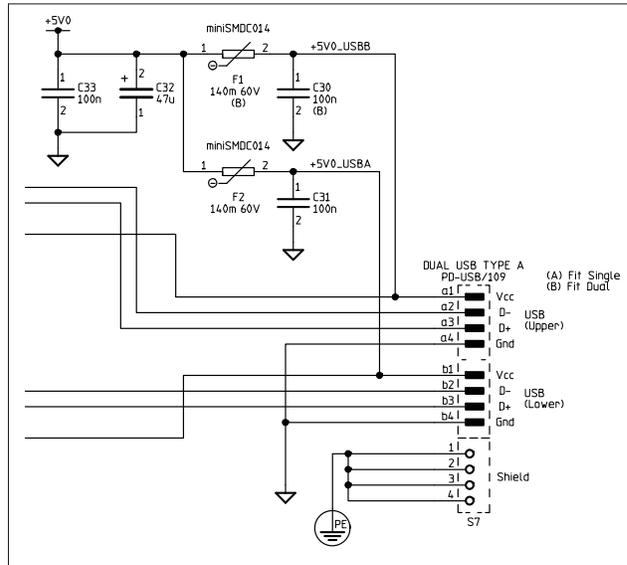


Figure 1.9 Schéma électrique de l'alimentation des ports USB du *Raspberry Pi*[®]
 Tirée de *Raspberry Pi*[®] (2012, p. 3)



Figure 1.10 Assemblage de l'UCT (vue de devant)



Figure 1.11 Assemblage de l'UCT (vue de dessus)

1.3 Conclusion

Dans ce chapitre, une description complète du système utilisé a été faite. Chaque composant du système a été analysé en détail. D'abord, les capteurs de courant ont été décrits ainsi que le fonctionnement des capteurs à effet Hall. Les capteurs de courant sont réalisés avec un circuit imprimé comprenant un microcontrôleur, un capteur à effet Hall, un module radio, une antenne et tous les autres composants passifs et actifs nécessaires au fonctionnement des pièces principales. Ensuite, les fonctions de l'UCT ont été expliquées suivies par la réalisation matérielle de celle-ci. L'UCT a la responsabilité de capter les paquets radio transmis par les capteurs, de corriger les données pour les paquets manqués ou corrompus, de calculer et corriger la valeur RMS des mesures en effectuant la division et la racine carrée nécessaires, en ajustant l'ordonnée à l'origine et la pente et en annulant le bruit des capteurs et de communiquer ces données sur Internet. Elle est réalisée à partir d'un *Raspberry Pi*[®], d'un concentrateur USB et d'un module radio.

CHAPITRE 2

CONCEPTION ET FABRICATION DU BLINDAGE MAGNÉTIQUE

Comme mentionné à la section 1.1, les boîtiers des capteurs de courant sont entourés d'un morceau de mumétal qui agit en tant que blindage magnétique. Ce blindage est nécessaire en raison des variations de mesures importantes (voir section 2.2) qui se produisent lorsque l'orientation du capteur change, lorsqu'il est trop près d'un autre fil ou du disjoncteur ou encore lorsque le fil est courbé près du capteur. Toutes ces conditions ont un impact sur les résultats et peuvent rendre le système inopérant. Le mumétal a été choisi pour sa très grande perméabilité aux champs magnétiques. Comme son nom l'indique (mumétal ou encore μ -métal, où la lettre grecque μ représente la perméabilité magnétique), ce matériau a la capacité de faire dévier les lignes de champ magnétique. Cela est désiré pour ce projet afin de protéger le capteur à effet Hall des champs magnétiques indésirables tout en laissant pénétrer le champ magnétique du fil à mesurer.

Lors des tests pilotes dans les installations résidentielles, les capteurs de courant avaient une précision inférieure à ce qui avait été mesuré en laboratoire. Des tests en laboratoire ont permis de reproduire le problème et d'en identifier la cause principale, soit un problème d'auto-interférence. En effet, tel qu'illustré à la figure 2.1, le capteur qui mesure le champ magnétique dans le fil conducteur peut être affecté par le même champ magnétique qu'il recroise plus loin lorsque le fil est dans une plage d'angles particulière. Ainsi, l'intensité mesurée est plus élevée que prévu et la précision des mesures en est affectée. Voilà principalement pourquoi les blindages magnétiques ont été conçus.

Dans cette section, la méthodologie utilisée pour définir le blindage approprié est présentée et est suivie par les résultats de tests avec et sans la présence du blindage magnétique.

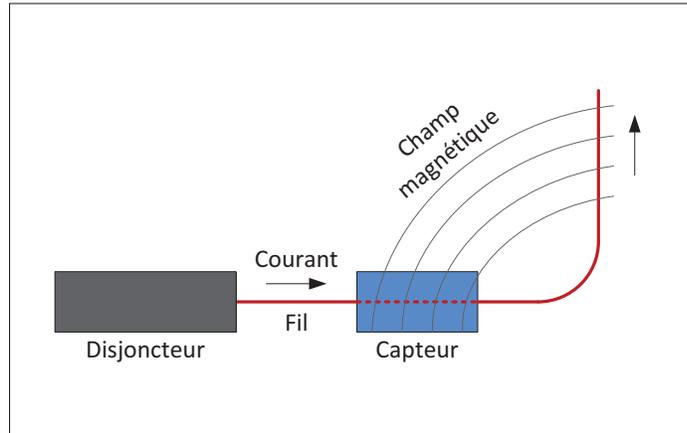


Figure 2.1 Principe d'auto-interférence

2.1 Méthodologie

Afin de déterminer la forme appropriée de blindage à utiliser de même que l'endroit où l'installer, plusieurs tests ont été effectués.

Comme les capteurs s'insèrent à l'intérieur d'un panneau électrique, l'idée d'installer un blindage métallique à l'extérieur du boîtier n'a pas initialement été abordée en raison des possibilités de courts-circuits. Les premiers tests ont donc été effectués avec des blindages de plusieurs formes placés à l'intérieur du boîtier et autour du capteur à effet Hall. La figure 2.2 montre deux exemples de blindages qui ont été testés, mais qui n'offraient pas de résultats satisfaisants. Les mesures prises avec ces types de blindage étaient pratiquement identiques aux mesures sans blindage. Les signaux étaient atténués, mais il y avait encore de grandes fluctuations dans les mesures lors de changements d'orientation. Il a été déduit qu'en ayant un blindage trop près du capteur à effet Hall, la totalité des champs magnétiques était atténuée et, donc, le signal à mesurer n'était pas plus perceptible que précédemment. Il fallait donc trouver une manière d'éloigner le blindage du capteur à effet Hall pour réduire l'amplitude des champs magnétiques nuisibles, sans trop diminuer l'amplitude du signal à mesurer.

Pour ce faire, il a été décidé d'effectuer des tests avec des blindages à l'extérieur du boîtier. Plusieurs formes ont encore une fois été testées. En se basant sur le modèle A, la première de ces formes (voir le modèle G sur la figure 2.3a) a été conçue. Cette dernière avait elle aussi une

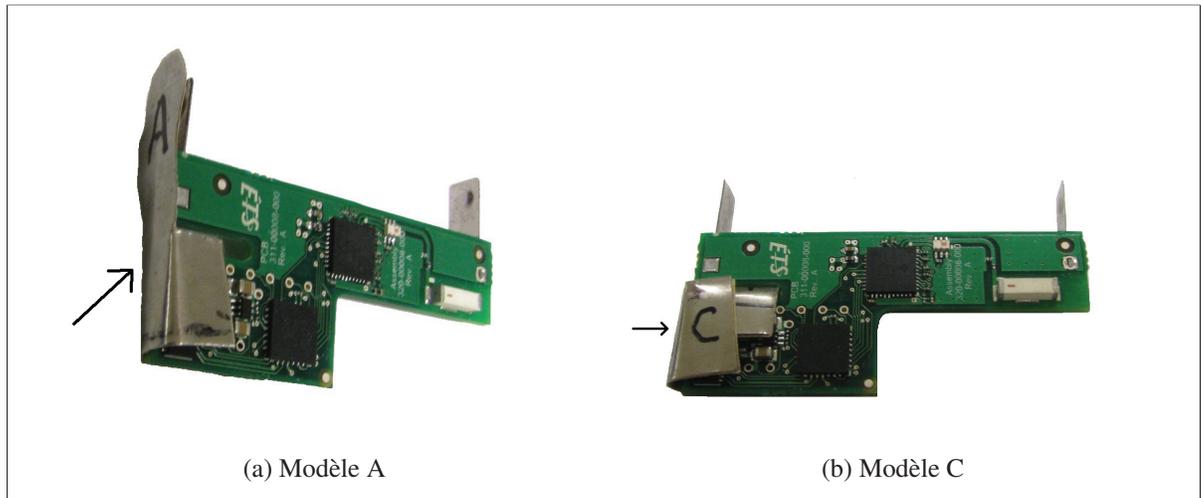


Figure 2.2 Essais de blindages internes

plaque de mumétal qui couvrait tout l'avant du boîtier. Par contre, au lieu d'avoir un blindage sur les côtés du circuit imprimé à l'intérieur du boîtier, ce blindage longeait les côtés extérieurs du boîtier. Il est à noter que, dans la figure 2.3, tous les blindages (sauf le modèle K) ont été aplatis de manière à pouvoir les comparer aisément l'un à l'autre. Pour le modèle G, les résultats étaient un peu mieux qu'avec tous les modèles placés à l'intérieur du boîtier alors d'autres modèles externes (voir figure 2.3) ont été faits et testés jusqu'à finalement obtenir un résultat qui réduisait le niveau des champs magnétiques indésirables sans trop affaiblir le signal à mesurer. Le blindage offrant les meilleurs résultats est illustré à la figure 2.4 et ses résultats sont présentés à la section 2.2. Sur la figure 2.4c, il est possible de constater la présence de ruban adhésif tout autour du boîtier. Celui-ci sert à maintenir le blindage en place et à minimiser son déplacement lors de manipulations.



Figure 2.3 Essais de blindages externes

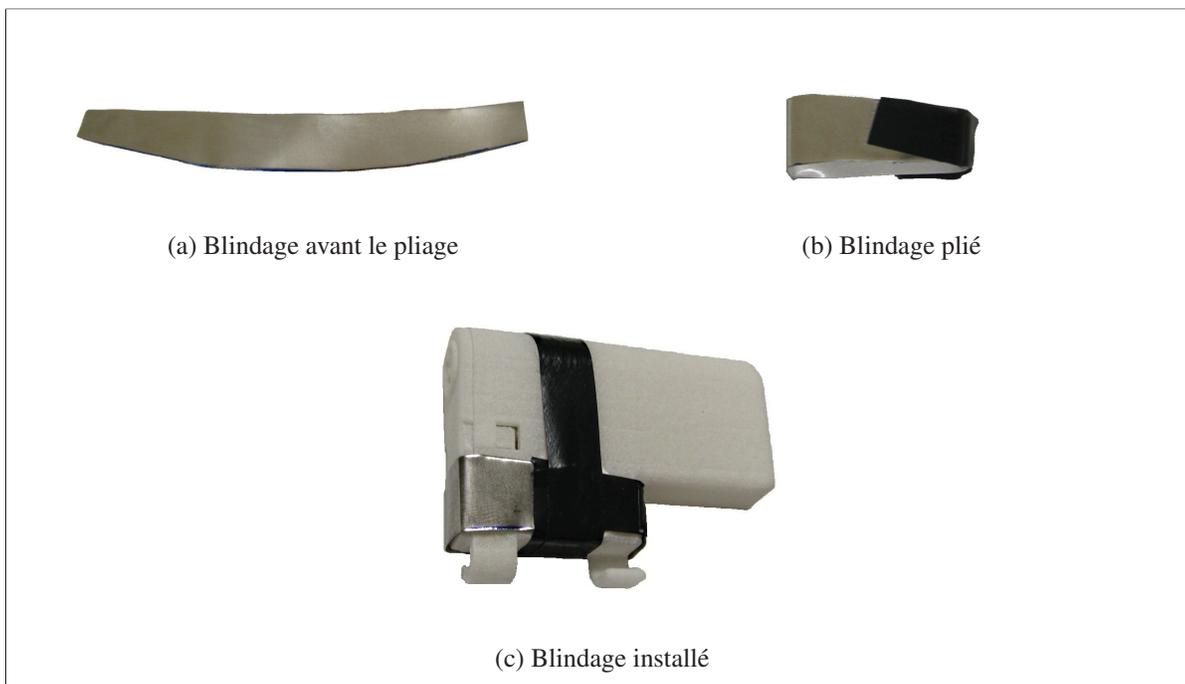


Figure 2.4 Blindage externe

2.2 Résultats du blindage

Dans cette section, les résultats du blindage dans diverses positions sont exposés afin de démontrer l'efficacité du blindage réalisé dans la première partie de ce chapitre. Les positions

utilisées pour prendre les mesures sont montrées à la figure 2.5 et sont identifiées par leur numéro dans la suite de ce document. Les positions 1 à 4 permettent de simuler plusieurs phénomènes qui se produisent dans le panneau de disjoncteurs et qui sont décrits dans les prochains paragraphes. La position 5, quant à elle, représente le capteur dans une condition idéale sans aucune interférence.

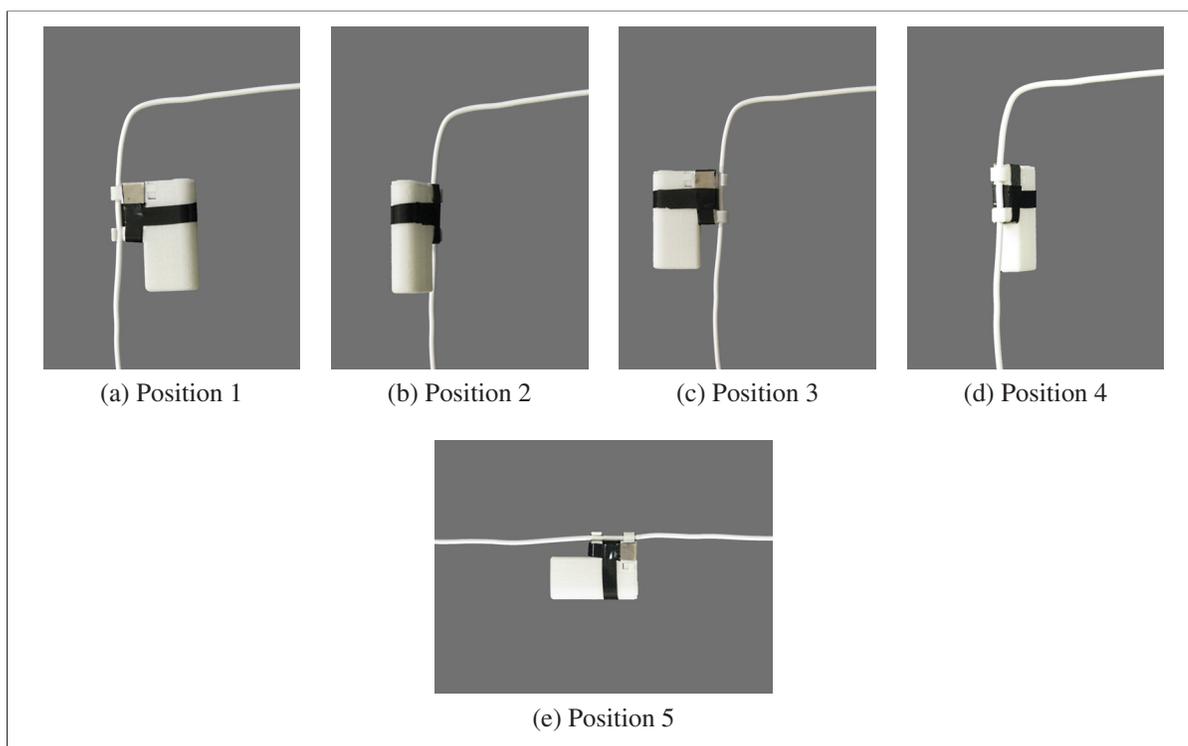


Figure 2.5 Positions de mesures 1 à 5

Premièrement, l'effet d'auto-interférence, tel qu'illustré par la figure 2.1, c'est-à-dire lorsque le fil lui-même génère un champ magnétique nuisible dans le capteur en raison d'une courbe dans le fil, est mesuré avec les quatre premières positions montrées. Ce phénomène est pratiquement toujours présent étant donné que le fil doit généralement courber vers le haut ou le bas pour sortir du panneau électrique. Si ce n'est pas le fil lui-même qui est courbé, c'est souvent son homologue, c'est-à-dire l'autre fil qui conduit le même courant, qui se dirige vers le connecteur neutre et qui passe à 90° du fil mesuré.

Les positions 1 à 4 peuvent aussi être utilisées pour simuler un fil qui passerait à proximité perpendiculairement au capteur. En raison de la quantité importante de câbles dans le panneau électrique, il va de soi que plusieurs fils passent à proximité du capteur et peuvent affecter ce dernier.

Finalement, lorsqu'un capteur est installé dans le panneau électrique, il est situé très près du disjoncteur (à quelques centimètres seulement). En observant l'architecture interne des disjoncteurs (voir la figure 2.6), il est possible d'observer qu'un électroaimant est situé tout près de l'endroit où le fil s'insère et est perpendiculaire à ce fil. Dans les positions 1 à 4, le fil plié à 90° reproduit quelque peu ce phénomène.

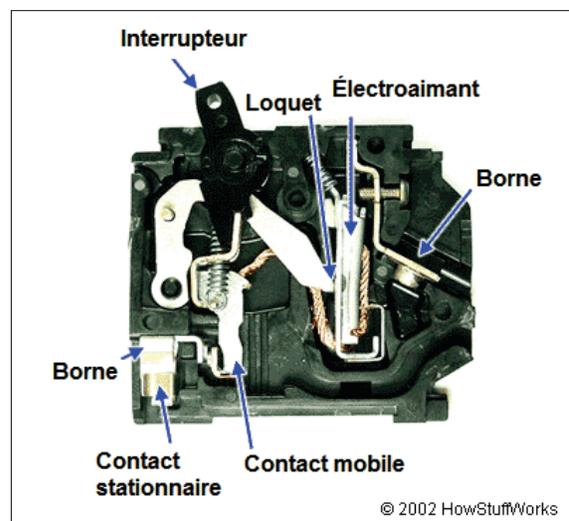


Figure 2.6 Intérieur d'un disjoncteur
Adaptée de Harris (2002)

Ainsi, en effectuant des tests avec un fil courbé comme dans les positions 1 à 4, plusieurs conditions qui se retrouvent dans un panneau électrique sont simulées. L'avantage principal de ne pas faire la calibration directement dans le panneau électrique est que cela permet d'effectuer la calibration d'une multitude de capteurs à la fois plutôt que d'un seul, et ce, sur plusieurs gabarits de fil à la fois.

Les tests ont été effectués sur trois capteurs différents pour vérifier la variabilité d'un capteur à l'autre. Ces capteurs sont identifiés par leur numéro de série 8093, 8094 et 8095. Ils ont tous été fabriqués de la même façon. Les différences observées sont dues à la variabilité du processus de fabrications (valeur exacte des composantes, dimensions du boîtier, dimensions du PCB, dimensions du blindage, etc.).

Dans les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3, les résultats aux variations de positions ainsi qu'à la présence ou l'absence d'un blindage sont montrés. La valeur des courants de référence indiquée est fournie par une source de courant calibrée. Les capteurs étant tous constitués des mêmes composants, afin de les identifier, ils ont différents numéros d'assemblage. Les valeurs contenues dans ces tableaux n'ont pas d'unité. Il s'agit de valeurs extraites à la sortie de l'ADC et qui représentent l'amplitude moyenne du courant dans le fil. Pour obtenir la valeur de courant associée à ces données, il faut avoir recours à une calibration. Les valeurs de calibration ne sont évidemment pas les mêmes avec et sans le blindage. Pour cette raison, il a été jugé plus simple d'afficher les valeurs brutes dans ces tableaux. Le but est de comparer les erreurs de mesures lors de variations de positions et non pas de comparer chaque capteur sans calibration l'un avec l'autre.

Les valeurs qui se trouvent dans les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 sont les valeurs RMS de 100 mesures pour chaque position et chaque valeur de courant.

Tableau 2.1 Résultats du blindage magnétique du capteur 8093

| Position de mesure | Capteur 8093 | | | | | | | |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
| | Sans blindage | Avec blindage |
| 1 | 17,87 | 16,82 | 257,89 | 116,03 | 458,62 | 202,70 | 608,55 | 298,60 |
| 2 | 15,77 | 15,00 | 183,16 | 98,82 | 331,94 | 174,30 | 479,46 | 247,01 |
| 3 | 17,36 | 15,11 | 157,09 | 89,04 | 285,07 | 153,11 | 416,00 | 218,91 |
| 4 | 16,50 | 16,22 | 203,55 | 103,75 | 364,38 | 178,94 | 524,08 | 261,09 |
| 5 | 15,73 | 16,72 | 202,11 | 108,03 | 383,98 | 183,70 | 537,10 | 264,27 |

Tableau 2.2 Résultats du blindage magnétique du capteur 8094

| Position de mesure | Capteur 8094 | | | | | | | |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
| | Sans blindage | Avec blindage |
| 1 | 13,37 | 13,05 | 246,09 | 95,01 | 444,64 | 159,58 | 645,66 | 233,92 |
| 2 | 13,28 | 14,05 | 199,83 | 93,60 | 360,14 | 157,89 | 522,73 | 221,25 |
| 3 | 14,94 | 14,32 | 182,32 | 87,82 | 331,77 | 151,27 | 479,68 | 219,14 |
| 4 | 13,70 | 11,78 | 215,41 | 95,73 | 391,83 | 161,90 | 562,50 | 233,31 |
| 5 | 13,23 | 13,94 | 221,41 | 92,00 | 401,17 | 161,72 | 575,46 | 230,33 |

Tableau 2.3 Résultats du blindage magnétique du capteur 8095

| Position de mesure | Capteur 8095 | | | | | | | |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
| | Sans blindage | Avec blindage |
| 1 | 14,51 | 15,31 | 245,61 | 103,18 | 452,52 | 177,19 | 652,28 | 252,91 |
| 2 | 13,96 | 12,78 | 201,98 | 96,10 | 361,55 | 162,83 | 527,65 | 237,09 |
| 3 | 14,20 | 15,18 | 204,50 | 95,83 | 376,00 | 162,36 | 540,36 | 234,06 |
| 4 | 13,73 | 15,13 | 226,82 | 104,89 | 400,28 | 187,03 | 585,81 | 261,27 |
| 5 | 13,87 | 14,56 | 227,90 | 101,63 | 423,67 | 176,91 | 596,27 | 248,74 |

Dans le tableau 2.4, la valeur contenue dans chaque case est la valeur moyenne d'erreur par rapport à la position de calibration, c'est-à-dire la position 1. Cette position a été utilisée pour effectuer la calibration des capteurs pour les prototypes déjà installés ; il allait donc de soi d'utiliser cette position comme référence dans cette section. À l'annexe II, dans les tableaux A II-1, II-2 et II-3, l'erreur entre chaque valeur des positions 2 à 5 des tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 et la valeur à la position de calibration (position 1) pour un même courant est donnée en pourcentage et a été calculée à partir de l'équation suivante :

$$err_{pos_n} = \frac{val_{pos_n} - val_{pos_1}}{val_{pos_1}} \quad \{n = 2...5\} \quad (2.1)$$

où err_{pos_n} représente l'erreur entre chaque position et la position de référence, val_{pos_n} est la valeur moyenne mesurée à la position observée et val_{pos_1} est la valeur moyenne mesurée à la position de référence. À partir de ces tableaux en annexe, une simple moyenne arithmétique en valeur absolue a été faite pour remplir le tableau 2.4 tel que décrit par l'équation :

$$\overline{err} = \frac{\sum_{n=2}^5 |err_{pos_n}|}{4} \quad (2.2)$$

où \overline{err} est l'erreur moyenne pour un capteur donné.

Tableau 2.4 Résumé des résultats des blindages magnétiques de trois capteurs

| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Sans blindage | Avec blindage |
| Capteur 8093 | 8,56% | 6,29% | 27,69% | 13,89% | 25,57% | 14,89% | 19,62% | 17,01% |
| Capteur 8094 | 3,98% | 8,49% | 16,80% | 3,24% | 16,51% | 2,27% | 17,12% | 3,38% |
| Capteur 8095 | 3,93% | 5,86% | 12,34% | 4,29% | 13,73% | 5,55% | 13,76% | 4,67% |

En comparant les résultats obtenus avec le blindage et sans le blindage, pour un même capteur et un même courant, il est possible de constater une grande diminution des écarts de mesures lors des variations de position, peu importe le courant appliqué, pourvu qu'un courant soit appliqué. Bien entendu, lorsqu'il n'y a pas de courant qui circule, l'erreur ne peut pas être modifiée. Dans les autres cas montrés, le pourcentage d'erreur par rapport à la position de référence est diminué. En effectuant la moyenne arithmétique de l'écart entre les valeurs sans et avec blindage, la variation moyenne des données passe de 18,13% à 7,69%. Cela représente une amélioration relative de 57,6%, ce qui signifie que le blindage est efficace.

À la figure 2.7, il est possible de visualiser l'impact de ce blindage de manière graphique. Les valeurs de chaque position ont été divisées par la valeur moyenne à la position 1 avec le courant de 13 A afin d'obtenir des résultats comparables et sur la même échelle pour les mesures avec et sans blindage. Dans ces graphiques, les 100 premiers échantillons sont les mesures prises à 13 A, les 100 suivants sont pris à 9 A, ensuite 5 A et finalement, les 100 dernières mesures sont prises avec 0 A circulant dans le fil. Il est aisé de remarquer qu'avec les variations de positions, les données sont beaucoup moins espacées dans le graphique de droite, celui avec la présence du blindage, que dans le graphique de gauche, celui sans le blindage, par rapport à la position de référence, la position 1. Pour chaque valeur de courant, excepté pour le cas où il n'y a pas de courant, il y a beaucoup moins de variations de la mesure par rapport à la valeur de référence. Pour les résultats à 0 A, il est normal que les variations semblent plus importantes étant donné que les valeurs mesurées sont divisées par un nombre moins élevé avec le blindage que sans le blindage. Bref, ce graphique confirme que l'ajout du blindage aide à réduire les variations de mesures dues aux changements de position du capteur.

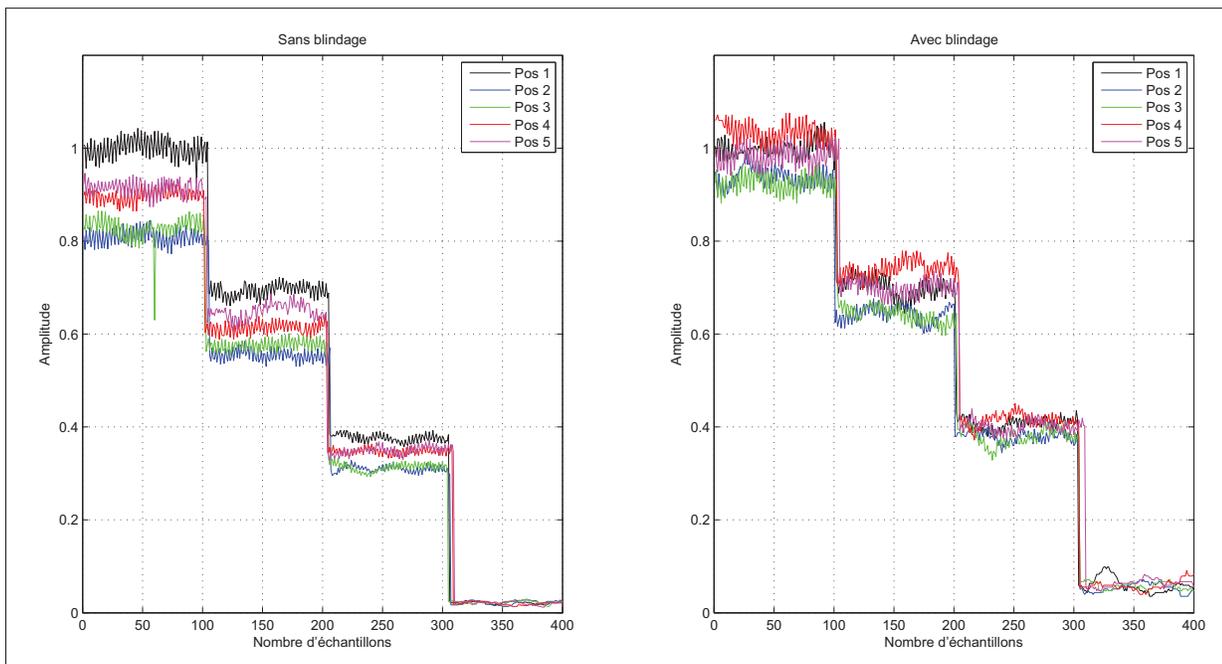


Figure 2.7 Mesures du capteur 8095

2.3 Conclusion

Dans cette section, la conception du blindage magnétique a été présentée. Tout d'abord, quelques prototypes de blindages internes ont été montrés. Ensuite, plusieurs modèles de blindages externes ont été décrits. Finalement, le modèle ayant les meilleurs résultats a été exposé de même que ses performances. Il s'agit d'un blindage de mumétal qui recouvre le pourtour de la base du boîtier de plastique. Des améliorations majeures aux résultats ont été observées lorsque le blindage est ajouté. L'écart entre les valeurs mesurées aux autres positions et la valeur à la position de référence diminue de plus de 50% en moyenne. L'ajout du blindage a donc un effet considérable sur la précision du système.

CHAPITRE 3

CARACTÉRISATION DES CAPTEURS

Dans ce chapitre, une caractérisation complète des capteurs est effectuée. Plusieurs paramètres pouvant influencer le comportement des capteurs sont testés et analysés. Pour ce faire, quelques capteurs ont été sélectionnés au hasard et ont servi pour les tests. Certains capteurs utilisés dans cette section sont les mêmes que ceux utilisés dans la section 2.2. Pour débiter, l'écart-type des mesures des capteurs est calculé. Ensuite, l'impact du calibre du fil est observé. Suite à cela, chaque capteur est testé précisément dans la même position avec les mêmes courants de manière à déterminer si une seule calibration générale est suffisante. Par la suite, l'impact de la distance des capteurs par rapport au disjoncteur est étudié. Afin de déterminer l'impact de la rotation du capteur autour du fil lorsqu'il est installé dans le panneau électrique, des mesures sont effectuées pour une rotation du capteur sur 180°. La sensibilité des capteurs aux champs magnétiques de fils avoisinant est aussi caractérisée. Finalement, la diminution de la puissance des signaux reçus par l'UCT en fonction de la distance entre les capteurs et l'UCT est mesurée.

3.1 Variabilité des mesures

Dans cette section, chaque capteur est testé avec trois valeurs de courants. Pour chaque valeur de courant, l'écart-type de 1000 mesures a été calculé. Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 présentent les résultats de variabilité des mesures des capteurs. Comme pour les données des tableaux du chapitre 2, les données comprises dans ces tableaux n'ont pas d'unité. Il s'agit des valeurs directement prises à la sortie de l'ADC.

Une variabilité moyenne générale a été calculée et est égale à 4,72%. Cela signifie que, pour chaque tranche de 18 mesures, la valeur RMS calculée se retrouve à l'intérieur de $\pm 4,72\%$ de la moyenne des mesures dans 68% des cas en supposant une distribution normale (Pierce (2012)).

Les histogrammes représentant les distributions de ces trois capteurs pour chacune des valeurs de courant se retrouvent aux figures 3.1, 3.2 et 3.3. Sur ces graphiques, la courbe normale est tracée par-dessus l'histogramme, ce qui permet de constater que la distribution des capteurs se

Tableau 3.1 Variabilité des mesures du capteur 8093

| Courant circulant dans le fil | Valeur RMS | Écart-type | Variabilité | Variabilité moyenne |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| 2 A | 45,18 | 4,05 | 8,96% | 6,34% |
| 7 A | 140,93 | 7,45 | 5,28% | |
| 15 A | 296,25 | 14,17 | 4,78% | |

Tableau 3.2 Variabilité des mesures du capteur 8094

| Courant circulant dans le fil | Valeur RMS | Écart-type | Variabilité | Variabilité moyenne |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| 2 A | 54,34 | 3,29 | 6,05% | 3,51% |
| 7 A | 177,40 | 4,52 | 2,55% | |
| 15 A | 376,47 | 7,24 | 1,92% | |

rapproche beaucoup d'une distribution normale. Aussi, la moyenne de l'erreur à long terme est nulle pour un courant stable. Donc, l'erreur diminue en fonction du temps ce qui rend l'erreur négligeable sur la lecture de la consommation d'énergie d'un appareil pour une longue période d'observation.

Tableau 3.3 Variabilité des mesures du capteur 8095

| Courant circulant dans le fil | Valeur RMS | Écart-type | Variabilité | Variabilité moyenne |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|
| 2 A | 41,10 | 3,32 | 8,07% | 4,32% |
| 7 A | 124,33 | 3,55 | 2,86% | |
| 15 A | 254,43 | 5,18 | 2,04% | |

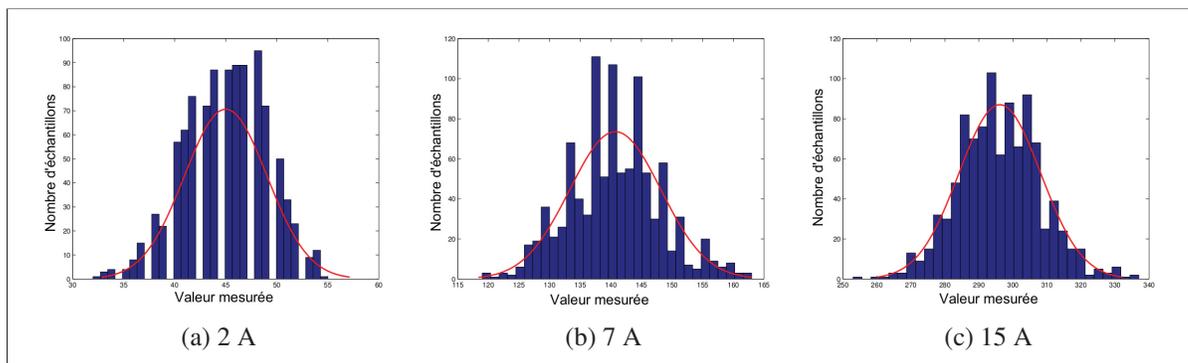


Figure 3.1 Distribution des données du capteur 8093

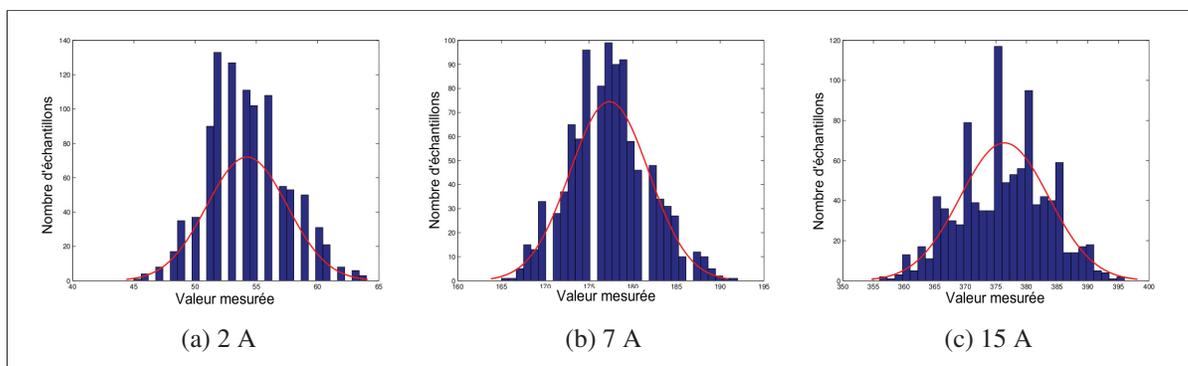


Figure 3.2 Distribution des données du capteur 8094

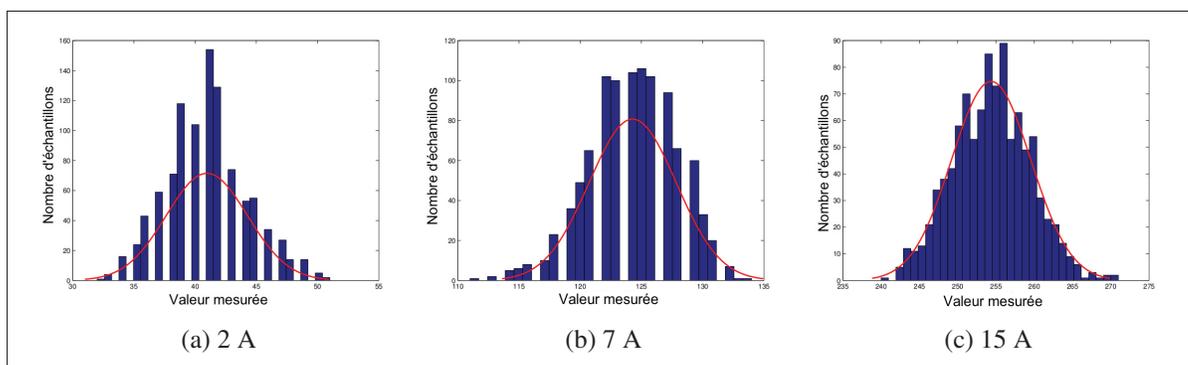


Figure 3.3 Distribution des données du capteur 8095

3.2 Variation des mesures selon le calibre du fil

Dans cette section, il est question de faire varier le diamètre du fil à mesurer et d'observer les différences entre les mesures. Pour obtenir les résultats présentés, 200 mesures ont été effectuées pour chaque capteur, pour chaque valeur de courant et pour chaque diamètre de fil. Les mesures ont été prises avec les capteurs dans la position 1 telle qu'illustrée à la figure 2.5a. La moyenne de ces 200 mesures est donnée dans les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6.

Tableau 3.4 Résultats du changement de diamètre des fils avec le capteur 8093

| Courant testé | Diamètre du fil (AWG) | | | | |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 5 A | 75,32 | 85,22 | 99,61 | 102,86 | 101,74 |
| 9 A | 126,17 | 147,27 | 171,22 | 179,41 | 180,30 |
| 13 A | 183,37 | 213,86 | 243,60 | 258,36 | 257,37 |

Tableau 3.5 Résultats du changement de diamètre des fils avec le capteur 8094

| Courant testé | Diamètre du fil (AWG) | | | | |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 5 A | 75,63 | 93,61 | 96,98 | 104,54 | 101,68 |
| 9 A | 127,68 | 160,64 | 170,38 | 183,04 | 176,86 |
| 13 A | 182,88 | 232,44 | 244,82 | 263,86 | 253,92 |

Tableau 3.6 Résultats du changement de diamètre des fils avec le capteur 8095

| Courant testé | Diamètre du fil (AWG) | | | | |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 5 A | 77,53 | 95,69 | 109,92 | 111,95 | 107,32 |
| 9 A | 129,61 | 166,39 | 189,08 | 195,46 | 187,45 |
| 13 A | 185,77 | 235,36 | 269,86 | 281,51 | 266,38 |

En observant les résultats des trois capteurs, il est possible d'observer des variations considérables entre les mesures prises sur les différents calibres. Les trois plus petits calibres soient le 10, le 12 et le 14, offrent des résultats comparables. Si l'on considère le calibre 14 comme

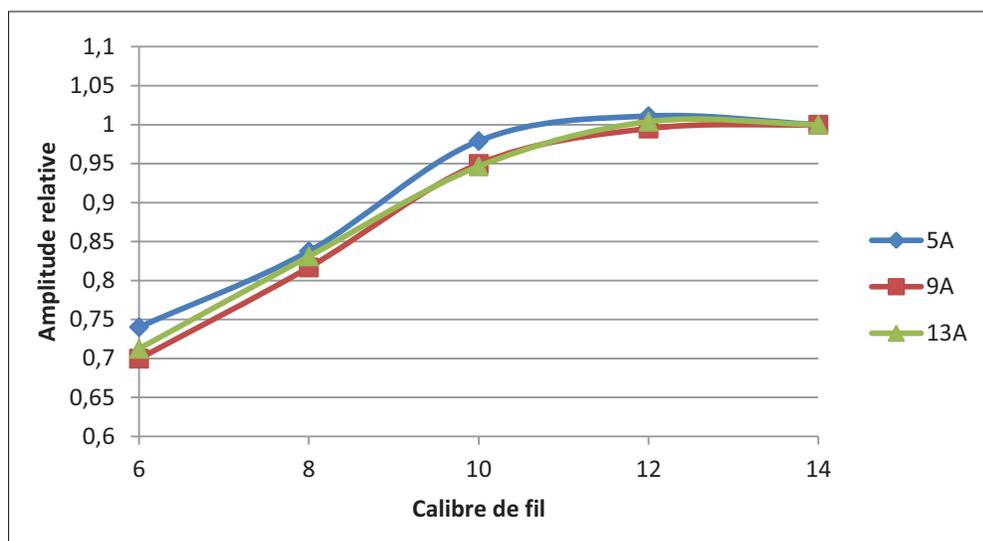


Figure 3.4 Variation de l'amplitude mesurée relative en fonction du calibre de fil utilisé et du courant appliqué avec le capteur 8093

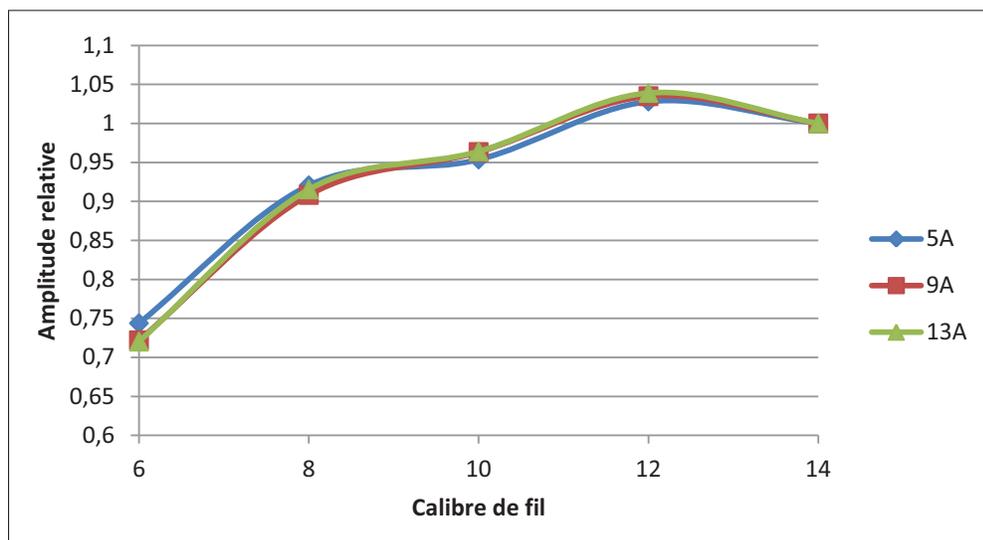


Figure 3.5 Variation de l'amplitude mesurée relative en fonction du calibre de fil utilisé et du courant appliqué avec le capteur 8094

calibre de référence, ce qui est normal étant donné qu'il s'agit du calibre le plus répandu dans une maison, les données recueillies pour les calibres 10 et 12 se situent à l'intérieur d'une tolérance de 5% comme démontré par les figures 3.4, 3.5 et 3.6. Sur ces graphiques, toutes les données ont été divisées par la valeur moyenne avec le calibre 14 pour la valeur de courant en

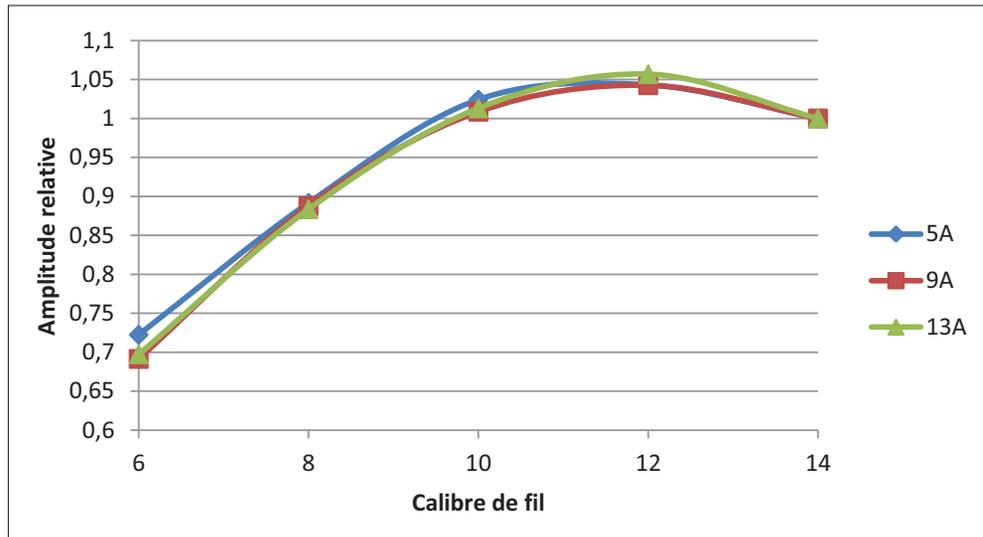


Figure 3.6 Variation de l'amplitude mesurée relative en fonction du calibre de fil utilisé et du courant appliqué avec le capteur 8095

question. Cela permet de comparer chaque valeur de courant et chaque capteur selon une même échelle. En ce qui concerne les plus gros calibres, c'est-à-dire les calibres 6 et 8, les résultats recueillis démontrent une différence plus importante par rapport au calibre de référence. Ces calibres pouvant conduire des courants plus importants, leur isolant est plus épais que sur les plus petits calibres et, donc, le capteur à effet Hall se retrouve plus loin de la source du champ magnétique. Ceci explique donc pourquoi les valeurs moyennes des plus gros calibres sont plus faibles que les valeurs des autres calibres.

Grâce à ces résultats, il est possible d'affirmer qu'une calibration sur du calibre 14 pourrait éventuellement être utilisée pour calibrer tous les capteurs installés sur les calibres 10, 12 et 14. Par contre, en raison des différences majeures avec les calibres 6 et 8, une calibration directement sur ces calibres s'impose ou l'application d'un facteur de correction.

3.3 Variation des mesures en fonction du capteur utilisé

Dans cette section, les capteurs sont tous testés dans des conditions identiques dans le but de déterminer l'importance des disparités entre chaque capteur et de voir si une calibration générale pourrait éventuellement être utilisée pour calibrer tous les capteurs. Pour ce faire, les

trois capteurs utilisés sont placés, chacun leur tour, précisément au même endroit et dans la même position (position 1) sur un fil de calibre 12 dans lequel passe un courant de 5 A, 9 A et finalement 13 A.

Tableau 3.7 Résultats lors de changements de capteur et de courant pour une même position

| Capteur testé | Courant circulant dans le fil | | |
|---------------|-------------------------------|--------|--------|
| | 5 A | 9 A | 13 A |
| 8093 | 97,54 | 167,70 | 243,45 |
| 8094 | 133,94 | 235,41 | 335,55 |
| 8095 | 92,50 | 156,53 | 223,00 |

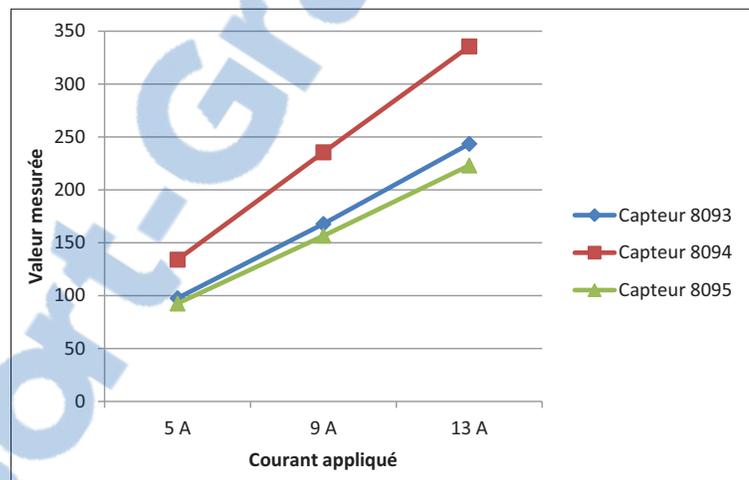


Figure 3.7 Résultats lors de changements de capteur et de courant pour une même position

À partir des résultats contenus dans le tableau 3.7, il est possible de constater que les valeurs mesurées par les capteurs ne sont pas les mêmes. En effet, des différences considérables sont présentes entre les valeurs mesurées par les différents capteurs, telles qu'illustrées à la figure 3.7. En observant les résultats pour un même courant, par exemple 13 A, la différence entre les valeurs minimale (223,00) et maximale (335,55) mesurées représente un écart de 50,47% par rapport cette première valeur. Cela implique donc qu'il n'est pas possible de faire une seule

calibration qui serait valide pour tous les capteurs. Une calibration individuelle se doit d'être effectuée sur chaque capteur en raison des trop grandes disparités de mesure entre les capteurs.

3.4 Variation des mesures en fonction de la distance par rapport au disjoncteur

Dans cette partie, les capteurs sont testés directement dans le panneau de disjoncteurs afin d'évaluer la variation des mesures en fonction de la distance par rapport au disjoncteur. Pour ce faire, les capteurs effectuent une série de mesures avec trois valeurs de courant (2 A, 7 A et 15 A) à deux distances (1 cm et 4 cm) du disjoncteur. Les capteurs sont maintenus dans une position verticale pour la totalité des mesures. Les tableaux 3.8, 3.9 et 3.10 montrent les résultats obtenus. La distance mesurée est l'espace entre le boîtier des capteurs et le disjoncteur.

Tableau 3.8 Résultats du capteur 8090 lors de changements de la distance par rapport au disjoncteur

| Courant circulant dans le fil | Distance du capteur | | Erreur moyenne |
|-------------------------------|---------------------|--------|----------------|
| | 1 cm | 4 cm | |
| 2 A | 39,25 | 41,16 | 4,86% |
| 7 A | 115,29 | 121,28 | |
| 15 A | 225,79 | 236,81 | |

Tableau 3.9 Résultats du capteur 8093 lors de changements de la distance par rapport au disjoncteur

| Courant circulant dans le fil | Distance du capteur | | Erreur moyenne |
|-------------------------------|---------------------|--------|----------------|
| | 1 cm | 4 cm | |
| 2 A | 46,43 | 48,21 | 3,86% |
| 7 A | 146,30 | 151,56 | |
| 15 A | 304,93 | 318,30 | |

Tableau 3.10 Résultats du capteur 8094 lors de changements de la distance par rapport au disjoncteur

| Courant circulant dans le fil | Distance du capteur | | Erreur moyenne |
|-------------------------------|---------------------|--------|----------------|
| | 1 cm | 4 cm | |
| 2 A | 52,83 | 57,13 | 8,69% |
| 7 A | 170,56 | 185,93 | |
| 15 A | 358,65 | 394,92 | |

L'erreur moyenne dans ces tableaux est définie par :

$$err_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{max_n - min_n}{(max_n + min_n)/2} \quad (3.1)$$

où N est le nombre de courants testés, dans ce cas il vaut 3, et où max_n et min_n sont les valeurs maximales et minimales pour chaque valeur de courant testée.

La première constatation, en observant ces résultats, est que, dans tous les cas, les valeurs mesurées à une distance de 4 cm du disjoncteur sont plus grandes que les mesures prises à 1 cm. Étant donné que le courant dans le disjoncteur suit un trajet cruciforme, nous croyons que la mesure à une distance plus éloignée est la plus représentative de la réalité. Ainsi, une interférence soustractive serait générée par le disjoncteur. En effet, soit parce que le champ magnétique généré par l'électroaimant annule celui du courant à mesurer ou parce que le disjoncteur fait dévier le champ magnétique du fil à mesurer, le disjoncteur a un effet nuisible sur la mesure. En éloignant le capteur du disjoncteur, ces effets sont réduits et la valeur mesurée augmente. En effectuant la moyenne des erreurs précédemment trouvées pour chacun des trois capteurs, une augmentation moyenne de 5,8% est calculée.

3.5 Variation des mesures lors de rotations dans le panneau de disjoncteurs

Pour ce test, les capteurs sont installés dans le panneau électrique à une distance de 2 cm du disjoncteur. Ils subissent une rotation de 180° avec une prise de mesure à -90° , -45° , 0° , $+45^\circ$ et finalement $+90^\circ$ comme montré à la figure 3.8. De cette façon, les capteurs sont caractérisés

dans leur environnement véritable, dans des conditions réelles d'installation. Les tableaux 3.11, 3.12 et 3.13 présentent les résultats de ces tests.

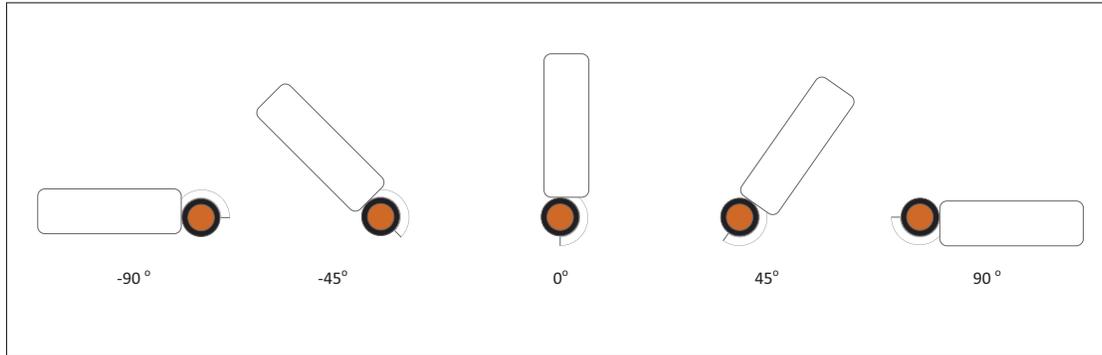


Figure 3.8 Positions de mesure dans le panneau de disjoncteurs

Tableau 3.11 Résultats lors de rotations du capteur 8093

| Courant circulant dans le fil | Position de mesure | | | | | Erreur moyenne |
|-------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| | -90 ° | -45 ° | 0 ° | +45 ° | +90 ° | |
| 2 A | 44,44 | 40,99 | 44,57 | 44,11 | 46,49 | 2,85% |
| 7 A | 140,58 | 128,73 | 138,11 | 141,28 | 145,64 | 3,14% |
| 15 A | 295,69 | 269,52 | 288,90 | 301,76 | 311,01 | 3,86% |

Tableau 3.12 Résultats lors de rotations du capteur 8094

| Courant circulant dans le fil | Position de mesure | | | | | Erreur moyenne |
|-------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| | -90 ° | -45 ° | 0 ° | +45 ° | +90 ° | |
| 2 A | 53,82 | 52,36 | 50,28 | 53,56 | 56,55 | 2,99% |
| 7 A | 178,76 | 167,07 | 162,49 | 167,47 | 179,50 | 3,78% |
| 15 A | 376,84 | 349,18 | 339,19 | 355,95 | 383,21 | 4,25% |

Tableau 3.13 Résultats lors de rotations du capteur 8095

| Courant circulant dans le fil | Position de mesure | | | | | Erreur moyenne |
|-------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| | -90 ° | -45 ° | 0 ° | +45 ° | +90 ° | |
| 2 A | 36,76 | 39,66 | 40,43 | 42,77 | 39,96 | 3,42% |
| 7 A | 111,10 | 122,40 | 120,30 | 129,47 | 119,16 | 3,62% |
| 15 A | 224,39 | 250,14 | 248,00 | 269,14 | 252,55 | 4,07% |

La valeur d'erreur dans ces tableaux est définie par :

$$err_{moy} = \frac{\sum_{n=1}^5 \frac{|val_{pos_n} - val_{moy}|}{val_{moy}}}{5} \quad (3.2)$$

où err_{moy} est l'erreur moyenne pour une valeur de courant et un capteur donné, val_{pos_n} est la valeur à la position observée et val_{moy} est la valeur moyenne des cinq mesures.

En calculant la moyenne des erreurs moyennes des trois capteurs, une erreur moyenne générale de 3,55% est trouvée.

3.6 Sensibilité des capteurs à la proximité d'un fil chargé

Lors de ce test, un fil de calibre 10 a été fixé sur le poste de travail et une série de courants a été appliquée dans ce fil. Les valeurs du courant étaient de 2 A, 7 A et 15 A. Les trois capteurs utilisés étaient fixés sur un fil qui était mobile et dans lequel aucun courant ne circulait (voir la figure 3.9). Les capteurs ont d'abord été placés à une distance de 12 cm. Comme le champ magnétique du fil n'avait aucun impact sur les valeurs mesurées, les capteurs ont été rapprochés du fil. À 7 cm, toujours aucun résultat n'était visible. À 4 cm, un léger effet est perceptible, mais c'est à 1,5 cm que l'impact du champ magnétique est très clair. Dans les figures 3.10, 3.11 et 3.12, les résultats pour les trois valeurs de courant aux distances de 1,5 cm et de 7 cm sont présentés. Pour ce test, les capteurs ont préalablement été calibrés afin d'obtenir des résultats en ampères.

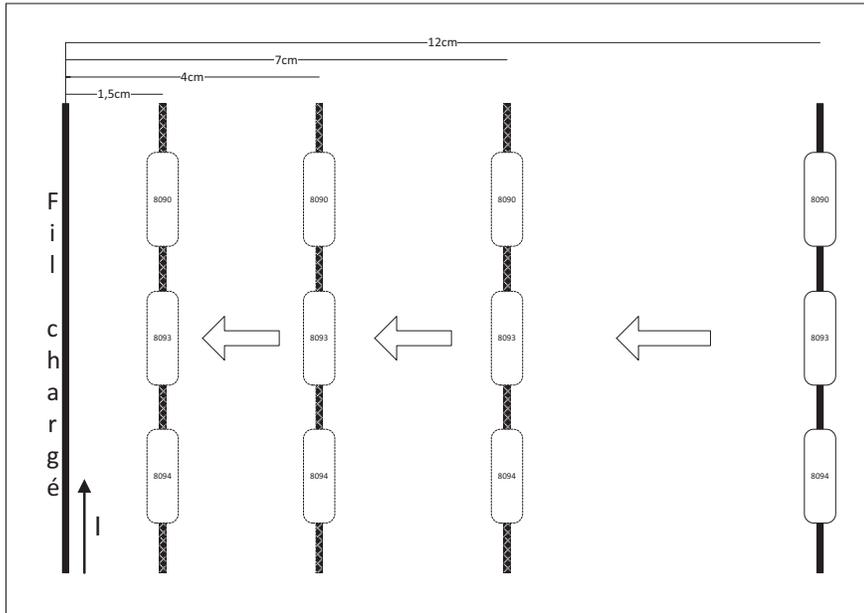


Figure 3.9 Schéma du montage pour la prise de mesure

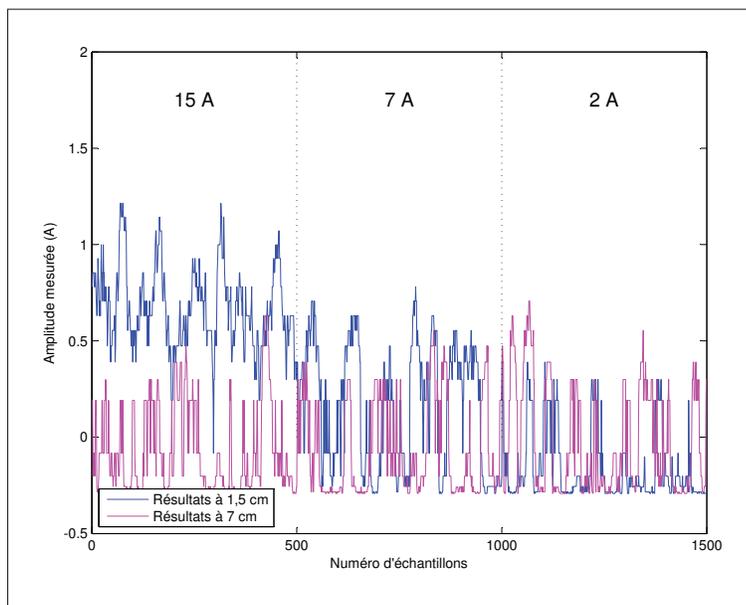


Figure 3.10 Résultats lorsqu'un fil chargé est approché du capteur 8090

Dans ces graphiques, principalement à 15 A, l'effet du champ magnétique est très visible. La trace en bleu est clairement supérieure à celle en magenta dans les trois cas. Cela signifie que les capteurs captent une partie du champ magnétique généré par le courant circulant dans

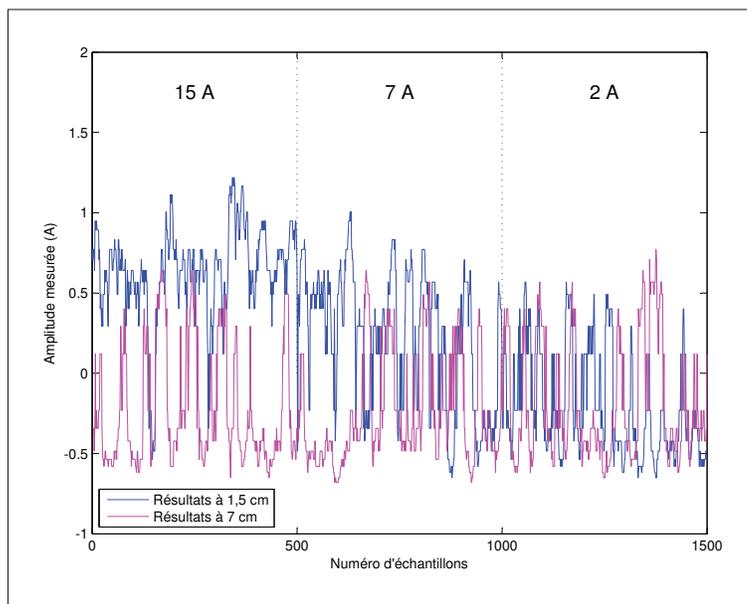


Figure 3.11 Résultats lorsqu'un fil chargé est approché du capteur 8093

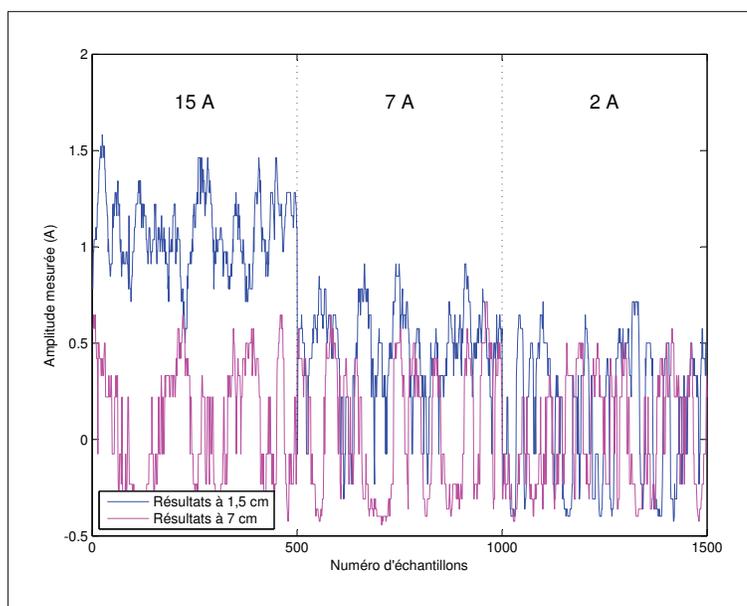


Figure 3.12 Résultats lorsqu'un fil chargé est approché du capteur 8094

l'autre fil. En comparant les valeurs RMS de ces mesures pour chaque intervalle, telles que montrées dans les tableaux 3.14, 3.15 et 3.16, cet effet est évident. Dans le cas du capteur 8093, il semble que ce dernier soit plus sensible que les deux autres. Une majeure différence

Tableau 3.14 Résultats de sensibilité du capteur 8090

| Courant appliqué | Distance | | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 1,5 cm | 4 cm | 7 cm | 12 cm |
| 2 A | 0,2426 A | 0,2636 A | 0,2837 A | 0,2638 A |
| 7 A | 0,3524 A | 0,3148 A | 0,2571 A | 0,2358 A |
| 15 A | 0,7033 A | 0,2867 A | 0,2392 A | 0,2512 A |

Tableau 3.15 Résultats de sensibilité du capteur 8093

| Courant appliqué | Distance | | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 1,5 cm | 4 cm | 7 cm | 12 cm |
| 2 A | 0,3856 A | 0,3955 A | 0,4085 A | 0,3978 A |
| 7 A | 0,4632 A | 0,4827 A | 0,4057 A | 0,4135 A |
| 15 A | 0,6990 A | 0,8756 A | 0,4255 A | 0,3949 A |

apparaît déjà sur les valeurs mesurées à 4 cm alors que les deux autres capteurs n'indiquent que de très modestes variations. Pour ces deux autres capteurs, il y a une différence notable entre les valeurs RMS prises à 1,5 cm et celles prises à 4 cm, particulièrement avec les courants de 7 A et de 15 A. Pour les valeurs lues par le capteur 8093, les mesures prises à 4 cm sont légèrement plus élevées que celles prises à 1,5 cm. L'hypothèse de ce phénomène est que le champ magnétique du fil à une distance de 1,5 cm est plus atténué par le blindage magnétique. En approchant le capteur, l'angle entre les lignes de champ et le blindage est modifié et cela peut réduire les valeurs lues. Comme les blindages ont tous été découpés et installés manuellement, certaines légères différences existent entre ceux-ci et pourraient expliquer ces résultats.

Ces résultats démontrent que lorsqu'un fil conduisant un courant important est près du fil mesuré, son champ magnétique peut générer une erreur dans la mesure. L'amplitude de cette

Tableau 3.16 Résultats de sensibilité du capteur 8094

| Courant appliqué | Distance | | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 1,5 cm | 4 cm | 7 cm | 12 cm |
| 2 A | 0,3777 A | 0,3010 A | 0,3132 A | 0,3044 A |
| 7 A | 0,5221 A | 0,3223 A | 0,3507 A | 0,3135 A |
| 15 A | 1,1027 A | 0,3874 A | 0,3327 A | 0,3448 A |

erreur dépend évidemment de la distance séparant le fil du capteur, mais aussi de la valeur du courant circulant dans le fil. La pire condition a été observée avec le capteur 8094 lorsqu'il était situé à 1,5 cm du fil dans lequel circulait un courant de 15 A. Plus de 1 A était mesuré par le capteur tandis que sa lecture aurait dû être de 0 A.

3.7 Mesure de la puissance de transmission reçue en fonction de la distance

Dans cette section, cinq capteurs ont été utilisés afin de déterminer la diminution de la puissance reçue en fonction de la distance entre ces capteurs et l'UCT. De plus, les capteurs ont été testés dans trois conditions différentes. D'abord, les capteurs ont été testés sans aucun obstacle entre eux et l'UCT. Ensuite, les capteurs ont été placés dans un panneau de disjoncteurs de petite taille. Cette boîte métallique a les dimensions suivantes : 19,7 cm x 13,4 cm x 7,3 cm. Finalement, les capteurs ont été installés dans un panneau de disjoncteurs standard pour un domicile. Les dimensions de celui-ci sont de : 91,5 cm x 36,5 cm x 10,2 cm (voir la figure 3.13). Les capteurs ont ensuite été installés sur un chariot à roulettes et la distance les séparant de l'UCT a été mesurée à l'aide d'un instrument de mesure au laser.



Figure 3.13 Panneaux de disjoncteurs

Les figures 3.14, 3.15 et 3.16 présentent les valeurs RSSI (*Received Signal Strength Indication*) moyennes reçues des cinq capteurs par l'UCT pour les différentes distances et les différents scénarios. La moyenne est le point central pour chaque distance et les barres verticales représentent ± 1 écart-type. De ces graphiques, les conclusions suivantes peuvent être tirées.

D'abord, l'environnement dans lequel les mesures ont été prises, soit le laboratoire du LACIME, a affecté partiellement les résultats. En effet, les valeurs RSSI suivent normalement l'équation de Friis (Chamberlin (2009)) :

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (3.3)$$

où P_r est la puissance mesurée à l'antenne de réception, P_t est la puissance transmise à l'antenne de transmission, G_t et G_r sont les gains des antennes de transmission et de réception, λ est la longueur d'onde du signal et R est la distance séparant les deux antennes. Dans les résultats présentés, les courbes ont quelques pics qui ne devraient pas être présents. Cela s'explique avec la notion des multitrajets. En effet, avec les réflexions sur les différentes surfaces et obstacles présents dans la salle (voir la figure III-1 en annexe), des interférences constructives et destructives sont présentes. Cela explique pourquoi, par exemple, dans le cas sans boîtier, les mesures à 5,5 m et à 6 m sont supérieures de celles à 4,5 m.

Le deuxième élément à observer concerne le taux auquel les valeurs diminuent entre chaque scénario. Dans le cas sans boîtier, il faut une distance de 9 m avant d'obtenir une valeur RSSI inférieure à 30 tandis que lorsque les capteurs sont placés dans un boîtier métallique, cette distance diminue à 4 m. Cela indique donc que les boîtiers métalliques atténuent considérablement les signaux transmis.

En plus des valeurs de RSSI, une autre information importante lors de ces prises de mesures est le nombre de paquets radio perdus lors des transmissions. En effet, plus les capteurs étaient éloignés de l'UCT et plus le nombre de paquets reçus diminuait. Les figures 3.17, 3.18 et 3.19 présentent ces résultats. Encore une fois, le point central pour chaque distance est le nombre moyen de paquets manqués par capteur par l'UCT et les barres verticales représentent une variation de ± 1 écart-type.

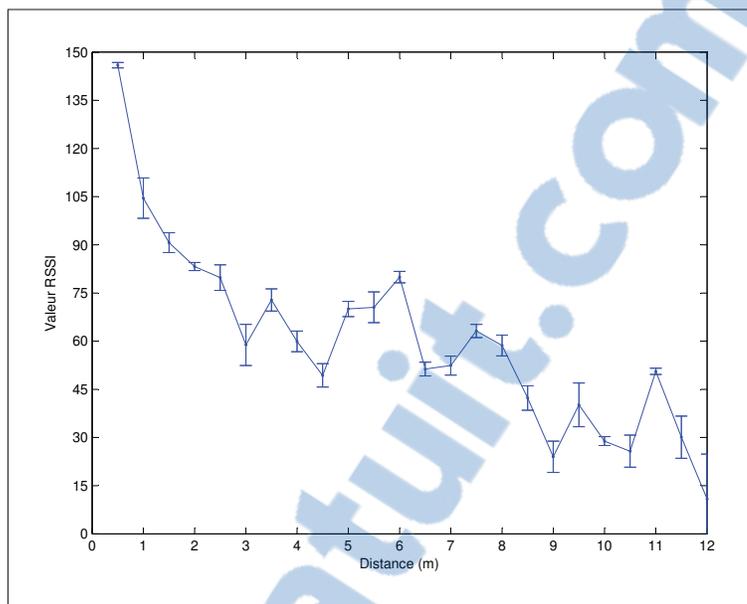


Figure 3.14 Valeur moyenne du RSSI en fonction de la distance
Sans boîtier

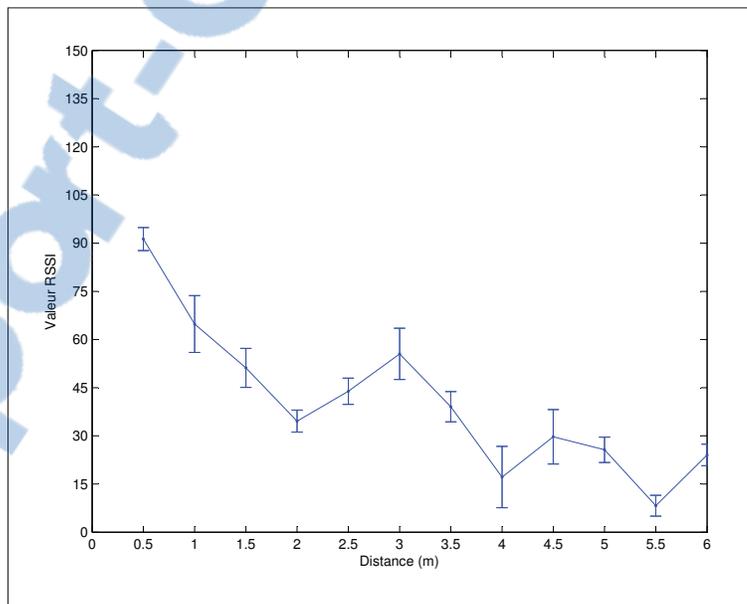


Figure 3.15 Valeur moyenne du RSSI en fonction de la distance
Petit boîtier métallique

Pour les capteurs qui ne sont pas dans un boîtier, aucune donnée n'est perdue dans les quatre premiers mètres. Ensuite, comme le montre le graphique 3.17, de plus en plus de transmissions

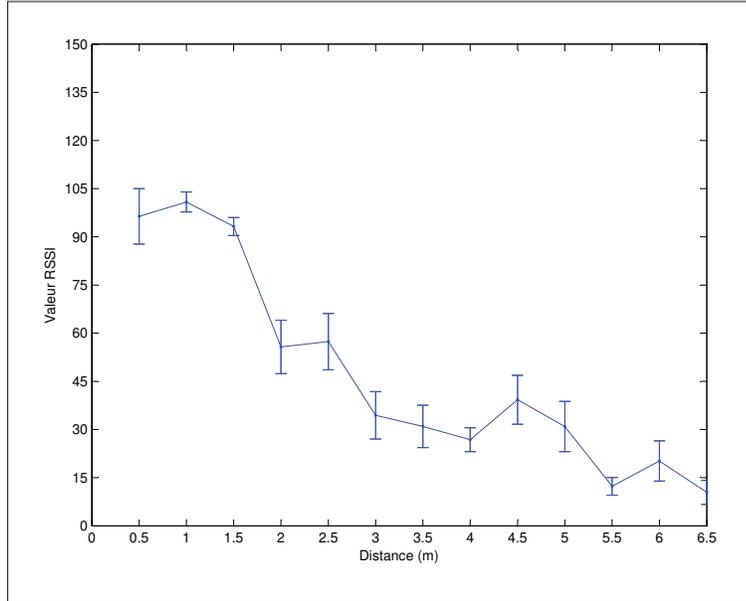


Figure 3.16 Valeur moyenne du RSSI en fonction de la distance
Grand boîtier métallique

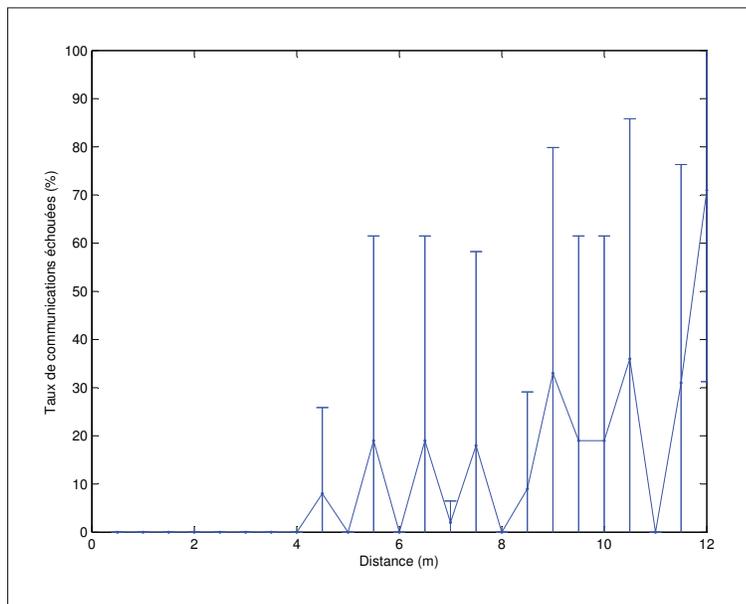


Figure 3.17 Pourcentage de paquets radio perdus en fonction de la distance
Sans boîtier

sont incomplètes jusqu'à obtenir un taux d'échec de communications atteignant en moyenne 70% à 12 m.

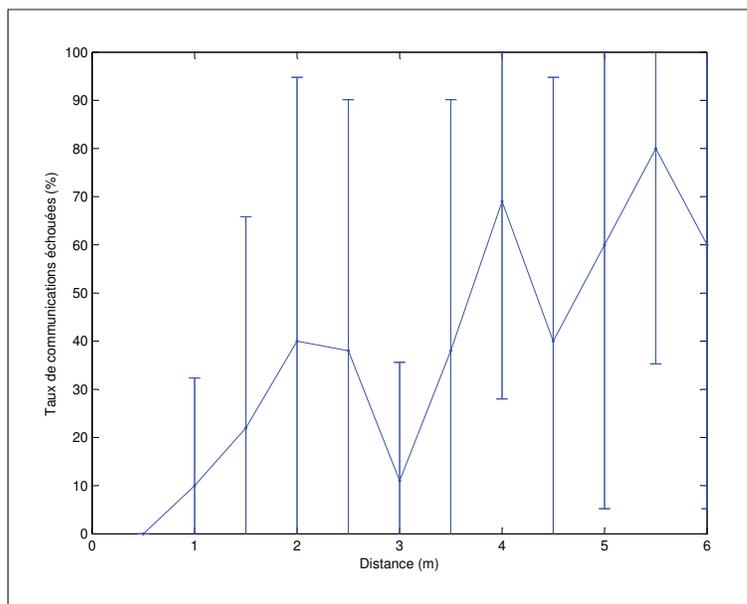


Figure 3.18 Pourcentage de paquets radio perdus en fonction de la distance
Petit boîtier métallique

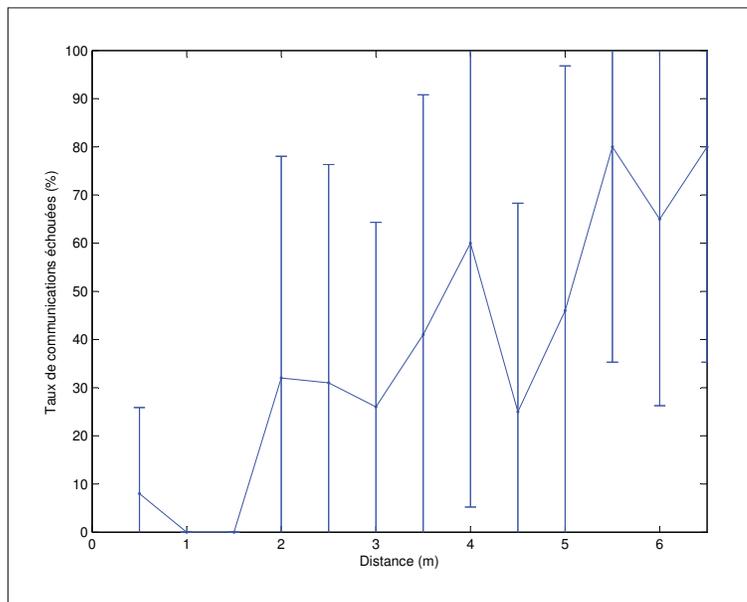


Figure 3.19 Pourcentage de paquets radio perdus en fonction de la distance
Grand boîtier métallique

En ce qui concerne les capteurs dans le petit panneau de disjoncteurs, à partir de 1 m, certaines communications ne parviennent pas à l'UCT. Avec l'augmentation de la distance, le nombre de

communications manquées ne fait qu'augmenter pour atteindre une moyenne de 80% d'échec de communication à une distance de 5,5 m. Au-delà de 6 m, pratiquement aucun paquet n'était reçu.

La situation est sensiblement la même avec le grand boîtier métallique. Quelques transmissions ont été captées à 6,5 m, mais, à partir de 7 m, plus rien n'était reçu.

En comparant les résultats des trois scénarios, la constatation suivante apparaît : le nombre de paquets qui ne parviennent pas à destination augmente drastiquement à partir du moment où la moyenne des valeurs RSSI est inférieure à 60. Pour le cas sans boîtier, cette valeur est atteinte à une distance d'environ 4 m. Dans le petit boîtier, cette distance est de 1 m et dans le grand boîtier, elle est de 2 m.

Pour obtenir la valeur en dBm correspondante aux valeurs RSSI mesurées, les spécifications énoncées à la page 96 de la fiche technique du module radio (Microchip Technology inc. (2010a)) sont utilisées.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une caractérisation détaillée du système a été accomplie. Les capteurs ont été soumis à plusieurs tests afin de déterminer leur taux d'erreur. Tout d'abord, un écart-type moyen de 4,72% a été mesuré sur un échantillon de 1000 mesures pour trois capteurs. Ensuite, l'impact du calibre du fil a été vérifié. Les résultats pour les calibres 10, 12 et 14 étaient sensiblement les mêmes tandis que les résultats pour les calibres 6 et 8 étaient plus faibles. Une calibration sur un seul gabarit de fil est donc impossible dans le cas des calibres 6 et 8, mais une calibration unique pour les calibres 10, 12 et 14 est envisageable. Par la suite, les trois capteurs ont été testés exactement dans la même configuration. Encore une fois, en raison de résultats différents pour chaque capteur, une calibration unique ne peut être utilisée. Chaque capteur doit être calibré individuellement et pour le gabarit de fil sur lequel il sera installé. Ensuite, l'impact de la distance par rapport au disjoncteur a été observé. Une différence moyenne de 5,8% a été constatée entre les positions à 1 cm et à 4 cm du disjoncteur. Lors d'une rotation de 180° autour du fil, une variation moyenne de 3,55% a été mesurée. Les capteurs ont ensuite été testés afin

de déterminer leur sensibilité à la proximité d'autres fils dans lesquels circule un courant. Les résultats montrent que lorsque les capteurs sont à plus de 7 cm aucun effet n'est visible pour des courants de 15 A et moins. Lorsque le capteur est plus près que cela, une partie du champ magnétique est capté et affecte les valeurs lues. Finalement, la diminution de la puissance reçue par l'UCT en fonction de la distance la séparant des capteurs a été mesurée. Afin de favoriser un maximum de réception et un minimum de transmissions perdues, les capteurs devraient se situer à moins de 1 m de l'UCT, lorsqu'ils sont installés dans un boîtier métallique.

CONCLUSION

Dans ce document, un système de prise de mesure de la consommation électrique de bâtiments résidentiels a été caractérisé et amélioré.

Tout d'abord, une description du système utilisé et de ses composants a été faite. Les capteurs de courant ont été présentés et le fonctionnement des capteurs à effet Hall a été décrit. Les capteurs de courant sont réalisés à l'aide d'un circuit imprimé sur lequel sont fixés un micro-contrôleur, un capteur à effet Hall, un module radio, une antenne et tous les autres composants passifs et actifs nécessaires au fonctionnement des pièces principales. Suite à cela, l'UCT a été présentée. Ses fonctions ont d'abord été abordées suivies par sa réalisation matérielle. L'UCT est en charge de capter les paquets radio transmis par les capteurs, de corriger les données pour les paquets manqués ou corrompus, de calculer et corriger la valeur RMS des mesures en effectuant la division et la racine carrée nécessaires, en ajustant l'ordonnée à l'origine et la pente et en annulant le bruit thermique des capteurs et finalement de communiquer ces données sur Internet. L'UCT est construite avec un *Raspberry Pi*[®], un concentrateur USB et un module radio identique à celui que l'on retrouve sur les capteurs.

Ensuite, la réalisation et les résultats du blindage magnétique ont été présentés. D'abord, plusieurs modèles de prototypes de blindages ont été présentés. Le modèle ayant les meilleurs résultats a ensuite été présenté ainsi que ses performances. Le blindage est réalisé avec du mu-métal et entoure la base du boîtier de plastique. Une diminution de plus de 50% des variations de mesures a été observée en présence de ce blindage.

Finalement, une caractérisation du système complet et plus particulièrement des capteurs de courant a été effectuée. Voici les conclusions obtenues suite aux tests effectués. D'abord, les mesures des capteurs ont un écart-type moyen de 4,72%. Ensuite, le calibre du fil à mesurer a un impact sur les mesures. Les résultats ont montré qu'une calibration sur un seul gabarit de fil est impossible pour les calibres 6 et 8, mais qu'une calibration unique pourrait être envisageable pour les calibres 10, 12 et 14. Par la suite, les capteurs ont été installés dans la même position et testés sous les mêmes conditions. En raison de résultats différents, une calibration indivi-

duelle pour chaque capteur est essentielle. Suite à cela, l'influence de la distance par rapport au disjoncteur a été analysée. Un écart moyen de 5,8% a été observé entre les positions à 1 cm et à 4 cm du disjoncteur. Puis, pour une rotation de 180° autour du fil, une fluctuation moyenne de 3,55% a été mesurée. Lorsque les capteurs ont été soumis au champ magnétique d'un autre fil à proximité, les capteurs ont capté ce champ seulement lorsque le fil était à une distance de moins de 7 cm pour des courants égaux ou inférieurs à 15 A. La valeur maximale moyenne lue par un capteur a été une lecture de 1,1 A pour un courant de 15 A à une distance de 1,5 cm. Enfin, pour favoriser au maximum la réception des paquets transmis, les capteurs ne devraient pas se situer à plus de 1 m de l'UCT lorsqu'ils sont installés dans un boîtier métallique fermé.

En ce qui concerne les développements futurs et les améliorations possibles, des travaux sont déjà entamés afin d'élaborer un algorithme pour calibrer les capteurs en temps réel à l'aide d'un seul capteur précis sur l'entrée électrique. Cela complexifierait légèrement l'installation, mais permettrait de réduire le temps de préparation des systèmes considérablement et assurerait une fiabilité et une précision à long terme. Cet algorithme pourrait éventuellement être implanté directement dans le *Raspberry Pi*®.

ANNEXE I

SOUS-ÉCHANTILLONNAGE D'UNE ONDE SINUSOÏDALE

Avec l'objectif de minimiser la consommation d'énergie, tel que discuté à la section 1.1.3, le sous-échantillonnage du signal de 60 Hz s'est avéré essentiel. La fréquence de 3,08 Hz a été jugée optimale au niveau de la granularité recherchée et de l'énergie consommée.

Cette fréquence a été déterminée, principalement, afin de pouvoir capturer la consommation électrique des plinthes électriques commandées par des thermostats électroniques. Ces derniers contrôlent les plinthes par modulation de largeur d'impulsion (PWM). Cela implique donc des périodes actives de forte consommation de largeur indéterminées, mais qui, généralement, sont de l'ordre de quelques secondes (Veris Industries (2013)). En échantillonnant un peu plus de trois fois par seconde, ces périodes de consommation sont facilement détectables et la mesure peut ainsi être fiable.

Un autre critère ayant influencé le choix de cette fréquence est les restrictions lors de l'implémentation dans le microcontrôleur. En effet, le *watchdog* du microcontrôleur a une période de sommeil égale à :

$$4 \text{ ms} \cdot 2^n \quad (\text{A I-1})$$

où n est un nombre entier compris entre 0 et 15 (Microchip Technology inc. (2010b)). Le microcontrôleur se réveille donc à intervalles réguliers. Par contre, comme la valeur du multiplicateur évolue de manière exponentielle, obtenir une fréquence de valeur précise, telle que 3,08 Hz, requiert un travail logiciel supplémentaire. Dans le cadre de ce projet, le délai de 4 ms a été multiplié par 2^2 . Cela donne un temps de 16 ms entre chaque réveil et donc une fréquence de 62,5 Hz. Suite à cela, dans la logique du microcontrôleur, un compteur accumule le nombre de réveils effectués par le *watchdog* et une vérification est faite pour ne pas dépasser le nombre de réveils désirés. Dans ce cas, 19 réveils sont nécessaires pour obtenir la fréquence désirée. Théoriquement, la fréquence obtenue est de 3,29 Hz, mais, en rajoutant les délais générés par le *watchdog* pour s'endormir et se réveiller, la fréquence de 3,08 Hz est obtenue.

Dans le cadre de ce projet, comme la reconstruction du signal original n'est pas nécessaire, ni même utile, les problèmes de recouvrement spectral ne sont pas importants. Le seul paramètre nécessaire à ce travail est la valeur RMS du signal mesuré. Il est donc important de démontrer que la valeur RMS des échantillons pris à une fréquence de 3,08 Hz est égale à la valeur RMS du signal de 60 Hz original.

Pour que le signal à mesurer ainsi que le signal basé sur les échantillons prélevés aient le potentiel d'avoir la même valeur RMS, il faut que les deux aient complété un nombre de cycles entiers.

Afin d'obtenir le temps minimal requis pour que les deux fréquences aient effectué un nombre de cycles entier, l'équation suivante est minimisée :

$$\min(t) \Big|_{(t \cdot f_1 \in \mathbb{N}) \& (t \cdot f_2 \in \mathbb{N})} \quad (\text{A I-2})$$

où t est le temps minimal pour obtenir un nombre de cycles entier pour les deux fréquences, f_1 est la fréquence du signal à observer et équivaut à 60 Hz et f_2 est la fréquence d'échantillonnage et est égale à 3,08 Hz. Le résultat de ce calcul est un temps minimal de 25 secondes. C'est-à-dire qu'après 25 secondes, les deux signaux ont terminé un cycle et sont revenus à leur valeur de départ. Cela implique aussi que la valeur RMS des échantillons et du signal original sont les mêmes, une fois ce délai écoulé. En effet, à partir du graphe de la figure I-1, les valeurs RMS des deux signaux ont été calculées. La valeur RMS du signal à 60 Hz est de $\sqrt{2}/2$ A, c'est-à-dire, de 0,7071 A tandis que la valeur RMS des échantillons est de 0,7067 A. L'erreur entre les deux est de 0,057%. Comme les tests du chapitre 3 le montrent, cette erreur est négligeable par rapport aux autres facteurs qui affectent la précision des capteurs.

Dans la figure I-1, le signal en bleu est le sinus à échantillonner tandis que le signal en noir représente un sous-échantillonnage de ce sinus. En effectuant une interpolation d'ordre 2 entre chacun de ces points, tel que montré par le signal en rouge, il est clair que les valeurs des échantillons forment une onde sinusoïdale de même amplitude que le signal original, mais de fréquence inférieure.

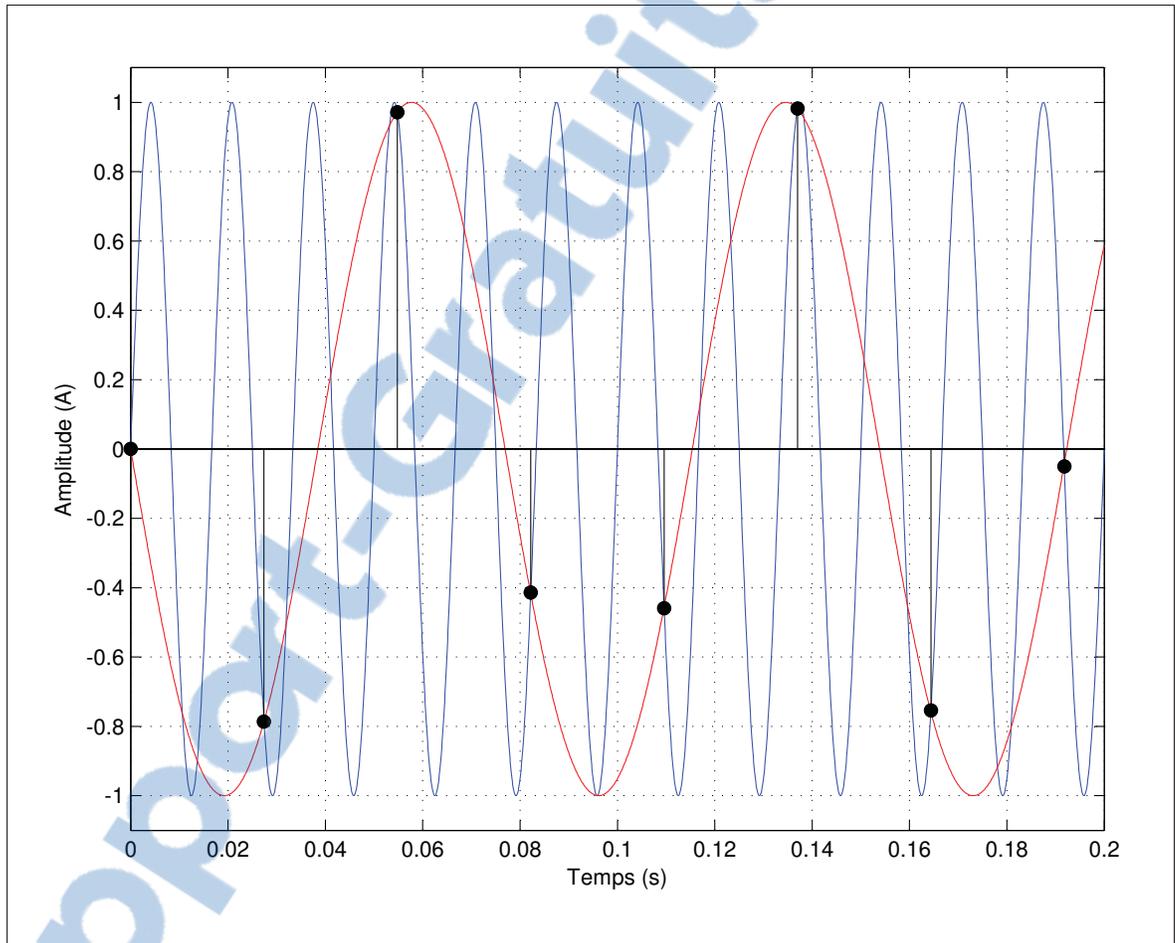


Figure-A I-1 Sinus sous-échantillonné

ANNEXE II

ERREURS DE MESURES AVEC ET SANS LE BLINDAGE MAGNÉTIQUE

Tableau-A II-1 Erreurs de mesures du capteur 8093

| Position de mesure | Courant circulant dans le fil | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
| | Sans blindage | Avec blindage | Sans blindage | Avec blindage | Sans blindage | Avec blindage | Sans blindage | Avec blindage |
| 1 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 2 | -11,8% | -10,8% | -29,0% | -14,8% | -27,6% | -14,0% | -21,2% | -17,3% |
| 3 | -2,9% | -10,2% | -39,1% | -23,3% | -37,8% | -24,5% | -31,6% | -26,7% |
| 4 | -7,7% | -3,6% | -21,1% | -10,6% | -20,6% | -11,7% | -13,9% | -12,6% |
| 5 | -12,0% | -0,6% | -21,6% | -6,9% | -16,3% | -9,4% | -11,7% | -11,5% |

Tableau-A II-2 Erreurs de mesures du capteur 8094

| Position de mesure | Courant circulant dans le fil | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
| | Sans blindage | Avec blindage | Sans blindage | Avec blindage | Sans blindage | Avec blindage | Sans blindage | Avec blindage |
| 1 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 2 | -0,7% | 7,7% | -18,8% | -1,5% | -19,0% | -1,1% | -19,0% | -5,4% |
| 3 | 11,7% | 9,7% | -25,9% | -7,6% | -25,4% | -5,2% | -25,7% | -6,3% |
| 4 | 2,5% | -9,7% | -12,5% | 0,8% | -11,9% | 1,5% | -12,9% | -0,3% |
| 5 | -1,1% | 6,8% | -10,0% | -3,2% | -9,8% | 1,3% | -10,9% | -1,5% |

Tableau-A II-3 Erreurs de mesures du capteur 8095

| Position de mesure | Courant circulant dans le fil | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 0 A | | 5 A | | 9 A | | 13 A | |
| | Sans blin- dage | Avec blin- dage | Sans blin- dage | Avec blin- dage | Sans blin- dage | Avec blin- dage | Sans blin- dage | Avec blin- dage |
| 1 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| 2 | -3,8% | -16,5% | -17,8% | -6,9% | -20,1% | -8,1% | -19,1% | -6,3% |
| 3 | -2,1% | -0,9% | -16,7% | -7,1% | -16,9% | -8,4% | -17,2% | -7,5% |
| 4 | -5,4% | -1,2% | -7,7% | 1,7% | -11,5% | 5,6% | -10,2% | 3,3% |
| 5 | -4,4% | -4,9% | -7,2% | -1,5% | -6,4% | -0,2% | -8,6% | -1,7% |

ANNEXE III

PLAN DU LABORATOIRE DU LACIME

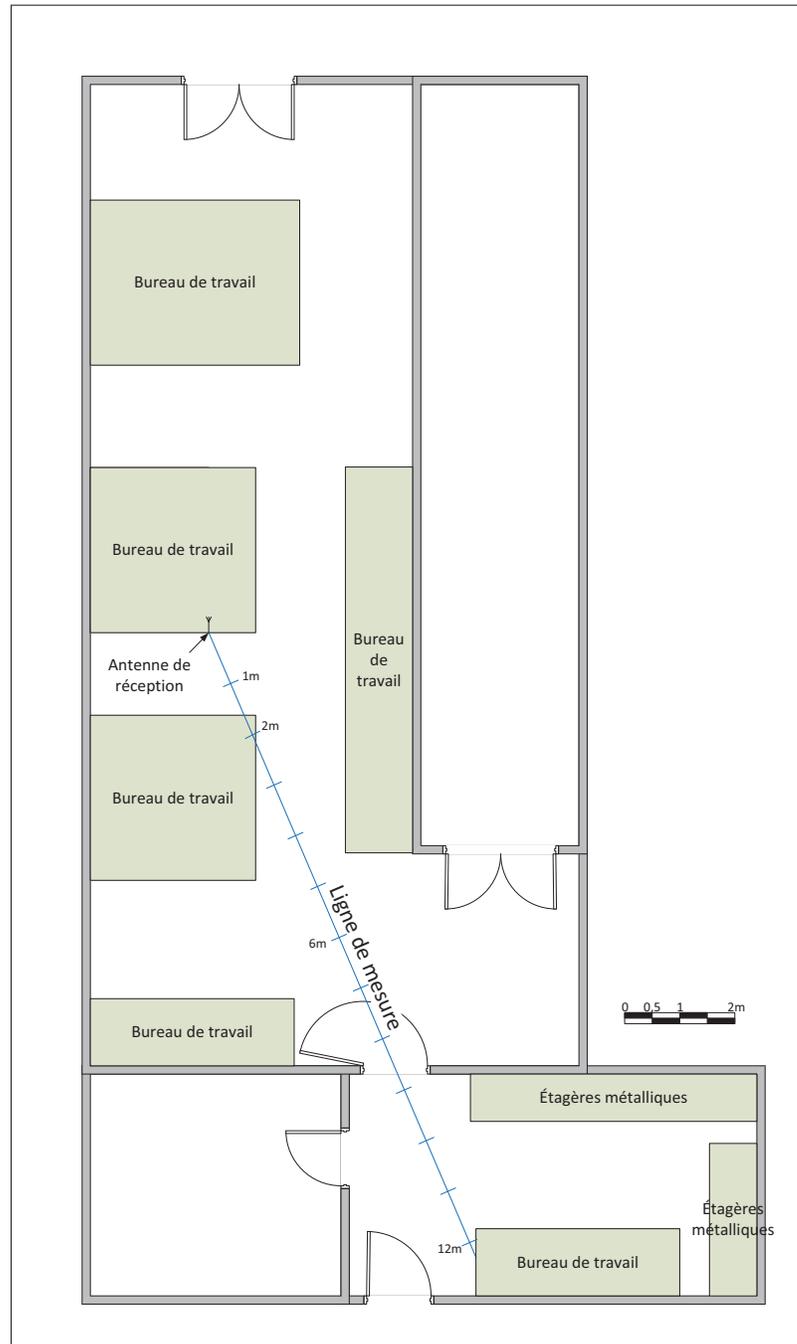


Figure-A III-1 Plan du laboratoire du LACIME

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Allegro MicroSystems inc. Octobre 2011. « Micro Power 3 V Linear Hall Effect Sensor ICs with Tri-State Output and User-Selectable Sleep Mode ». En Ligne. <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/174632/ALLEGRO/A1393SEHLT-T.html>>. Consulté le 26 février 2013.
- Biezl. Avril 2009. « Dessin CT ». En Ligne. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Stromwandler_Zeichnung.svg>. Consulté le 5 mars 2013.
- Bose, T., 2004. *Digital Signal and Image Processing*. J. Wiley, 706 p.
- Brander, T., A. Gerfer, B. Rall, et H. Zenkner, 2009. *Trilogy of Magnetics : Design Guide for EMI Filter Design, SMP & RF Circuits*. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG, Waldenburg, 700 p.
- Chamberlin, Kent. 2009. « Friis Transmission Formula ». En Ligne. <<http://tesla.unh.edu/courses/ece994/Acrobat%20Files/Friis.pdf>>. Consulté le 14 mai 2013.
- Current Cost. 2013. « Current Cost ». En Ligne. <<http://www.currentcost.com/>>. Consulté le 4 mars 2013.
- Darby, Sarah. Avril 2006. « The Effectiveness of Feedback on Energy Consumption ». En Ligne. <<http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/smart-metering-report.pdf>>. Consulté le 3 août 2013.
- Energizer. 2012. « ENERGIZER EN92 ». En Ligne. <<http://data.energizer.com/PDFs/EN92.pdf>>. Consulté le 7 août 2013.
- Energy Inc. 2012. « TED Residential Electricity Monitor ». En Ligne. <<http://www.theenergydetective.com/residential.html>>. Consulté le 4 mars 2013.
- Harris, Tom. 2002. « How Circuit Breakers Work ». En Ligne. <<http://electronics.howstuffworks.com/circuit-breaker2.htm>>. Consulté le 12 février 2013.
- Levasseur, Marc-André, Sébastien Jomphe, Daniel Sicard, Andrei Dulipovici, François Gagnon, et Ghyslain Gagnon. Mai 2012. « A wireless sensor network for residential electrical energy consumption measurement ». In *25th IEEE Canadian Conference on Electrical Computer Engineering (CCECE)*. p. 1-4.
- Microchip Technology inc. 2010a. *MRF24J40 Data Sheet - IEEE 802.15.4™ 2.4 GHz RF Transceiver*.
- Microchip Technology inc. Octobre 2010b. *PIC18F23K20/ 24K20/ 25K20/ 26K20/ 43K20/ 44K20/ 45K20/ 46K20 Data Sheet*.
- Nilsson, J.W. et S.A. Riedel, 2008. *Electric Circuits, Eighth Edition*. Pearson/Prentice Hall.

- P3 International Corporation. 2013. « Kill A Watt ». En Ligne. <<http://www.p3international.com/products/special/p4400/p4400-ce.html>>. Consulté le 4 mars 2013.
- Pierce, Rod. Décembre 2012. « Normal Distribution ». In *Math Is Fun*, En Ligne. <<http://www.mathsisfun.com/data/standard-normal-distribution.html>>. Consulté le 15 avril 2013.
- Ramsden, Edward, 2011. *Hall-Effect Sensors : Theory and Application*. Elsevier Science.
- Raspberry Pi®. Avril 2012. « Raspberry Pi Ethernet & USB ». En Ligne. <<http://www.raspberrypi.org/wp-content/uploads/2012/04/Raspberry-Pi-Schematics-R1.0.pdf>>. Consulté le 7 mars 2013.
- Raspberry Pi®. Février 2013. « Raspberry Pi FAQs ». En Ligne. <<http://www.raspberrypi.org/faqs>>. Consulté le 7 mars 2013.
- Selik, Melissa, Richard Baraniuk, et Adam Blair. Août 2004. « Signal Energy vs. Signal Power ». En Ligne. <<http://cnx.org/content/m10055/2.10/>>. Consulté le 2 avril 2013.
- Stannered. Février 2007. « Electromagnetism.svg ». En Ligne. <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetism.svg>>. Consulté le 30 avril 2013.
- Tech-FAQ. 2013. « Hall Effect ». En Ligne. <<http://www.tech-faq.com/wp-content/uploads/images/Hall-Effect.jpg>>. Consulté le 5 mars 2013.
- ÉTS. Décembre 2012. « Site web de l'ÉTS ». En Ligne. <<http://www.etsmtl.ca>>. Consulté le 12 février 2013.
- UPM Marketing. 2010. « Experts in home automation products ». En Ligne. <<http://www.upm-marketing.com/products/em130.html>>. Consulté le 4 mars 2013.
- Veris Industries. 2013. « VT7200F5x00 Series ». En Ligne. <http://www.veris.com/docs/Datasheets/VT7200F5x00_d01131.pdf>. Consulté le 2 mai 2013.
- Watts up meters. 2012. « watts up ? ». En Ligne. <https://www.wattsupmeters.com/secure/downloads/SC20_manual_rev10905_.pdf>. Consulté le 4 mars 2013.
- Weiss, M., A. Helfenstein, F. Mattern, et T. Staake. Mars 2012. « Leveraging smart meter data to recognize home appliances ». In *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), 2012*. p. 190-197.
- Wen, X.-G. Octobre 2012. « Topological order : from long-range entangled quantum matter to an unification of light and electrons ». *ArXiv e-prints*.