



STAGE FIN D'ÉTUDE : RAPPORT FINAL

Cartographie Magnétique

Étudiant:
BASTOS Vitória

Tuteur Centrale Lille:
MAURICE Vincent
Tuteurs d'Entreprise:
BRULAIS Sébastien
THOMAS Remy

Remerciements

Tout d'abord, je remercie Sébastien Brulais et Remy Thomas, mes tuteurs de stage, pour l'opportunité de travailler avec eux sur les sujets passionnants et intéressants, pour leurs conseils et pour l'apprentissage qui m'a été transmis.

Je tiens également à remercier M. Maurice et M. Talbi pour les cours formidables que j'ai suivis avec lui, ainsi que pour son tutorat pendant toute ma formation à Centrale.

En outre, je tiens à remercier mes camarades, Vincent et Olivier pour leur compagnie, les conversations et les échanges d'expériences tout au long de mon stage.

Par ailleurs, je remercie ma famille, spécialement mon cher père Marcelo, et ma chère mère Regina, pour son soutien émotionnel et financier et sa confiance au cours de ma formation, et surtout maintenant, pendant ces longues années d'études en France.

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	L'Organisation	5
1.1.1	CEA	5
1.1.2	CEA - Grenoble	5
1.1.3	CEA - Leti	6
1.2	Contexte	7
1.3	Objectifs	7
2	Missions	10
2.1	État d'art	10
2.1.1	Introduction aux piles à combustible	10
2.1.2	Méthodes de diagnostic des défaillances et diagnostic par champ magnétique	12
2.1.3	Densité de courant	13
2.2	Dispositif d'instrumentation	13
2.2.1	Objectif Général	13
2.2.2	Aspects Technologiques à Explorer	14
3	Méthodologie et réalisations	15
3.1	Contraintes	15
3.2	Conception architecture logicielle	17
3.2.1	Firmware embarquée	19
3.2.2	Traitement des données	23
3.3	Caractérisation du dispositif d'instrumentation	27
3.3.1	Vérification de la dynamique	27
3.3.2	Essai avec boite isolante	29
3.3.3	Essai avec Bobine de Helmholtz	31
4	Expérimentation sur pile à combustible du CEA	34
4.1	Description de l'expérimentation	34
4.1.1	Montage expérimental	34
4.2	Résultat expérimentaux	35
5	Conclusion	40
6	Perspectives	41
6.1	Optimisation de la Synchronisation des Capteurs	41
6.2	Dépassement des Limitations de Fréquence	41
6.3	Améliorations de la Calibration	41
7	Annexes	42
7.1	Schéma Carte Mère	42
7.2	Schéma Carte Capteurs	46

Table des figures

1	Presqu'île de Grenoble	6
2	Organigramme du CEA Grenoble	6
3	Planning du stage	9
4	Schéma représentatif d'une cellule élémentaire PEMFC [2]	11
5	Dispositif d'instrumentation	15
6	Carte capteurs	15
7	Schéma carte capteurs	16
8	La séquence d'exécution	18
9	Écart de temps entre le début des mesures, avec des périphériques utilisant le DMA	21
10	Effets du degaussing	22
11	Schéma temporel de chaque fonctionnalité du firmware	23
12	Écran de sélection des paramètres UART	24
13	Line plot de l'interface	25
14	Heatmap interface	26
15	Interface de visualisation	27
16	Système pour le test de la dynamique	28
17	Réponses du software au test de dynamique	29
18	Blindage magnétique	29
19	Résultats des mesures dans l'enceinte	30
20	Bobine de Helmholtz	31
21	Configuration expérimentale	32
22	Réponse des capteurs aux champs isolés	32
23	Fixation de la carte	34
24	Deuxième enregistrement	35
25	Effet de l'injection de courant sur la pile	36
26	Effet de l'injection de courant sur différents capteurs	36
27	Variation du courant dans la pile au cours du temps	37
28	Variation de la norme du champ dans la pile au cours du temps	37
29	Résultats des mesures sur la pile, mettant en évidence les données pour chaque axe	38
30	Résultats des mesures en haut de la carte, mettant en évidence les données pour chaque axe	38

1 Introduction

1.1 L'Organisation

1.1.1 CEA

Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) est un organisme public français dédié à la recherche, au développement et à l'innovation. Il joue un rôle fondamental dans six domaines principaux : la défense et la sécurité nationale, les énergies (nucléaires et renouvelables), la biotechnologie et la recherche médicale, la recherche technologique pour l'industrie, la recherche fondamentale, ainsi que le démantèlement des installations nucléaires.

Avec une présence répartie sur 10 sites principaux en France et sept implantations régionales via CEA Tech, le CEA bénéficie d'une forte implantation sur le territoire national. Reconnue internationalement, l'organisation s'intègre dans l'Espace européen de la recherche et accroît sa présence mondiale à travers des collaborations et des projets de recherche. En 2020, le CEA a présenté un budget global de 5 milliards d'euros, réparti entre le secteur civil et la défense, et emploie plus de 20 000 personnes. Ses chercheurs publient chaque année plus de 5 000 articles scientifiques.

En matière de propriété intellectuelle, le CEA est l'un des principaux déposants de brevets en France et en Europe, avec plus de 6 980 familles de brevets actives. Ses contributions s'étendent des innovations industrielles à la recherche fondamentale. De plus, le CEA valorise ses technologies en les transférant à l'industrie, renforçant ainsi la compétitivité des entreprises françaises. Au cours des dernières années, il a encouragé la création de start-ups, avec plus de 216 entreprises créées, dont 89 au cours des dix dernières années. Il collabore également avec plus de 700 partenaires industriels et 56 pôles de compétitivité.

1.1.2 CEA - Grenoble

Le CEA Grenoble, situé au cœur de la Presqu'île de Grenoble (figure 1), est l'un des principaux centres de recherche du CEA. Installé sur une superficie de 67 hectares avec 280 bâtiments, ce site accueille près de 6 000 personnes, dont 4 200 salariés. Ses infrastructures comprennent des laboratoires de pointe, des salles blanches et des plateformes technologiques.

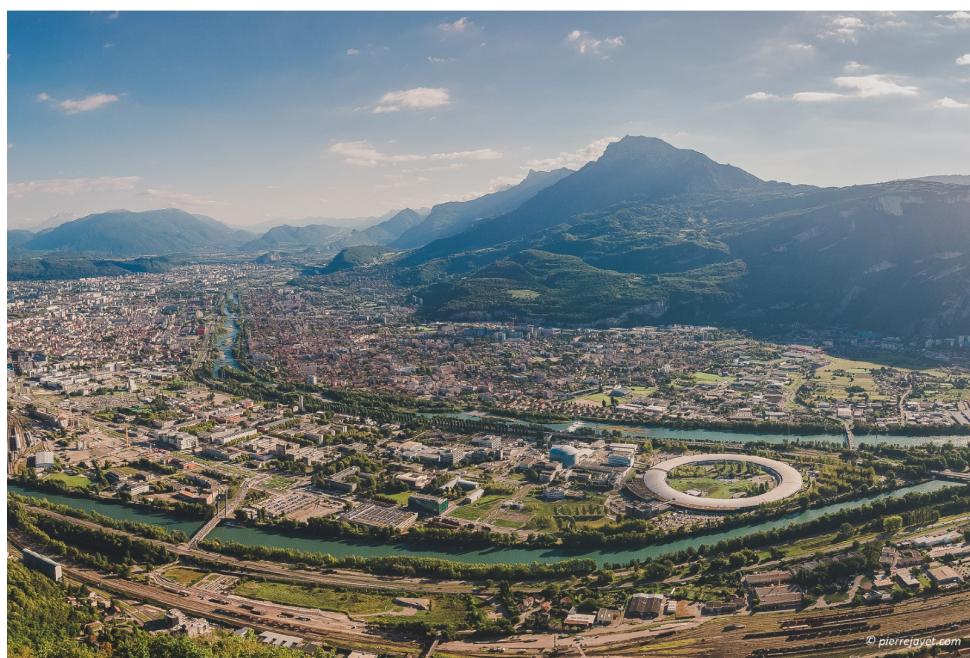


FIGURE 1 – Presqu’île de Grenoble

Les activités du CEA Grenoble couvrent des domaines variés tels que l’énergie, la santé, l’information et la communication, tout en maintenant une recherche fondamentale d’excellence en biologie cellulaire, nanosciences, chimie et cryotechnologies. Il abrite plusieurs départements de recherche spécialisés : l’IRIG, le LETI, le LITEN et le LIST. (figure 2)

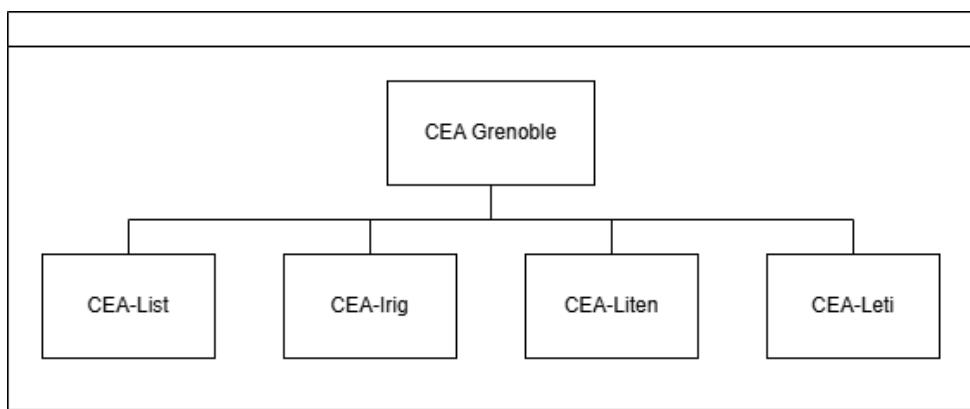


FIGURE 2 – Organigramme du CEA Grenoble

1.1.3 CEA - Leti

Le CEA-Leti (Laboratoire d’Électronique et des Technologies de l’Information), laboratoire où ce stage s’est déroulé, est un des départements du CEA Grenoble (figure 2). Le CEA-Leti se distingue par son expertise en microélectronique, nanoélectronique, intelligence artificielle et systèmes embarqués. L’institut promeut des innovations qui dynamisent des industries telles que la santé, l’énergie, le transport, les télécommunications et l’Internet des Objets (IoT).

Au sein du CEA-Leti, le département Systèmes (DSYS) joue un rôle concevant et développant des fonctions électroniques innovantes. Ses activités vont de la création de circuits intégrés basés sur des technologies nouvelles à l'intégration de ces solutions dans des systèmes. Le département travaille en collaboration avec des industries de différentes tailles, renforçant leur position dans la chaîne de valeur. Pour atteindre ces objectifs, le DSYS mène des travaux intensifs de recherche et développement, axés sur les transmissions sans fil, les systèmes de capteurs, l'électronique pour l'énergie et la sécurité des systèmes embarqués.

1.2 Contexte

Les laboratoires LAIC (Laboratoire d'Intégration de Capteurs) et L2EP (Laboratoire d'Électronique de Puissance) sont deux entités du CEA-Leti et Liten (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles). Ces laboratoires travaillent sur des solutions technologiques liées à l'électronique embarquée, l'électronique de puissance, les systèmes de gestion d'énergie d'énergie pour les batteries et les piles à combustibles. Leur expertise englobe la conception de systèmes de capteurs, l'intégration de ces systèmes dans des plateformes électroniques à basse consommation, ainsi que la gestion et la surveillance des dispositifs de puissance.

Dans le cadre de la recherche sur les piles à combustible, il est essentiel de surveiller divers paramètres de fonctionnement afin d'optimiser leurs performances et d'augmenter leur durée de vie. Les piles à combustible, en raison de leur nature, peuvent développer des défauts internes au fil du temps, ce qui peut entraîner des perturbations magnétiques. Ces perturbations peuvent être détectées et analysées à l'aide d'un réseau de capteurs magnétiques, permettant ainsi de caractériser ces défauts et d'améliorer le diagnostic de la pile à combustible.

1.3 Objectifs

Le projet avait pour objectif principal le développement d'un système de réseau de capteurs magnétiques en temps réel, destiné à mesurer les perturbations magnétiques autour d'une pile à combustible. Ce système, basé sur une matrice de capteurs magnéto-résistifs de type AMR, devait être capable de collecter des données, de les traiter et de les transmettre à un PC pour analyse.

Les étapes clés du projet incluaient :

- **Recherche Bibliographique et Analyse des Travaux Précédents :** La première phase du stage a consisté à effectuer une recherche bibliographique approfondie pour comprendre les mécanismes de fonctionnement des piles à combustible et les défauts internes pouvant générer des perturbations magnétiques. J'ai également étudié les travaux précédemment réalisés au CEA sur ce sujet, notamment les systèmes électroniques développés pour la surveillance des piles à combustible. L'analyse de ces systèmes existants m'a permis de mieux cerner les défis techniques à relever pour la mise en œuvre de la nouvelle plateforme.
- **Développement sur Microcontrôleur STM32 :** Cette phase a été consacrée au développement de la partie embarquée du système. Le projet a nécessité la programmation en C du microcontrôleur STM32 pour piloter une matrice de 64

magnétomètres tri-axes. Les drivers bas niveau ont été développés pour permettre la communication entre les capteurs et le microcontrôleur, tout en assurant la synchronisation des mesures. Un protocole de communication a également été mis en place pour permettre l'envoi des données vers un PC.

- **Développement du Logiciel de Traitement des Données :** Une fois les données de mesures magnétiques transmises au PC, un logiciel a été développé en Python pour permettre la visualisation et le traitement des mesures. Ce logiciel permet de récupérer les données brutes provenant des magnétomètres, de les organiser et de les afficher en temps réel. Des algorithmes de traitement de données ont également été implémentés pour extraire des informations pertinentes concernant les défauts de fonctionnement des piles à combustible.
- **Tests et Validation du Système :** Dans la dernière phase du stage, le système complet a été testé dans un laboratoire du CEA, en collaboration avec des chercheurs spécialisés dans les piles à combustible. Ces tests ont permis de valider l'ensemble de la chaîne de mesure, de la collecte des données magnétiques à leur traitement sur PC.

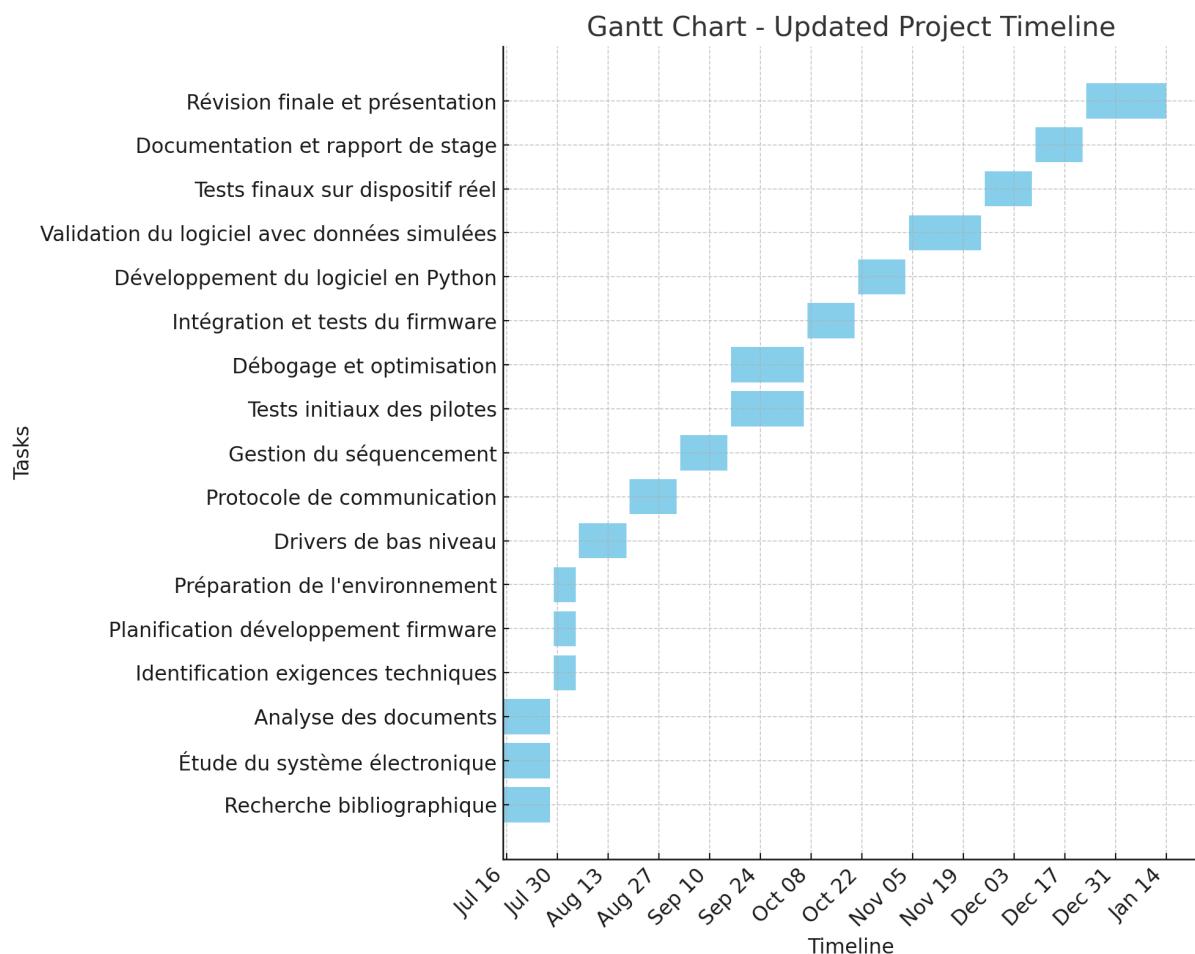


FIGURE 3 – Planning du stage

2 Missions

2.1 État d'art

2.1.1 Introduction aux piles à combustible

Les piles à combustible, en particulier celles utilisant une membrane échangeuse de protons (PEMFC), incarnent une technologie clé dans la transition énergétique mondiale. Leur fonctionnement repose sur une réaction électrochimique entre l'hydrogène et l'oxygène, produisant de l'électricité, de la chaleur et de l'eau comme unique sous-produit. Grâce à leur rendement élevé (jusqu'à 60 %) et à leur capacité à générer de l'électricité de manière continue tant qu'un apport en combustible est assuré, elles se révèlent adaptées à une variété d'applications, notamment dans les domaines du transport, des systèmes stationnaires et des applications portables [5]

Concernant sa structure et son fonctionnement, la PEMFC est essentiellement constituée des couches fonctionnelles présentées ci-dessous et illustrées figure 4 :

- **La membrane échangeuse de protons (PEM)** : cœur de la cellule, elle permet le passage sélectif des protons tout en bloquant les électrons.
- **Les couches catalytiques** : généralement composées de platine, elles facilitent les réactions électrochimiques.
- **Les couches de diffusion gazeuse (GDL)** : assurent une distribution homogène des gaz réactifs (H_2 et O_2) sur la surface de la membrane.
- **Les plaques bipolaires** : distribuent les gaz, collectent le courant et garantissent la gestion thermique.

Le schéma de une cellule élémentaire est représenté par la figure 4

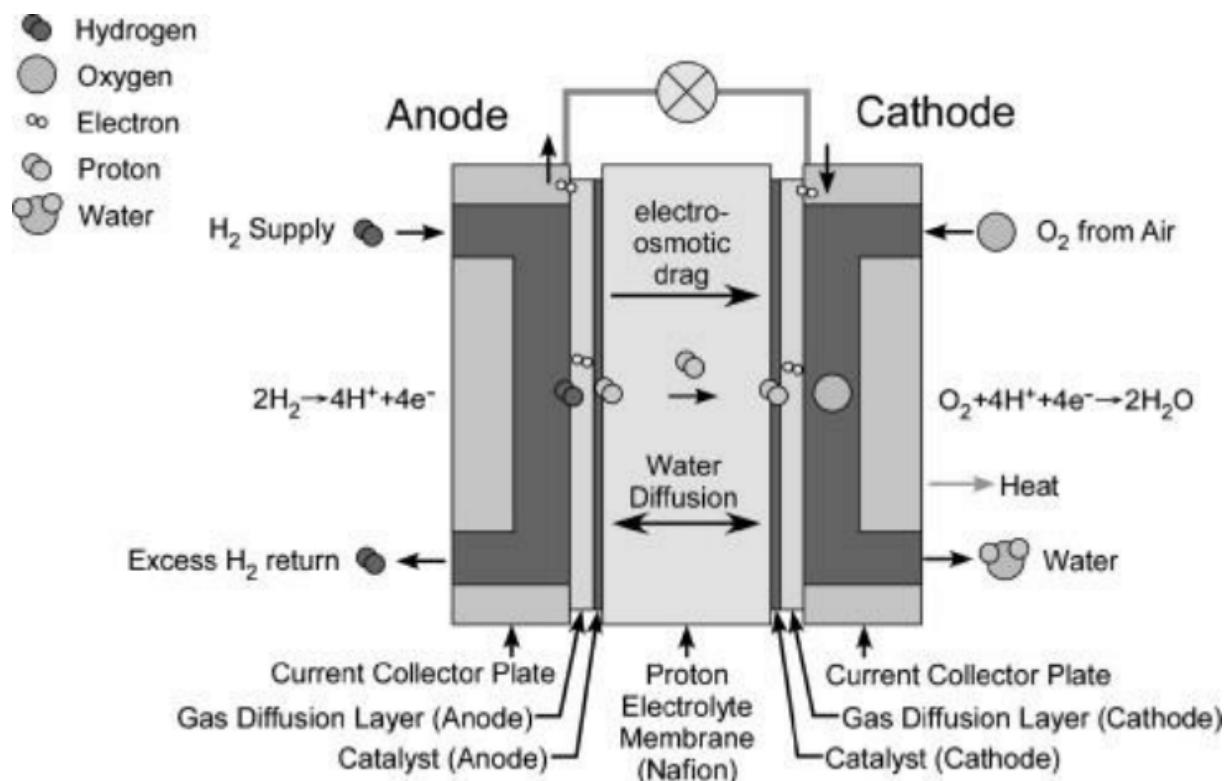


FIGURE 4 – Schéma représentatif d'une cellule élémentaire PEMFC [2]

Lorsque l'hydrogène est introduit à l'anode, il est dissocié en protons et électrons. Les protons traversent la membrane tandis que les électrons sont contraints de suivre un circuit externe, générant ainsi un courant électrique exploitable. À la cathode, les protons, les électrons et l'oxygène se combinent pour former de l'eau, concluant ainsi le cycle [3]

Les PEMFC offrent de nombreux avantages. Leur efficacité énergétique dépasse celle des moteurs thermiques traditionnels, et leur impact environnemental est minimal, puisqu'elles ne produisent que de l'eau comme résidu [1]. De plus, leur modularité et leur flexibilité leur permettent d'être adaptées à des besoins variés, allant des applications domestiques aux véhicules électriques. Cependant, ces piles doivent encore surmonter des défis techniques et économiques avant de pouvoir être déployées à grande échelle.

Leur coût élevé, principalement dû à l'utilisation de catalyseurs à base de métaux précieux comme le platine, constitue un obstacle majeur. En outre, leur durabilité et leur fiabilité sont compromises par des dégradations réversibles (noyage) et irréversibles (corrosion ou dégradation de la membrane), qui affectent leurs performances et leur durée de vie. La gestion des conditions opérationnelles, telles que la température, l'humidité relative et la stoechiométrie des gaz, reste également complexe et critique pour éviter les défaillances. [1].

Afin de relever ces défis, les efforts de recherche se concentrent sur l'amélioration des matériaux, la réduction des coûts et le développement de méthodes de diagnostic avancées. Ces dernières, qu'elles soient invasives ou non invasives, jouent un rôle crucial dans l'identification des défaillances et l'optimisation des performances. Les diagnostics non invasifs, en particulier, permettent de surveiller l'état de santé des piles sans perturber

leur fonctionnement, ce qui est essentiel pour garantir leur fiabilité dans des applications industrielles

2.1.2 Méthodes de diagnostic des défaillances et diagnostic par champ magnétique

Les méthodes de diagnostic des défaillances dans les piles à combustible jouent un rôle crucial dans l'amélioration de leur durabilité et de leur fiabilité. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes invasives et les méthodes non invasives, chacune ayant des caractéristiques et des applications spécifiques en fonction des besoins et des contraintes opérationnelles.

Les méthodes invasives impliquent des interventions directes sur le système. Elles consistent généralement à introduire des modifications ou des capteurs au sein même de la pile, ce qui peut perturber son fonctionnement. Bien que ces approches puissent fournir des informations très détaillées sur les paramètres internes, elles présentent des inconvénients majeurs, notamment contraintes d'intégration qui apportent des perturbations au fonctionnement de la pile.

En revanche, les méthodes non invasives s'appuient sur des mesures externes, sans interférer directement avec le fonctionnement de la pile. Elles reposent sur des grandeurs physiques mesurables telles que le champ magnétique, la tension, ou encore la pression. Parmi ces approches, l'analyse du champ magnétique externe semble être une solution prometteuse. Ce type de diagnostic utilise des capteurs externes pour mesurer les variations de champ magnétique autour de la pile, lesquelles sont directement liées à la distribution des courants internes.

Le diagnostic des piles à combustible par la mesure du champ magnétique externe représente perspectives prometteuses dans les méthodes non invasives pour évaluer leur état de santé. Cette approche repose sur la relation entre les variations du champ magnétique autour de la pile et la distribution des densités de courant en son sein. En mesurant ces variations, il devient possible de détecter, de localiser et de qualifier les défauts présents, tout en maintenant les conditions de fonctionnement du système intactes.

Un des avantages de cette méthode réside dans sa capacité à identifier à la fois des défauts globaux, affectant l'ensemble de la pile, et des défauts locaux, limités à des cellules spécifiques. Les travaux antérieurs, tels que ceux réalisés par Mathieu Le Ny [3], se sont concentrés sur la détection de défauts globaux, démontrant que des anomalies généralisées peuvent être diagnostiquées avec une grande précision en analysant les changements dans le champ magnétique externe. Cependant, les avancées récentes, notamment celles décrites dans les recherches de Lyes Ifrek [1], ont permis de franchir une nouvelle étape en détectant des défauts localisés. Cette granularité accrue ouvre la voie à une compréhension plus fine des mécanismes de dégradation internes.

Un aspect essentiel de cette méthode est la reconstruction des densités de courant traversant le stack de la pile à combustible. En mesurant les variations différentielles du champ magnétique, il est possible de cartographier précisément la distribution de courant sous différentes conditions opérationnelles. Ces cartographies fournissent des informations détaillées sur le comportement interne de la pile, permettant d'identifier des déséquilibres ou des zones de dégradation avant qu'elles n'affectent significativement les performances.

globales [1] [5]

2.1.3 Densité de courant

Le développement des technologies de diagnostic non invasif appliquées aux piles à combustible a connu des avancées significatives, en se concentrant principalement sur la mesure et l'analyse de la densité de courant dans la pile. Ce diagnostic s'articule autour de deux axes principaux : la création de modèles inverses capables de convertir les mesures de champ magnétique en densités de courant exploitables, et le perfectionnement des technologies d'acquisition de données magnétiques.

L'un des principaux défis du diagnostic des piles à combustible réside dans la transformation des données brutes de champ magnétique mesurées, en informations pertinentes. Dans le cas des densités de courant, des modèles robustes ont été développés s'appuyant sur des approches électromagnétiques et mathématiques. Ces modèles utilisent les principes de la magnétostatique pour établir une corrélation entre les variations du champ magnétique et les courants circulant dans les cellules, permettant ainsi une reconstruction précise des densités de courant.

En ce qui concerne les systèmes d'acquisition de données, les magnétomètres fluxgate sont actuellement utilisés en raison de leur haute sensibilité aux variations de champ magnétique, ce qui en fait un essentiel pour les systèmes de mesure [3] [5]. Cependant, ces capteurs présentent des limitations, notamment leur bande passante, limitant la mesure de champs plus dynamiques. Ce contrainte augmente la complexité des systèmes et limite leur utilisation dans des applications nécessitant une acquisition rapide .

Face à ces limites, les capteurs xMR, tels que l'AMR (Magnetorésistance Anisotrope) et le TMR (Magnetorésistance Tunnelée), représentent une technologie prometteuse. Grâce à leur taille compacte, leur coût réduit et leur large bande passante [4], ils offrent la perspective d'une intégration plus simple. Contrairement aux fluxgate, les capteurs xMR pourraient permettre une implantation statique, éliminant complexité du système pour capturer une vue globale. Bien qu'ils ne soient pas encore largement adoptés, leur compatibilité avec des systèmes de synchronisation avancés ouvre la voie à de nouvelles possibilités, notamment pour l'étude de phénomènes plus dynamiques.

2.2 Dispositif d'instrumentation

2.2.1 Objectif Général

Compte tenu de ce contexte théorique, l'objectif principal de ce stage est donc de valider l'utilisation d'une instrumentation basée sur des capteurs AMR pour des mesures statiques et synchronisées des champs magnétiques dans le contexte des piles à combustible.

Ce système a une matrice de capteurs organisée selon un agencement 8x8, avec un pas de 10 mm entre eux, afin de garantir une précision élevée dans la collecte et l'analyse des données magnétiques. L'instrumentation sera validée dans des scénarios pratiques, assurant son applicabilité dans le contexte.

2.2.2 Aspects Technologiques à Explorer

Sachant les avantages de l'utilisation des capteurs de type fluxgate pour cette application, un axe d'exploration consiste à évaluer les performances des capteurs AMR dans la perspective d'un éventuel remplacement des fluxgate. En parallèle, dans le cadre de l'implémentation d'un grand nombre de capteurs AMR, il est également essentiel d'examiner les limitations liées à leur bande passante ainsi que les défis associés à la synchronisation des mesures.

Donc, pour évaluer les performances des capteurs AMR, une analyse détaillée de leurs caractéristiques sera réalisée, en mettant l'accent sur des aspects tels que la sensibilité, la plage de fonctionnement et leur adéquation pour des mesures à haute fréquence. Ces paramètres sont cruciaux pour déterminer la faisabilité de l'application de ces capteurs dans des systèmes de diagnostic avancés, en particulier dans des scénarios nécessitant précision et rapidité dans l'acquisition des données.

Le dispositif d'instrumentation développé à cet effet est composé de deux cartes électroniques. La première est responsable de la gestion centrale du système, intégrant le microcontrôleur et ses interfaces de communication. La seconde carte accueille une matrice de capteurs AMR, mentionnée précédemment.

Dans l'exploration de l'utilisation de cette matrice de capteurs, des défis techniques affectant les performances des matrices denses de capteurs AMR seront abordés. Parmi les principaux points à examiner figurent :

- **La synchronisation des mesures** : garantir que les données collectées par les capteurs soient alignées temporellement, évitant ainsi les écarts pouvant compromettre l'analyse.
- **L'organisation de la lecture et de la transmission des données** : développer une stratégie efficace pour la collecte et l'envoi des informations, favorisant une bande passante la plus large possible tout en minimisant les latences et maximisant l'intégrité des données transmises.

Ces étapes permettront d'identifier les limitations et les opportunités d'amélioration dans l'utilisation des capteurs AMR dans le contexte des piles à combustible, ouvrant la voie à des nouvelles solutions pour des systèmes d'acquisition.

3 Méthodologie et réalisations

3.1 Contraintes

La carte électronique utilisée dans le cadre de ces travaux est issue d'un ancien projet du LAIC dont le but était de vérifier de manière non invasive la stabilité des prothèses métalliques. Pour atteindre cet objectif, la carte a été conçue en deux parties principales : une carte mère et une matrice de capteurs. La structure générale peut être visualisée sur la Figure 1, qui illustre la séparation fonctionnelle et l'intégration entre les deux modules.



(a) Carte mère et la matrice des capteurs



(b) Carte assemblée

FIGURE 5 – Dispositif d'instrumentation

La matrice de capteurs est composée de 64 capteurs MMC3630KJ, organisés en une grille 8x8 avec un espacement de 10 mm entre eux. Ces capteurs sont magnétiques à trois axes, capables de mesurer des champs magnétiques dans une plage de ± 30 Gauss (± 3 mT) avec une résolution de 1 mG par LSB et bruit RMS entre 2mG et 5mG (variable en raison de la fréquence de fonctionnement). De plus, ils disposent d'une fonctionnalité avancée de démagnétisation (degaussing), qui corrige les écarts dus aux variations thermiques et élimine les magnétisations résiduelles, garantissant des résultats fiables et cohérents. Chaque capteur possède une adresse I₂C fixe, prédéfinie en usine à la valeur de 0x18 (7 bits d'adressage). L'organisation physique de la matrice peut être observée dans la Figure 6, qui détaille la disposition des capteurs.

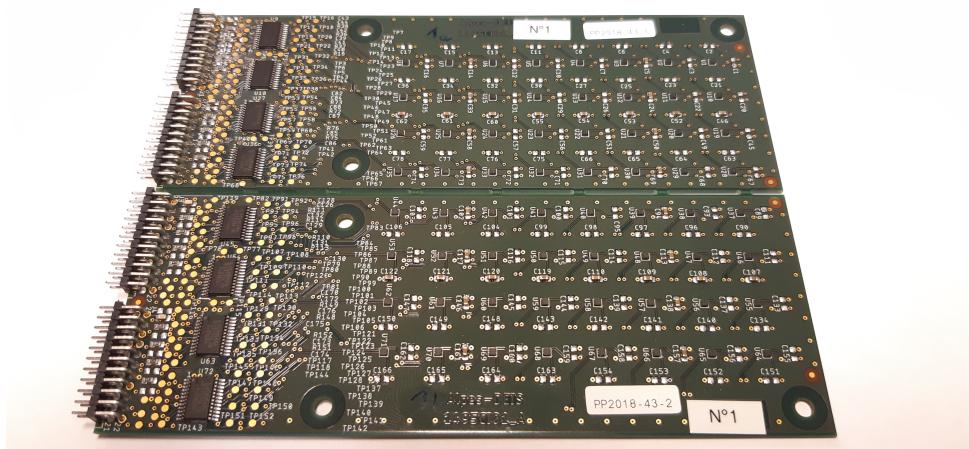


FIGURE 6 – Carte capteurs

Pour gérer les capteurs et assurer une communication efficace avec le système central, la carte utilise 8 multiplexeurs I2C de référence PCA9548APW, représentés sur la figure 7 sous les noms MUX0 et MUX1. Ces dispositifs divisent les capteurs en quatre bus indépendants, chaque bus étant responsable du contrôle de 16 capteurs. Les multiplexeurs possèdent des adresses configurées matériellement, définies comme 0x70 et 0x74 (7 bits). Cette architecture permet d'activer simultanément tous les capteurs d'un même bus, tandis que les multiplexeurs évitent les conflits d'adressage, puisque les capteurs partagent la même adresse I2C.

Le schéma de la figure 7 illustre l'organisation de la carte de capteurs. Les capteurs sont numérotés de 0 à 63. On y voit également les paires de commutateurs (MUX0 et MUX1) associées à chaque canal I2C du microcontrôleur, via les connecteurs J6, J7, J8 et J9, qui relient la carte mère à la carte de capteurs.

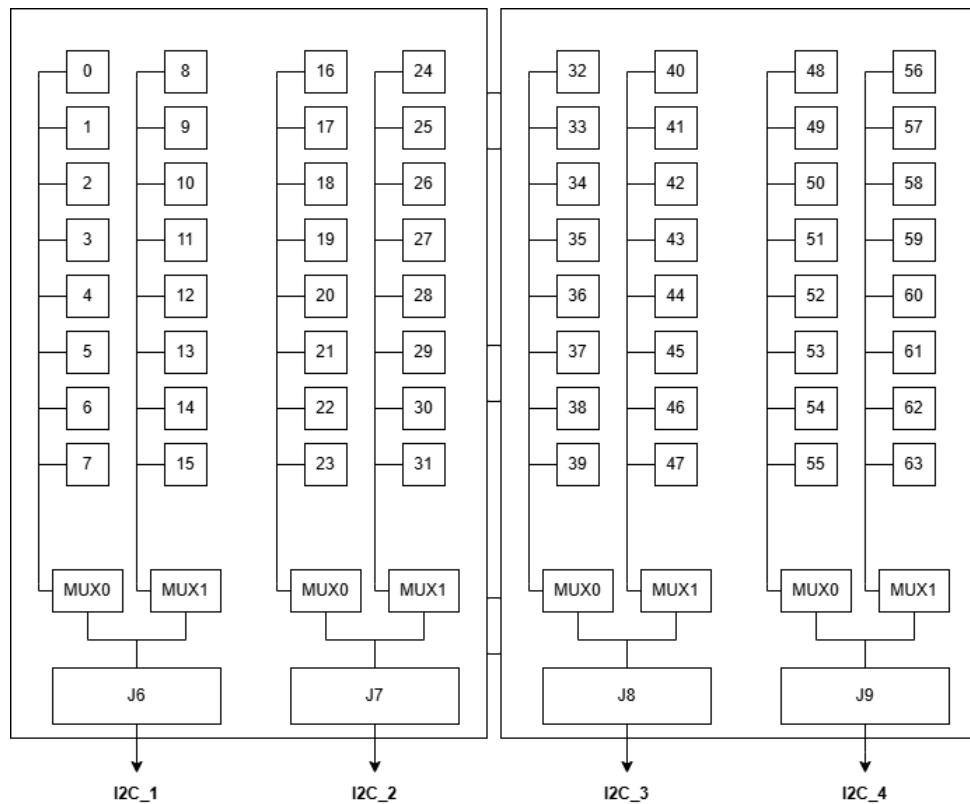


FIGURE 7 – Schéma carte capteurs

La stabilité électrique de la matrice est assurée par des condensateurs stratégiquement positionnés, avec des valeurs de $1\mu F$, $4,7 \mu F$ et $10n F$, qui minimisent les interférences et garantissent un découplage efficace. De plus, des résistances de pull-up de $4,7 k\Omega$ sur les lignes de données et d'horloge préservent l'intégrité de la communication I2C, même à des fréquences élevées.

Bien que le bus I2C de la carte fonctionne en mode rapide (Fast Mode, 400 kHz), une synchronisation parfaite entre les quatre bus n'est pas possible en raison de leur indépendance, ce qui entraîne de légers écarts temporels dans les mesures effectuées par les capteurs des différents bus.

Ce problème survient en raison des limitations du matériel, à savoir qu'il est impossible d'accéder à tous les multiplexeurs avec un seul canal I2C. Chaque canal I2C est connecté à une paire de multiplexeurs. Ainsi, étant donné l'indépendance des canaux I2C, il n'est pas possible de commander ces périphériques en parallèle. Cependant, les multiplexeurs peuvent être configurés pour transmettre simultanément sur leurs 8 canaux, ce qui signifie que la mesure n'a pas besoin d'être initialisée capteur par capteur. De plus, une fois configurés avec tous leurs canaux ouverts, il est possible d'envoyer des commandes simultanées à la paire de multiplexeurs associée au canal I2C, permettant ainsi de transmettre des signaux à 16 capteurs simultanément.

Concernant les capteurs, le MMC3630KJ offre plusieurs modes de fonctionnement dédiés à la mesure des champs magnétiques, permettant d'ajuster la résolution, le débit de données et la consommation d'énergie.

La fréquence de sortie des données (ODR) peut être configurée à 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz ou 600 Hz, correspondant à des temps de mesure de 10 ms, 5 ms, 2,5 ms et 1,6 ms, respectivement. Nous pouvons constater ces informations aussi dans le tableau 1, qui regroupe les symboles associés à chaque temps minimum entre les mesures.

Symbol	Temps Minimum [ms]
00	10
01	5
10	2,5
11	1,6

TABLE 1 – Symbole et son temps minimum correspondant

Le bruit RMS est fortement lié à la fréquence de sortie choisie : il augmente avec la fréquence. Pour des fréquences de 100 Hz et 200 Hz, le bruit maximal est de 4 mG, tandis que pour des fréquences supérieures, comme 400 Hz ou 600 Hz, le bruit maximal atteint 5 mG.

Les capteurs proposent également un mode de mesure continue, dans lequel la fréquence d'échantillonnage peut être configurée à 14 Hz, 5 Hz ou même 1 Hz. Toutefois, dans ce mode, la fréquence de sortie des données est prédéfinie à 100 Hz.

La carte mère, quant à elle, constitue le noyau opérationnel du système. Le microcontrôleur STM32H743IIT, basé sur l'architecture ARM Cortex-M7, est l'élément principal de contrôle, offrant des performances élevées pour le traitement et la communication. Concernant l'alimentation, la carte accepte des tensions comprises entre 4,5 V et 5,5 V, avec une capacité allant jusqu'à 500 mA, converties en 3,3 V par un régulateur de tension (MCP1826S-3302E/AB). Ce design inclut des condensateurs de filtrage et des diodes de protection, comme le BAT54C, garantissant la sécurité et la stabilité face aux fluctuations électriques.

3.2 Conception architecture logicielle

En réponse aux contraintes de la carte électronique et de ses composants, l'architecture du programme suit l'ordre représenté par la figure 8.

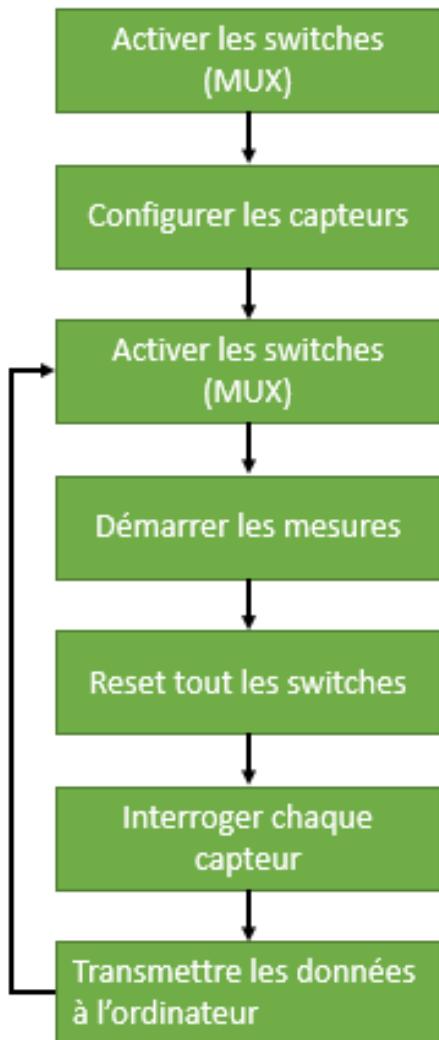


FIGURE 8 – La séquence d'exécution

Initialement, le programme initialise les huit commutateurs afin de permettre la configuration de tous les capteurs. Ensuite, la boucle du programme est lancée avec les étapes suivantes :

- **Activer toutes les canaux des switches** : Dans cette phase initiale, tous les canaux des commutateurs sont activés. Cela garantit que tous les capteurs sont prêts pour recevoir le signaux suivantes.
- **Démarrer la mesure** : Une fois que toutes les canaux des switches sont ouvertes, on broadcast le signal de démarrage de mesure pour toutes les capteurs
- **Désactiver les switches** : Une fois la mesure initiale terminée, les canaux des commutateurs sont désactivés pour éviter les interférences ou les superpositions de signaux pendant le traitement des données.
- **Interroger chaque capteur** : À cette étape, le microcontrôleur accède séquentiellement à chaque capteur de la matrice, lit les données collectées et les stocke

dans une structure de données interne.

- **Transmettre les données à l'ordinateur** : Enfin, les mesures des capteurs sont transmises à un ordinateur. Cette transmission s'effectue via l'interface de communication UART

Après la dernière étape, le processus revient à l'activation des commutateurs, créant ainsi un cycle continu de démarrage de la mesure, lecture des données et transmission.

3.2.1 Firmware embarquée

Après cette brève introduction au logiciel, cette sous-section vise à spécifier et justifier les choix liés à l'acquisition de données, depuis l'activation de tous les canaux des commutateurs jusqu'à l'envoi des données à l'ordinateur.

Tout d'abord, avant de lancer une mesure, il est nécessaire d'ouvrir tous les canaux des commutateurs afin d'envoyer les commandes simultanément à chaque groupe de 16 capteurs. À l'aide du driver I2C HAL fourni par le fabricant du microcontrôleur, la valeur '0xFF' a été écrite dans le registre de commande des commutateurs, permettant l'ouverture de tous les canaux. L'écriture a été réalisée de manière séquentielle, chaque commutateur étant adressé individuellement parmi les 8 disponibles, car pour cette étape, la synchronisation entre les bus n'était pas indispensable.

Ensuite, il a fallu définir les configurations des capteurs adaptées à l'application. Une des configurations essentielles concerne le mode de mesure des capteurs. Ces derniers peuvent fonctionner de deux manières : en mode continu ou en mode non-continu.

Comme mentionné précédemment, il est possible d'écrire simultanément une valeur commune dans les registres de tous les capteurs. Cependant, la lecture nécessite un séquencement temporel précis.

En mode continu, il n'est pas possible de verrouiller la valeur mesurée pour permettre une lecture séquentielle complète des registres. De plus, ce mode suppose un écart temporel de 3,3 ms entre les trois axes d'une même mesure. Comme mentionné précédemment, il est possible d'écrire simultanément une valeur commune dans les registres de tous les capteurs. Cependant, la lecture nécessite un séquencement temporel précis.

Pour ces raisons, le choix s'est porté sur le mode non-continu. Dans ce mode non-continu, une trame de déclenchement est diffusée en "broadcast" à l'ensemble des capteurs, suivie d'une lecture séquentielle des résultats. Une fois cette lecture terminée, une nouvelle trame de déclenchement est envoyée pour les mesures suivantes. Le mode non-continu présente un autre avantage : il permet de réduire l'écart temporel entre les axes. Ce délai, configuré selon les besoins, passe à 0,56 ms au lieu des 3,3 ms du mode continu.

Une fois la configuration des capteurs terminée, le programme entre dans la boucle principale. Dans cette boucle, les commandes sont envoyées pour ouvrir tous les canaux des 8 commutateurs, suivies de l'instruction de début de mesure pour les capteurs.

À ce stade, la synchronisation des bus I2C est essentielle pour le projet. Comme tous les périphériques I2C du microcontrôleur disposent d'un accès direct à la mémoire (DMA), cette fonctionnalité a été utilisée pour transférer les données de manière autonome (sans intervention continue du CPU). Cela permet de transmettre le signal de démarrage des

mesures aux capteurs tout en fonctionnant en arrière-plan, en utilisant les cycles inactifs du bus mémoire, ce qui libère le CPU pour exécuter d'autres tâches.

Le microcontrôleur dispose de deux DMA, et les deux ont été utilisés pour déclencher les mesures. Pour initialiser cet accès à la mémoire, deux méthodes ont été testées : l'utilisation d'un timer et celle du CPU. Cependant, les deux méthodes ont donné des résultats similaires en termes de décalage temporel entre les bus I2C, car il y avait toujours une compétition pour l'accès direct à la mémoire. Par conséquent, il a été jugé préférable de maintenir le déclenchement des mesures via le CPU. Les résultats des délais obtenus sont présentés dans le tableau 2.

On a pu observer que même avec l'accès direct à la mémoire, il est impossible de lancer simultanément la commande de début de mesure sur les quatre bus I2C du microcontrôleur, en raison du nombre limité de périphériques DMA disponibles. Néanmoins, les délais entre le lancement des mesures ont été réduits grâce à l'utilisation du DMA.

Plusieurs tests de lancement des mesures ont été effectués pour obtenir le meilleur résultat en termes de synchronisation des mesures. Dans un premier temps, nous avons testé les différentes méthodes de déclenchement du DMA mentionnées précédemment (Timer et CPU). Ensuite, le lancement a été testé avec des fréquences d'horloge du microcontrôleur (SysClk) réglées à 100 MHz, 200 MHz et 480 MHz.

Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau 2 et illustrés dans la figure 9.

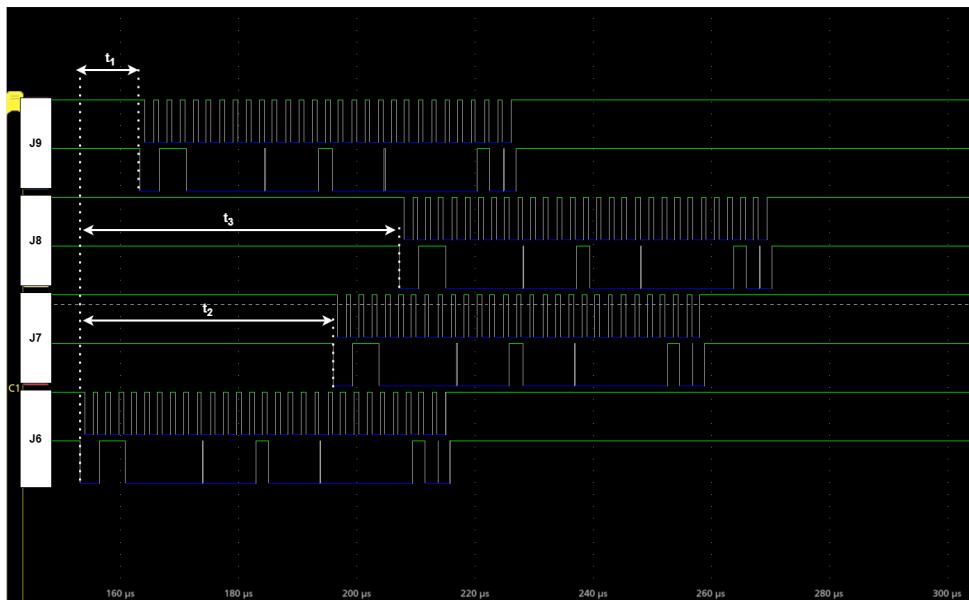


FIGURE 9 – Écart de temps entre le début des mesures, avec des périphériques utilisant le DMA

SysClk [MHz]	t_1 [μ s]	t_2 [μ s]	t_3 [μ s]
100	19,75	95,32	115,41
200	11,23	42,54	53,84
480	7,23	20,18	30,77

TABLE 2 – Écart de temps entre le début des mesures, avec des périphériques utilisant le DMA

Ainsi, après ces tests, nous avons pu conclure que les meilleurs résultats en termes d'écart temporel entre les mesures et de stabilité des données transmises sont obtenus lorsque les données sont transférées via le DMA avec un SysClk à 480 MHz.

Ensuite, pour lancer la mesure, nous avons de nouveau utilisé le driver HAL. À cette fin, nous avons écrit dans le registre de contrôle 0 la valeur 0x01. La séquence de lancement des mesures commence par le bus connecté au connecteur J6, suivi par J9, J7 et J8 (figure 7). Cet ordre a été déterminé pour optimiser la gestion des bus I2C et réduire les interférences potentielles entre les différents canaux lors du traitement des données.

Une fois les mesures lancées, les commutateurs sont réinitialisés afin d'éviter tout

conflit de données sur le bus I2C lors de l'acquisition individuelle des données obtenues par chaque capteur.

Pour acquérir les données mesurées par les capteurs, un buffer est utilisé, qui sera ensuite envoyé à l'ordinateur. Le buffer est un tableau contenant 64 espaces, chacun représentant les mesures des axes X, Y et Z de chacun des 64 capteurs. Une fois ce buffer rempli, il est linéarisé dans un tableau de type `uint16_t` contenant 194 espaces : 192 espaces sont dédiés aux données des capteurs. Les 2 premiers et derniers espaces servent de marqueurs de synchronisation. Enfin, le tableau linéarisé est envoyé à l'ordinateur via l'interface UART, ce qui permet de réinitialiser le cycle et de recommencer le processus.

Pour profiter au maximum des utilités des capteurs et de la carte mère, nous avons implémenté aussi une interruption lié au EXT0 (le bouton poussoir 2 ou le WP_Button) que entraîne le degaussing de la carte des capteurs. Le processus de démagnétisation (ou degaussing) du capteur MMC3630KJ repose sur la fonction intégrée de SET/RESET, qui permet d'éliminer les erreurs dues aux variations de la sortie en champ nul causées par la température. Aussi, elle efface toute polarisation magnétique résiduelle des capteurs résultant d'une exposition à des aimants externes puissants. L'élimination des erreurs thermiques est liée à une mesure de l'offset. Une fois cet offset mesuré, il est ensuite soustrait des mesures successives.

Et pendant des tests plus longues on pouvait remarquer la magnétisation des capteurs bien comme une offset entre les capteurs, donc pour cette raison on avait implémenté le degaussing à demande. On peut remarquer le effet de la démagnétisation dans la figure 10

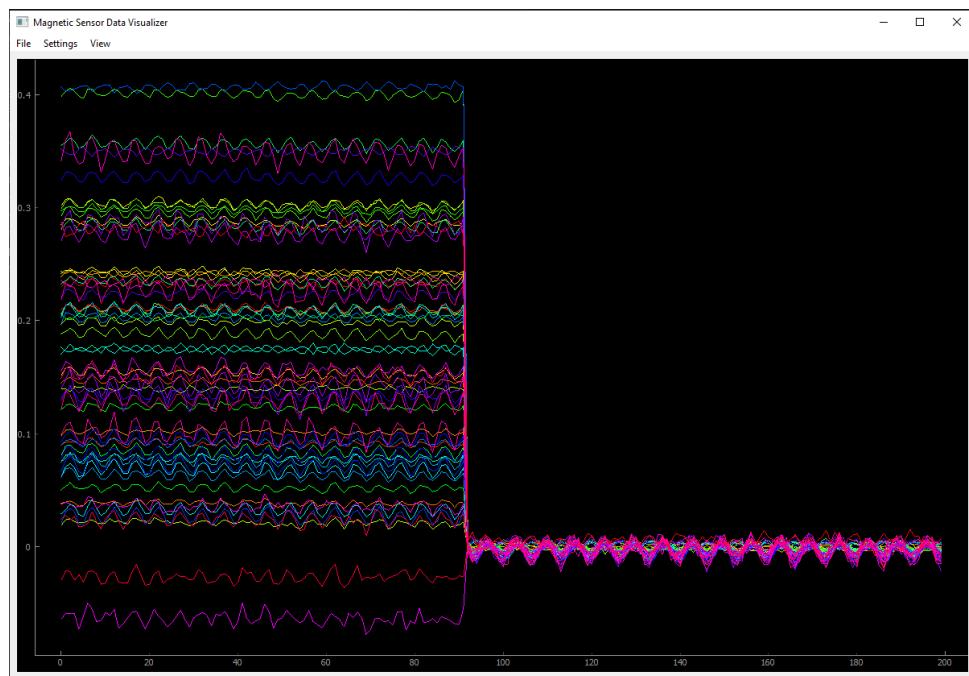


FIGURE 10 – Effets du degaussing

En considérant la fréquence I2C en mode rapide (400 kHz) et le débit de transmission UART à 230 400 bits/s, ainsi que le volume de données traité, il est possible d'estimer une fréquence théorique pour le firmware embarqué de 80,22 ms.

Cependant, nous avons constaté expérimentalement que le firmware embarqué fonctionne à une fréquence de 10,8 Hz, c'est-à-dire qu'il complète le processus d'acquisition en 92,37 ms. La temporalité de chaque fonction peut être observée dans le schéma de la figure 11.

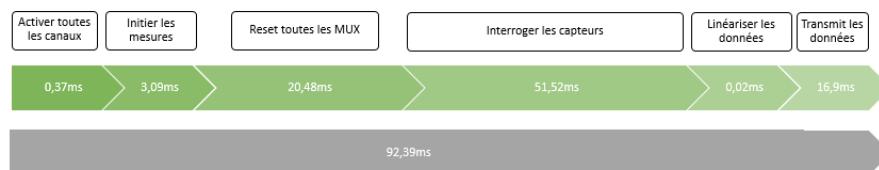


FIGURE 11 – Schéma temporel de chaque fonctionnalité du firmware

En comparant ensuite la temporalité théorique de chaque fonction avec les temps expérimentaux mesurés à l'oscilloscope, nous obtenons les résultats présentés dans le tableau 3.

Fonction	Temps Théorique [ms]	Temps Expérimentaux [ms]
Activer canaux	0,32	0,37
Lancer les mesures	2,48	3,09
Reset commutateurs	16,32	16,48
Interroger capteurs	43,44	51,52
Transmission Données	13,5	16,9

TABLE 3 – Comparaison entre les temps théoriques et experimentaux du firmware

Comme on peut le voir, il existe une différence considérable entre les valeurs théoriques et expérimentales, ce qui montre qu'il est possible d'améliorer l'interrogation des capteurs.

3.2.2 Traitement des données

Pour la visualisation des données acquises par les capteurs, deux applications ont été développées, toutes deux utilisant le langage Python. La première d'entre elles est une interface graphique (GUI) basée sur Qt5, qui permet à l'utilisateur de se connecter à un port UART, de recevoir des données provenant de 64 capteurs magnétiques, de tracer ces données en temps réel à l'aide de la bibliothèque PyQtGraph et de sauvegarder les données dans des fichiers CSV pour une analyse ultérieure.

La communication suit une protocole bien définie. Chaque trame de données possède une structure composée de : 2 octets indiquant le début de la trame (0xAA55), 384 octets correspondant aux données des capteurs (64 capteurs avec 3 axes chacun, représentés par 16 bits) et 2 octets supplémentaires pour indiquer la fin de la trame (0x56AA). Au total, la taille de chaque trame est de 388 octets, avec baud de transmission de la communication

sériel est de 230400 bits/s. Autrement dit, le système peut recevoir jusqu'à 74 trames par seconde. Ce débit est largement suffisant comparé à la fréquence d'acquisition des données dans le firmware, qui ne dépasse pas 11 Hz.

L'application offre une série de fonctionnalités, comme se connecter et se déconnecter du port UART, sélectionner le nom du port et la vitesse de transmission (baud rate), visualiser les données en temps réel et les sauvegarder dans un fichier CSV. Pour l'utiliser, il suffit d'exécuter l'application, de choisir le port UART et le baud rate corrects, de cliquer sur "Connect" pour établir la connexion avec le dispositif, et de visualiser les données tracées en temps réel.

Il existe deux façons de sauvegarder les données. La première consiste à utiliser le bouton "Save CSV", qui sauvegarde les 200 dernières acquisitions. La deuxième commence automatiquement dès que l'utilisateur clique sur "Connect", enregistrant ainsi toutes les acquisitions effectuées à partir de ce moment. Ces fonctionnalités sont illustrées à la figure 12.

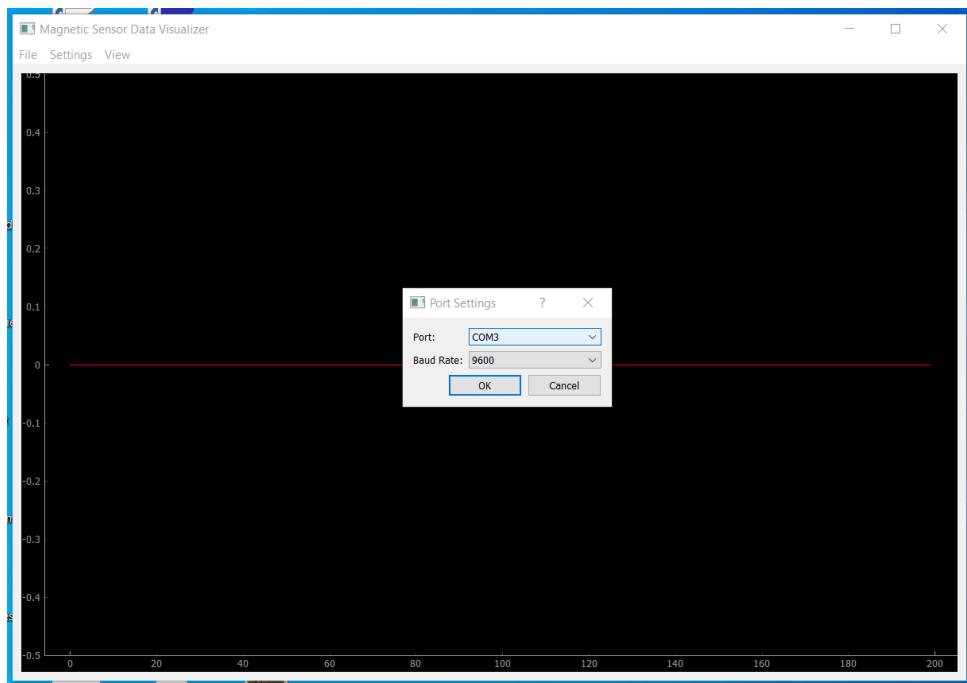


FIGURE 12 – Écran de sélection des paramètres UART

Le code de l'application est structuré en classes et fonctions qui organisent les différentes responsabilités. La classe principale, `MagneticSensorApp`, gère l'interface et les opérations. La fonction `setup_ui` est responsable de créer et organiser les éléments de l'interface, tandis que `setup_plot` initialise le widget de traçage de `PyQtGraph`. La fonction `setup_serial` configure la communication série en utilisant la classe `QSerialPort`, et `toggle_connection` gère le processus de connexion et de déconnexion du port UART. En outre, des fonctions comme `read_data` traitent les données reçues, `update_plot` met à jour le graphique en temps réel, et `save_to_csv` enregistre les données actuelles dans un fichier CSV.

En termes de manipulation des données, l'application maintient un tampon conte-

nant les 200 échantillons les plus récents de chaque capteur et axe. Ces données sont continuellement mises à jour et affichées sur le graphique.

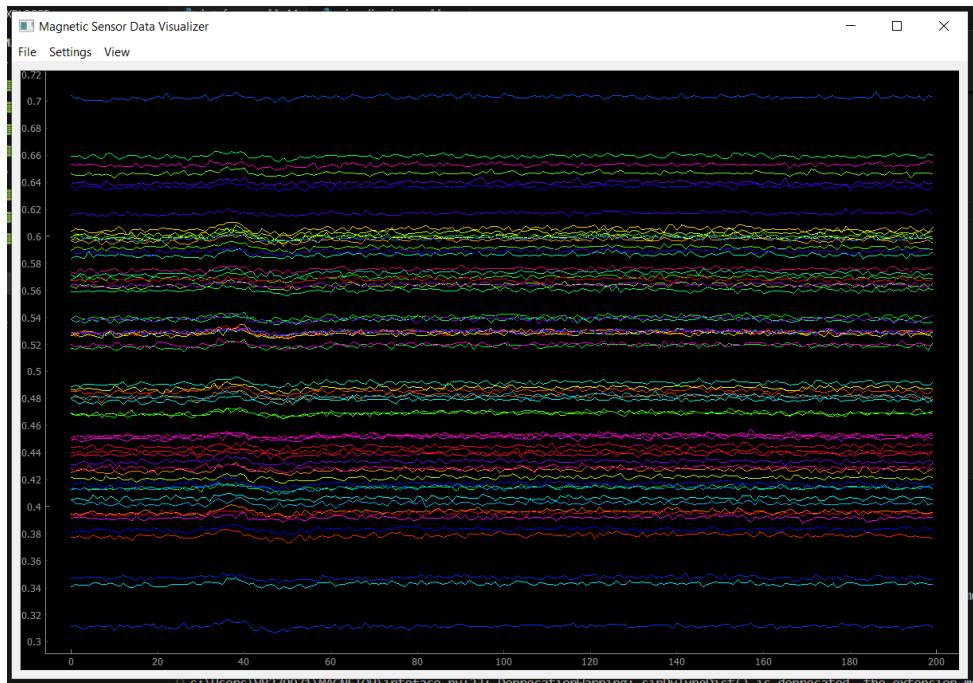


FIGURE 13 – Line plot de l’interface

La figure 13 représente l’un des modes de représentation graphique des données obtenues : le line plot. Dans le line plot, la norme des 64 capteurs est affichée en temps réel.

L’application propose également un autre mode de visualisation en temps réel des données : le heatmap. Comme illustré dans la figure 14, le heatmap utilise également la norme des valeurs des 64 capteurs. L’échelle de couleurs et de nuances s’adapte automatiquement en fonction des valeurs maximales et minimales mesurées par les capteurs.

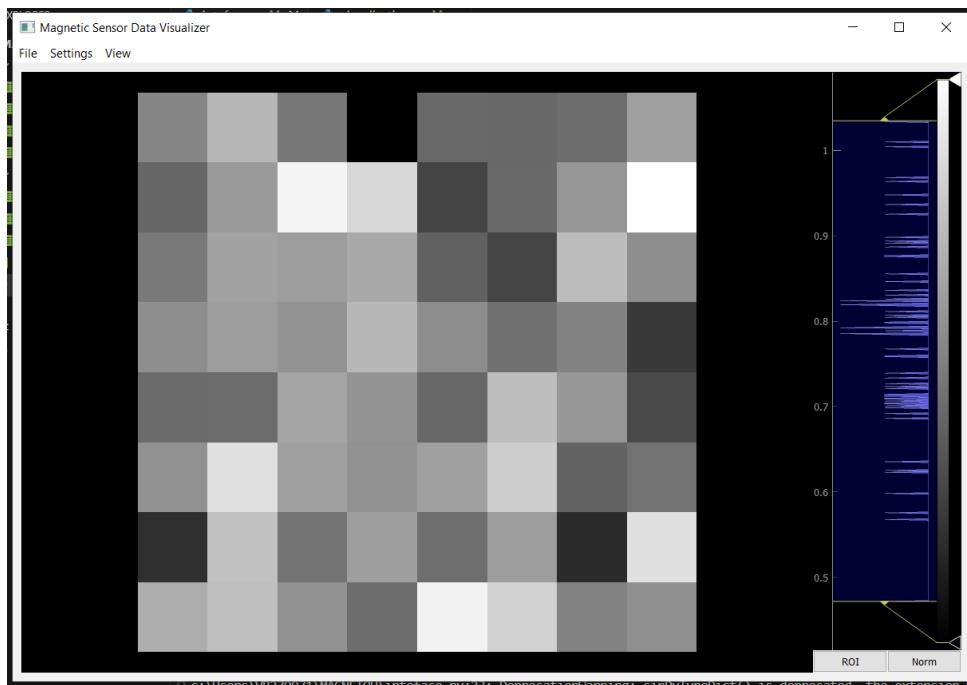


FIGURE 14 – Heatmap interface

La deuxième interface est également une application développée en Python pour la visualisation, le traitement et l'analyse hors ligne des données de capteurs magnétiques stockées dans des fichiers CSV. En utilisant la bibliothèque PyQt5, l'interface offre une expérience interactive et personnalisable, permettant à l'utilisateur d'explorer les données de manière efficace et d'appliquer diverses opérations de traitement.

L'application commence par la sélection d'un fichier CSV. Une fois les données chargées, les capteurs disponibles sont listés dans l'interface, permettant à l'utilisateur de choisir ceux qu'il souhaite visualiser. Il est possible de sélectionner les axes X, Y et Z ou la norme des données. De plus, l'application propose des outils de traitement, tels que la normalisation des données sur une plage de 0 à 1, l'application de filtres par seuil pour limiter les valeurs au-delà d'une certaine limite, et un filtre de moyenne mobile configurable.

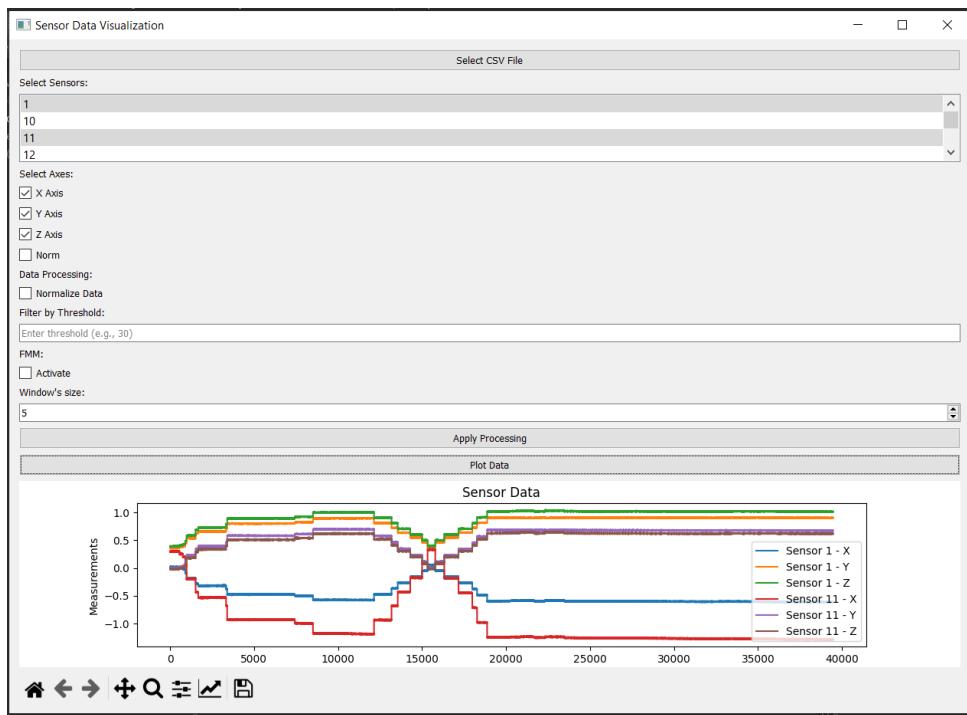


FIGURE 15 – Interface de visualisation

Les données traitées sont affichées dans des graphiques interactifs, comme illustré dans la figure 15, permettant une analyse détaillée. La visualisation est enrichie par la possibilité d’alterner entre les capteurs, d’ajuster les paramètres de traitement et d’explorer différentes combinaisons d’axes et de normes. Ces fonctionnalités rendent l’outil utile pour comprendre le comportement des capteurs.

Derrière cette fonctionnalité, la structure du code est organisée de manière modulaire. L’application est gérée par la classe principale `SensorDataApp`, qui centralise la logique de l’interface graphique et du traitement des données. La fonction `select_file` permet de sélectionner des fichiers CSV, tandis que `load_data` charge et organise les données, combinant les colonnes dupliquées et les structurant de manière cohérente pour l’analyse. La logique de traitement est encapsulée dans la fonction `apply_processing`, qui implémente les normalisations, les filtres et la moyenne mobile. Enfin, la fonction `update_plot` est responsable de mettre à jour les graphiques avec les données traitées.

3.3 Caractérisation du dispositif d’instrumentation

Une des missions de ce stage est également de caractériser la matrice des capteurs. Pour cela, trois tests ont été réalisés : le premier, visant à vérifier la réponse dynamique des capteurs, le second pour évaluer la réponse des capteurs dans un environnement isolé de champ magnétique, et le troisième nous avons utilisé une bobine de Helmholtz pour évaluer les valeurs de chaque axe de la matrice.

3.3.1 Vérification de la dynamique

Ce test consistait à évaluer à la fois la carte des capteurs et le logiciel en termes de dynamique. Pour ce faire, nous avons utilisé une source de champ magnétique et la

carte dans un environnement non isolé de champ magnétique. Le choix de cet environnement initialement non isolé a été fait en raison de l'objectif du test, qui visait à détecter dynamiquement la présence d'un champ. Ainsi, comme les perturbations dans le milieu étaient suffisamment constantes compte tenu de la résolution du capteur, le choix de l'environnement n'était pas critique pour ce premier test du système. Le choix de la source de champ magnétique n'était pas non plus critique à ce stade initial. C'est pourquoi un aimant ordinaire a été choisi comme source de champ mobile. Le système est représenté dans la figure 16.

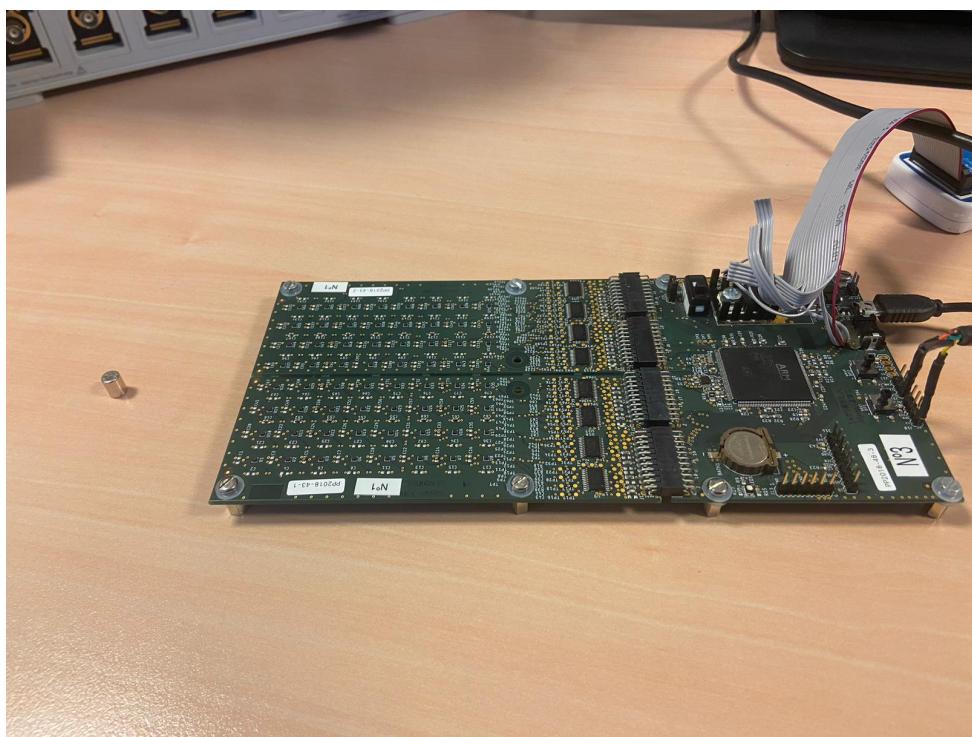
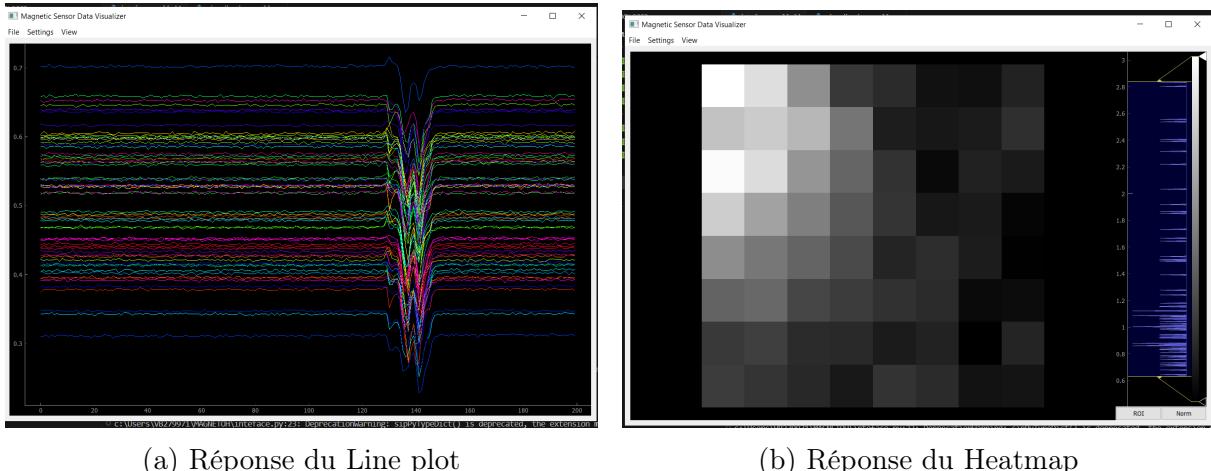


FIGURE 16 – Système pour le test de la dynamique

Le test consistait donc à faire passer une source de champ magnétique mobile au-dessus de la carte et à observer si la dynamique observée dans le système d'acquisition était cohérente, notamment dans le heatmap.

Ainsi, en faisant varier les coordonnées de l'aimant (x , y , z), nous obtenons une réponse à la fois dans le line plot et dans le heatmap. Dans le line plot, comme on peut le voir dans la figure 17a, il y a une grande perturbation lorsque la source de champ magnétique passe, ce qui nous donne quelques indices sur la dynamique. Cependant, c'est généralement dans le heatmap que nous obtenons des informations plus précises sur le positionnement et les tendances de déplacement. Dans la figure 17b, nous pouvons voir le résultat de l'aimant positionné au-dessus de la plaque dans le coin supérieur gauche, confirmant les lectures du line plot.



(a) Réponse du Line plot

(b) Réponse du Heatmap

FIGURE 17 – Réponses du software au test de dynamique

3.3.2 Essai avec boite isolante

Lors des tests de dynamique, nous avons observé une différence entre les normes des capteurs. Par exemple, dans la figure 17a, avant de perturber le milieu avec l'aimant, il est possible d'observer un ratio allant jusqu'à 2 entre les valeurs mesurées. Dans ce contexte, pour une meilleure compréhension des données et du comportement des capteurs, nous avons réalisé des mesures dans un milieu isolé de champ magnétique. Ce milieu isolé permet également de mieux visualiser le bruit présent dans les mesures. Ce dispositif est représenté dans la figure 18a et 18b.



(a) Blindage magnétique sans capot



(b) Blindage magnétique avec capot

FIGURE 18 – Blindage magnétique

Cependant, même lors du test dans la boîte isolante, nous avons constaté une différence entre les valeurs mesurées par les capteurs, comme illustré à la figure 19.

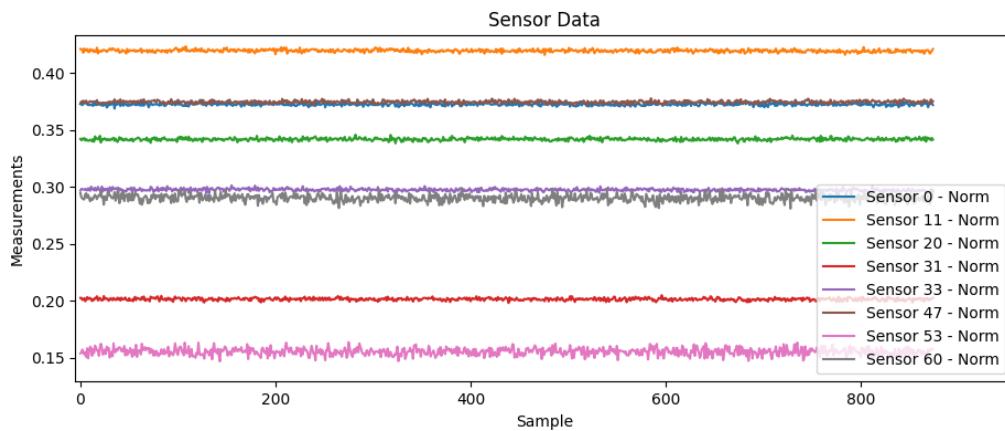


FIGURE 19 – Résultats des mesures dans l’enceinte

Ces différences nous ont alors montré qu’une suppression du offset devait être effectuée. Ainsi, dans le firmware embarqué, nous avons implémenté le degaussing des capteurs via la commande du bouton WP_2. Aussi, l’une des corrections choisies pour traiter cette disparité a été la normalisation des données sous Python et l’application d’une correction de la ligne de base (baseline). Le choix de la correction de la ligne de base repose principalement sur le bon fonctionnement de la dynamique des capteurs.

Cependant, il existe des différences entre ces deux méthodes : La calibration effectuée en appuyant sur le bouton envoie la commande SET, réalise une mesure, puis la commande RESET, effectuant une autre mesure. L’offset du pont est calculé comme la moyenne de ces deux valeurs et est soustrait de toutes les mesures suivantes. La correction de la ligne de base prend uniquement la première valeur mesurée et la soustrait des mesures suivantes. Une fois la suppression du offset était effectuée, nous avons pu refaire le test pour évaluer le bruit RMS dans les capteurs.

Donc après les réponses obtenues, il a été possible de constater que le bruit mesuré par tous les capteurs des connecteurs J6 à J8 étaient conforme aux spécifications du datasheet, $\pm 5mG$. Même sans connaître le champ magnétique résiduel mesuré par les capteurs, la variation des mesures était inférieure ou égale à $10mG$. Cependant, tous les capteurs du connecteur J9, c’est-à-dire les capteurs 48 à 63, ont présenté une variation supérieure à $10mG$.

Pour enquêter sur cet incident, nous avons effectué des tests de repositionnement de la carte afin d’observer s’il existait un champ résiduel dans l’environnement magnétique à l’emplacement des deux colonnes de capteurs concernées. Nous avons également remplacé la carte à matrice de capteurs par une autre identique pour vérifier la présence éventuelle d’une aimantation permanente dans les capteurs.

Cependant, lors des deux tests, les deux colonnes reliées au connecteur J9 ont présenté des variations non prévues dans la datasheet. Cela nous amène à supposer qu’il existe soit une interférence provenant des composants de la carte agissant sur ces deux colonnes, soit un bruit électrique de l’alimentation perturbant la mesure.

3.3.3 Essai avec Bobine de Helmholtz

Pour terminer la caractérisation des capteurs, nous avons réalisé un essai avec un champ magnétique de valeur connue. Pour ce faire, nous avons utilisé un cube de Helmholtz, illustré dans la figure 20, qui nous a permis d'induire un champ magnétique connu sur chacun des axes de la matrice de capteurs. Le cube présente une fonction de transfert de 87,4 nT/mA et une homogénéité de 1% ($\Delta B/B_{max} = 10^{-2}$) au centre du cube sur $\pm 6,5$ cm, et de 10^{-3} sur $\pm 2,5$ cm.

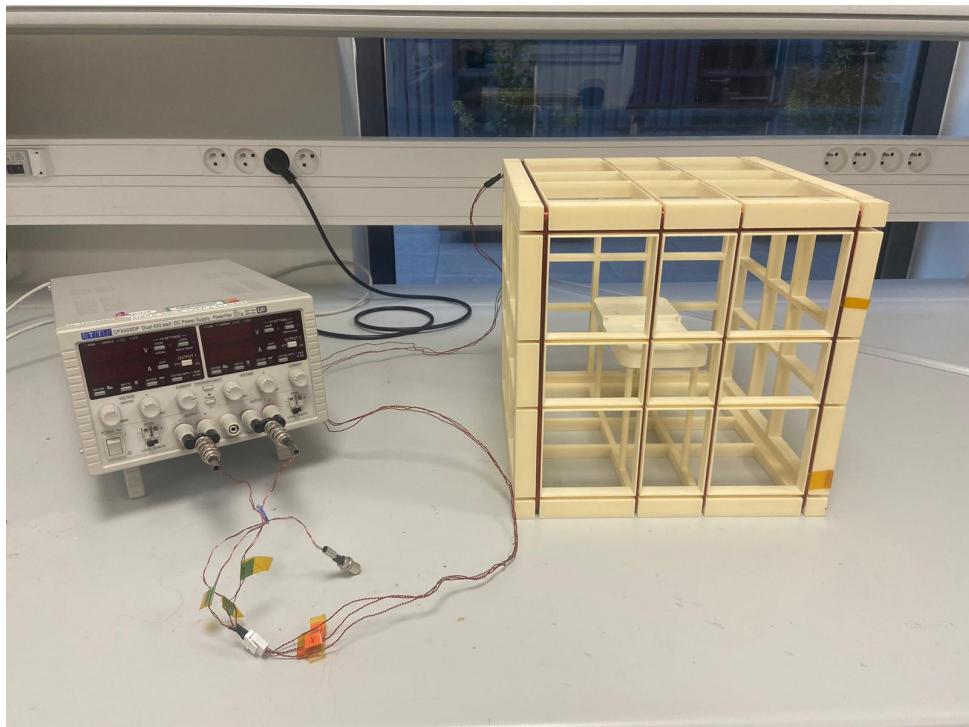


FIGURE 20 – Bobine de Helmholtz

La carte a été placée à l'intérieur du cube, comme le montre la figure 21. Ensuite, avec une source de courant, nous avons appliqué 0,5 A sur chacun des axes. Avec 0,5 A, selon la fonction de transfert, il était attendu d'obtenir un champ d'environ 43,7T ou 0,437G sur chacun des axes.

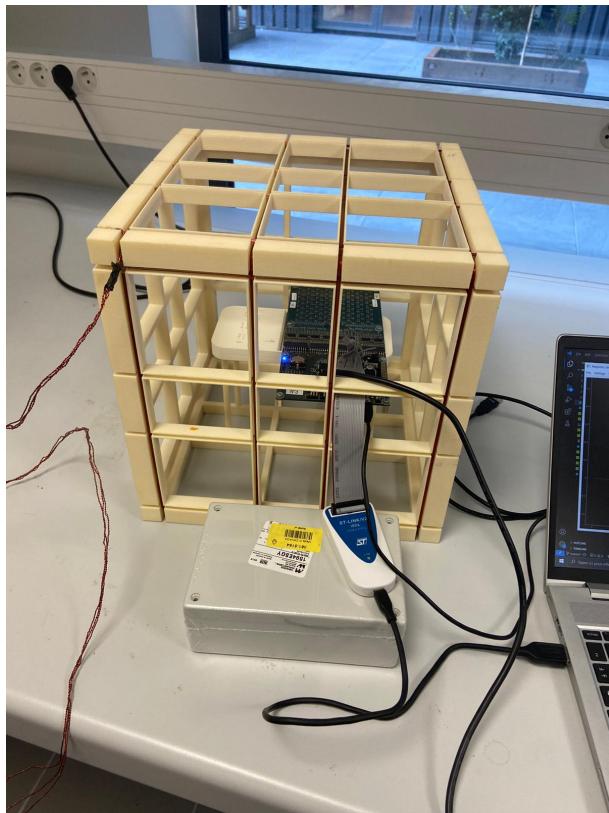


FIGURE 21 – Configuration expérimentale

Ainsi, nous avons généré des champs magnétiques dans les directions X, Y et Z, dans cet ordre, afin d'obtenir la réponse des capteurs à ces champs isolés. La réponse des capteurs est illustrée dans le graphique de la figure 22.

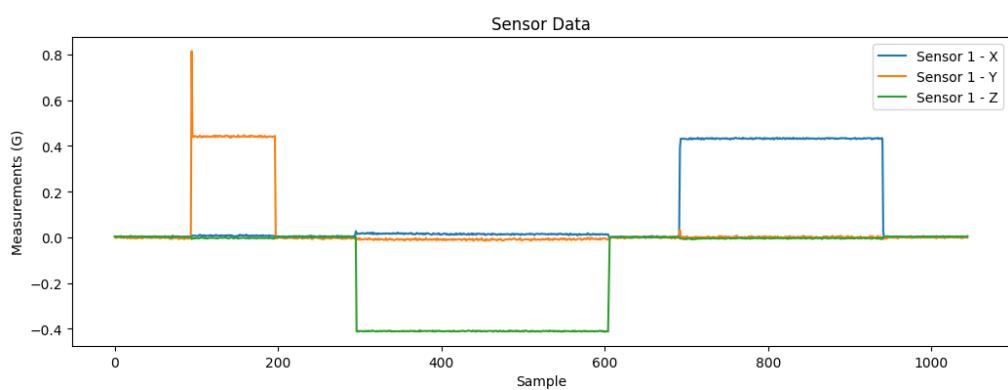


FIGURE 22 – Réponse des capteurs aux champs isolés

Dans la figure 22, nous observons le comportement du capteur 1 uniquement. Cependant, les autres capteurs présentent une réponse similaire. La moyenne des valeurs obtenues, présentée dans le tableau 4, confirme la tendance des mesures vers la valeur théorique attendue du champ magnétique.

Axe	x	y	z
Moyenne	-0,431 G	0,433 G	-0,418 G

TABLE 4 – Résultats moyennes de l’expérimentation pour chaque axe

Donc, étant donné que les mesures ont été réalisées dans un environnement non-isolé magnétiquement et qu’il a été impossible de centrer la carte au milieu du cube, les mesures semblent cohérentes en direction et en amplitude, variant de moins de 5 % par rapport à la valeur attendue.

4 Expérimentation sur pile à combustible du CEA

4.1 Description de l'expérimentation

Pour valider l'application de la matrice de capteurs et des capteurs AMR dans le suivi d'une pile, nous avons lancé une campagne de mesures sur une pile à combustible du CEA-Liten. La campagne a duré deux jours, plus précisément deux matinées.

4.1.1 Montage expérimental

Le montage de l'expérience comprenait les matériaux suivants :

- Carte électronique
- Câble FDTI
- Câble d'alimentation de la carte
- Ordinateur

Avec ces matériaux, nous avons fixé la carte sur la pile à l'aide de scotch. Le montage peut être vu dans les figures 23a et 23b. Les câbles étaient connectés à l'ordinateur pour permettre une visualisation en temps réel de l'expérience.

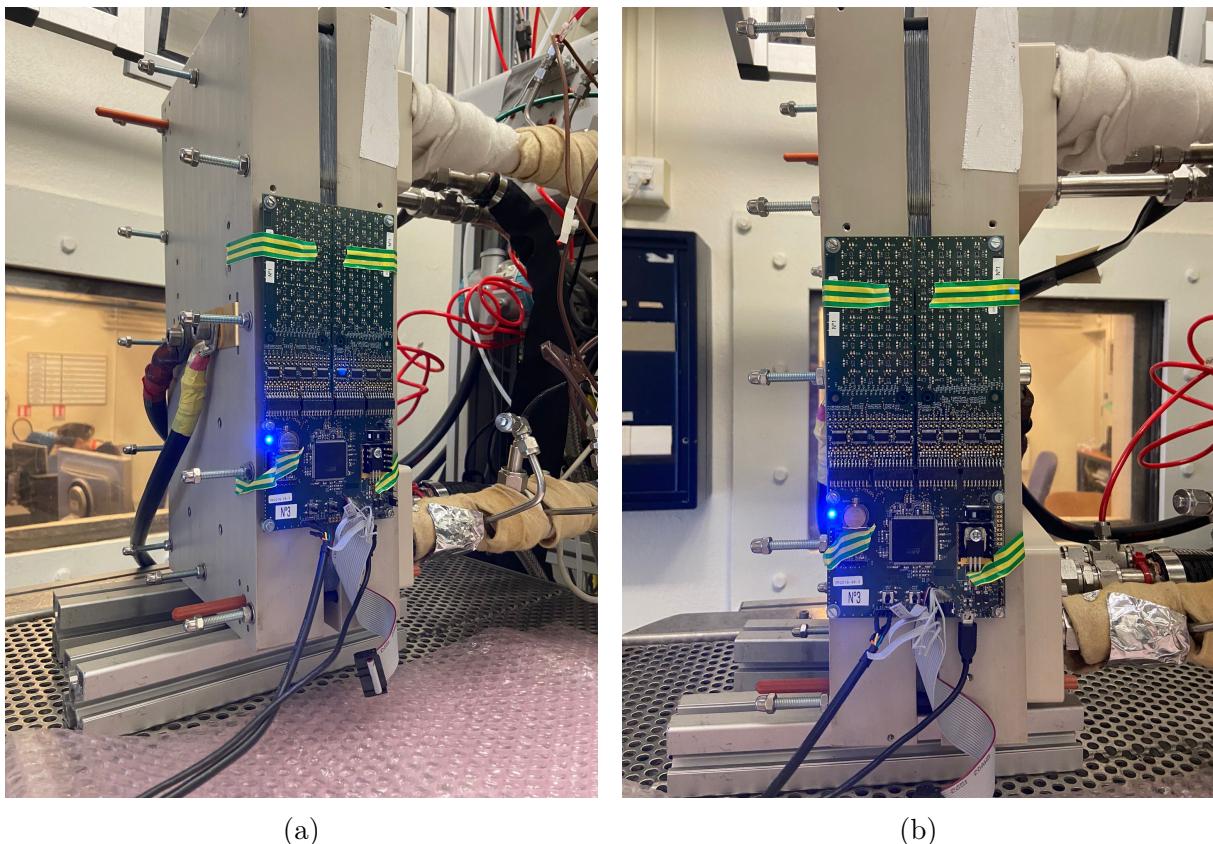


FIGURE 23 – Fixation de la carte

La pile était contrôlée à distance depuis une salle adjacente. Deux paramètres de la pile ont été variés pour tester les limites du système :

- Courant
- Humidité

La température a été maintenue à 30 °C pendant toute l'expérience pour éviter d'endommager la carte et perturber sa fixation. La pile à combustible contenait 12 cellules.

Pendant les deux jours, nous avons effectué trois enregistrements : Le premier enregistrait le bruit blanc de l'expérience. Dans le deuxième, les gaz circulaient mais aucun courant n'était appliqué. Dans le troisième, la pile était complètement fonctionnelle.

Lors du troisième enregistrement, comme mentionné précédemment, les paramètres de courant et d'humidité ont été modifiés pour observer la réponse du système d'acquisition.

Le premier jour, nous avons testé le système à 1 Hz, et le second jour à environ 10,8 Hz. Les résultats du deuxième jour semblaient mieux refléter le comportement de la pile ; c'est donc sur ceux-ci que nous concentrerons notre analyse des résultats.

4.2 Résultat expérimentaux

Comme mentionné précédemment, les paramètres variables de la pile étaient principalement le courant et l'humidité. Ces paramètres ont été modifiés pendant le troisième enregistrement du deuxième jour de tests.

Cependant, lors des deux enregistrements précédents, nous avons mesuré le bruit blanc pour le premier et la pile en fonctionnement sans courant traversant pour le second.

Pour le premier enregistrement, nous avons obtenu les résultats suivants : essentiellement le bruit des capteurs et celui de la pile. Pour le deuxième enregistrement, comme il y avait circulation des gaz, il est possible d'observer une oscillation périodique (figure 26) provenant de cette circulation des gaz à travers la pile.

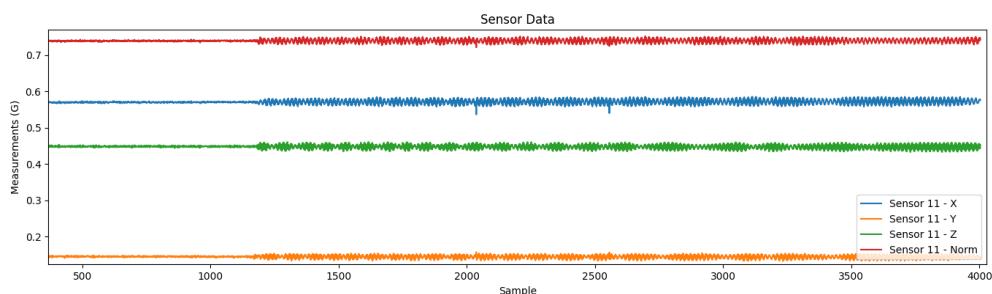
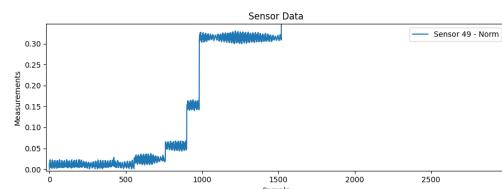


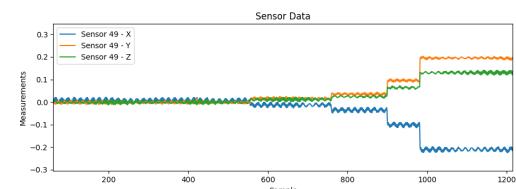
FIGURE 24 – Deuxième enregistrement

Lors de cet enregistrement, nous avons également voulu enregistrer la transition de la pile éteinte, sans gaz la traversant, vers la pile avec les gaz. Ce changement est visible approximativement à partir de l'échantillon 1250, comme illustré dans la figure 26.

Lors du troisième enregistrement, nous avons fait passer un courant dans la pile. Comme dans le processus précédent, nous avons également voulu capturer la transition du moment sans courant au moment où nous l'appliquons à la pile. Sur la figure 25a et 25b, nous pouvons voir la norme de cette transition ainsi que l'effet sur chacun des axes d'un capteur choisi arbitrairement.



(a) Effet de la transition sur la norme



(b) Effet de la transition sur les axes

FIGURE 25 – Effet de l'injection de courant sur la pile

Pour comparer la transition sur les différents capteurs, des capteurs situés à la même hauteur verticale mais dans différentes colonnes ont été choisis, c'est-à-dire un capteur de chaque canal I2C à la même hauteur verticale.

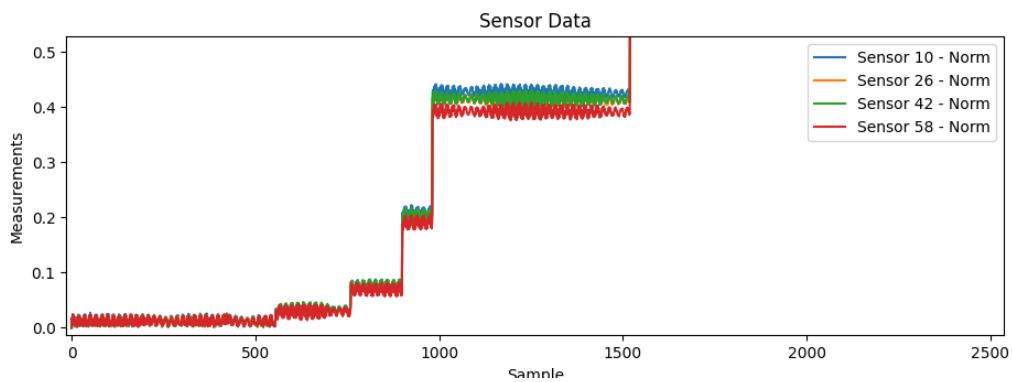


FIGURE 26 – Effet de l'injection de courant sur différents capteurs

Après la transition, le courant a été fait varier de 0 à 300, par pas de 50 A. Les journaux pour le courant de la pile sont représentés dans la figure 27.

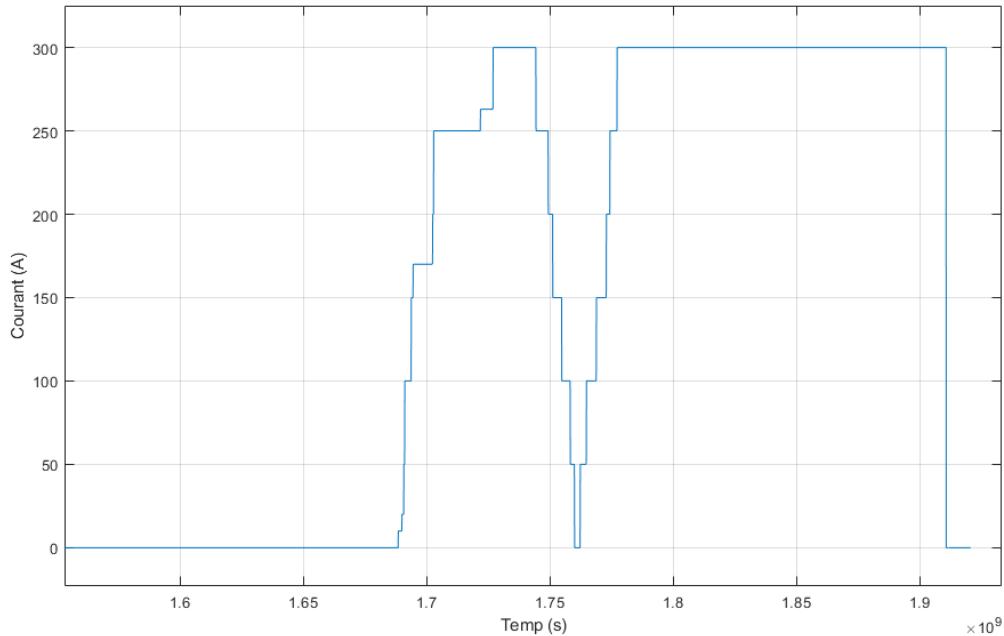


FIGURE 27 – Variation du courant dans la pile au cours du temps

En comparant avec notre résultat dans la matrice des capteurs, nous avons obtenu la courbe suivante représentée par la figure 28.

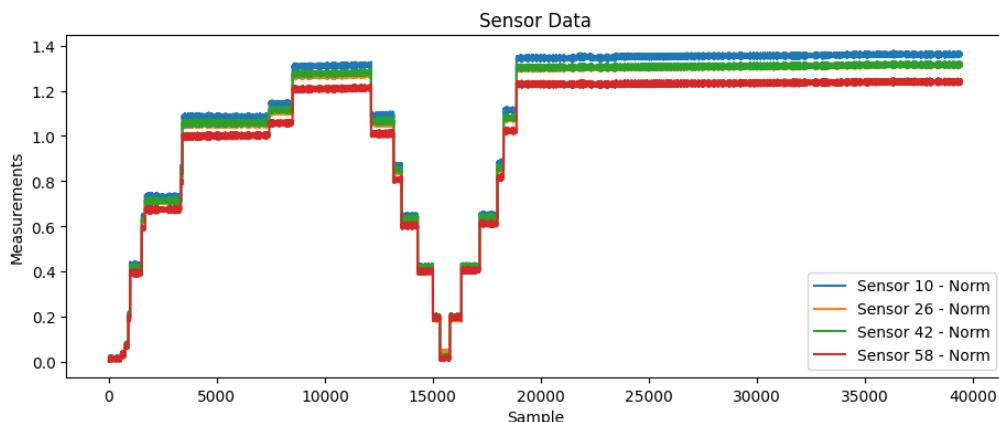


FIGURE 28 – Variation de la norme du champ dans la pile au cours du temps

En regardant les résultats des figures 27 et 28, nous pouvons observer que le profil des acquisitions de la matrice suit le courant appliqué à la pile. Comme mentionné précédemment, des variations d'humidité dans la cellule ont également été effectuées pendant les tests. Cependant, à la fréquence d'échantillonnage de 10,8 Hz, il n'a pas été possible d'observer une réponse des capteurs à ces variations.

En analysant les résultats de chaque axe en réponse aux variations, nous avons observé que l'axe x s'est révélé être la composante la plus importante par rapport aux

autres, en particulier pour les capteurs situés au centre horizontal et dans la partie inférieure de la carte (figure 29).

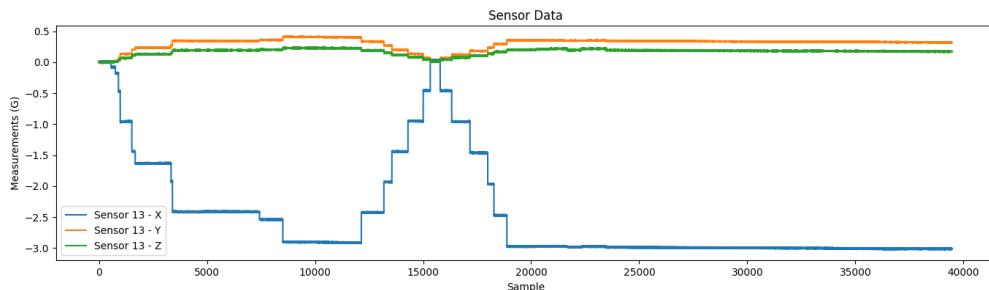


FIGURE 29 – Résultats des mesures sur la pile, mettant en évidence les données pour chaque axe

En revanche, en variant la hauteur du capteur sélectionné, les axes z et y se sont avérés plus significatifs que pour les capteurs situés au centre de la carte. Par exemple, les mesures en haut de la carte ont une profil représenté par la figure 30

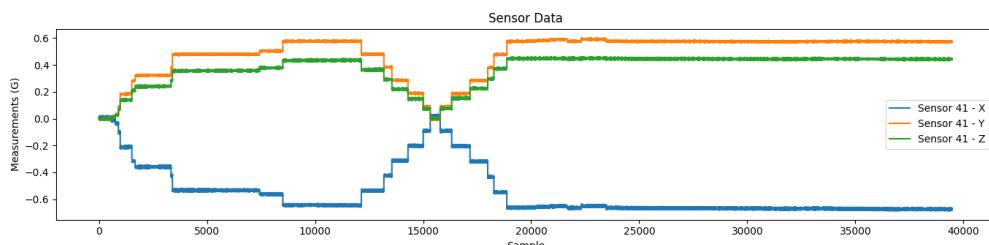


FIGURE 30 – Résultats des mesures en haut de la carte, mettant en évidence les données pour chaque axe

Cela peut s'expliquer par le positionnement de la carte par rapport à la pile pendant l'expérimentation. Les capteurs situés dans la partie inférieure de la carte étaient plus proches du centre de la pile que ceux situés dans la partie supérieure, où l'influence des effets de bord est supposée être moindre.

Initialement, les tendances des résultats obtenus pour le champ magnétique semblent cohérentes avec le profil de courant attendu dans la pile. Cependant, dans un second temps, un traitement des données plus robuste ou la mise en œuvre d'un modèle inverse sera nécessaire pour déduire précisément le profil de courant.

5 Conclusion

Le stage avait pour objectif initial le développement d'un système de surveillance magnétique en temps réel pour le diagnostic des piles à combustible. Cependant, l'objectif a été affiné pour explorer l'architecture de la carte développée, caractériser la matrice de capteurs AMR et évaluer l'applicabilité de ces capteurs dans le contexte des piles à combustible.

Pendant le stage, une analyse de la matrice de capteurs AMR a été réalisée, explorant ses capacités en termes de sensibilité, plage de mesure et réponse dans différentes conditions. Les tests ont inclus la caractérisation dynamique avec des sources de champ magnétique mobile, des essais dans des environnements isolés de champ magnétique, ainsi que des expérimentations avec une bobine de Helmholtz pour la calibration et la validation. Ces tests ont été essentiels pour identifier des limitations techniques, telles que des interférences régionales dans certaines parties spécifiques de la matrice et la nécessité d'une synchronisation plus précise entre les capteurs.

L'intégration du firmware embarqué, incluant des fonctionnalités telles que la calibration par démagnétisation et la transmission de données pour une analyse en temps réel, a démontré l'efficacité du système à capturer de manière fiable les variations magnétiques. De plus, le système a été testé expérimentalement dans des conditions réelles avec une pile à combustible, confirmant sa capacité à surveiller les variations de champs magnétiques liées à courant injecté à la pile

Les résultats obtenus montrent que le stage a contribué à la validation de la matrice de capteurs pour l'application, et aussi à la caractérisation des capteurs AMR. De plus, cette stage a révélé un potentiel pour des améliorations futures dans l'architecture de la carte.

6 Perspectives

Bien que le système développé ait obtenu des résultats satisfaisants en termes de fonctionnalité et de validation expérimentale, des opportunités significatives d'amélioration existent pour accroître son efficacité. Ce chapitre discute certaines des principales améliorations envisageables, en mettant l'accent sur les défis identifiés, tels que les limitations de fréquence des capteurs et les problèmes de synchronisation.

6.1 Optimisation de la Synchronisation des Capteurs

Actuellement, l'architecture du système rencontre des défis de synchronisation en raison de l'indépendance des quatre bus I2C utilisés pour contrôler les capteurs. Ce manque de synchronisation engendre de légers écarts temporels entre les mesures effectuées par différents capteurs de la matrice.

Une solution envisageable serait la mise en œuvre d'un mécanisme de synchronisation basé sur le matériel pour coordonner les signaux d'activation des capteurs. Cela impliquerait l'utilisation d'une structure permettant de démarrer la mesure via un seul bus I2C, puis d'exploiter les quatre autres bus pour interroger les capteurs et collecter les données.

Une autre alternative consisterait à migrer vers une architecture SPI pour le contrôle des capteurs, ce qui pourrait réduire la latence associée au bus I2C et améliorer la synchronisation des mesures.

Ces solutions reposent principalement sur des changements matériels et impliquent forcement la conception et la fabrication d'une nouvelle carte pour répondre aux exigences spécifiques de l'application

6.2 Dépassement des Limitations de Fréquence

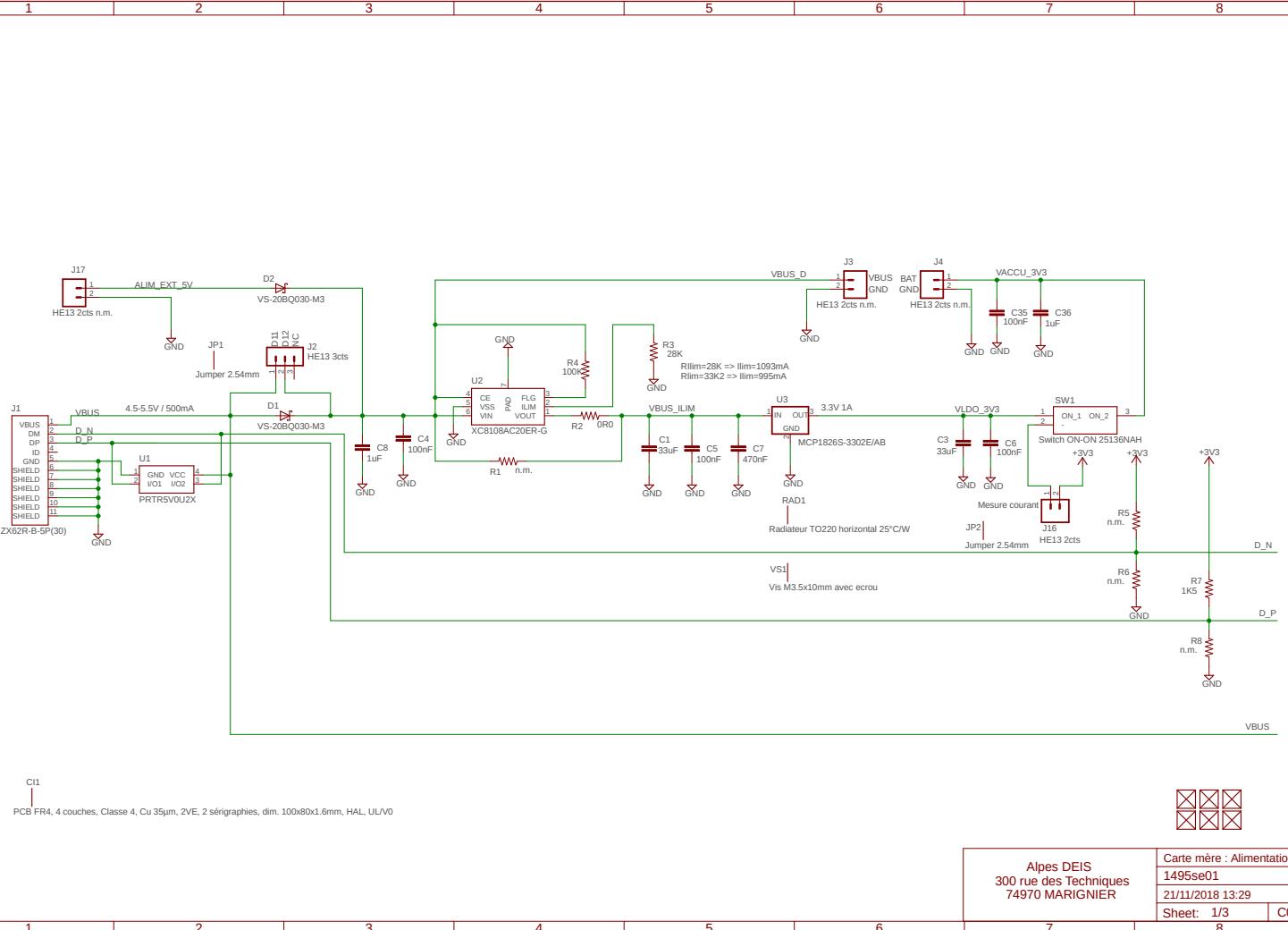
Les capteurs AMR utilisés dans le système ont une fréquence maximale de 600 Hz et contraintes par les muxes, la fréquence maximale d'acquisition est 75Hz, ce qui peut constituer une limite dans des applications nécessitant des mesures plus rapides, comme l'étude de l'effet de l'humidité sur le champ magnétique d'une pile à combustible. Pour surmonter cette contrainte, l'adoption de capteurs alternatifs, tels que les capteurs TMR ou GMR, pourrait être envisagée. Ces capteurs offrent des caractéristiques similaires aux AMR, mais avec des performances nettement supérieures à des fréquences plus élevées.

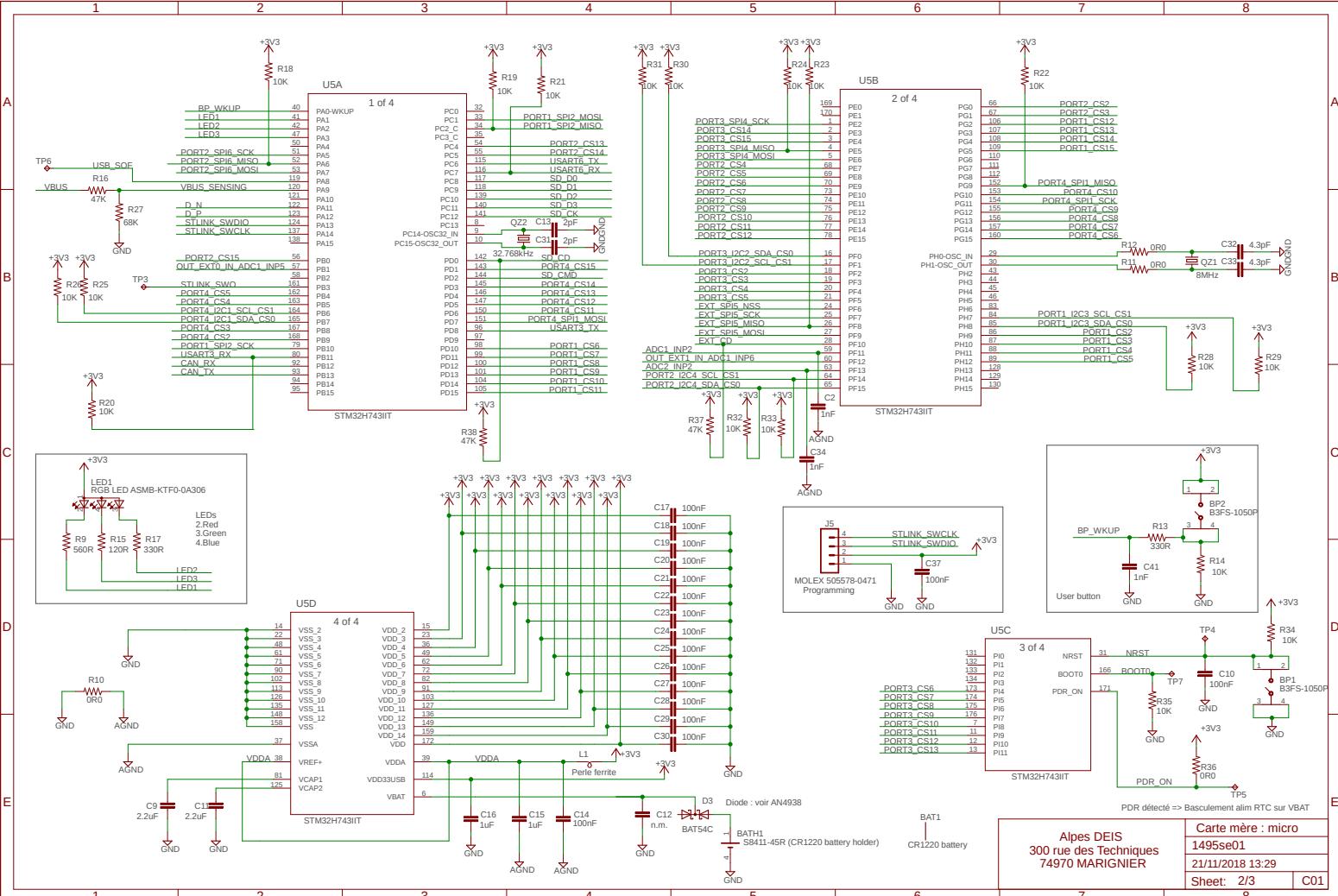
6.3 Améliorations de la Calibration

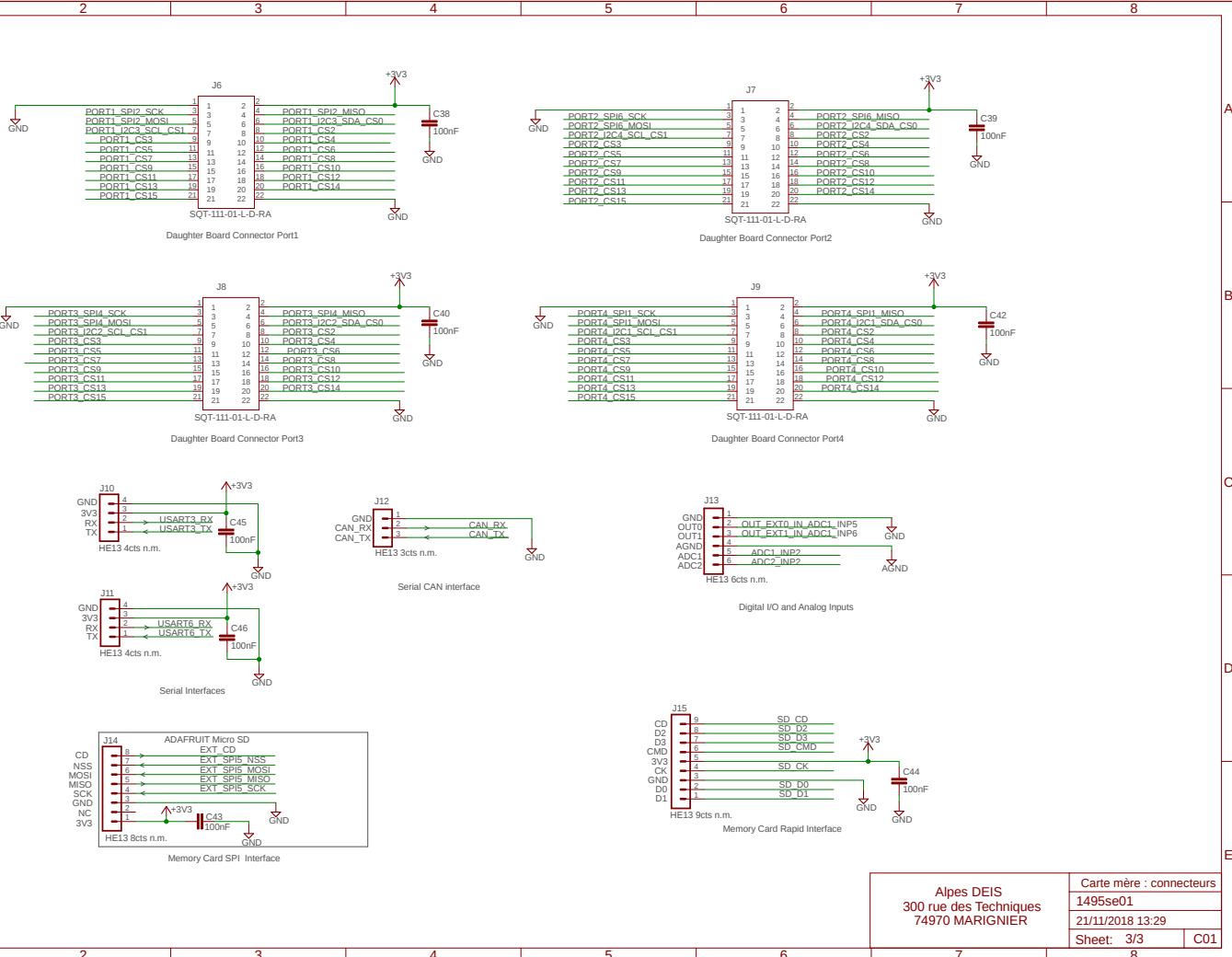
La calibration est essentielle pour garantir la précision des mesures, notamment face aux différences observées entre les capteurs lors des tests de caractérisation (sensibilité et offset). Pour améliorer ce processus, une approche pourrait consister à intégrer un système de calibration automatique directement dans le firmware, capable d'identifier et de corriger les écarts en temps réel. Cette solution pourrait s'appuyer sur des algorithmes adaptatifs ajustant dynamiquement les paramètres des capteurs selon les besoins.

7 Annexes

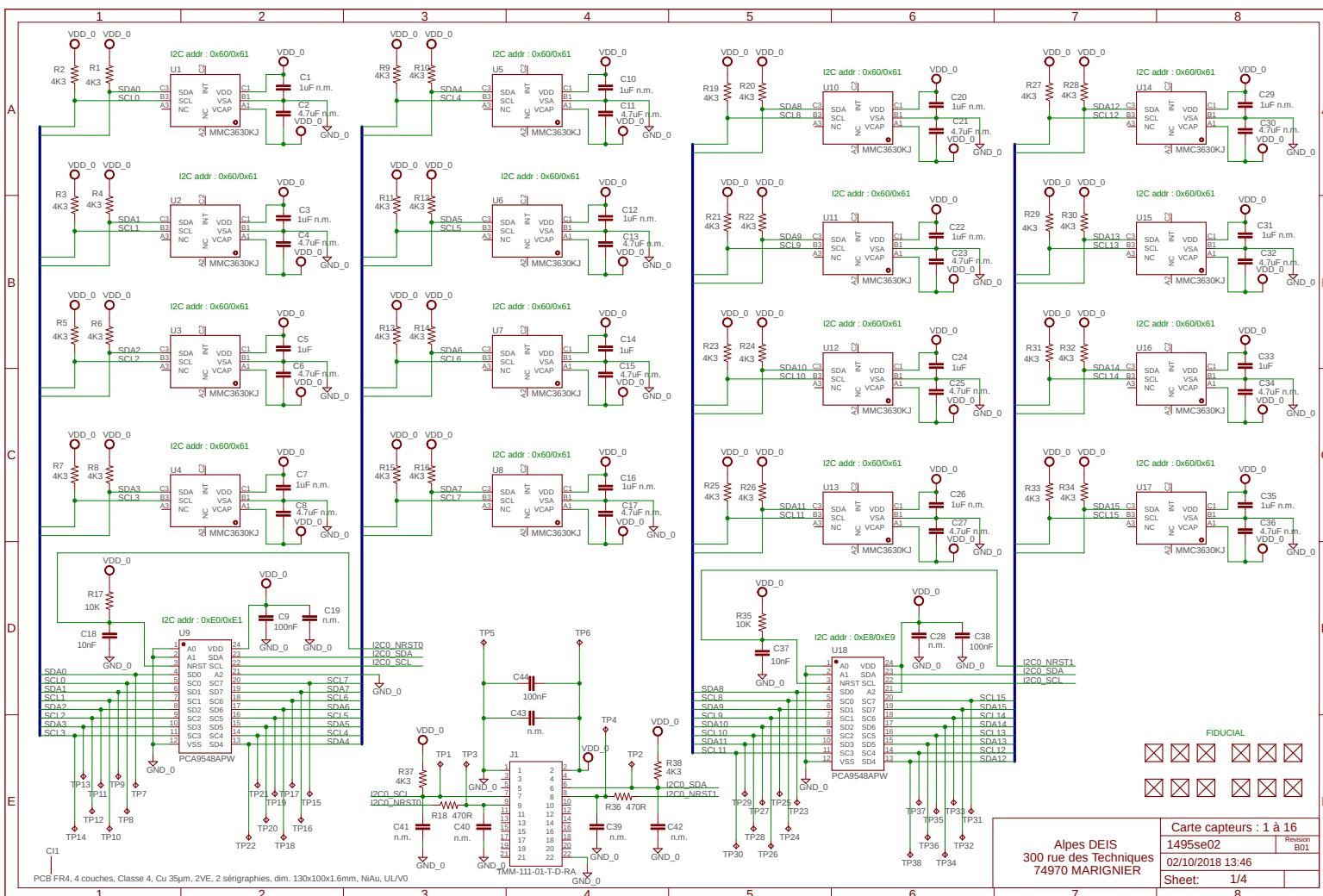
7.1 Schéma Carte Mère

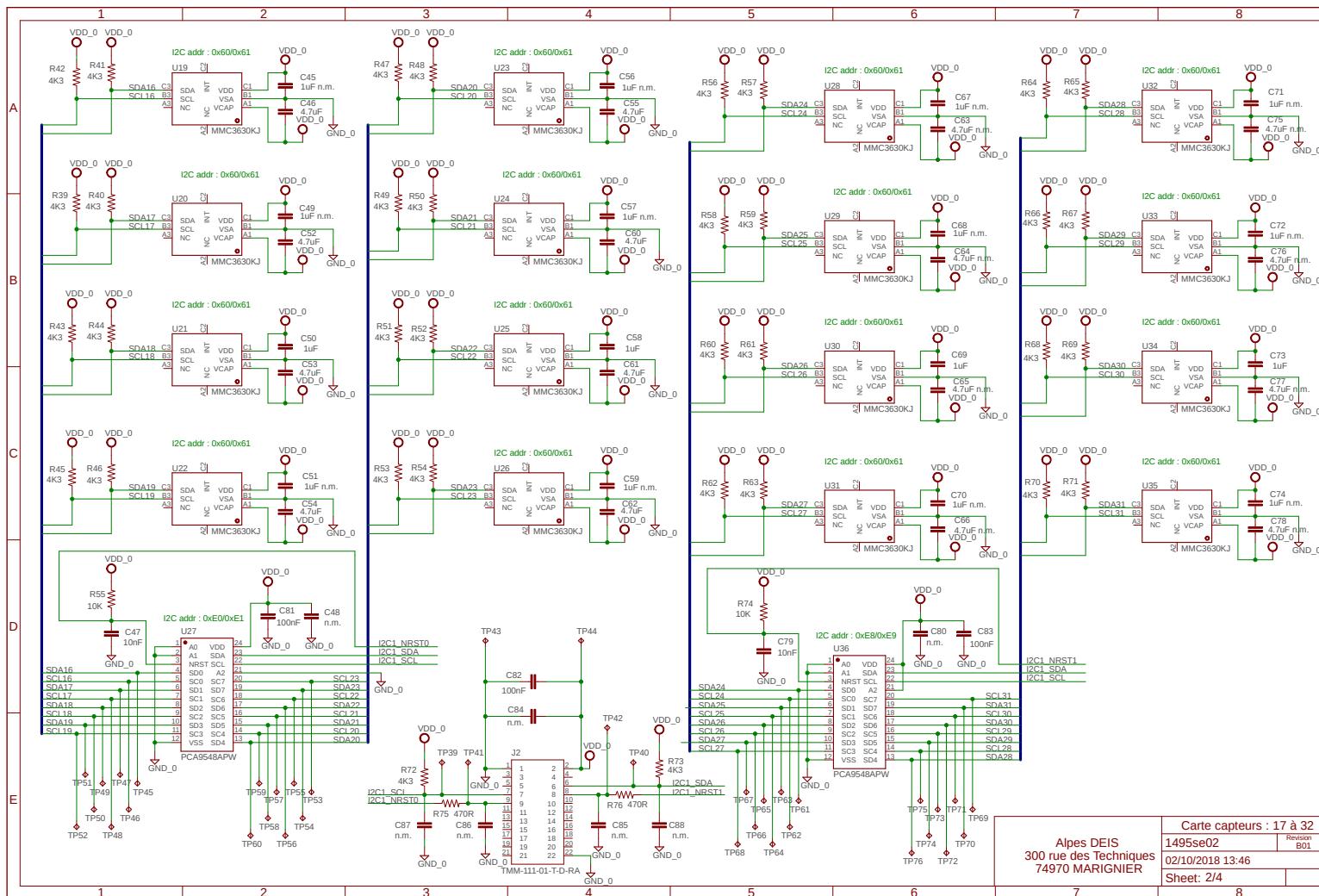




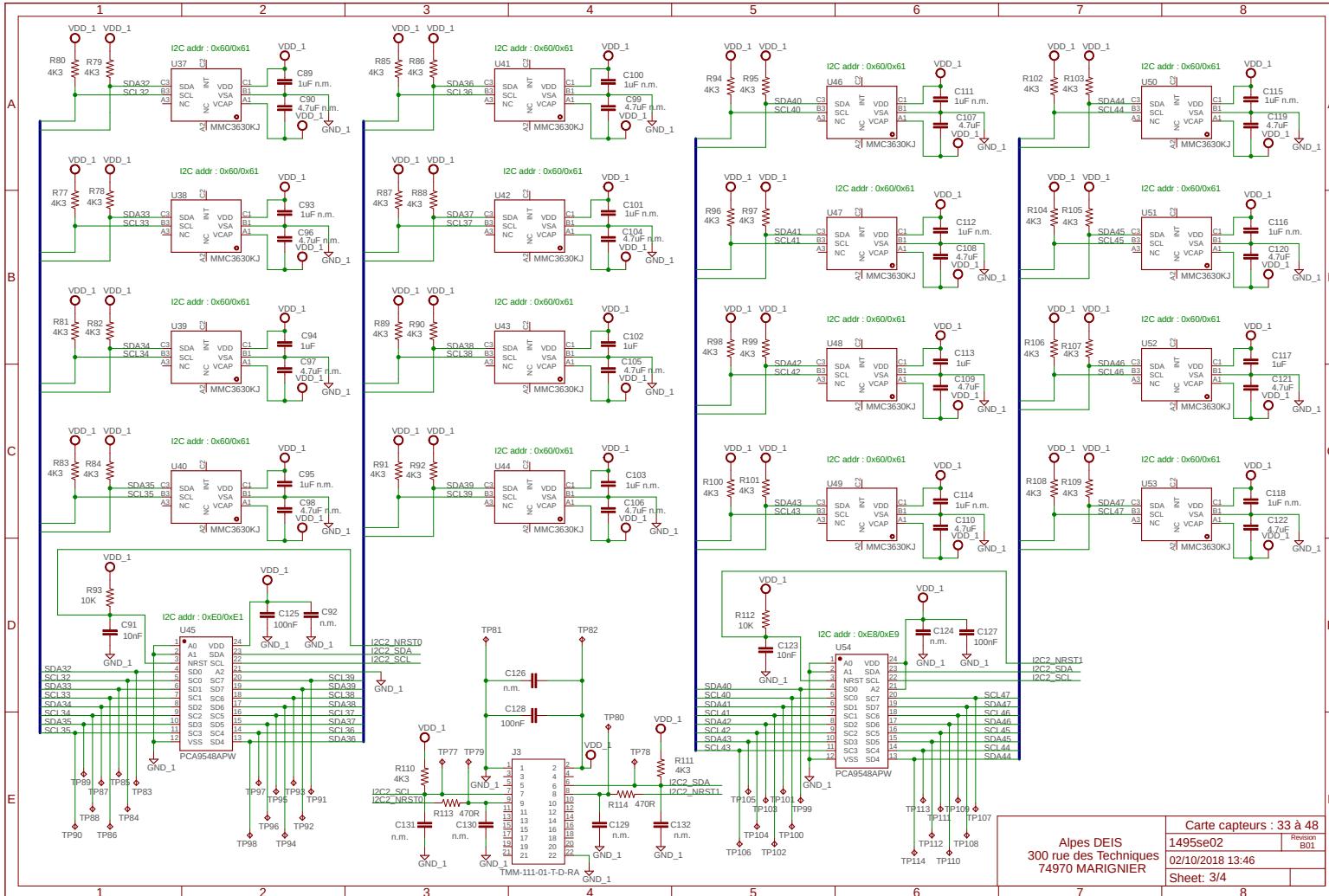


7.2 Schéma Carte Capteurs

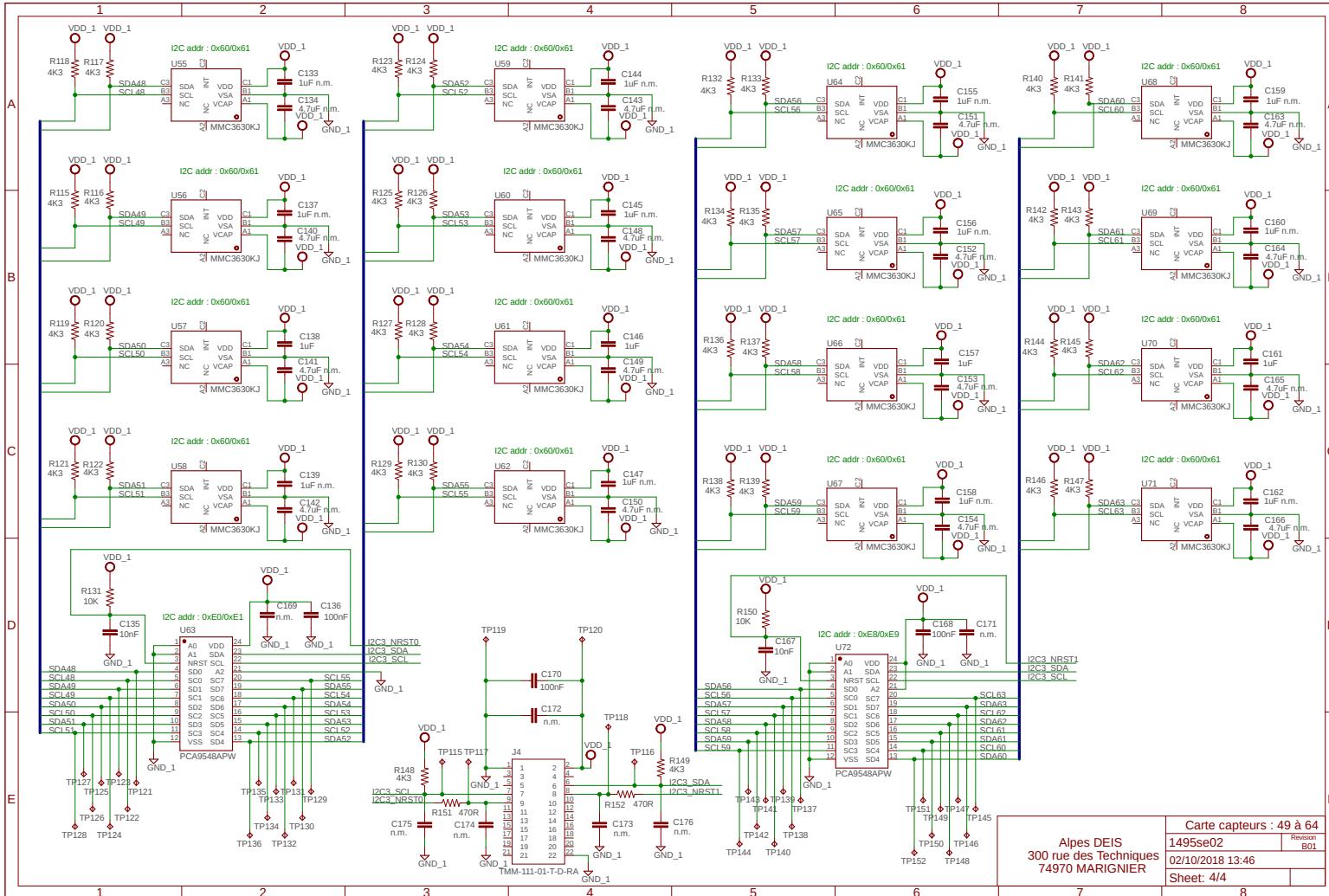




Alpes DEIS
300 rue des Techniques



1495se02	Revision B01
02/10/2018 13:46	



Références

- [1] Lyes Ifrek. *Identification des défauts d'une pile à combustible par la mesure du champ magnétique externe : vers la détermination de défauts locaux.* Theses, Université Grenoble Alpes, November 2017.
- [2] Nikhil Jain, Anurag Roy, Rajat Jain, and Netai Karmakar. Polymer electrolyte membrane fuel cells : Alternative to fossil fuels for power supply to heavy earth moving and allied machinery in mining and civil engineering industry. 12 2013.
- [3] Mathieu Le Ny. *Diagnostic non invasif de piles à combustible par mesure du champ magnétique proche.* Theses, Université de Grenoble, December 2012.
- [4] J.E. Lenz. A review of magnetic sensors. *Proceedings of the IEEE*, 78(6) :973–989, 1990.
- [5] Sylvain Tant. *Contribution au diagnostic d'empilements PEMFC par spectroscopie d'impédance électrochimique et méthodes acoustiques.* Theses, Université de Grenoble, July 2013.