



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

**Docteur de l'Université de Lorraine
en Génie Electrique**

Par

Rafael Antonio Linares Lamus

**ALIMENTATION D'UNE BOBINE SUPRACONDUCTRICE
PAR UNE PILE À COMBUSTIBLE A HYDROGÈNE ET CONCEPTION
D'UN AIMANT VECTORIEL DE 3 T**

Soutenance publique le 27 novembre 2017 devant le jury composé de :

Rapporteurs

M. Philippe VANDERBEMDEN Professeur, Institut Montefiore, Université de Liège
M. Olivier BETHOUX Professeur, GeePs, Université Paris-Sud

Examinateurs

M. Lionel QUETTIER Ingénieur-chercheur, CEA, Paris-Saclay
Mme Afef KEDOUS-LEBOUC Directrice de recherche CNRS, G2Elab, Grenoble

Directeurs de thèse

Mme Melika HINAJE Professeur, GREEN, Université de Lorraine
M. Kévin BERGER Maître de Conférences, GREEN, Université de Lorraine

Remerciements

Je voudrais remercier Monsieur Bernard Davat et Monsieur Shahrokh Saadate, Professeurs à l'Université de Lorraine, directeurs et anciens directeurs du laboratoire GREEN, de m'avoir accueilli au laboratoire.

Je voudrais exprimer mes remerciements les plus sincères à Madame Melika Hinaje et Monsieur Kévin Berger, Professeur et Maître de conférences à l'Université de Lorraine, pour avoir accepté d'être directeur et co-directeur de cette thèse. Merci pour votre patience, vos remarques et vos conseils qui m'ont apporté énormément de connaissances dans le domaine de la supraconductivité et des piles à combustible.

J'adresse mes remerciements à Monsieur Bruno Douine, Professeur à l'Université de Lorraine, pour m'avoir confié un projet sur l'aimantation des pastilles supraconductrices lors de mon Master.

Je voudrais également remercier Monsieur Jean Lévêque, Professeur à l'Université de Lorraine, pour ses conseils et sa confiance en mes compétences.

Je remercie Monsieur Philippe Vanderbemden et Monsieur Olivier Bethoux, respectivement Professeur à l'Institut Montefiore, Université de Liège et Professeur au GeePs, Université Paris-Sud, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et le temps qu'ils ont consacré pour l'évaluer.

Je remercie Monsieur Lionel Quettier et Madame Afef Kedous-Lebouc, respectivement Ingénieur-chercheur au CEA, Paris-Saclay et la Directrice de recherche au CNRS, G2Elab, de Grenoble, d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

Je voudrais également remercier spécialement Madame Rada Alhasan, Monsieur Bashar Gony, Monsieur Ehsan Jamshidpour, Monsieur Bastien Dolisy, Monsieur Julien Leclerc et Madame Isabelle Schwenker pour leur soutien amical.

Je voudrais remercier profondément ma compagne Anne-Séverine pour toute sa précieuse aide, son soutien et sa patience. Je remercie également mon fils Nino.

Un grand merci à tous mes collègues du GREEN et plus généralement, de l'Université de Lorraine.

Sommaire

Remerciements	iii
Sommaire	v
Introduction générale.....	1
I- Généralités	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Pile à combustible	4
I.2.1 Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?	4
I.2.2 Structure de la pile à combustible.....	4
I.2.3 Types de pile à combustible	5
I.2.3.1 Pile à combustible alcaline, AFC.....	6
I.2.3.2 Pile à combustible à hydrure de bore direct, DBFC.....	7
I.2.3.3 Pile à combustible à méthanol direct, DMFC.....	8
I.2.3.4 Pile à combustible à éthanol direct, DEFC.....	9
I.2.3.5 Pile à combustible à acide phosphorique, PAFC	10
I.2.3.6 Pile à combustible à carbonate fondu, MCFC	11
I.2.3.7 Pile à combustible à oxyde solide, SOFC	12
I.2.3.8 Pile à combustible à membrane d'échangeuse de protons, PEMFC.....	13
I.2.3.8.1 Structure d'une cellule élémentaire.....	14
I.2.3.8.2 Réaction d'oxydo-réduction de la PEMFC.....	14
I.2.3.8.3 Systèmes auxiliaires de la PEMFC	15
I.2.3.8.4 Modèle physico-chimique d'une PEMFC.....	16
I.2.3.8.5 Modèle circuit électrique d'une PEMFC.....	18
I.2.3.8.6 Fonctionnement comme source de tension	23
I.2.3.8.7 Fonctionnement en source de courant.....	24
I.3 Les supraconducteurs.....	27
I.3.1 Brève historique des matériaux supraconducteurs	27
I.3.2 Grandeurs physiques de la supraconductivité	28
I.3.2.1 La température critique	28
I.3.2.2 Le champ magnétique critique.....	29
I.3.2.3 La densité de courant critique.....	31

I.3.3	Types de supraconducteurs	32
I.3.3.1	Supraconducteurs de type I	32
I.3.3.2	Supraconducteurs de type II	33
I.3.3.3	Conducteurs supraconducteurs	36
I.3.3.3.1	BSCCO 2212	37
I.3.3.3.2	YBCO	37
I.3.3.3.3	MgB ₂	38
I.3.3.3.4	Nb ₃ Sn	38
I.3.3.3.5	NbTi	39
I.3.3.4	Choix du fil	39
I.3.4	Aimant vectoriel	40
I.3.5	Applications des aimants vectoriels	41
I.3.6	Exemples d'aimants vectoriels	43
I.4	Conclusions.....	46
II-	Alimentation d'une bobine supraconductrice par une pile à combustible.....	47
II.1	Introduction.....	47
II.2	Modélisation du système	50
II.2.1	Méthode	50
II.2.2	Modèle de la Pile à combustible	51
II.2.3	Modèle de bobine supraconductrice	53
II.2.4	Validation du modèle	54
II.2.5	Résultats et discussion	55
II.3	Banc expérimental d'une pile à combustible alimentant une bobine supraconductrice de 10 H	61
II.3.1	Système de contrôle pour la connexion entre la pile à combustible et la bobine supraconductrice	61
II.3.2	Choix d'une pile à combustible mono-cellule	62
II.3.3	Structure de l'alimentation pour la bobine supraconductrice	62
II.3.4	Expérimentation	63
II.3.4.1	Composition du banc d'essai.....	63
II.3.4.2	Résultats	64
II.4	Conclusions.....	70
III-	Dimensionnement d'un aimant vectoriel supraconducteur	73
III.1	Introduction.....	73
III.2	État de l'art des bobines de champ magnétique uniforme.....	74

III.2.1	Le solénoïde.....	74
III.2.2	Bobine de Helmholtz	75
III.2.3	Bobine de Lee-Whiting	77
III.2.4	Bobine de Merritt.....	78
III.2.5	Bobine par secteurs.....	78
III.3	Evaluation des bobines pour notre aimant vectoriel	79
III.3.1	Cahier des charges et comparaison des bobines	79
III.3.2	Homogénéité de l'induction magnétique	81
III.3.3	Configurations d'aimant vectoriel retenues.....	82
III.4	Aimant vectoriel de type Helmholtz.....	87
III.4.1	Validation du modèle 3D.....	87
III.4.2	Modélisation 3D de la structure définitive de l'aimant vectoriel	89
III.4.3	Fil supraconducteur NbTi	93
III.4.4	Etude paramétrique	95
III.5	Simulations	96
III.6	Résultats	97
III.7	Conception des supports.....	102
III.8	Cryostat	107
III.9	Conclusion	108
IV-	Conclusion générale	109
V-	Perspectives.....	111
VI-	Bibliographie.....	113
VII-	Annexes	119
VII.1	Champ produit par une spire	119
VII.2	Plans cryostat	122
		123
VII.3	Vue éclatée des supports en G11.....	124
VII.1	Dimensions des supports en G11	125
		125
	Nomenclature.....	127
	Liste de figures	129
	Liste des tableaux.....	133
	Publications	135
	Résumé.....	138
	Mots clés	138
	Abstract	138

Keywords.....	138
---------------	-----

Introduction générale

Les piles à combustible et plus particulièrement la pile à hydrogène connaissent un renouveau depuis quelques décennies en raison de leur combustible, leur bon rendement et leur faible impact environnemental en fonctionnement. La pile est un générateur d'électricité continu basse tension, elle est par conséquent souvent utilisée en association avec des convertisseurs : élévateur et/ou onduleur. Ses conditions opératoires sont fixées habituellement de sorte que la puissance électrique récupérable soit maximum. Dans cette thèse, nous présentons un fonctionnement atypique de la pile, à savoir, son fonctionnement en source de courant très basse tension. Dans cette application, l'objectif n'est pas d'obtenir la tension maximale à courant donné mais bien au contraire une tension quasi nulle. En effet, des essais préliminaires menés au laboratoire GREEN ont montré que le fonctionnement d'une pile en court-circuit sous certaines conditions opératoires permettait de contrôler le courant via le débit d'hydrogène. En somme, dans cet état, la pile se comporte comme une source de courant commandé.

En raison de l'expertise du laboratoire GREEN dans les domaines des supraconducteurs, c'est tout naturellement que nous avons vu l'intérêt d'alimenter une bobine supraconductrice par une pile à combustible. En effet, les supraconducteurs présentent une résistance nulle, et par conséquent, alimenter une bobine supraconductrice par une pile serait proche du fonctionnement de la pile en court-circuit. De surcroit, les alimentations requises pour les supraconducteurs exigent, entre autres, un courant continu avec un faible taux d'ondulation. Les matériaux supraconducteurs permettent de générer des champs magnétiques très élevés, de plusieurs dizaines de Tesla, et cela sans échauffement car leur résistance électrique est nulle. Une des applications les plus répandues est l'imagerie médicale et la détection de champs magnétiques de très faible amplitude. Ils sont aussi employés pour la fabrication des machines électriques de forte puissance, celles-ci étant plus compactes et plus légères que les machines électriques traditionnelles. Les supraconducteurs présentent de nombreux avantages mais la nécessité d'un système de refroidissement et le coût du matériau restent un frein à leur expansion.

Un premier test expérimental mené lors d'une précédente expérience avec une bobine supraconductrice de 4 mH, a confirmé tout le potentiel de cette application. Les dispositifs à bobinages supraconducteurs présentent des inductances de valeurs beaucoup plus élevées et par conséquent des énergies mises en jeu plus importantes. L'alimentation d'une bobine supraconductrice d'inductance élevée par une pile à combustible peut faire apparaître des interactions indésirables entre les deux dispositifs : décharge de l'inductance sur la pile, phénomènes de résonnance... Pour étudier cela, un modèle d'une pile à combustible monocellule alimentant une bobine supraconductrice a été développé, ce qui nous a permis de dimensionner le dispositif de protection et de prédire le comportement de la pile soumise à différentes sollicitations.

Parallèlement, afin de valoriser le fil supraconducteur qui servira à l'expérimentation, un dimensionnement d'aimant vectoriel a été fait. Les besoins en caractérisation de l'équipe supraconductrice a permis d'en établir le cahier des charges. Cet aimant vectoriel servira de plateforme de

caractérisation d'échantillons supraconducteurs de grandes tailles et pourra générer des champs homogènes à plus de 95 % dans les 3 directions spatiales. Ce manuscrit est composé de trois chapitres comprenant les diverses étapes de conception et de mise en œuvre.

Le premier chapitre permet de se familiariser avec les technologies de pile à combustible et les supraconducteurs ainsi que leurs applications : les concepts élémentaires des piles à combustible, des matériaux supraconducteurs et des aimants vectoriels. Nous allons notamment revisiter l'historique et différentes technologies possibles. Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation de l'association d'une pile et d'une bobine supraconductrice, ainsi qu'à l'exploitation des résultats de simulation et à leur validation expérimentale.

Dans le troisième chapitre nous présentons les différentes bobines pouvant être employées pour la fabrication d'un aimant vectoriel. Le dimensionnement magnétique sera réalisé grâce notamment à une modélisation par éléments finis. Nous allons aussi brièvement montrer le dimensionnement mécanique des supports des bobines et les calculs des efforts, qui nous ont permis de finaliser la procédure d'usinage des pièces et la fabrication du cryostat.

Enfin, une synthèse des principaux résultats et des orientations possibles quant à la continuité de ce travail à court, moyen et long terme sera présentée pour conclure ce document.

I- Généralités

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier des éléments essentiels pour comprendre l'objectif de ce travail qui consiste en la connexion électrique directe, entre une pile à combustible et une bobine supraconductrice. Ces technologies très différentes, présentent des caractéristiques communes. Il a ainsi été possible de les associer sans utiliser de convertisseur de puissance. Ce chapitre est divisé en trois parties fondamentales, à savoir la première partie dans laquelle nous allons décrire les généralités des piles à combustible et leurs possibilités comme source d'alimentation. Ensuite dans la deuxième partie nous allons décrire les généralités sur les matériaux supraconducteurs utilisés pour la fabrication des bobines supraconductrices et leurs caractéristiques de fonctionnement. Enfin nous présenterons les aimants vectoriels, une catégorie de bobines supraconductrices que nous envisageons utiliser pour l'étude des matériaux supraconducteurs.

Les supraconducteurs sont des matériaux avec des caractéristiques physiques exceptionnelles. Pendant des années, des chercheurs de plusieurs pays ont investi de longues heures dans le développement de cette technologie. Aujourd'hui, une partie des travaux sont liés à leur applications dans le transport et la génération d'électricité, l'imagerie médicale, la magnétométrie, l'électronique et la recherche en physique des matériaux [1], [2]. Le facteur retardant l'utilisation des supraconducteurs est leur prix [3], [4], ce qui confine les supraconducteurs à des applications de niches très spécifiques. Les matériaux utilisés, la complexité de fabrication et la cryogénie sont responsables de leur coût élevé [5]. Les supraconducteurs ont comme principale caractéristique d'avoir des faibles pertes électriques, quelques milliwatts en régimes alternatifs, et une grande aptitude pour la production de champs magnétiques intenses, ce qui les rend très appréciés en ce moment où les efforts sont concentrés dans l'amélioration des rendements des systèmes électriques et électromécaniques [6].

Une autre technologie en plein étude est la pile à combustible. Son fonctionnement consiste en la production d'énergie électrique à partir d'une réaction d'oxydo-réduction. Elle suscite un grand intérêt dans diverses applications grâce à son bon rendement [7]. Parmi les différentes types de pile à combustible, la plus utilisée est la PEMFC, la pile à combustible à membrane échangeuse de protons [8]. Ces piles sont intéressantes d'une part pour leur rapidité de mise en service et d'autre part en raison du combustible, l'hydrogène, un vecteur énergétique à fort potentiel [9], [10], [11]. Cependant, cette pile à combustible souffre d'un coût de production élevée. Dans les dernières années son rapport prix par watt produit a été largement réduit, mais demeure élevé pour une utilisation à grande échelle [12], [13].

Le troisième sujet étudié dans cette thèse concerne les aimants vectoriels, qui sont employés pour la création de champs magnétiques orientables dans une direction choisie. Ils sont construits de différentes tailles selon la nature de l'application. Ils peuvent être utilisés pour compenser le champ magnétique terrestre ($\sim 0,5$ gauss) à quelques teslas dans des applications biomédicales et la

caractérisation de matériaux. Ils se composent de bobines réparties spatialement sur des axes d'un repère cartésien. Ces bobines sont faites de fil de cuivre ou de fil supraconducteur dans le cas de fort champ magnétique.

Le chapitre 1 est consacré à une présentation générale des piles à combustible, des supraconducteurs et des aimants vectoriels. On abordera également dans cette partie les caractéristiques et spécificités de chacun de ces éléments qui formeront un système source/charge.

1.2 Pile à combustible

1.2.1 Qu'est-ce qu'une pile à combustible ?

L'histoire de la pile à combustible remonte à 1842 quand William R. Grove construit le premier modèle de pile à combustible, juste après la découverte du phénomène par son collègue Christian Schönbein en 1839. Les piles à combustible convertissent l'énergie chimique provenant de la réaction d'oxydoréduction en énergie électrique. Dans le cas de la pile PEM, le combustible est l'hydrogène et le comburant l'oxygène (généralement prélevé dans l'air). La réaction est favorisée par l'élévation de la température et par la présence d'un catalyseur (le platine). Le produit de la réaction d'oxydoréduction est de l'eau, de la chaleur et de l'électricité. La pile à combustible est vue comme une source d'énergie électrique propre puisqu'elle produit de l'eau ; et de la chaleur qui peut être valorisée.

Les recherches reprennent quelques années plus tard en 1953 et les premiers modèles de quelques kilowatts sont créés pour les programmes spatiaux Gemini et Apollo. Malheureusement, la pile à combustible a été mise de côté en raison de l'utilisation d'autres types de production d'énergie pour des applications grand public, plus économiques à la fabrication et la maintenance. Aujourd'hui, la pile à combustible est un des générateurs d'électricité les plus prometteurs en termes d'autonomie. L'avancement dans la production et le stockage d'hydrogène, ces dernières années, a suscité un regain d'intérêt dans la recherche de nouvelles applications pour la pile à combustible [14], [15]. Il existe plusieurs types de piles à combustible, comme nous le verrons par la suite, mais commençons tout d'abord par présenter ce qu'est une pile à combustible.

1.2.2 Structure de la pile à combustible

Toute pile à combustible est composée de deux électrodes, anode et cathode, siège des réactions d'oxydation et de réduction respectivement, séparées par un électrolyte. Cet ensemble constitue ce qu'on appelle une cellule électrochimique. L'électrolyte permet le transport des ions et sont également un isolant électrique. Les électrons produits à l'anode sont ainsi transportés via les électrodes vers le circuit extérieur (charge) où ils regagnent la cathode. La pile à combustible est un générateur de courant continu où la borne positive est la cathode. Les électrodes ont la particularité d'être poreuses permettant le passage des gaz jusqu'aux sites réactifs. Généralement, l'emploi de catalyseurs est nécessaire afin d'accélérer la réaction.

La Figure I-1 représente un schéma de la structure générale d'une pile à combustible : (1) l'espèce qui va être oxydée entre côté anode. (2) l'électrode va faciliter le transport de l'espèce jusqu'au site réactif où elle sera oxydée et celui des électrons e^- jusqu'à la charge.

Les ions quant à eux vont traverser l'électrolyte pour regagner la cathode. (3) Le combustible, qui n'est pas consommé, sort de la pile (selon les systèmes de pile à combustible soit il y a recirculation soit l'excédent est évacué dans l'atmosphère via une hotte d'extraction). (4) Le comburant est fourni (4) du côté cathode et va être mis en contact (5) avec les ions provenant de l'électrolyte. (6) Le produit de la réaction de réduction est expulsé de la pile. (7) La circulation des électrons générés pendant le cycle complet établit le courant électrique produit par la pile vers la charge.

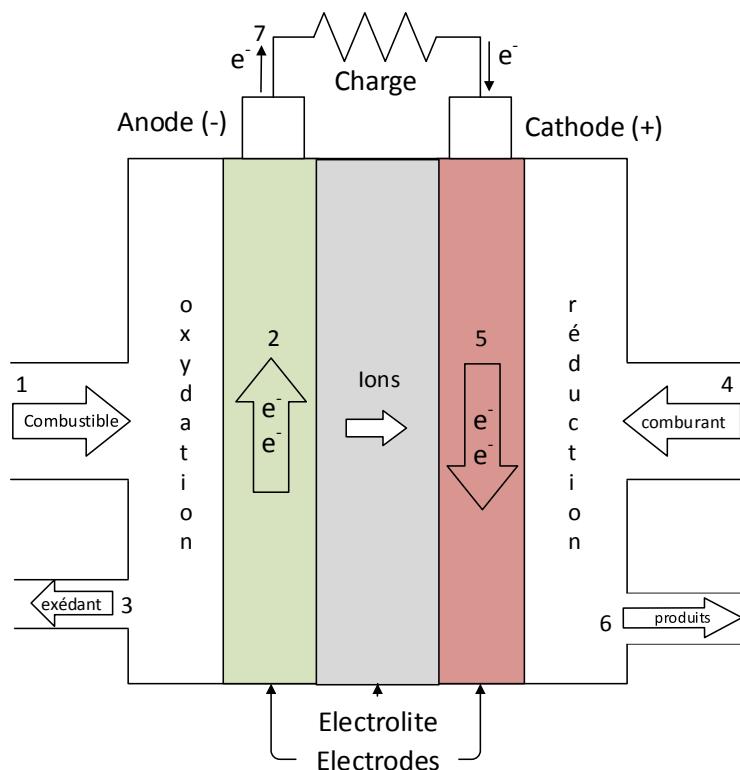


Figure I-1. Structure d'une pile à combustible.

Différentes technologies ont employé cette configuration. Ce qui varie entre chaque type de pile à combustible est principalement la nature des matériaux utilisés dans leur construction et la classe du comburant et du combustible. Dans ce qui suit, quelques-unes seront présentées.

I.2.3 Types de pile à combustible

Différentes technologies ont été développées pour la fabrication des piles à combustible. Ces diverses technologies sont orientées selon plusieurs critères : la réduction du prix de fabrication, de

l'amélioration du rendement, de la sécurité, de la compacité et de leur application. Nous pouvons en citer quelques-unes :

I.2.3.1 Pile à combustible alcaline, AFC

Pendant les années 1960, les besoins en piles à combustible de haut rendement dans les programmes spatiaux ont permis d'aboutir à la pile alcaline. Cette technologie emploie de l'hydrogène, H₂ et de l'oxygène, O₂ pur produisant de l'électricité de l'eau, H₂O et de la chaleur qui est utilisée dans un cycle combiné améliorant son rendement. Il est nécessaire d'éviter la pollution de l'électrolyte et des catalyseurs déposés en surface des électrodes avec du CO₂, ce qui impose une alimentation avec des gaz purs. Son rendement est le plus élevé parmi les piles à combustible, il peut atteindre jusqu'à 70-80 % en cogénération et 60 % de rendement électrique [16].

La réaction d'oxydoréduction produite dans la pile à combustible alcaline est exprimée ainsi :

A l'anode :



A la cathode :

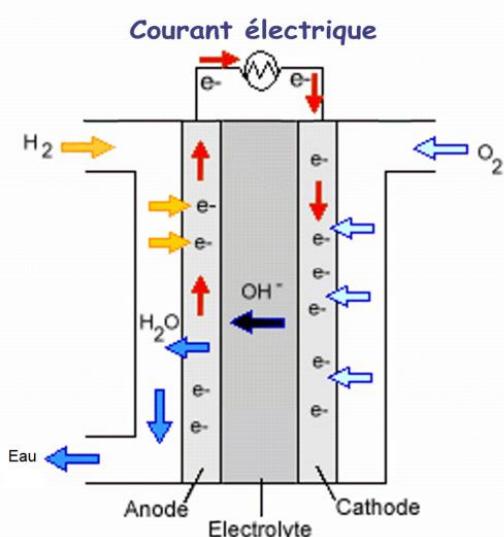
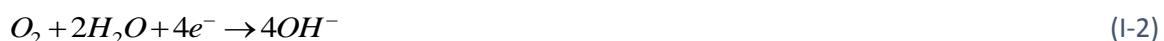


Figure I-2. Principe de fonctionnement d'une pile AFC [17].

Pour assurer le transport des ions d'hydrogène, une matière poreuse imprégnée d'une substance aqueuse alcaline (KOH) est employée. Cette matière est placée entre les électrodes, ce qui va assurer le transport du radical hydroxyle OH⁻ de la cathode vers l'anode avec la génération du courant vers la charge (Figure I-2).

I.2.3.2 Pile à combustible à hydrure de bore direct, DBFC

La pile à combustible à hydrure de bore direct est un type de pile alcaline qui a comme carburant le borohydrure de sodium (NaBH_4) [18], [19]. Le stockage d'hydrogène sous forme de borohydrure de sodium est moins complexe que son stockage sous forme gazeuse, ce qui permet une réduction du coût et les mesures de sécurité. L'hydrogène est contenu dans le carburant et les produits de la réaction dans la pile peuvent être jetés dans la nature sans impact environnemental, car ils se dégradent en sels. [20], [21].

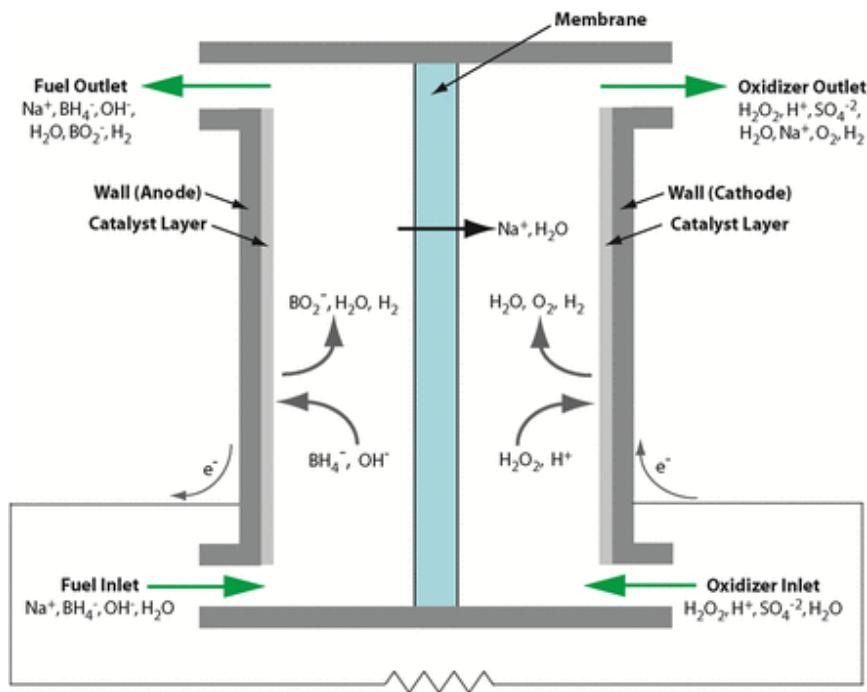


Figure I-3. Principe de fonctionnement d'une pile DBFC [22].

Le borohydrure est alors une composition aqueuse et produit de l'hydrogène par une décomposition catalytique selon l'équation :



Le composé NaBH_4 est amené à être oxydé à l'intérieur de la pile afin d'éviter la production d'hydrogène, ce qui conduit à une amélioration du rendement. La réaction simplifiée peut être décrite selon l'équation :



La tension de la pile à combustible est plus élevée que celle des piles conventionnelles : 1,64 V et sa température de fonctionnement est de 70 °C. Cette technologie est en cours de développement.

La Figure I-3 montre en détail les réactions subies au cœur de la pile DBFC, La membrane doit permettre le transport de l'ion Na⁺ et de l'eau de l'anode vers la cathode.

I.2.3.3 Pile à combustible à méthanol direct, DMFC

Il s'agit d'une pile à combustible de technologie de membrane d'échange de protons (PEM), utilisant le méthanol (CH₃OH) comme carburant fourni sous cette forme directement à la pile [23]. Un des avantages de cette technologie est le stockage du méthanol qui est beaucoup plus simple que le stockage d'hydrogène gazeux.

La puissance produite est limitée entre 1 watt à quelques kilowatts [24], ce qui ne permet pas son utilisation dans les applications où une forte puissance est demandée, e.g. le transport. En revanche, elle peut servir pour les applications portables comme source d'alimentation pour des petits véhicules, des ordinateurs ou des petits robots. Elle peut fournir de petites quantités de puissance pendant des périodes prolongées [25], [26], [27].

Son rendement électrique est de 40 % et de 80 % en cogénération. La réaction intérieure commence avec l'oxydation du méthanol à l'anode à l'aide d'un catalyseur, de l'eau est ainsi consommée et du dioxyde de carbone est produit. Les ions H⁺ résultant de l'oxydation sont alors transportés à travers la membrane vers la cathode où ils sont réduits avec l'oxygène pour produire de l'eau. Les électrons sont transportés de l'anode vers la charge et ensuite à la cathode. La réaction est exprimée selon les équations :

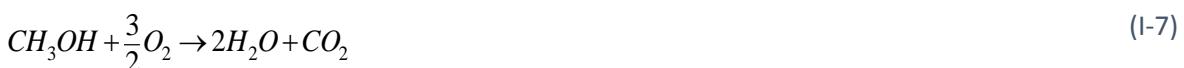
Pour l'anode :



Pour la cathode :



Equation bilan :



La membrane de la pile DMFC est non perméable au méthanol, et elle ne transporte que les ions H⁺, de l'eau et du dioxyde de carbone (Figure I-4).

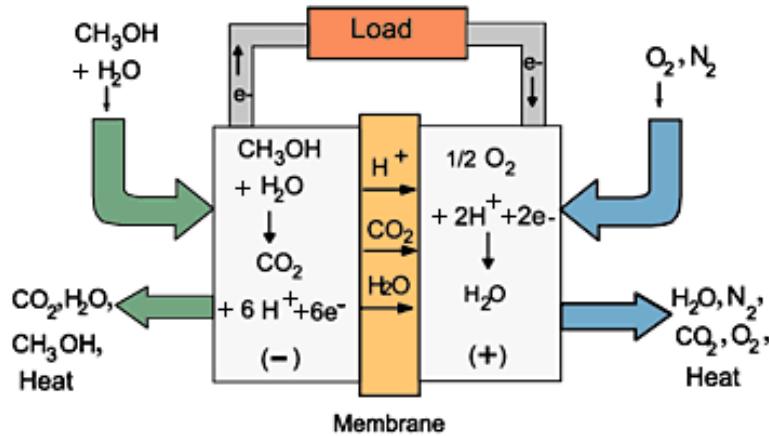


Figure I-4. Principe de fonctionnement d'une pile DMFC [28].

I.2.3.4 Pile à combustible à éthanol direct, DEFC

Ce type de pile à combustible a le même fonctionnement que la pile à combustible à méthanol direct, seul le combustible change, le méthanol est remplacé par de l'éthanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) [16], [29]. Le principal avantage est que l'éthanol est plus répandu, d'accès facile et moins毒ique que le méthanol. Comme dans la pile à méthanol, la reconversion catalytique n'est pas nécessaire, ce qui réduit les coûts de production [30]. Sa réaction est exprimée dans les équations (Figure I-5) :

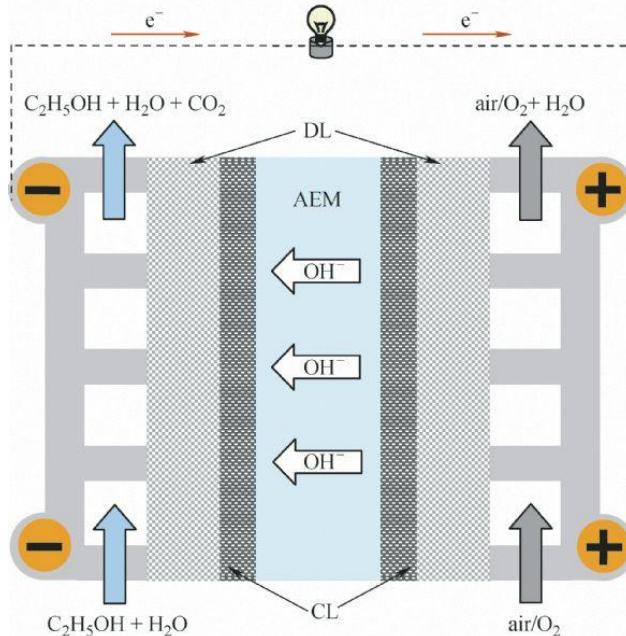


Figure I-5. Principe de fonctionnement d'une pile DEFC.

Pour l'anode :



Pour la cathode :



L'équation bilan en résultant s'écrit :



I.2.3.5 Pile à combustible à acide phosphorique, PAFC

L'acide phosphorique liquide est employé comme électrolyte dans ce type de pile à combustible. Son rendement est de 40 % pour la production d'électricité et atteint 85 % en cogénération. Elle peut être alimentée avec de l'hydrogène non purifié, ce qui la rend idéale dans les applications en environnements pollués où elle peut être exposée au monoxyde de carbone pouvant altérer le catalyseur [7], [31]. Sa température de fonctionnement est comprise entre 150-220 °C. Malheureusement, son coût est élevé et la quantité d'énergie produite est inférieure aux autres piles à combustible de même taille. L'équation des réactions redox sont les suivantes :

Pour l'anode :



Pour la cathode :



Equation bilan :

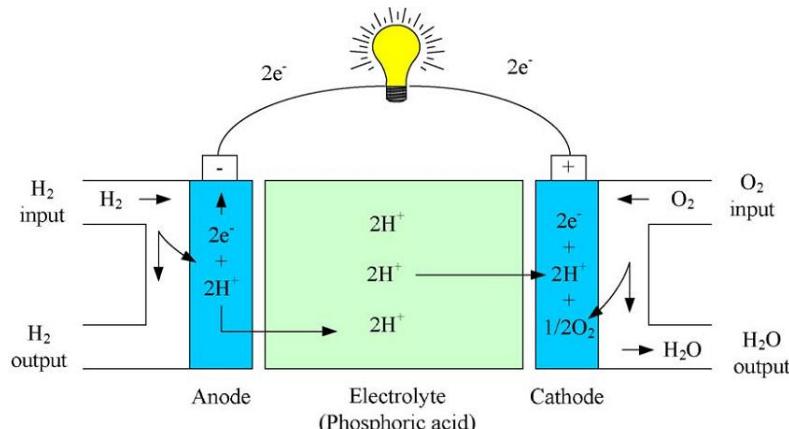


Figure I-6. Principe de fonctionnement d'une pile PAFC [32].

I.2.3.6 Pile à combustible à carbonate fondu, MCFC

L'électrolyte utilisé dans cette technologie de pile à combustible est le sel de carbonate fondu, lequel est déposé en suspension sur une matrice céramique poreuse et inerte de *beta-alumina solid electrolyte*. Sa température de fonctionnement est supérieure à 600 °C avec un rendement électrique proche de 50 % et de 85 % en cogénération. L'absence de métaux précieux (platine) dans sa construction favorise la réduction de son coût [7]. Elle est également résistante aux polluants comme le monoxyde et le dioxyde de carbone, qui peuvent être utilisés comme combustibles [33]. Les piles MCFC sont principalement utilisées en stationnaire (génération d'électricité et cogénération dans les bâtiments et l'industrie...)

Ses applications principales sont les centrales de génération d'électricité, l'industrie et les applications militaires. Sa réaction est exprimée dans l'équation :

Pour l'anode :



Pour la cathode :



Equation bilan :

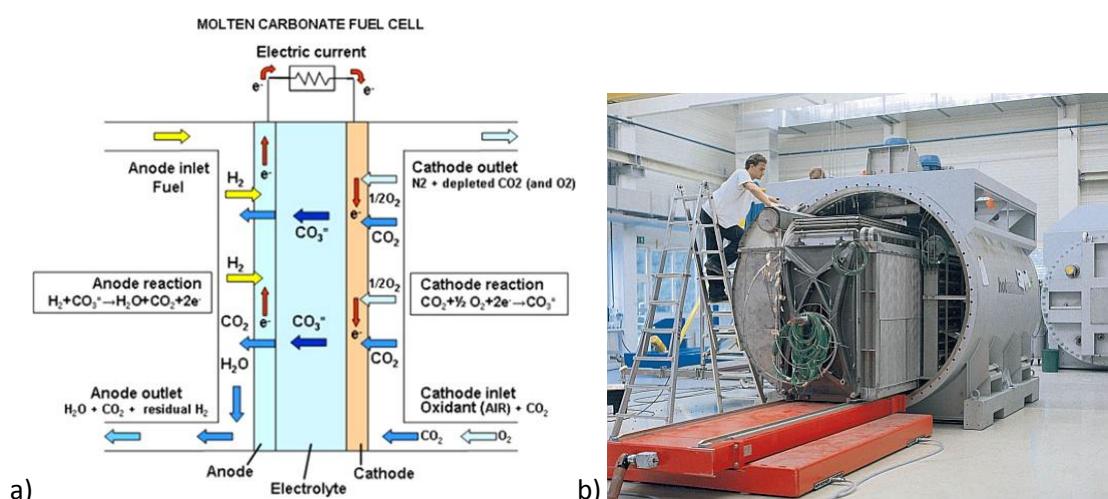


Figure I-7. a) Principe de fonctionnement d'une pile MCFC [34], b) MCFC dans un cryostat [35].

La Figure I-7a montre le schéma des réactions de la pile MCFC et la Figure I-7b montre le placement de la pile à l'intérieur d'une enceinte thermique afin de protéger l'environnement des hautes températures. L'enceinte thermique vient augmenter le volume de l'ensemble.

I.2.3.7 Pile à combustible à oxyde solide, SOFC

Ce sont des piles à haute température et leur température de fonctionnement se situe entre 500 et 1000 °C, avec un électrolyte solide de type céramique non poreux appelé zirconium (ZrO_2) résistant aux températures élevées. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des métaux précieux pour la fabrication des électrodes dans cette technologie. A l'anode, le nickel et le cobalt sont employés dans un composé céramique ($Co-ZrO_2$, $Ni-ZrO_2$).

La cathode est produite avec des céramiques composées d'yttrium ou lanthane. Les applications pour cette pile à combustible sont essentiellement stationnaires (bien qu'il existe des applications en embarquée à la marge telles que les camions frigorifiques où la pile est utilisée pour maintenir le froid même à l'arrêt du véhicule). Son rendement en cogénération atteint 70 – 80 % avec un rendement électrique de 35-45 % [36], [7]. Les réactions anodique et cathodique s'écrivent :

A l'anode :



A la cathode :



Soit l'équation bilan :



Ce type de pile à combustible peut avoir différentes formes (planaire, cylindrique) de fabrication comme l'indique la Figure I-8. Le modèle tubulaire proposé par Siemens (a) est un exemple d'une pile compacte afin de maximiser le rapport volume-production d'énergie.

Elle peut également faciliter son placement dans un cryostat. Cette pile à combustible peut également être produite dans une structure classique (b).

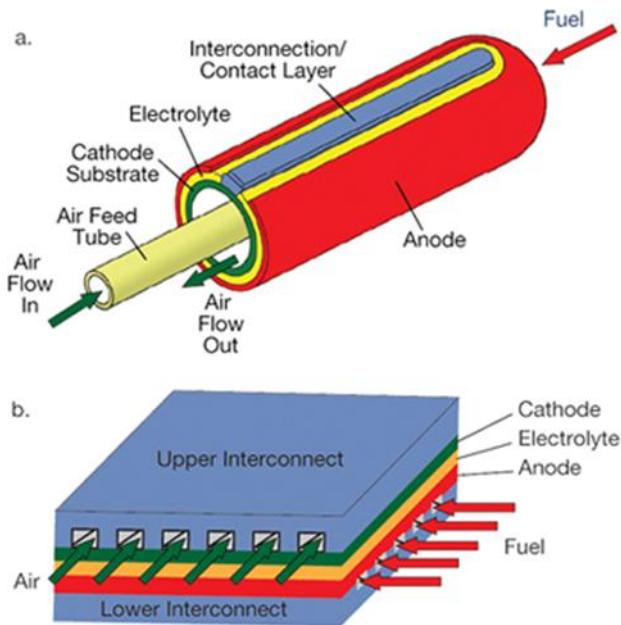


Figure I-8. a) Modèle tubulaire d'une SOFC par Siemens, b) Structure planaire d'une SOFC [37].

I.2.3.8 Pile à combustible à membrane d'échangeuse de protons, PEMFC

Les piles à combustible PEMFC « Proton exchange membrane fuel cell » ont été développées pour leur utilisation dans les missions spatiales Gemini dans les années 1960. Par la suite, l'intérêt pour cette technologie porte sur son utilisation dans le transport et sur les dispositifs mobiles. Le principe de fonctionnement est basé sur la réaction d'oxydoréduction de l'hydrogène et de l'oxygène. Les PEMFC utilisent comme électrolyte une membrane polymère qui conduit les ions H^+ d'hydrogène de l'anode vers la cathode. Elle est également étanche aux gaz et isolant électrique (évitant ainsi un court-circuit anode/cathode). Le catalyseur le plus utilisé est le platine (Pt) qui est un métal de transition très résistant aux milieux corrosifs. La nature acide de la membrane peut engendrer des dégradations aux éléments en contact direct avec elle (les électrodes). Ainsi le choix des matériaux des différents éléments en contact doit se faire en connaissance de ces contraintes notamment.

Un des problèmes fréquents des PEMFC est la gestion d'eau. Trop d'eau peut noyer la pile réduisant ainsi ses performances électriques. Trop peu d'eau peut assécher la membrane la rendant fragile. La résistance de la membrane au passage des ions d'hydrogène doit être la plus faible possible afin de minimiser la chute de tension à ses bornes et augmenter le rendement de sortie. L'épaisseur de la membrane est de l'ordre de 50 µm. La pile étant sensible à la pollution, plus précisément, le platine, au monoxyde de carbone (CO), une alimentation en gaz très purs est recommandée. Des alliages de platine avec d'autres éléments comme le ruthénium (Ru) rendent les PEMFC plus tolérantes au CO et augmentent l'activité catalytique [38], [39].

Parmi les divers matériaux développés pour la membrane, le plus utilisé est le Nafion. Il y a des PEMFC à haute température de fonctionnement de l'ordre de 220 °C, où la membrane est faite de polybenzimidazole PBI imprégné d'acide phosphorique (H_3PO_4) [40], [41].

I.2.3.8.1 Structure d'une cellule élémentaire

La Figure I-9 représente la structure d'une pile à combustible du type PEM comprenant une cellule refroidie par circulation d'eau. On peut distinguer les divers éléments constituant le cœur de la pile. La membrane est placée au centre d'une structure symétrique où l'anode et la cathode sont placées de chaque côté. On peut décrire les éléments de la manière suivante :

- Membrane : Elle doit posséder une grande conductivité ionique, mais une conductivité électronique nulle. Elle ne doit pas être perméable aux gaz. Son coût de fabrication est faible. L'humidification de la membrane doit être contrôlée.
- Cathode et anode : Elles constituent les couches actives de la PEMFC et sont le siège des réactions de réduction et d'oxydation respectivement. Elles sont disposées de part et d'autre de la membrane. C'est également là qu'est localisé le platine (sous forme de nano particules) qui catalyse la réaction.
- Couche de diffusion des gaz : Elle aide à la distribution des gaz sur les couches actives de la façon la plus homogène possible. Elle est composée par des fibres couvertes de PTFE pour la rendre hydrophobe.
- Plaques bipolaires : Elles acheminent les gaz vers les électrodes. Elles permettent également l'évacuation de l'eau produite vers l'extérieur de la PEMFC. Elles collectent les électrons produits à l'anode et les redistribuent à la cathode. La mise en série des cellules se fait à travers des plaques bipolaires.
- Plaques collectrices : Elles récupèrent le courant électrique produit pour alimenter la charge.
- Plaques terminales : Le rôle des plaques terminales est de nature mécanique. Elles doivent assurer la rigidité mécanique de l'ensemble des éléments, évitant ainsi les fuites. Elles servent de support aux divers tuyaux d'entrée - sortie de gaz et eau qui sont connectés à la PEMFC.

I.2.3.8.2 Réaction d'oxydo-réduction de la PEMFC

La PEMFC est un générateur électrique qui convertit l'énergie d'un combustible (l'hydrogène) en électricité par réaction électrochimique. L'hydrogène pur est délivré à l'anode et est oxydé, libérant des électrons et produisant des protons H^+ comme décrit en (I-20), les électrons circulent vers un circuit électrique externe.

Les protons vont traverser la membrane, vers la cathode. A l'interface membrane cathode les protons se combinent à l'oxygène et aux électrons provenant du circuit extérieur formant ainsi de l'eau. (I-21).

Oxydation :



Réduction :



Equation bilan :



I.2.3.8.3 Systèmes auxiliaires de la PEMFC

Toute pile à combustible, quelle que soit la technologie employée, a besoin de divers auxiliaires. Ils vont travailler pour maintenir la stabilité des conditions optimales de fonctionnement. Plusieurs paramètres tels que la pression des gaz entrants, la température de fonctionnement, les débits des

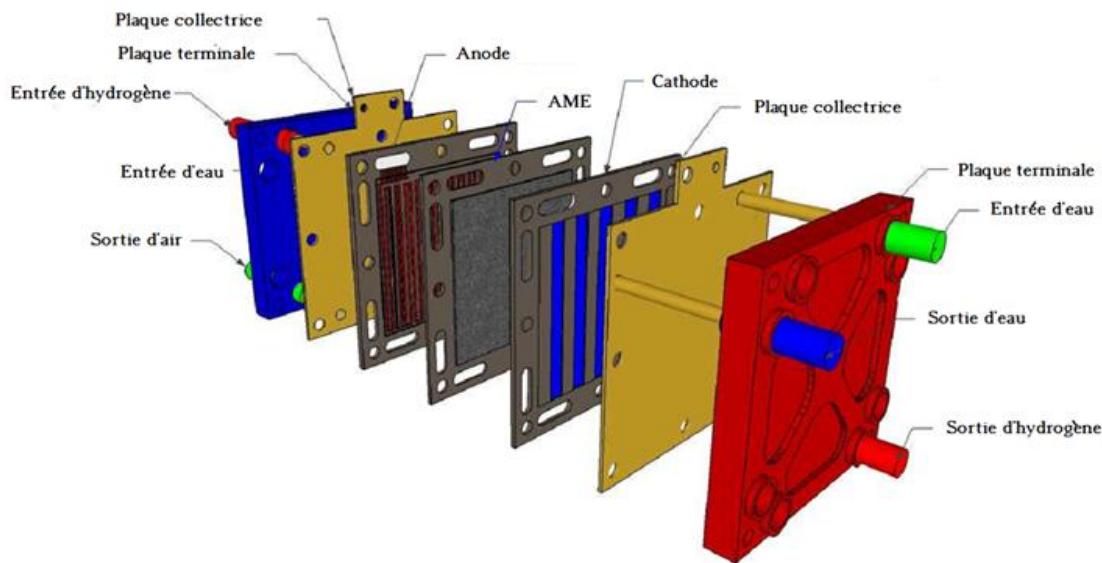


Figure I-9. Monocellule de pile à combustible de type PEM refroidie à l'eau.

gaz et l'humidité affectent fortement sur les performances de la pile et son rendement.

Pour cela, des auxiliaires de surveillance et de contrôle sont utilisés afin d'assurer le bon fonctionnement de la pile et sa pérennité, par exemple en maintenant la température de fonctionnement entre 50 °C et 90 °C et une température d'entrée des gaz proche de celle de sortie.

En effet, une différence entre les températures des gaz et le corps de la pile peut causer de la condensation d'eau dans les canaux de gaz, créant un bouchon.

Ce système doit permettre de maintenir une température homogène dans tout le volume du stack, évitant la condensation d'eau et assurant la répartition homogène de la densité de courant dans les plaques bipolaires.

D'autres types de dispositif peuvent être employés pour la récupération de l'hydrogène non consommé (économie d'hydrogène) et pour la purification de l'air d'entrée (élimination de CO).

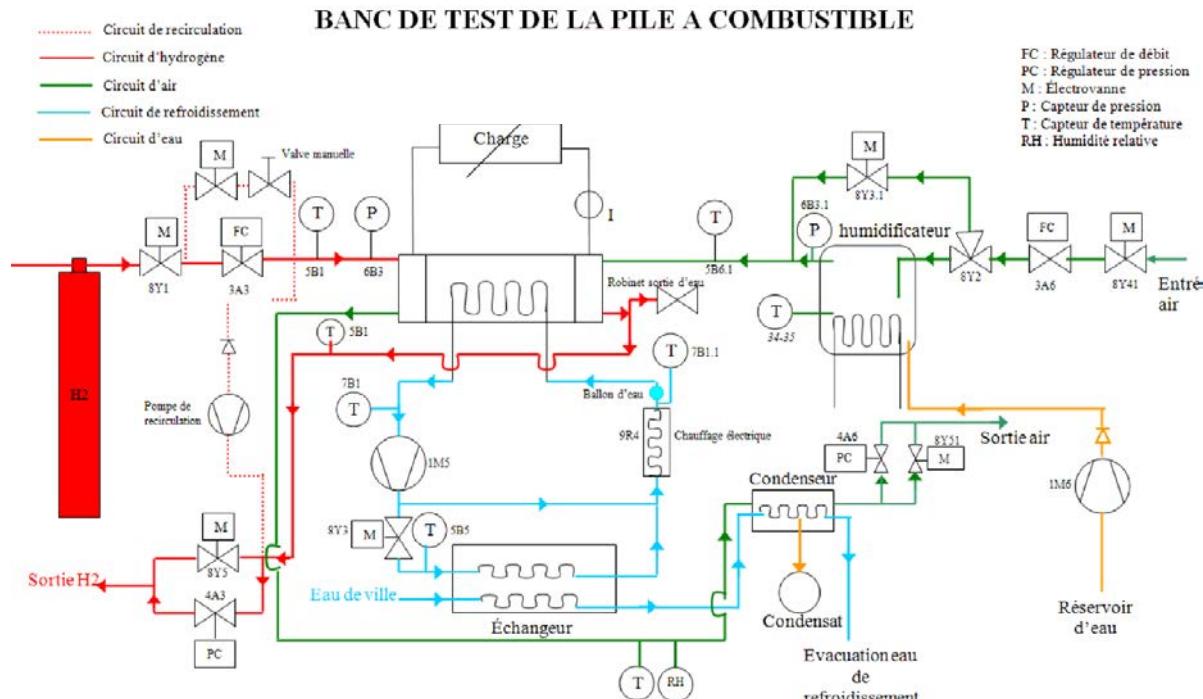


Figure I-10. Schéma d'un système pile à combustible de type PEM à 23 cellules.

Le compresseur est un organe important parmi les auxiliaires, il doit avoir un bon débit d'air sans polluant. Généralement le temps de réponse du compresseur est également un facteur très influent quant aux temps de réponse de la pile aux sollicitations dynamiques [42], [43].

La Figure I-10, présente les différents auxiliaires d'un banc de test d'une PEMFC. Ils se composent de 2 circuits de circulation de gaz et d'un circuit d'eau dans le cas d'une pile refroidie par circulation d'eau et des capteurs de température sont également mis en place en entrées et en sorties pile. Le banc présenté en Figure I-10 est un banc expérimental académique qui permet de faire notamment un bilan en eau et de travailler à différentes pressions et débits de gaz. En embarqué, le système pile peut être plus compacte en retirant certains auxiliaires et en simplifiant d'autres.

I.2.3.8.4 Modèle physico-chimique d'une PEMFC

Les modèles de la pile à combustible sont nombreux selon le type de phénomène ou d'application que l'on souhaite étudier. Le cœur de pile est le siège d'une série de réactions chimiques et physiques, une modélisation de son comportement nécessite qu'ils soient pris en compte. De plus, l'étude dynamique nécessite de modéliser le système pile proprement dit. Généralement, pour la construction du modèle, les divers phénomènes représentés par des équations aux dérivées partielles, la relation de Stefan-Maxwell [44] est employée pour décrire le transport de gaz dans les couches de diffusion. Cette loi peut être accompagnée de la loi de Darcy en présence d'un gradient de pression de gaz dans le même domaine. Dans les couches de réaction la loi de Butler-Volmer décrit les réactions

d'oxydoréductions [45], [46]. Concernant le transport d'électrons dans les électrodes et le transport d'ions dans la membrane, la loi d'Ohm est employée. Pour représenter le transport d'eau, plusieurs phénomènes sont pris en compte comme le gradient de concentration de l'eau liquide (diffusion) et le transport des molécules d'eau par les ions H⁺ dans la membrane (électro-osmose). A ces lois sont également associées des équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, et de charges électriques. Dans des modèles plus complexes où le transfert de la chaleur reste un élément important, la loi de Fourier est utilisée [47].

Ce type de représentation précédemment décrite, est considéré comme un modèle local. Considérant les phénomènes domaine par domaine, on peut écrire :

Les canaux acheminent les gaz vers les couches de diffusion. La composition des gaz dépend de celle fournie par les sources de gaz et de leur consommation à l'intérieur de la pile. Dans la modélisation, cette composition peut être imposée comme constante pendant la totalité de la réaction ou peut être considérée comme variable en fonction des autres paramètres de fonctionnement si besoin. Des paramètres comme les pressions d'entrée et de sortie, la température des gaz, l'humidité, le volume des canaux, sont considérés. Le nombre de variable est donc considérable. Généralement des hypothèses simplificatrices de fonctionnement sont utilisées pour réduire la complexité de formulation [48], [49].

Couches de diffusion : Elles sont responsables de la diffusion des mélanges des gaz dans les couches de réaction et de la sortie de l'eau produite par la réaction d'oxydo-réduction vers les canaux. Donc dans les couches de diffusion, les gaz et l'eau sont ensemble dans la même région. Les paramètres à prendre en compte pour la modélisation des couches de diffusion doivent intégrer les phénomènes liés à la convection, à la condensation et l'évaporation de l'eau en fonction de la température, pression, diffusion des gaz ainsi qu'à la nature du milieu (poreux) [50].

Couches de réaction : Elles sont le siège des réactions d'oxydation de l'hydrogène et la réduction de l'oxygène. Elles sont placées de chaque côté de la membrane. La pression et le flux des gaz sont fortement affectés en raison de l'imperméabilité aux gaz de la membrane. D'autres facteurs jouent un rôle dans la modélisation des couches de réaction, comme la nature et la composition du catalyseur, la température du milieu et la concentration d'eau.

La membrane est l'élément central de la pile, sa spécificité principale est la conduction des ions d'hydrogène. Son modèle peut se réduire à la détermination de sa résistance électrique en fonction de l'humidité. Un modèle plus complet sert à quantifier l'eau qu'elle contient. La Figure I-11 synthétise les domaines d'étude, lesquels ont été réduits en fonction des symétries géométriques existantes. Le modèle physico-chimique peut prendre des dimensions très imposantes si toutes les variables qui interviennent dans le fonctionnement de la PEMFC sont prises en compte. Cette problématique se traduit par un temps de calcul élevé et une contrainte en termes de puissance de calcul. La plupart du temps, on ne peut pas prendre en compte les variables dans leur intégralité. Pour cela, des hypothèses simplificatrices sont employées.

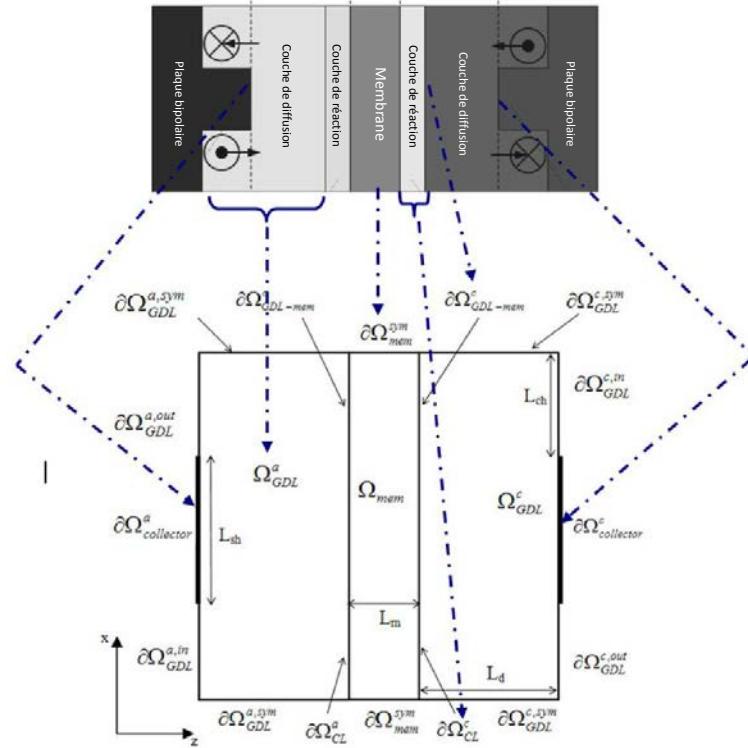


Figure I-11. Domaines d'étude simplifiés et les conditions dans les frontières, plan de coupe x0z.

La température est un facteur qui intervient dans tous les domaines, et le fait que plusieurs paramètres dépendent de la température contribue à la complexité du modèle. Une température considérée comme constante dans l'ensemble de la PEMFC permet la réduction du temps de calcul. Dans le cas des piles régulées en température par circulation d'eau, cette hypothèse est vérifiée. Un modèle physico-chimique peut être utilisé pour l'optimisation des dimensions des différentes couches ou la quantité de catalyseur à employer.

Ces modèles restent limités, mais permettent une bonne capacité de prédiction du comportement de la pile.

I.2.3.8.5 Modèle circuit électrique d'une PEMFC

Un deuxième type de modèle est utilisé dans la modélisation de piles à combustible, les modèles de type circuit électrique. Ils sont généralement destinés à un usage système, c'est-à-dire qu'ils ont pour objectif l'étude du fonctionnement d'un système électrique comprenant une pile à combustible. Les modèles rencontrés, dans la littérature, vont du plus simple modèle dont une représentation schématique est donnée en Figure I-12 (où les éléments sont montrés : R_{OHM} : Résistance de membrane et de contact, R_{ACT} : Résistance d'activation, R_{CODE} : Résistance de concentration, E_{NERST} : Tension de Nerst, C_{DC} : Capacités de double couche, V_{fc} : Tension de pile) à des modèles plus complexes voire sophistiqués [51], [52], [53].

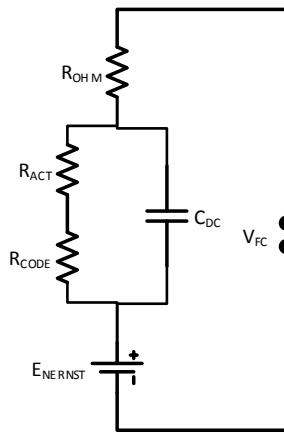


Figure I-12. Modèle dynamique circuit électrique équivalent d'une pile à combustible de type PEM [54].

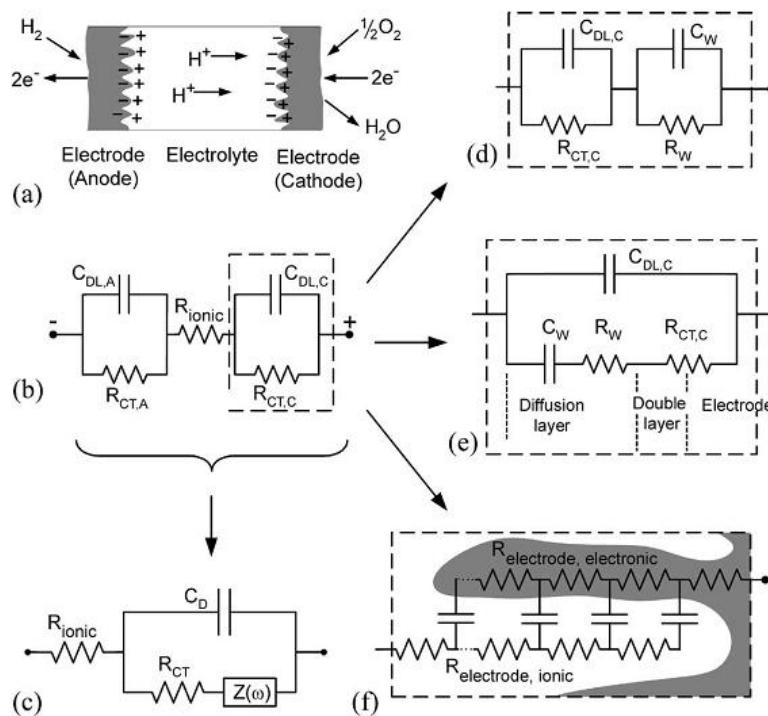


Figure I-13. Différents modèles électriques de la PEMFC [55].

La Figure I-13 illustre le schéma de principe d'une cellule électrochimique avec la représentation de la réaction d'oxydo-réduction. La Figure I-13b est appelée la représentation de Randel. Les différentes variantes qui peuvent en être faites selon le choix de granularité voulue sont montrées en Figure I-13d à Figure I-13f. A titre d'exemple, l'étude de la couche de réaction est souvent menée en

approximant l'impédance de Warburg, notée $Z(\omega)$ par une ligne de transmission comme indiquée en Figure I-13f.

L'identification des éléments du circuit électrique équivalent est mesurée par différents techniques de caractérisation expérimentale dont la plus connue et la plus répandue est la spectroscopie d'impédance électrochimique. Cette méthode de caractérisation consiste à superposer à la composante continue du courant (respectivement de la tension) une composante sinusoïdale de fréquence variable (quelques Hz à quelques kHz) et de mesurer l'amplitude des oscillations en tension (respectivement en courant).

Le module de l'impédance complexe est alors obtenu en faisant le rapport de la variation de tension sur la variation du courant et son argument correspond au déphasage entre le courant et la tension. On trace ainsi, sur un diagramme de Nyquist, pour chaque valeur moyenne de courant de pile (respectivement de tension) le spectre d'impédance.

En raison de la méthode de caractérisation, ces modèles sont qualifiés de « petits signaux » et ne sont donc valables qu'autour d'un point de fonctionnement. L'objectif est donc d'établir un modèle équivalent circuit électrique valable quel que soit le point de fonctionnement et dont les éléments seront calculés à partir des phénomènes physico-chimiques dont la pile est le siège (transport de masse et réaction d'oxydoréduction) et ainsi de contourner les modèles classiques semi-empiriques existants. Le principal avantage de cette modélisation est l'implémentation dans des logiciels de simulation de type circuit, par exemple Matlab-Simulink.

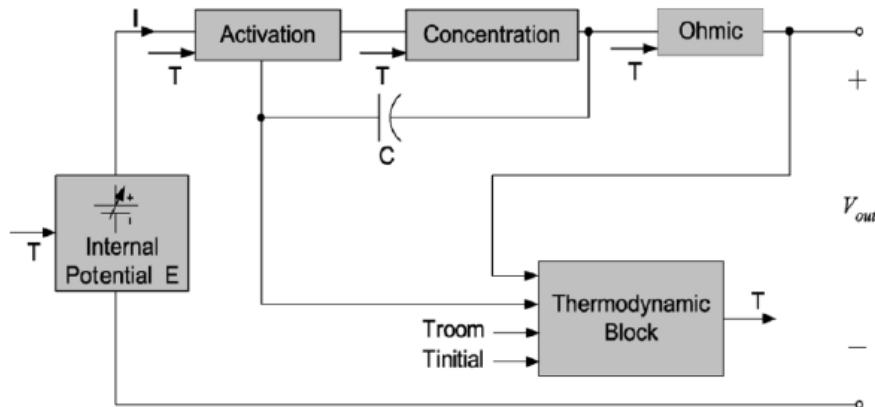


Figure I-14. Diagramme de construction d'un modèle électrique de pile à combustible sous logiciel PSPICE.

Par exemple, l'on peut citer C. Wang et al. [56] qui ont établi un modèle de pile à combustible implantable dans un environnement Simulink® ou PSpice® (logiciels dédiés à des applications systèmes électrique). La Figure I-14 illustre comment la tension de sortie de pile est calculée à partir des différentes chutes de tension (d'activation, de concentration et ohmiques) dans ce schéma de block.

A chacune de ces chutes correspond un circuit électrique équivalent : (Figure I-15 à Figure I-18). Nous avons choisi ce type d'approche pour nos travaux, en tenant compte des temps de réponse de l'alimentation en gaz de la pile par leurs auxiliaires.

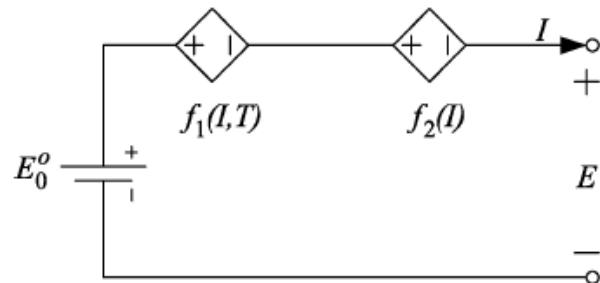


Figure I-15. Circuit électrique équivalent pour déterminer la tension à vide de la pile.

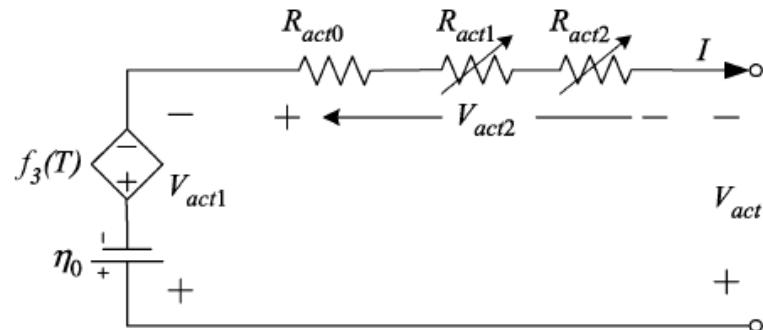


Figure I-16. Circuit électrique équivalent correspondant aux chutes d'activation.

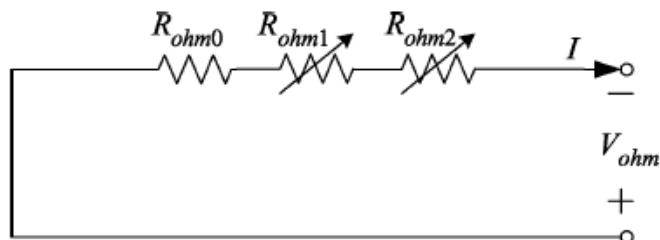


Figure I-17. Circuit électrique équivalent correspondant aux chutes ohmiques.

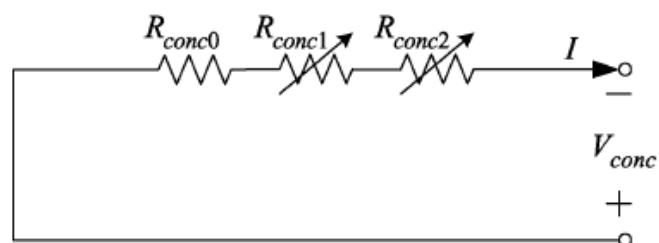


Figure I-18. Circuit électrique équivalent correspondant aux chutes de concentration.

Plusieurs paramètres sont considérés constants tels que la température, la résistance de la membrane ou encore la pression des gaz d'entrée.

Les hypothèses utilisées pour le modèle sont :

1. Le débit d'air est considéré comme constant
2. La température est considérée comme étant constante dans toute la cellule
3. L'eau est sous forme de vapeur sans changement de phase
4. La résistance électrique de la membrane est constante.
5. La membrane est imperméable aux gaz et ne permet pas le transport d'électrons
6. Il n'y a pas de perte de charge dans les canaux
7. Les capacités de double couche (interface membrane-électrode) sont considérées comme étant constantes

Le modèle 1D a été établi en tenant compte de la loi de diffusion des gaz dans les couches de diffusion cathodiques. Les différents phénomènes physiques du cœur de pile sont représentés par des éléments tels que des résistances électriques, des capacités et des sources de tension. Ces éléments peuvent reproduire de façon assez fidèle le comportement global de la pile.

Le modèle ainsi établi est décrit en détail dans ce qui suit.

I.2.3.8.6 Fonctionnement comme source de tension

Le mode de fonctionnement en source de tension est l'utilisation la plus répandue de la pile à combustible. En circuit ouvert, lorsque la pile est alimentée en réactant (hydrogène et oxygène), la tension à vide mesurée sur chaque cellule est d'environ 1V. En conséquence de quoi, pour augmenter la tension d'une pile à combustible, plusieurs cellules sont mises en série électrique, constituant ainsi ce qu'on appelle un stack.

Cela se traduit par une augmentation de volume et de masse du stack. La Figure I-19 présente une caractéristique statique de pile à combustible où l'on peut distinguer les pertes d'activation et les pertes ohmiques. On peut identifier le point de fonctionnement en source de tension qui se situe sur la partie linéaire de la courbe de polarisation où les chutes ohmiques sont prépondérantes (Zone 2). En raison de contraintes mécaniques et afin d'assurer une bonne étanchéité du stack, le nombre de cellules à mettre en série est limité, ce qui nécessite, dans la plupart des cas, d'avoir recours à des convertisseurs de puissance afin de conditionner correctement la tension vers la charge. Selon l'utilisation visée, il est nécessaire d'augmenter la valeur de tension plusieurs fois la valeur produite par le stack. Des convertisseurs DC-DC du type Boost et Flyback [57], [58] ont cette fonction et peuvent être accompagnés par des onduleurs en série pour la génération de tension alternative. Ces configurations sont montrées dans la Figure I-20 où on peut distinguer en (a) un seul étage de conversion où l'onduleur est relié directement à la pile à combustible et la tension alternative est augmentée par le biais d'un transformateur et (b) pour lequel un montage de plusieurs étages de conversion est employé. Tous ces systèmes de conditionnement de la tension se traduisent par une augmentation dans les

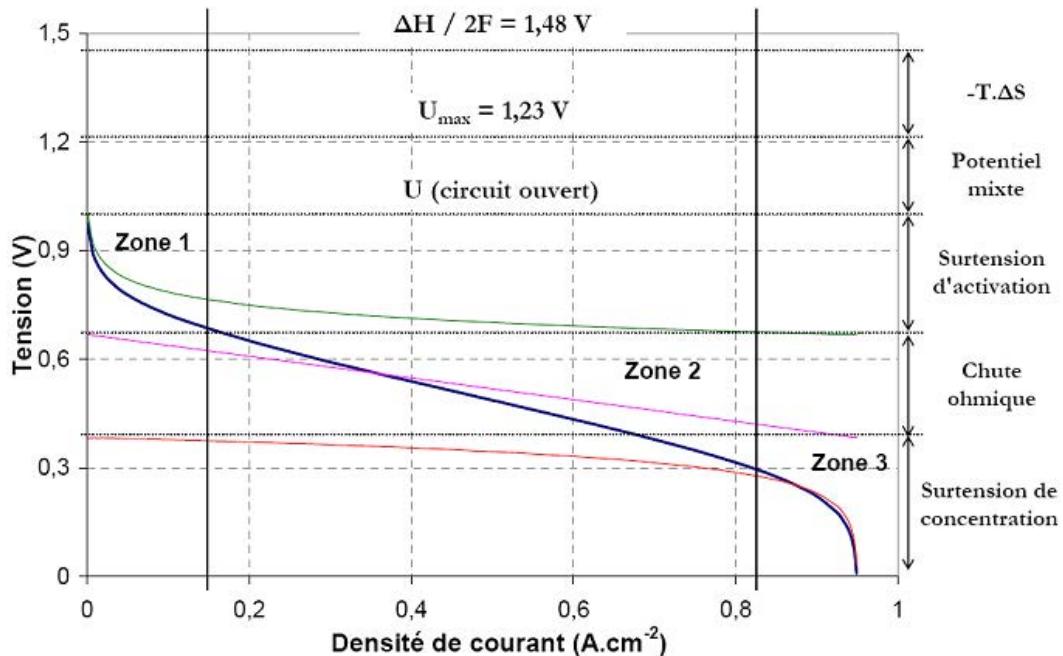


Figure I-19. Courbe de polarisation d'une PEM avec ses zones de fonctionnement.

coûts d'installation, de poids et de maintenance pour les systèmes de pile à combustible. Le découpage hautes fréquences peut faire vieillir prématulement la pile à combustible [59].

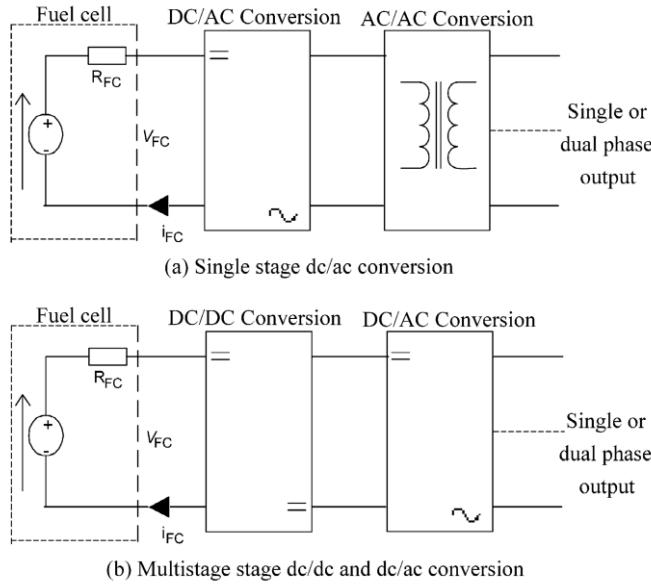


Figure I-20. Deux types de systèmes de conversion pour piles à combustible.

I.2.3.8.7 Fonctionnement en source de courant

Les nombreuses études faites sur la pile à combustible sont dédiées au fonctionnement classique en générateur de tension, le mode de fonctionnement en source de courant n'était pas considéré comme un avantage puisqu'on se trouve sur la zone 3 (Figure I-19) correspondant à un fonctionnement en limitation de courant. Dans la majorité des applications pour les piles à combustible, la visée de valeur reste de maximiser la puissance électrique récupérable. Par conséquent, ce mode de fonctionnement a été peu étudié étant considéré comme une défaillance de fonctionnement et donc comme un mode de fonctionnement non souhaité. Ce fonctionnement en source de courant est représenté dans la Zone 3 de la Figure I-19, où la densité de courant produite par la pile à combustible est maximale. La tension générée par la pile est alors très basse et peut atteindre zéro volt. Cette chute de tension est produite par les diverses pertes : d'activation, ohmiques et concentration, qui vont être maximales dans cette zone.

Le mode de fonctionnement en source de courant a été mis en évidence lors d'une expérience d'hybridation directe d'une pile à combustible PEM avec un banc de supercapacités préalablement déchargés [60]. Durant cette expérience, le régime transitoire de la charge des supercapacités a permis de montrer que la pile à combustible fournit du courant proportionnellement à la variation du débit d'hydrogène, fixé par I_{set} (Figure I-21). Autrement dit, le courant de pile peut être contrôlé par le débit d'hydrogène lorsque le point de fonctionnement se trouve dans la zone 3 de la courbe $V(I)$ (Figure

I-19). Sur les courbes de tension et courant, quatre zones apparaissent : La zone (a) de fonctionnement à vide de la pile à combustible, la tension V_{oc} est maximale et la valeur du courant est nulle ; La zone (b) où une surintensité est produite par la quantité des gaz emmagasinée dans les tuyaux d'alimentation. Une fois le surplus consommé, on atteint un régime stationnaire, où $I_{fc} = I_{set}$ qui correspond au fonctionnement en source de courant représenté par la zone (c), I_{fc} étant le courant réel débité par la pile et I_{set} le courant de consigne fixant également le débit de gaz ; et pour finaliser avec la zone (d), où la supercapacité peut se considérer comme chargée, I_{fc} , tend à s'annuler et $V_{fc} = V_{oc}$, permettant au courant et à la tension d'arriver au régime permanent.

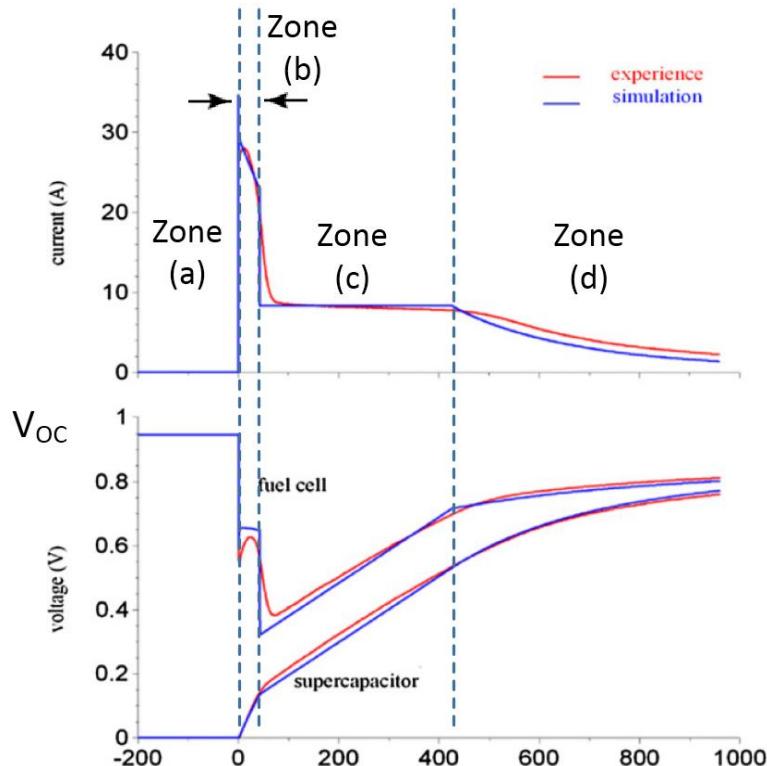


Figure I-21. Simulation (courbes bleues) vs résultats expérimentaux (courbes rouges) de courant et de tension du couplage PEMFC – supercapacitor.

La zone(c) présente le comportement le plus intéressant et fait l'objet de notre étude : la courbe en rouge montre le résultat expérimental où le fonctionnement en source de courant a été observé dans l'intervalle de 40 à 430 s. Durant cet intervalle de temps, le courant fourni par la pile à combustible a suivi la valeur de la consigne de 10 A fixée par le débit d'hydrogène. A $t = 0$ s, lorsqu'on associe la pile aux supercapacités déchargées (préalablement), la pile est en court-circuit.

On constate donc que le contrôle en courant est assuré tant que la tension de pile est inférieure à une certaine tension seuil pour une alimentation en hydrogène dans les proportions stœchiométriques [60].

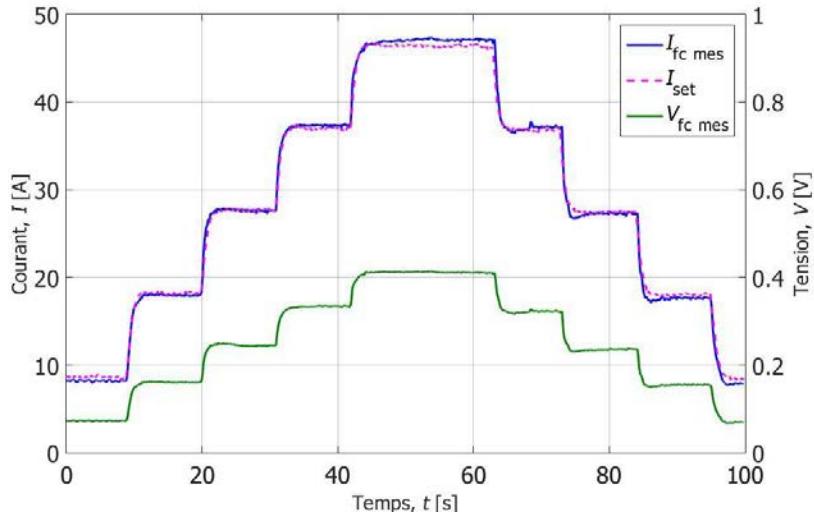


Figure I-22. Résultats expérimentaux d'une PEMFC en court-circuit, le courant de la pile est contrôlé par le débit d'hydrogène [61].

Cette première expérience a permis d'ouvrir la voie sur le potentiel d'un tel mode de fonctionnement, afin de vérifier les conditions opératoires nécessaires au fonctionnement en source de courant, une deuxième expérience est menée, cette fois sur un court-circuit franc (on relie directement l'anode à la cathode). Les résultats de mesure sont montrés sur la Figure I-22, où quatre échelons de courant de consigne de 10 A, de 8 à 48 A (courbe rose) ont été réalisés. La courbe bleue représente le courant produit par la pile à combustible (A). La courbe en vert est la tension de la pile à combustible. Dans cette expérience, on confirme que le courant produit par la pile à combustible en conditions de court-circuit est contrôlé par débit d'hydrogène. On note que le courant de pile est parfaitement continu et stable. La tension de pile n'est pas tout à fait nulle en raison de l'impédance de câblage. Ce dernier point est important pour dimensionner correctement un banc pile destiné à un usage en source de courant.

Il reste à confirmer si ce mode de fonctionnement peut affecter significativement la durée de vie d'une PEMFC ou dégrader son état de santé. Des essais expérimentaux ont montré une faible dégradation dans les performances de la PEMFC dans les conditions de court-circuit après une durée de 2000 h de fonctionnement [62]. La stoechiométrie en hydrogène a dû être augmentée dans les dernières heures de fonctionnement afin de compenser les dégradations subies par la membrane et les couches de diffusion, afin de maintenir le courant constant pendant la totalité du test. Une longue étude est nécessaire pour comparer la dégradation de la PEMFC fonctionnant en court-circuit à celles fonctionnant en mode usuel.

Dans les applications possibles de la pile à combustible comme source de courant, nous avons pensé naturellement (en raison de l'expertise du laboratoire dans ce domaine) à l'alimentation de systèmes supraconducteurs [61]. Une première étude de faisabilité a été menée sur une petite bobine de 4 mH (et de résistance nulle).

Nous présenterons dans ce qui suit les matériaux supraconducteurs et les aimants vectoriels.

I.3 Les supraconducteurs

I.3.1 Brève historique des matériaux supraconducteurs

Les supraconducteurs sont découverts en 1911 par Heike Kamerlingh Onnes pendant des essais sur la résistivité du mercure (Hg) à basse température. Il est observé une chute subite de la résistance électrique quand la température arrive à 4,15 K [63]. L'année suivante, le plomb (Pb) et l'étain (Sn) sont confirmés comme supraconducteurs par Onnes. Une autre caractéristique importante des supraconducteurs, la répulsion du champ magnétique, est observée sur un échantillon de plomb (Pb) en 1933 par Walter Meissner et Robert Ochsenfeld. L'effet Meissner, connu aujourd'hui, est utilisé pour expliquer, en partie, la lévitation magnétique.

Après plusieurs théories inachevées, il faut attendre jusqu'en 1957 pour que la physique puisse donner une explication scientifique au phénomène de la supraconductivité. Ce sont les physiciens John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer qui expliquent la supraconductivité comme un phénomène quantique, donc mesurable. Cette théorie explique que les électrons se déplacent par paires (paires de Cooper) à travers le supraconducteur. Cette théorie permet aux chercheurs de s'orienter vers les matériaux pouvant reproduire la supraconductivité. En 1986, les recherches portent sur la découverte des supraconducteurs à Haute Température critique (HTc ou HTS) par Johannes Georg Bednorz et Alex Muller ingénieurs chez IBM [64]. Ce nouveau supraconducteur est composé d'un alliage de Baryum (Ba) Lanthane (La) Cuivre (Cu) et Oxygène (O) dont la température critique est augmentée à 34 K. Puis d'autres éléments sont étudiés pour substituer le lanthane. Dans ce même contexte, on assiste à la naissance des oxydes mixtes de Baryum de Cuivre et d'Yttrium (YBaCuO, souvent abrégé « YBCO ») [65], dont la température critique est de 93 K. L'YBCO pouvait alors être employé avec de l'azote liquide comme réfrigérant. La découverte de ces matériaux a permis de mettre en évidence la relation entre la pression et la température sur la supraconductivité [66], dirigeant les recherches vers l'emploi de la pression dans la conception des supraconducteurs.

Ce fut une révolution d'échapper aux températures de l'hélium liquide pour utiliser un matériau dans l'état supraconducteur, ce qui a réduit énormément le coût du refroidissement. Aujourd'hui, un des objectifs le plus intéressant pour les chercheurs dans la physique de la supraconductivité est de trouver des matériaux pouvant acquérir l'état supraconducteur à des températures proches de la température ambiante : 300 K [67]. Mais les dernières découvertes ne montrent pas de résultats satisfaisants [68], [69] pour leur utilisation dans l'électrotechnique où des fortes densités de courant et champ magnétique sont nécessaires [70]. Une augmentation de la température d'utilisation des supraconducteurs implique que le système de cryogénie peut être simplifié, ce qui se traduit par la généralisation de l'emploi des matériaux supraconducteurs dans diverses applications.

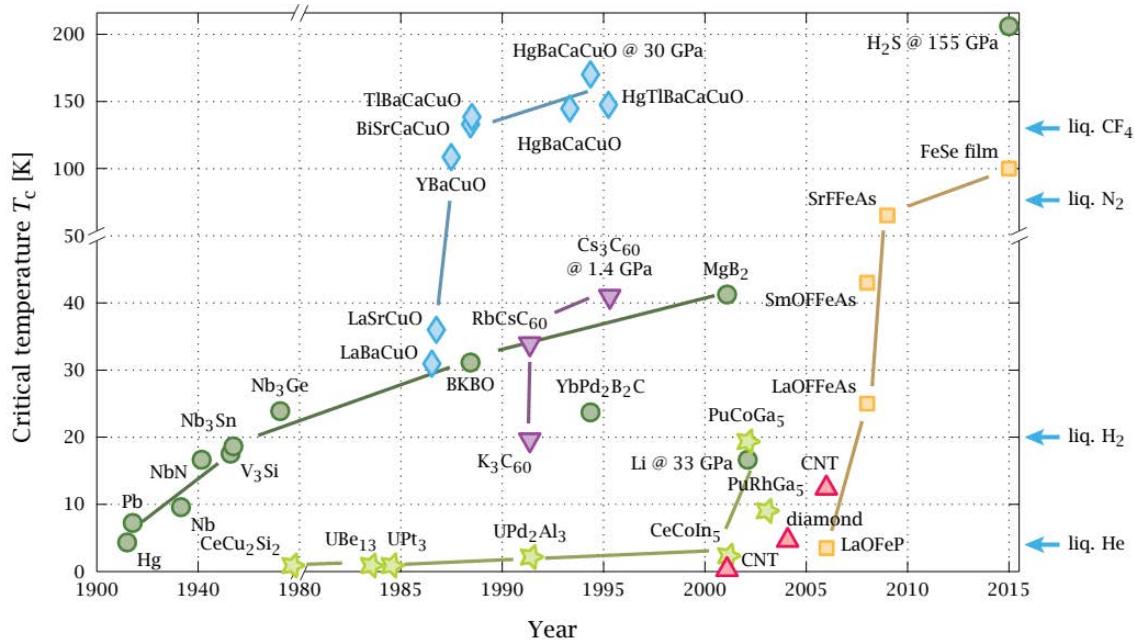


Figure I-23. Chronologie des matériaux supraconducteurs. Evolution de la température critique au cours des années [71].

Les principaux matériaux supraconducteurs sont montrés dans la Figure I-23 en fonction de l'année de leur découverte. On peut apprécier que les éléments supraconducteurs soient les premiers à être découverts, suivis par les premiers composés supraconducteurs. L'impact produit par la découverte des céramiques REBCO dans les années 80 a ouvert les portes aux supraconducteurs dans de nouvelles applications (e.g. écrantage magnétique, aimants supraconducteurs). Une partie des matériaux a besoin des hautes pressions pour acquérir l'état supraconducteur. Le plus récent, le sulfure d'hydrogène H₂S, est devenu supraconducteur avec une pression de 150 GPa et une température critique de 200 K [71].

Il existe certaines grandeurs physiques qui déterminent la présence ou pas de l'état supraconducteur. Ces grandeurs sont appelées grandeurs critiques. Nous les présenterons dans le paragraphe suivant.

I.3.2 Grandeurs physiques de la supraconductivité

Afin de rendre compréhensibles les concepts que nous allons présenter dans cette section, on ne les considèrera que pour une catégorie de supraconducteur, les supraconducteurs de type I.

I.3.2.1 La température critique

Pour les conducteurs électriques, la résistivité change en fonction de la température. C'est-à-dire que la résistivité décroît en même temps que la température, jusqu'à avoir une valeur minimale. Dans les éléments supraconducteurs de type I, pour une valeur précise de température, cette résistivité devient zéro et le courant peut circuler sans dissipation d'énergie. Cette valeur de température reçoit le nom de température critique (T_c) [72].

Une des explications de ce phénomène est montrée dans la théorie BCS, où les atomes qui forment le réseau cristallin du matériau vont acquérir une énergie cinétique faible, ainsi les vibrations du réseau d'atomes diminuent lorsque la température décroît. Cette disposition des atomes favorise le groupement en paires d'électrons, les paires de Cooper. La circulation des électrons dans cette condition se fait alors sans résistance. Quand la température augmente, les vibrations du réseau cristallin augmentent aussi. Avec cette augmentation de l'énergie cinétique des atomes, les paires de Cooper vont être séparées et les électrons vont avoir une circulation désordonnée et le matériau passe de l'état supraconducteur à l'état normal (Figure I-24).

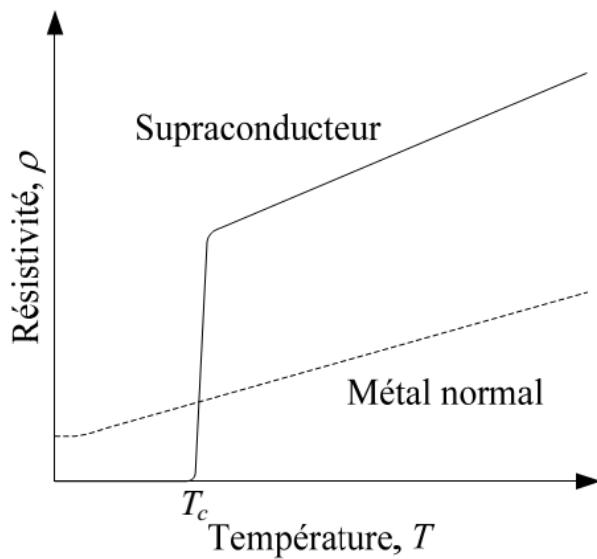


Figure I-24. Résistivité d'un supraconducteur et résistivité d'un conducteur électrique en fonction de la température [75].

Cette théorie facilite la compréhension de ce phénomène, en revanche elle n'explique pas le comportement de tous les supraconducteurs et jusqu'à maintenant, les supraconducteurs céramiques ne font pas l'objet de théorie expliquant leur comportement [73]. En revanche, la théorie BCS a prédict le comportement supraconducteur des matériaux avec des atomes légers (faible masse atomique), ceci conduisant à l'hypothèse de supraconductivité de l'hydrogène métallique (conducteur électrique sous hautes pressions) à la température ambiante, qui a été confirmée avec la mise en évidence de supraconductivité sur le sulfure d'hydrogène [74]. En conclusion, la théorie BCS peut identifier certains matériaux potentiellement supraconducteurs même à hautes températures.

1.3.2.2 Le champ magnétique critique

Avec la température critique, on trouve une autre grandeur particulièrement importante pour les supraconducteurs. Cette grandeur est appelée champ magnétique critique (H_c). Les supraconducteurs peuvent être soumis à leur propre champ magnétique lorsqu'ils transportent du courant, ou à des champs magnétiques extérieurs.

Dans l'état supraconducteur, les lignes de champ sont expulsées et contournent le matériau (Effet Meissner) Figure I-25a. Si le champ appliqué augmente, les lignes de champ vont pénétrer le matériau même si sa température se trouve au-dessous de la température critique.

Une fois le matériau pénétré par les lignes de champ, l'état supraconducteur est détruit (Figure I-25b). Pour des raisons pratiques, les valeurs de champ critique peuvent être exprimées en teslas (T), e.g. avec l'aluminium qui possède un champ critique H_c de l'ordre de 10,5 mT @ 1,2 K.

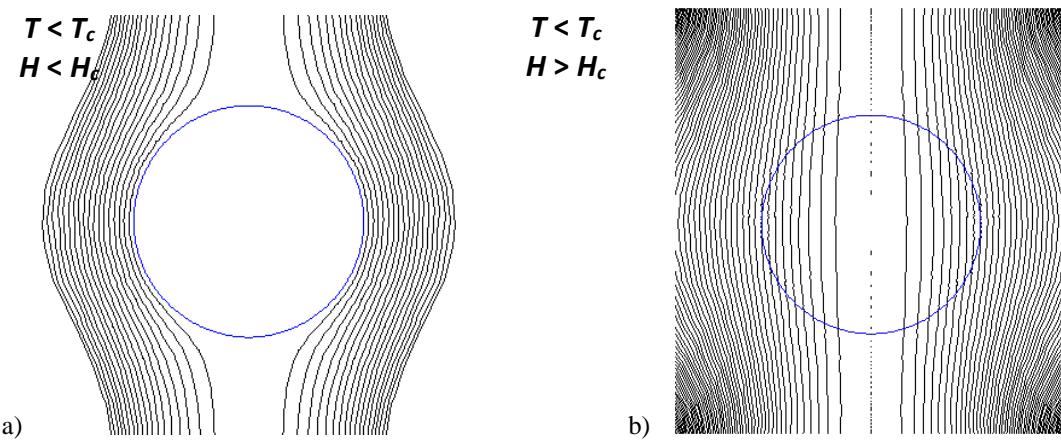


Figure I-25. a) Effet Meissner, les lignes de champ sont expulsées. b) Les lignes de champ pénètrent le matériau et l'état supraconducteur est détruit.

Le champ magnétique devient alors un paramètre déterminant de l'état supraconducteur et il a une interdépendance avec la température. L'équation (I-23), connue comme la loi de the Tuyn, est employée pour expliquer la relation entre le champ et la température critique dans les supraconducteurs de type I, avec H_{c0} le champ critique à 0 K.

$$H_c = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (\text{I-23})$$

Donc, H_{c0} et T_c sont des paramètres d'une fonction $H_c(T)$ qui définit une région où le matériau trouve l'état supraconducteur. La Figure I-26 représente le diagramme empirique de phase des supraconducteurs de type I.

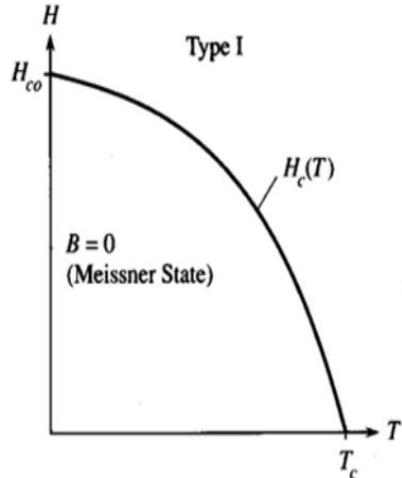


Figure I-26. Diagramme de phase des matériaux supraconducteurs de type I. Champ magnétique critique H_c en fonction de la température critique [64].

I.3.2.3 La densité de courant critique

Une troisième grandeur physique liée aux supraconducteurs est la densité de courant critique, J_c . Comme nous l'avons décrit précédemment, la valeur critique indique le point au-delà duquel le matériau revient à l'état normal. Comme cette densité de courant produit un champ magnétique propre, la valeur du champ critique dépend de cette valeur de champ propre en plus la valeur du champ magnétique qui lui est appliqué. Un supraconducteur a donc une valeur de densité de courant assurant la permanence de l'état supraconducteur. En conclusion, la densité de courant devient aussi une grandeur qui a une interaction avec le champ magnétique critique et la température critique. On peut alors définir une région essentielle pour la conservation de l'état supraconducteur, appelée surface critique (Figure I-27). Chaque matériau supraconducteur possède sa propre surface critique.

Ces surfaces critiques dépendent des éléments qui composent le matériau supraconducteur et de la méthode de fabrication.

On peut classifier les supraconducteurs par la valeur de leur température critique : les supraconducteurs à basse température critique (*Low Temperature Superconductor*, LTS) et les supraconducteurs à haute température critique (*High Temperature Superconductor*, HTS). On peut également les classifier en deux types: supraconducteurs de type I et les supraconducteurs de type II. La théorie de Ginzbourg-Landau, est une des premières théories phénoménologiques des supraconducteurs. Cette théorie explique la supraconductivité du point de vue macroscopique d'un matériau et a permis de définir les types de supraconducteurs. Elle a établi la constante de Ginzbourg-Landau : $\kappa = \lambda/\xi$, qui est la relation entre l'épaisseur de pénétration λ et la largeur de cohérence ξ . Cette constante permet, par la mesure de ces paramètres physiques, de classifier les différents types de supraconducteurs. Quand la valeur de κ est inférieure de $1/\sqrt{2}$, le supraconducteur est de type I et pour une valeur de κ supérieure de $1/\sqrt{2}$, le supraconducteur est du type II. Par la suite, on va décrire les principales caractéristiques des différents types de supraconducteurs.

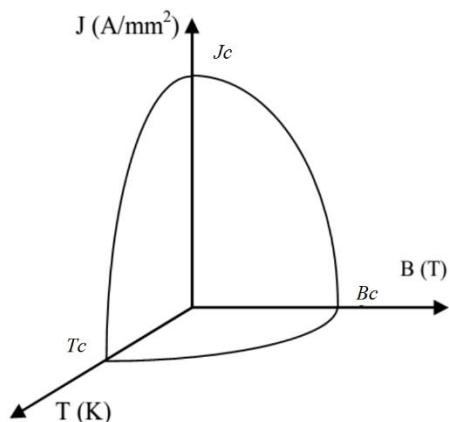


Figure I-27. Surface critique des supraconducteurs de type I.

I.3.3 Types de supraconducteurs

I.3.3.1 Supraconducteurs de type I

Les supraconducteurs de type I forment une famille de matériaux composés principalement par des éléments métalliques purs à l'exception de l'or, du cuivre et de l'argent (très bons conducteurs électriques) dont la structure atomique empêche la formation de paires de Cooper. Leur principale caractéristique est la présence d'un seul seuil critique de champ magnétique H_c (Figure I-26), où le matériau change d'une phase normale à supraconductrice et vice-versa.

Une autre caractéristique importante est le diamagnétisme parfait ou l'effet Meissner. Les supraconducteurs à l'intérieur du matériau vont induire un champ magnétique qui s'oppose parfaitement au champ appliqué extérieur, permettant son expulsion quasi totale.

Le champ magnétique ne peut être présent que dans la longueur de pénétration de London λ_L de l'ordre de la centaine de nanomètres placée à la surface du volume du matériau. Le Tableau I-1 montre quelques supraconducteurs de type I, ceux ayant les températures critiques les plus élevées.

Il faut noter que les valeurs de T_c et H_c requises pour conserver l'état supraconducteur pour un type I sont trop basses pour que ces matériaux soient facilement utilisables hors laboratoire.

Tableau I-1: Quelques supraconducteurs de type I avec leurs valeurs critiques

Matériaux	Formule générale	Température critique T_c [K]	Champ magnétique critique H_c [mT]
Aluminium	Al	1,200	10,5
Thallium	Tl	2,380	17,7
Etain	Sn	3,722	30,5
Mercure	Hg	4,153	41,0
Plomb	Pb	7,193	80,3

I.3.3.2 Supraconducteurs de type II

Il existe une deuxième catégorie de supraconducteurs, appelés de type II. Ils ont la particularité de posséder deux champs critiques H_{c1} et H_{c2} . H_{c2} est généralement très grand par rapport à H_{c1} . Pour l'YBCO, ces valeurs ont été mesurées : $H_{c1} = 22-26$ mT @ 56 K et $H_{c2} = 22$ T @ 61 K, [76]. Quand le champ magnétique extérieur H est inférieur à H_{c2} le matériau est considéré dans l'état supraconducteur, dans le cas contraire il est dans l'état normal. [76]

La valeur de H_{c2} peut être de plusieurs teslas, ce qui rend les types II plus appropriés pour des applications comme le transport de courant et la création de champs magnétiques.

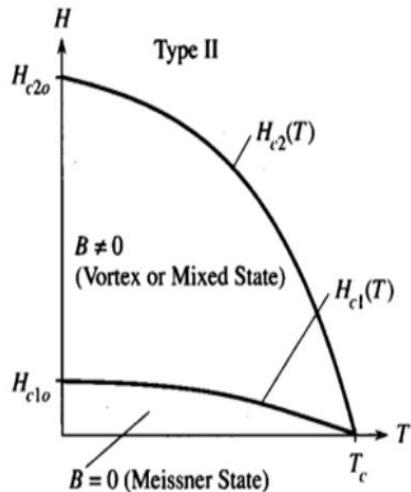


Figure I-28. Diagramme de phase des supraconducteurs type II, [77].

La Figure I-28 montre le diagramme de phase avec l'indication des différentes zones opératoires. Quand le champ magnétique appliqué H est inférieur à H_{c1} le supraconducteur présente un diamagnétisme parfait. Sa résistance est zéro et il se comporte comme un type I.

Si H se trouve entre H_{c1} et H_{c2} il est dans l'état mixte, dans lequel le matériau perd le diamagnétisme parfait et l'écrantage magnétique est partiel.

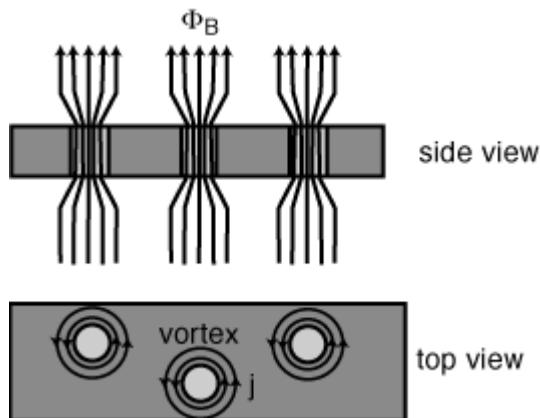


Figure I-29. Représentation des vortex pour un supraconducteur de type II dans l'état mixte [78].

Dans l'état mixte, les lignes de champ commencent à pénétrer le matériau et forment un réseau composé de tubes de flux magnétique nommés « vortex » (Figure I-29) [79]. Les vortex sont établis dans les régions où le matériau est à l'état normal, entourés par des régions à l'état supraconducteur. Chaque vortex comprend un quantum de flux magnétique : $\varphi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$. Autour d'un vortex, un courant électrique (supracourants) proportionnel à φ_0 se met à circuler. Au fur et à mesure que le champ magnétique externe varie, les vortex commencent à se déplacer en causant des pertes dans le matériau. Pour diminuer le déplacement des vortex, des impuretés sont ajoutées durant la fabrication du matériau. L'ancre des lignes de flux s'effectue aussi à travers des défauts naturels dans le plan de macle, les joints de grains ou défauts dans le réseau cristallin.

Pour les supraconducteurs de type II, la présence des deux champs critiques facilite leur emploi dans des applications très diverses : les accélérateurs, le transport d'énergie, l'imagerie médicale, la conception de capteurs magnétiques de haute sensibilité et les machines électriques. Les types II rassemblent une grande famille de matériaux dont quelques-uns seulement peuvent être utilisés pour la fabrication de fils. On peut regrouper les applications pour les types II en deux axes : **a) En courant continu**, où ils sont utilisés pour la génération des champs magnétiques statiques comme les accélérateurs de particules et les aimants pour l'imagerie médicale. **b) En courant alternatif**, où la procédure de fabrication a permis la multiplication du nombre de brins torsadés facilitant la réduction des pertes en régime alternatif. Les plus importantes applications en courant alternatif sont le transport de courant [80] et les limiteurs de courant [81].

La Figure I-30 montre les principaux matériaux supraconducteurs de type II utilisés dans la fabrication des fils. Cette figure est un comparatif du courant critique en fonction du champ magnétique pour divers matériaux à la température de l'hélium liquide 4,2 K. On peut signaler que le ruban YBCO a deux courbes en fonction de la direction du champ magnétique appliqué. Quand le champ est dans le même plan que le ruban, le courant critique reste très élevé (2000 A/mm^2 sous 20 T). En revanche,

quand le champ est appliqué perpendiculairement au ruban, le courant critique est relativement affecté (400 A/mm^2 sous 20 T) par rapport au point de départ de 4000 A/mm^2 à 0 T .

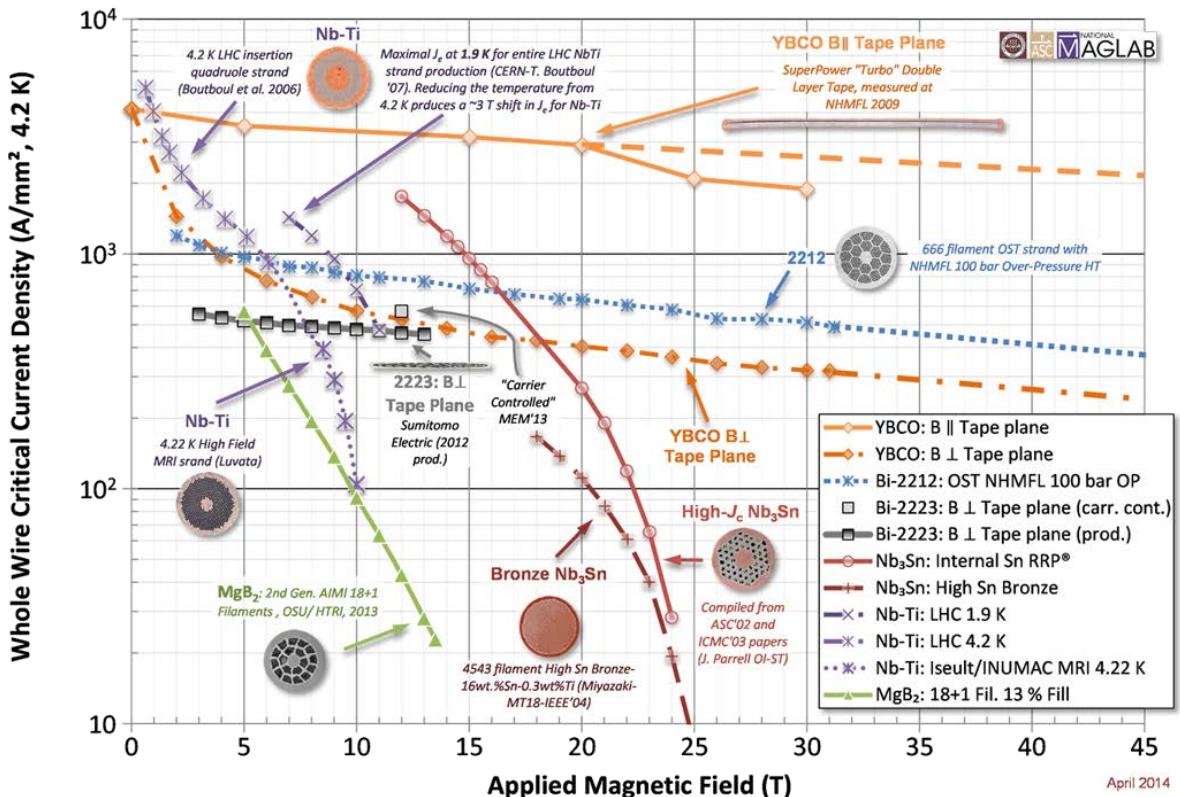


Figure I-30. Densité de courant critique ingénieur en fonction du champ magnétique appliqué [82].

Les conducteurs supraconducteurs peuvent être commercialisés sous deux formes : en forme de fils et en forme de ruban. Ceci est provoqué par la nature cristallographique de chaque matériau. Dans le cas de l'YBCO, sa fabrication requiert la déposition en couches minces (couches déposées) des différents composants chimiques afin d'assurer la formation du cristal. La partie supraconductrice est une couche plate d'environ de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur, caractérisée par une fragilité aux efforts mécaniques qui peuvent détruire cette disposition. Cette procédure de fabrication ne permet de produire que quelques centaines de mètres de ruban [83]. Les supraconducteurs tels que le NbTi, peuvent subir plusieurs étapes de filage – étirage consécutives multipliant ainsi le nombre de brins dans un fil. Le NbTi peut être produit en quantité kilométrique [84].

Dans le cadre de ce travail, on s'est intéressé aux supraconducteurs pouvant être employés dans la fabrication d'aimants. La Figure I-31 montre le diagramme de phase de plusieurs matériaux supraconducteurs permettant de comparer les caractéristiques de champ critique en fonction de la température critique. Ce graphique aide à la sélection du matériau selon le cahier des charges donné. L'YBCO possède la température la plus haute mais sa fragilité et l'anisotropie du matériau peut affecter l'amplitude du champ magnétique qu'il peut tolérer. En revanche, le NbTi peut tolérer des champs

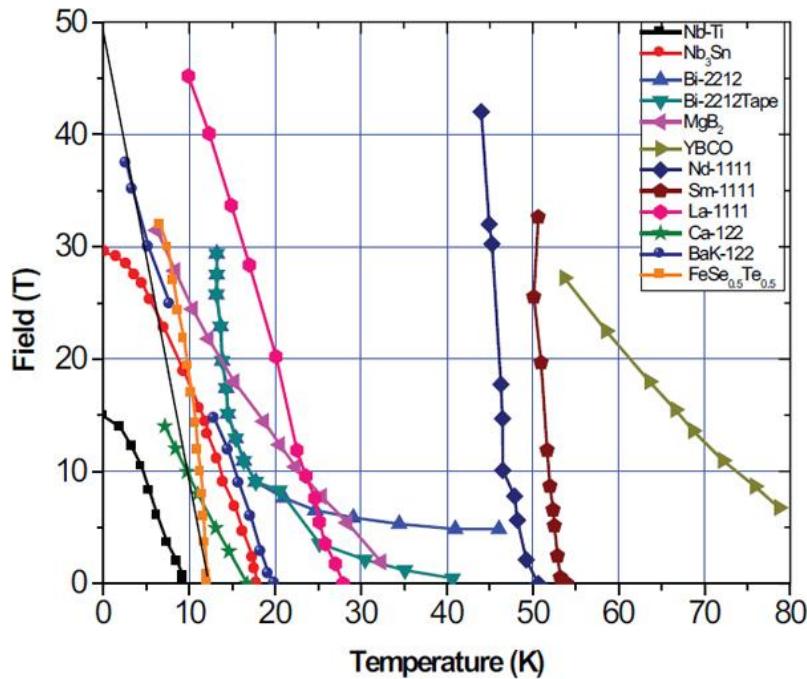


Figure I-31 Diagramme de phase $H_{c2}(T)$ de différents supraconducteurs employés dans la fabrication d'aimants [82].

magnétiques plus élevés, mais il a besoin d'être refroidi à plus basse température, augmentant les coûts et la complexité du système cryogénique.

Comment il a été décrit dans l'introduction de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la construction d'une bobine supraconductrice de forte inductance. Elle sera alimentée en courant par une pile à combustible du type PEMFC. Dans la section suivante, nous allons décrire les principaux matériaux supraconducteurs de type II employés dans la construction de bobines supraconductrices.

1.3.3.3 Conducteurs supraconducteurs

La construction des bobines supraconductrices requiert des quantités de fil de plusieurs kilomètres. La production de fil supraconducteur est donc plutôt orientée vers la fabrication de longueurs importantes. Diverses méthodes de fabrication ont été développées afin de conserver et d'améliorer leurs caractéristiques.

Plusieurs types de fils ont été créés ces dernières années, et les plus favorables pour la fabrication des bobines sont résumés dans le Tableau I-2. Les fils supraconducteurs sont soumis à diverses contraintes lorsqu'ils sont mis sous forme de bobine, ce qui va affecter la valeur du champ critique comme dans le cas du ruban d'YBCO de la Figure I-30, où la direction du champ appliqué a modifié son champ critique (matériau anisotrope). Nous allons décrire brièvement chaque supraconducteur dans la section suivante, et nous approfondirons celui qui représente le plus d'intérêt dans le cadre de notre travail.

Tableau I-2: Fils supraconducteurs les plus utilisés dans les applications à grande échelle.

Catégorie	Matériaux	T _c [K]	Formule générale
<i>HTc</i>	Bismuth - Strontium – Calcium - Cuivre – Oxygène	110	Bi ₂ Sr ₂ Ca _{n-1} Cu _n O _{2n+4+x}
	Yttrium – Baryum – Cuivre – Oxygène	93	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}
	Magnésium – Bohrium	39	MgB ₂
<i>BTc</i>	Niobium – Étain	18,3	Nb ₃ Sn
	Niobium – Titane	10	NbTi

I.3.3.3.1 BSCCO 2212

Le BSCCO 2212 est un des plus récents cuprates. Il a été découvert en 1988 par Hiroshi Maeda au *National Research Institute for Metals* au Japon [85]. Dans sa composition, les éléments de terres rares sont absents. Sa structure moléculaire est classée comme une pérovskite. Le BSCCO a besoin d'être très dopé avec des atomes d'oxygène, ce qui détermine sa température critique. Le BSCCO a été un des premiers matériaux à haute température critique à pouvoir être utilisé pour la fabrication des fils. Son prix est élevé, en raison de l'utilisation d'une matrice d'argent comme stabilisateur thermique. L'argent est également employé pour faciliter la formation de la phase 2223 dans l'interface argent-BSCCO [86]. Malheureusement le fil devient fragile à manipuler. Les longueurs de fabrication par SUMITOMO au Japon sont de l'ordre de 1500 m [87].

I.3.3.3.2 YBCO

L'YBCO est un des premiers cuprates supraconducteurs découverts avec une température critique supérieure à celle de l'azote liquide. Il est considéré comme le meilleur supraconducteur actuellement. Sa structure cristalline en forme de pérovskite, permet l'alignement de l'oxyde de cuivre donnant une grande capacité pour le transport de forts courants et une tolérance aux champs magnétiques élevés. Pour produire un ruban avec ce matériau et cette structure cristalline, la procédure de fabrication est assez compliquée et requiert la déposition des matériaux en couches très fines de quelques micromètres (Figure I-32). Sa fabrication est composée de plusieurs processus très pointus qui impactent le coût. Il est à noter que le rapport entre la couche supraconductrice et le reste de couches est d'environ 1 %. Le ruban est donc majoritairement composé par des couches de stabilisation thermique. Cette structure est responsable d'une fragilité face aux efforts mécaniques, ce qui freine l'utilisation de l'YBCO pour la fabrication de bobines. Les contractions thermiques provoquées lors du refroidissement peuvent provoquer la destruction de la couche supraconductrice.

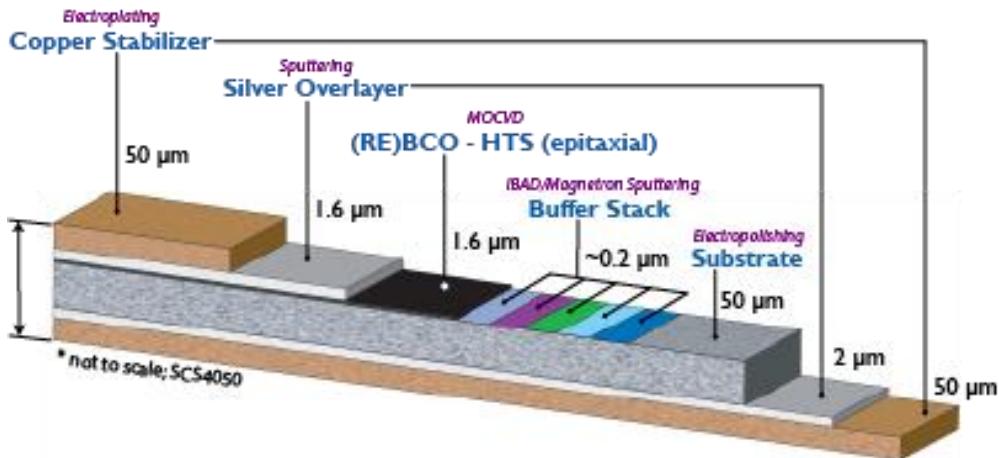


Figure I-32. Ruban YBCO avec ses différentes couches nécessaires à sa fabrication [88].

I.3.3.3.3 MgB_2

Récemment découvert comme matériau supraconducteur, le diborure de magnésium est un matériau prometteur quant à son prix et sa facilité de fabrication. Il est considéré comme un supraconducteur inter métallique qui forme une structure cristalline hexagonale. La méthode de fabrication a une influence directe dans ses performances électromagnétiques. En ce qui concerne la fabrication des fils, la méthode employée est appelée « Powder In Tube, PIT ». Elle permet la fabrication de plusieurs filaments de matériau supraconducteur dans une matrice de cuivre ou un autre métal avec de bonnes performances thermiques comme le nickel. Ceci permet de réduire les coûts de production significativement en comparaison avec le BSCCO et l'YBCO. Les longueurs de fabrication sont beaucoup plus élevées et peuvent atteindre plusieurs kilomètres.

I.3.3.3.4 Nb_3Sn

Ce matériau supraconducteur a été découvert en 1954 et il est composé de deux métaux : le niobium et l'étain, qui vont former un composé avec un réseau cristallin du type A15. À la suite de sa découverte, ce matériau a favorisé la fabrication des dispositifs supraconducteurs de grande taille.

Il permet de produire un des fils supraconducteurs les plus utilisés pour la réalisation d'aimants. Il est connu que ce matériau a été utilisé pour construire des bobines de 30 T [89]. Sa principale application est la fabrication de dipôles pour les accélérateurs de particules. En dépit de ses bonnes capacités électriques, le Nb_3Sn possède une fragilité mécanique importante, ce qui rend sa fabrication complexe. Pour la fabrication des fils, il est ainsi nécessaire d'ajouter des matrices avec des éléments ductiles qui vont amener de l'élasticité. Aussi, plusieurs techniques sont utilisées comme : « la voie étain », où l'élément précurseur est le cuivre et « la voie de bronze » qui utilise le bronze. Pendant sa fabrication, le niobium étain peut subir plusieurs traitements thermiques. A cause de sa fragilité, il est parfois nécessaire de faire le traitement thermique après bobinage. Cela impose des contraintes supplémentaires quand l'aimant est de grande taille. Lorsque le fil est d'abord bobiné puis que le traitement thermique est réalisé, on appelle ce traitement « wind and react ». Cela n'est possible que pour les aimants

de petite dimension. Une deuxième technique consiste à réaliser le traitement thermique avant le bobinage, il est alors appelé « react and wind ». Le seul inconvénient est la fragilisation du fil qui demande un bobinage minutieux.

I.3.3.5 NbTi

Le niobium-titanium est le plus utilisé des matériaux supraconducteurs. Il est souvent employé dans la fabrication des bobines produisant un champ supérieur à 10 T. Les longueurs de fabrication sont proches de 15 km et sa production mondiale est de l'ordre de deux mille tonnes par an. Il est principalement utilisé dans la fabrication d'aimants d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et pour les aimants des accélérateurs de particules. Sa température critique est de 9,3 K et il possède une anisotropie négligeable face à la direction d'un champ magnétique externe, favorisant son utilisation dans des structures de bobines de forme complexe. Contrairement au Nb_3Sn , il n'a pas besoin de traitements thermiques spéciaux.

I.3.3.4 Choix du fil

Dans la section I.3 dédié aux supraconducteurs, nous avons étudié le champ magnétique et le courant critique. Ces paramètres sont utilisés pour le choix du fil pour une application visée. La valeur de la température critique peut être employée pour déterminer le type de cryogénie à utiliser : de l'azote liquide à 77 K, de l'hélium liquide à 4,2 K, entre autres.

La procédure de sélection du fil supraconducteur doit tenir compte de plusieurs aspects techniques et économiques pour aboutir à un choix correct. Un facteur qui a un fort impact est l'utilisation du dispositif à fabriquer, selon qu'il s'agisse d'un prototype ou d'un produit à industrialiser et donc certaines concessions peuvent être réalisées.

Un autre point de comparaison est le prix de chaque matériau. Selon de récentes estimations, montrées dans la Figure I-33 [3], le coût des matériaux supraconducteurs dépend énormément du prix du marché des minéraux nécessaires pour la fabrication des fils. Les valeurs montrées ne représentent que des valeurs « cibles » et ne sont pas les vrais prix du marché.

Cependant, nous utiliserons ces données pour établir un critère des prix de quelques supraconducteurs. Les prix du marché pour les rubans de YBCO et de BSCCO sont entre 800 et 1200 \$/kA.m @ 77 K. Le prix du NbTi est de 1 \$/kA.m @ 4,2 K (2 T) et de 8 \$/kA.m pour le Nb_3Sn @ 4,2 K (12-15 T). Généralement, pour analyser les coûts, il est nécessaire de considérer le courant et le champ magnétique car une variation de la valeur de l'un ou de l'autre a une incidence directe sur le prix.

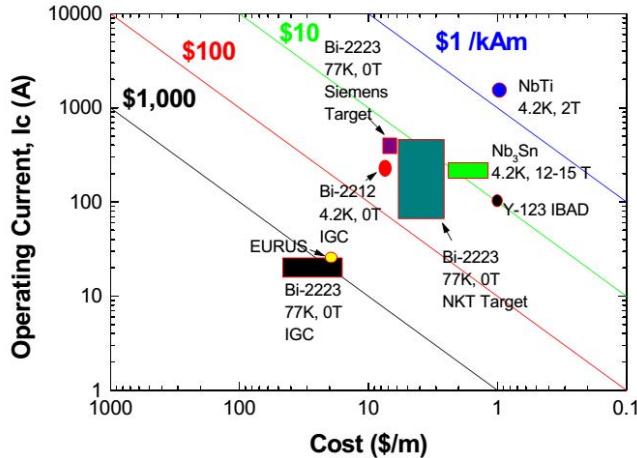


Figure I-33. Graphique « Sokolowsky » avec les prix des principaux fils supraconducteurs.

En respectant les caractéristiques énoncées, on peut orienter notre choix de sorte à utiliser une quantité minimale de supraconducteur. Favorisant le type de cryogénie, la taille du dispositif, la valeur de courant et du champ demandés pour l'application souhaitée.

A partir de la Figure I-30, nous pouvons comparer les différents fils supraconducteurs avec la valeur de la densité de courant critique en fonction du champ magnétique appliqué @ 4,2 K. Les rubans d'YBCO et BSCCO 2212 sont les plus performants et présentent des similitudes. Quant aux autres matériaux, leur densité de courant est plus affectée quand le champ applique augmente.

La Figure I-31 peut être utilisée pour évaluer le matériau en utilisant comme point de fonctionnement le champ magnétique critique en fonction de la température. Elle vient compléter l'information disponible sur la Figure I-30.

Au laboratoire, nous avons acquis une certaine expérience avec le fil NbTi. Le NbTi peut donc s'avérer être une solution convenable pour l'aimant vectoriel que nous souhaitons réaliser.

Par la suite nous allons décrire l'aimant vectoriel, que nous avons considéré pour la réalisation d'une bobine de forte inductance.

I.3.4 Aimant vectoriel

Les aimants vectoriels sont des dispositifs qui permettent de produire un champ magnétique qui peut être incliné ou tourné de manière électrique au lieu de le faire mécaniquement. La structure principale est composée de deux ou trois groupes de bobines placées suivant deux ou trois axes d'un repère cartésien (Figure I-34). La géométrie préférée pour la fabrication de ces bobines est le solénoïde, grâce à sa facilité de construction.

Un grand solénoïde est placé suivant l'axe z et dans les axes x et y sont placés des solénoïdes en configuration « split-pair ». L'utilisation d'autres types de bobines entraîne un bobinage plus complexe, suivie d'une augmentation du coût de fabrication. La région d'étude est normalement placée au

centre de l'aimant vectoriel. En fonction de l'accès souhaité (vertical ou horizontal), et du mode de refroidissement, l'amplitude maximale du champ appliqué peut être diminuée sensiblement.

L'utilisation de matériaux supraconducteurs va aider à augmenter le champ généré au centre, mais ils entraînent également des limitations magnétiques à cause du champ critique H_c . La position des bobines va ajouter des difficultés supplémentaires pour l'évaluation du champ magnétique critique, car chaque bobine est affectée par son champ propre et par le champ produit par chacune des bobines suivant les autres directions.

La densité de flux magnétique \mathbf{B} d'un aimant vectoriel est composée des inductions B_x , B_y , B_z produites par chaque groupe de bobines. Les aimants vectoriels sont généralement réalisés sans fer, le principe de superposition peut alors s'appliquer.



Figure I-34. Exemple d'aimant vectoriel suivant trois axes.

I.3.5 Applications des aimants vectoriels

Les aimants vectoriels sont employés dans l'étude de l'interaction entre le champ magnétique et la matière : dans la caractérisation des matériaux, la diffusion de neutrons, la matière condensée, la biologie, la médecine et les applications en sciences physiques. Généralement, la région où le champ magnétique est homogène est inférieure au centimètre.

Une autre application pour les aimants vectoriels est la compensation du champ magnétique terrestre, celui-ci étant de l'ordre de 0,5 gauss, cette application est souvent utilisée pour la calibration de magnétomètres.

Certaines applications demandent des champs magnétiques intenses supérieurs à plusieurs teslas, dans ce cas l'emploi de matériaux supraconducteurs est nécessaire et l'emploi d'un système cryogénique normalement complexe est demandé [90], [91].

Les matériaux HTS, spécialement les matériaux céramiques comme l'YBCO et le BSCCO peuvent nécessiter d'être étudiés en variant la direction du champ magnétique appliqué. En effet, la densité de courant transporté varie en fonction de la direction de la densité de flux magnétique. Dans la plupart des cas, l'échantillon est déplacé à l'intérieur d'un solénoïde (Figure I-35), ce qui peut produire des contraintes mécaniques liées aux dilatations thermiques des pièces mobiles. Le refroidissement de l'échantillon supraconducteur peut aussi être la cause du blocage des pièces. Un aimant vectoriel permet de varier la direction du champ externe, tout en gardant l'échantillon fixe. L'aimant vectoriel offre une solution permettant la fixation et le refroidissement de l'échantillon supraconducteur de façon simple. Le champ généré par l'aimant vectoriel peut être orienté électriquement et permet des études en dynamique avec un gain de temps considérable.

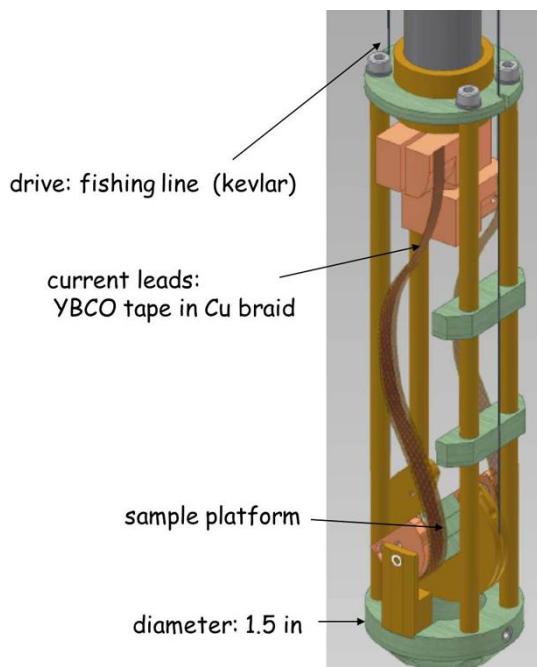


Figure I-35. Système mécanique pour l'étude angulaire du courant critique dans des rubans supraconducteurs [92].

Nous nous sommes intéressés dans la fabrication d'un aimant vectoriel supraconducteur pour la réalisation de tests magnétiques sur des supraconducteurs massifs. En raison des exigences de taille des échantillons supraconducteurs à tester, i.e. plusieurs centimètres de diamètre, l'aimant vectoriel sera un système de forte inductance. Ceci attire notre attention car il pourra alors être utilisé comme charge pour la pile à combustible et valider son fonctionnement comme source de courant pour des systèmes supraconducteurs.

Ces conditions vont nous permettre de confirmer l'application de la pile à combustible¹ pour alimenter des dispositifs supraconducteurs d'inductance élevée de l'ordre de quelques dizaines d'henry. Par la suite, nous allons présenter différentes conceptions d'aimants vectoriels et leurs applications.

I.3.6 Exemples d'aimants vectoriels

Dans la littérature, on peut trouver plusieurs configurations d'aimants vectoriels, ils vont du plus simple avec deux axes de fonctionnement, à des configurations avec des nombreuses bobines. La problématique des aimants réalisés avec des matériaux supraconducteurs est liée à la température de fonctionnement qui requiert des cryostats spécifiques et les limitations physiques du matériau supraconducteur qui vont affecter la conception des bobines.

Un deuxième problème est lié à la valeur élevée du module de la densité de flux magnétique sur le fil supraconducteur causé par chaque bobine.

La Figure I-36a est un exemple d'application d'un aimant vectoriel pour la mesure de croissance épitaxiale des pellicules de Fer (Fe) et Oxyde de magnésium (MgO). Il est construit suivant deux axes x et y , avec du cuivre bobiné sur deux plots en fer pour la création d'un champ uniforme d'une valeur maximale de $H_{max} = 1000 \pm 5$ Oe ($\sim 0,1$ T). Le champ produit est mis en rotation en variant l'amplitude du courant d'alimentation, grâce aux équations (I-24) et (I-25), où a_1 et a_2 sont les coefficients du rapport entre le courant et le champ magnétique produit par chaque bobine. Donc le champ magnétique résultant peut être dirigé dans un angle quelconque dans le plan xOy .

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H_2}{H_1}\right) = \arctan\left(\frac{a_2 I_2}{a_1 I_1}\right) \quad (\text{I-24})$$

$$H_{Tot} = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} \quad (\text{I-25})$$

La Figure I-36b est un autre exemple d'aimant vectoriel, mais dans ce cas, il est construit avec du NbTi et refroidi par conduction avec un cryocooler Gifford-McMahon ayant un pouvoir de refroidissement de 1,5 W à 4,2 K. Il est capable de produire 2 T avec les bobines « split-pair » et 5 T avec le solénoïde. La température du porte échantillon est contrôlée et l'échantillon peut être tourné sur son axe vertical de symétrie, ce qui permet d'avoir un champ magnétique appliqué sur l'échantillon dans toutes les directions. Ce type d'aimant combine les deux possibilités pour la variation de la direction du champ magnétique, le moyen électrique et le moyen mécanique. La Figure I-36c montre le cryostat construit pour le système de bobines (Figure I-36b) où le cryocooler et le système de rotation de l'échantillon sont placés. Le système de rotation et le système de refroidissement sont montrés plus en détail dans le plan de coupe (Figure I-36d), où nous pouvons observer le moyen de refroidissement de l'échantillon par conduction.

Une troisième configuration d'aimant vectoriel est celle proposée dans la Figure I-37a et b. Cet aimant vectoriel a été conçu pour l'expérimentation de diffusions de neutrons. Il est composé par trois groupes de bobines, 16 au total, construites en NbTi. Le champ magnétique vertical est fait par les bobines en orange, dans une configuration quasi-Helmholtz avec les bobines en bleu agissant comme écrans magnétiques actifs.

1. L'aimant vectoriel n'a pas pu être finalisé pendant la durée de la thèse. Nous l'avons substitué par une bobine supraconductrice déjà disponible au laboratoire. 43

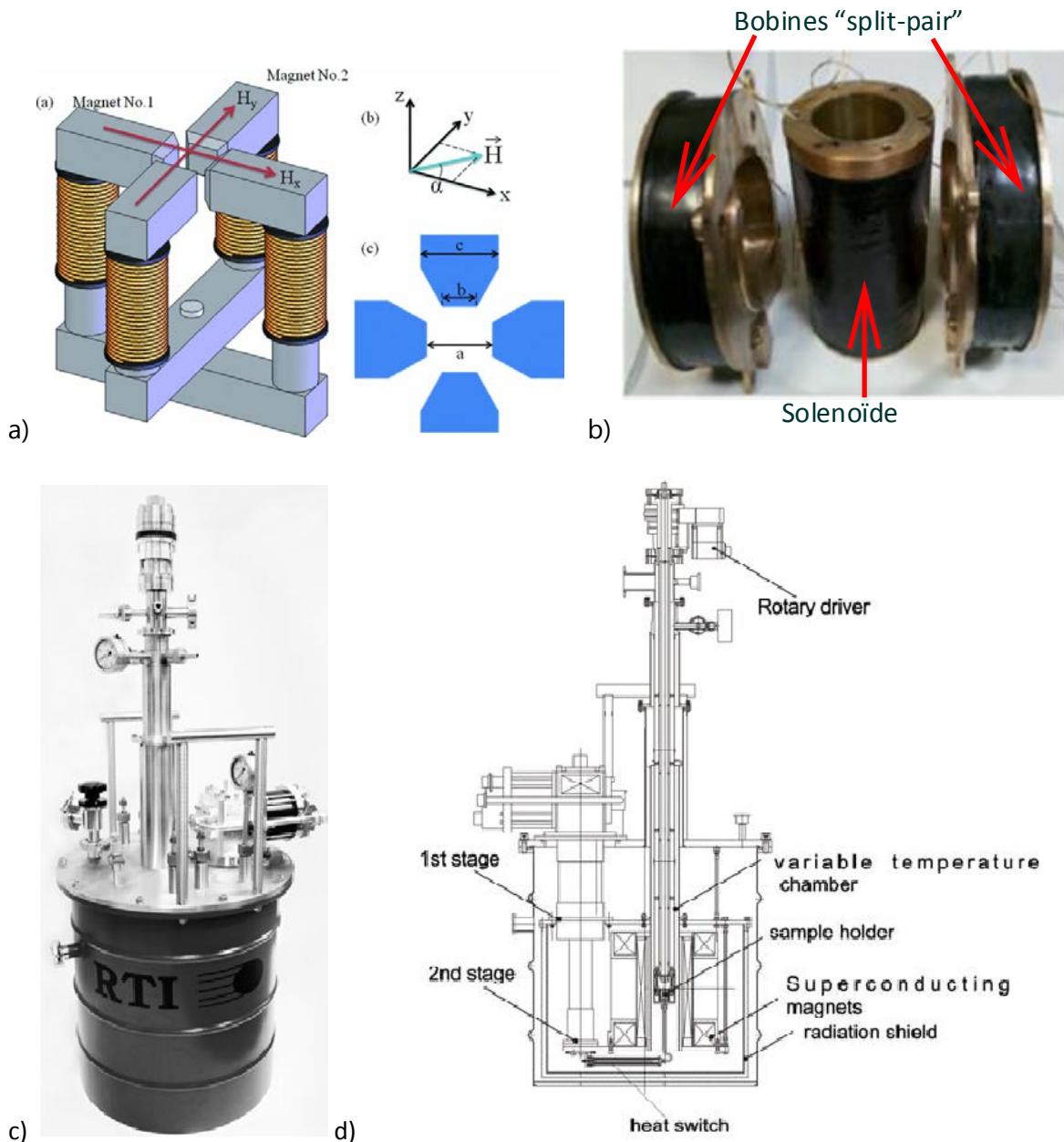


Figure I-36. Exemples d'aimants vectoriels deux axes [93], [94].

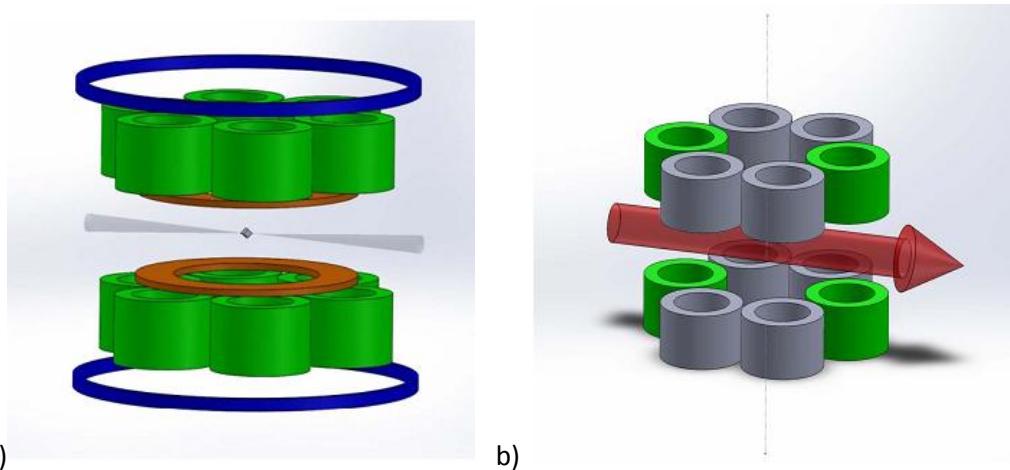


Figure I-37. Bobines de l'aimant WAVE (CEA) [95].

Les bobines en vert sont chargées de la création du champ magnétique horizontal. Avec la variation de l'amplitude du courant d'alimentation de chaque bobine, la direction et l'homogénéité du champ magnétique produit sont contrôlées. La Figure I-37b montre les bobines qui doivent être alimentées avec une valeur précise de courant afin de garantir l'orientation du champ magnétique horizontal. Cet aimant a une région de fonctionnement sphérique de 100 mm de diamètre avec une homogénéité de 500 ppm et une deuxième région de fonctionnement sphérique de 5 mm, où l'homogénéité passe à 70 ppm pour la composante B_z et de 4 ppm pour B_x et B_y . Il est capable de produire une densité de flux magnétique de 1 T dans toutes les directions.

Le courant d'alimentation maximal est de 200 A et la densité de flux magnétique maximal généré est de 5,7 T. Le système entier est refroidi par conduction avec une circulation d'hélium à travers des tuyaux connectés directement à la masse froide (thermosiphon) qui permet d'augmenter la capacité de mise en froid contre un système de refroidissement par conduction. Ce système est composé de deux cryocoolers d'un et deux étages ; 100 W @ 50 K, 35 W @ 4,5 K et 1,5 W @ 4,2 K respectivement. Les bobines sont thermalisées avec des supports en aluminium.

Un troisième système de bobines moins complexe est proposé Figure I-38. Il s'agit d'un système à six bobines identiques. Cette configuration admet une homogénéité importante dans des régions de fonctionnement très réduites de quelques millimètres de diamètre. La paire de bobines verticales produit un champ magnétique uniforme et les deux paires de bobines horizontales produisent des champs magnétiques oscillants. Cet aimant vectoriel est employé dans l'étude de la physique d'autoassemblage de molécules des êtres vivants. Cette étude a pour but de reproduire ce comportement pour la fabrication de matériaux. Le champ magnétique produit est de l'ordre de 0,005 à 0,015 T, et l'emploi de matériaux supraconducteurs n'est pas nécessaire [96].

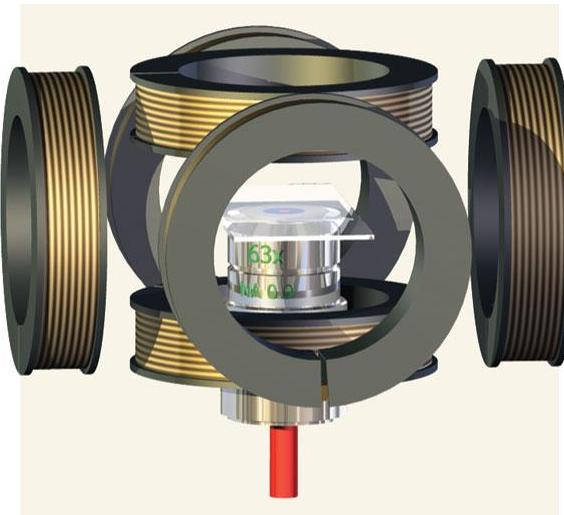


Figure I-38. Groupe de six bobines pour l'étude de billes de fer micrométriques [97].

1.4 Conclusions

Nous avons traité les aspects fondamentaux pour la compréhension des objectifs de ce travail. Nous avons étudié les différentes technologies de piles à combustible, leur mode de fonctionnement et leurs différentes contraintes.

Ensuite nous avons présenté les matériaux supraconducteurs, leurs valeurs critiques, les différents types et les matériaux utilisés dans la fabrication de fils. En dernière instance, nous avons décrit quelques aimants vectoriels, leurs applications et leur importance dans l'étude des matériaux.

L'objectif de cette thèse consiste à réaliser et à étudier une source d'alimentation pour un système supraconducteur à partir d'une pile à combustible. Nous nous intéressons à la recherche de nouvelles applications pour la pile à combustible mais également à l'étude des matériaux supraconducteurs. Donc le présent travail traite de deux domaines très différents qui, mis en fonctionnement commun, peuvent permettre l'apparition de nouvelles applications pour les deux systèmes.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter la procédure d'alimentation d'une bobine supraconductrice par une pile à combustible.

II- Alimentation d'une bobine supraconductrice par une pile à combustible

II.1 Introduction

La pile à combustible est un dispositif important pour l'avenir de la gestion de l'énergie [98]. Elle permet la génération d'électricité à partir de l'hydrogène. En revanche, l'utilisation des PEMFC comme source d'alimentation présente plusieurs inconvénients. En effet, des convertisseurs de puissance sont nécessaires pour gérer et rendre son signal électrique approprié aux applications visées. Les systèmes pile à combustible sont connus pour avoir une dynamique lente, des dispositifs de stockage d'énergie (batteries ou supercondensateurs) s'avèrent donc nécessaires. Toutes ces contraintes ajoutent des coûts et de l'encombrement supplémentaires [99].

Dans ce travail, nous avons choisi d'exploiter et de tirer avantage des caractéristiques de la pile à savoir qu'une cellule de pile peut être vue comme une source continue de basse tension et de fort courant, dont la gestion des réactants détermine la qualité et l'intensité du courant débité.

Ainsi, nous proposons d'utiliser la pile à combustible pour les applications nécessitant une source de courant continu, qui permettrait de s'affranchir du réseau électrique et des éventuels problèmes de pollution harmonique ainsi que de compatibilité électromagnétique. Une telle application répond très bien aux critères d'exigences des alimentations pour bobines supraconductrices, notamment en ce qui concerne l'ondulation et la stabilité du courant, autour de 1 à 100 ppm [100], [101].

Par conséquent, les caractéristiques de l'une et de l'autre se marient bien et ouvrent la pile à combustible à une nouvelle application tout à fait innovante. Cependant, il est nécessaire d'utiliser un appareil de protection contre les défauts pouvant affecter la pile à combustible, mais celui-ci est moins complexe que les convertisseurs de puissance habituellement employés.

Dans [61], la PEMFC était reliée directement avec un supercondensateur. Cette connexion (pour une courte période de temps) a montré la capacité de la PEMFC à travailler en court-circuit. Ce mode de fonctionnement est similaire à une source de courant contrôlée. La Figure II-1 représente une courbe de polarisation de la PEMFC avec sa zone de travail en tant que source de courant. Au sein de ce mode de fonctionnement, le courant de la pile à combustible I_{fc} peut être directement commandé par le débit d'hydrogène, d_{H_2} , via le courant de référence I_{set} , comme montré en (II-1). En d'autres termes, le paramètre I_{set} est la consigne de courant de la pile à combustible.

$$\begin{cases} d_{H_2} = I_{set} \frac{1}{2P_0} \frac{RT_0}{F} \cdot \zeta_a \cdot 1000 \cdot 60 \quad (\text{L} \cdot \text{min}^{-1}) \\ d_{air} = I_{set} \frac{1}{4P_0} \frac{RT_0}{F} \frac{1}{0.21} \cdot \zeta_c \cdot 1000 \cdot 60 \quad (\text{L} \cdot \text{min}^{-1}) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Où:

R est la constante des gaz : $8,3144621 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,

T_0 est la température des gaz : $298,15 \text{ K}$,

F est la constante de Faraday : $96\,485,33289 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$,

P_0 est la pression des gaz : $101\,325 \text{ Pa}$,

ζ_a et ζ_c sont les coefficients stoechiométriques de l'anode et la cathode, afin d'assurer le contrôle en courant, on fixe : $\zeta_a = 1$ et $\zeta_c = 4$.

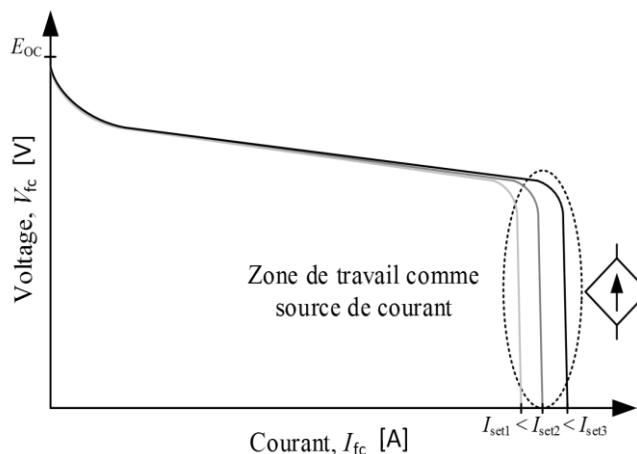


Figure II-1. Courbe de polarisation d'une PEMFC avec la zone de travail comme source de courant.

Dans une deuxième expérience [102], nous avons travaillé sur le couplage direct entre une PEMFC et une bobine supraconductrice. Nous avons pu vérifier expérimentalement que la PEMFC pourrait fonctionner comme une source de courant dans ce cas. La résistance de la bobine supraconductrice est presque nulle, elle peut donc être considérée comme un court-circuit.

Pendant la première partie de cet essai, l'anode et la cathode de la PEMFC sont directement connectées à travers un fil électrique, de sorte que la PEMFC est court-circuittée. Ceci permet de confirmer le fonctionnement en court-circuit et le réglage des dispositifs de contrôle de la PEMFC. Ensuite la pile à combustible a été connectée à une bobine supraconductrice de petite taille, d'une valeur d'inductance de 4 mH (Figure II-2).

Dans ce mode de fonctionnement, le contrôle de l'amplitude du courant généré par la PEMFC se fait par la valeur de courant de consigne. Cette valeur de consigne régule le débit d'hydrogène entrant côté anode de la pile. La Figure II-3, montre les résultats obtenus lors des expérimentations réalisées sur le système (Pile-Bobine supraconductrice). Le débit d'hydrogène d_{H2} est représenté par le courant de consigne I_{set} en couleur rose et le courant de pile I_{fc} en couleur bleue. Le courant de consigne

est un échelon de 15 à 35 A et de 35 à 15 A. La réponse du courant de pile suit la forme décrite par la courant de consigne. La tension de pile V_{fc} , montre une augmentation de sa valeur de 80 mV représentant la chute de tension liée à la résistance de connexion entre la pile à combustible et la bobine supraconductrice.



Figure II-2. Echantillon du ruban BSCCO 2212 et la bobine supraconductrice utilisé dans l'essai.

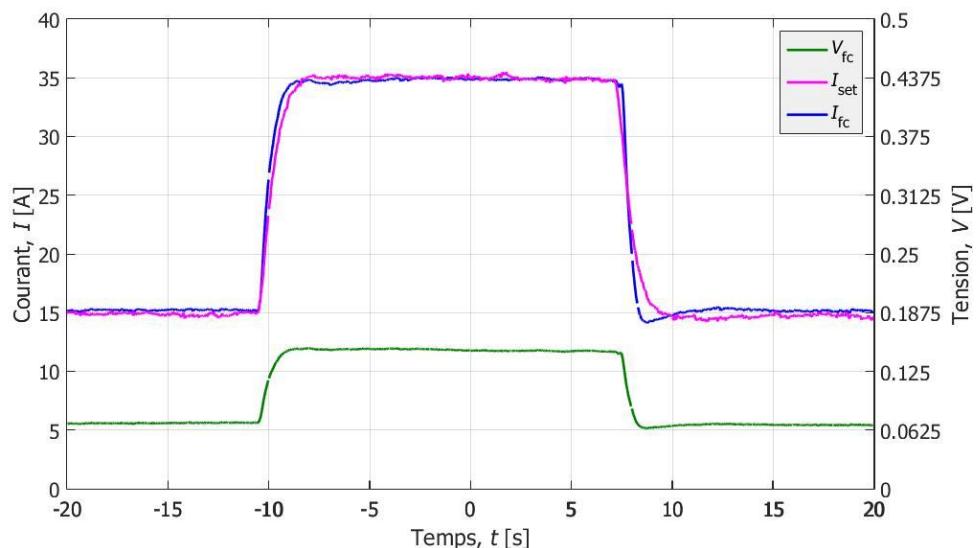


Figure II-3 Démonstration du contrôle du courant I_{fc} par le débit d'hydrogène à travers I_{set} .

Ces résultats ont permis de valider les hypothèses de connexion entre les dispositifs formulés précédemment. La dynamique entre les deux appareils semble être assez compatible, car on observe une relative stabilité dans la forme de courant de consigne et le courant fourni par la pile. On attendait des régimes transitoires dynamiques en raison de la valeur de l'inductance de charge. Les résultats ne montrent pas d'interactions apparentes importantes entre les deux dispositifs, l'inductance étant peut-être trop faible, ce qui ne permet pas d'obtenir des comportements indésirables. Si on veut

utiliser une pile à combustible comme source d'alimentation pour des dispositifs supraconducteurs, il faut que la pile puisse répondre d'une manière similaire avec une inductance très importante. En effet, les dispositifs supraconducteurs ont la particularité d'avoir des grandes dimensions, où la valeur d'inductance est généralement plus élevée, de quelques henry à plusieurs dizaines de henry [70].

Par conséquent, il est important d'étudier de tels systèmes avec des valeurs élevées d'inductance et de les tester expérimentalement. En effet, la PEMFC pourrait réagir d'une autre manière, plus instable avec une bobine d'inductance élevée en tant que charge. Des études supplémentaires devront également être effectuées pour tester la dégradation de la membrane [62], lorsque la PEMFC travaille en source de courant.

Ce chapitre représente l'étape d'essai d'une connexion entre la pile à combustible et la bobine supraconductrice de haute inductance. Par conséquent, nous avons travaillé pour améliorer le modèle dynamique électrique de la PEMFC pour pouvoir alimenter une bobine supraconductrice de grande taille. Nous nous sommes concentrés sur les effets de la valeur d'inductance dans les performances de la PEMFC, afin de dimensionner correctement le banc d'essai expérimental, le dispositif de protection et la connexion.

II.2 Modélisation du système

II.2.1 Méthode

Le modèle du système d'alimentation par une pile à combustible et une bobine supraconductrice a été développé sous Matlab Simulink. Ce modèle comporte deux éléments principaux : la pile à combustible de type : Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) et l'élément comprenant la charge : une bobine supraconductrice d'inductance élevée. Les équations caractéristiques de chaque élément ont été implémentées sous Simulink et les paramètres de la PEMFC ont été configurés pour le mode de fonctionnement comme source de courant. Les paramètres du modèle de la pile sont présentés dans le Tableau II-1. Le modèle utilisé pour la bobine supraconductrice est celui d'une inductance à résistance nulle L_{SC} , on introduit une résistance R_{wire} en série représentant la résistance du câblage qui connecte la pile et la charge.

Une fois établi le modèle, celui-ci est validé grâce aux résultats expérimentaux obtenus lors de notre première expérience avec une bobine supraconductrice de 4 mH, ce qui nous permettra de confirmer la fiabilité du modèle. Ensuite, la valeur de l'inductance de la bobine sera modifiée par une valeur plus importante afin de prédire le comportement du système dans le cas qui nous intéresse et prévoir ainsi les actions et matériaux nécessaires pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité de chacun des éléments lors l'essai expérimental.

Ce modèle permet aussi d'estimer la longueur des câbles de connexion entre les deux dispositifs afin d'assurer le mode de fonctionnement en source de courant de la pile à combustible. Si la valeur de la résistance électrique entre la pile et la bobine dépasse une valeur seuil, la PEMFC ne peut plus répondre aux conditions opératoires nécessaires et va se comporter comme une source de tension et

le courant débité va être inférieur. Les modèles des divers éléments vont être présentés en détail dans ce qui suit.

Tableau II-1: Paramètres utilisés dans le modèle de la pile à combustible

Symbol	Signification	Valeur	Unité
I_a, I_c	Courant anodique et cathodique	- ; -	A
S_{cell}	Surface active	100	cm ²
J_{0a}, J_{0c}	Densité de courant d'échange	5000 ; 0,5	A·m ⁻²
α_a, α_c	Coefficient de transfert de charge	0,5 ; 0,5	-
T	Température de fonctionnement	333,15	K
R_m	Résistance de membrane	4	mΩ
I_L, I_{fc}	Courant limite et courant de pile	- ; -	A·m ⁻²
C_{DLa}, C_{DLC}	Capacitance de double couche Anodique et cathodique	2 ; 2	F
E_a, E_c	Potentiel d'équilibre anodique et cathodique	0 ; 1	V
E_{oc}	Potentiel de pile en circuit ouvert	1	V
η_m	Chute de tension de la membrane	-	V
η_a, η_c	Surtension anodique et cathodique	- ; -	V
ζ_a, ζ_c	Coefficients de sur-stœchiométriques à l'anode et à la cathode	1 ; 4	

II.2.2 Modèle de la Pile à combustible

Le modèle de la PEMFC monocellule représenté sur la Figure II-4 est un modèle électrique, où les chutes de tension anodique et cathodique η_a et η_c sont identifiés par la loi de Butler-Volmer. Les capacités de couche double : C_{DLa} et C_{DLC} , la résistance de membrane R_m et les tensions à vide E_c , E_a , sont identifiés expérimentalement par spectroscopie d'impédance. Il convient de noter que le modèle de pile utilisé dans ce chapitre est un modèle 1D isotherme, qui va être décomposé entre les divers éléments connectés à la pile à combustible tels que la résistance de charge, la résistance de protection et le stockage d'hydrogène dans les tuyaux d'alimentation. Les équations (II-2) à (II-7) représentent le comportement électrochimique pour chaque élément de la cellule de la pile à combustible.

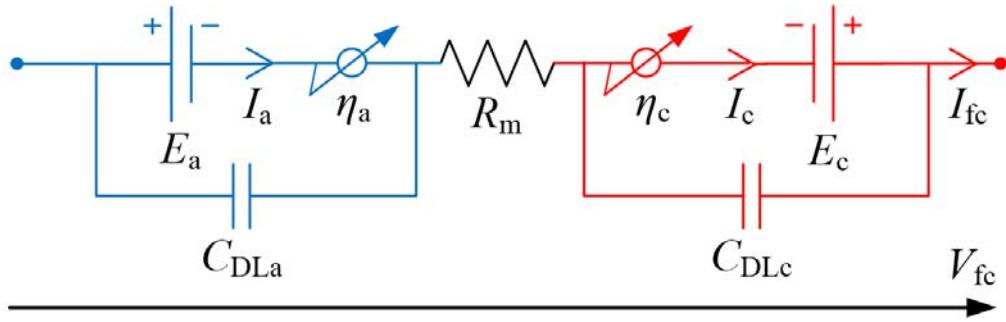


Figure II-4 Modèle dynamique électrique de la pile à combustible de type PEM.

De cette manière, les courants faradiques I_a et I_c sont calculés avec les équations (II-2) à (II-7) (adaptées à notre étude), [103]. La tension de la pile à combustible V_{fc} est calculée avec l'expression (II-7). Ainsi nous avons la variable V_{fc} qui va nous permettre de réaliser le couplage électrique avec le modèle de la bobine supraconductrice. Ce modèle même s'il représente une structure monocellule de pile assez compacte, permet de prendre en considération des paramètres physiques importants pour le choix du mode de fonctionnement, tels que les capacités de double couche anodiques et cathodiques et la résistance de la membrane.

$$I_a = S_{\text{cell}} J_{0a} \left(\exp(2\alpha_a f \eta_a) - \exp(-2(1-\alpha_a) f \eta_a) \right) \quad (\text{II-2})$$

avec $f = \frac{F}{RT}$

$$\eta_a = \frac{1}{f} \operatorname{argsh} \left(\frac{I_a}{2S_{\text{cell}} \cdot J_{0a}} \right) \quad (\text{II-3})$$

$$I_c = S_{\text{cell}} J_{0c} \left(\left(1 - \frac{I_c}{I_L} \right) \exp(2(1-\alpha_c) f \eta_c) - \exp(-2\alpha_c f \eta_c) \right) \quad (\text{II-4})$$

$$\eta_c = \frac{1}{f} \ln \left(1 + \frac{I_c}{S_{\text{cell}} J_{0c}} \right) - \frac{1}{f} \ln \left(1 - \frac{I_c}{I_L} \right) \quad (\text{II-5})$$

$$I_{a,c} = I_{fc} - C_{\text{DLa},c} \frac{d}{dt} \eta_{a,c} \quad (\text{II-6})$$

$$V_{fc} = (E_c - \eta_c) - \eta_m - (E_a + \eta_a) \quad (\text{II-7})$$

Où I_L est le courant limite de la pile à combustible. Il correspond au courant maximal qui peut circuler à travers la pile à combustible, et dépend de l'alimentation en gaz.

II.2.3 Modèle de bobine supraconductrice

La résistance électrique d'une bobine supraconductrice est égale à zéro, $R_{sc} = 0 \Omega$, quand elle acquiert l'état supraconducteur, de sorte que le modèle utilisé pour la représenter est d'une induction parfaite L_{sc} . Cependant, la résistance du fil R_{wire} utilisée pour connecter la PEMFC à la bobine supraconductrice doit être prise en considération car elle va limiter le courant produit par la pile et assurer que la pile reste dans le mode de fonctionnement en source de courant. La capacité parasite de la bobine supraconductrice a été négligée. Par conséquent, lorsque la PEMFC et la bobine supraconductrice sont reliées entre elles, la tension de la pile à combustible V_{fc} peut être exprimée comme suit :

$$V_{fc}(t) = R_{wire} I_{fc}(t) + L_{sc} \frac{d}{dt}(I_{fc}(t)) \quad (\text{II-8})$$

Cette relation nous permet de trouver la solution de I_{fc} qui servira pour être utilisée dans le modèle de la pile à combustible nécessaire pour le calcul des variables I_a et I_c . Le Tableau II-2 montre les divers paramètres de la bobine supraconductrice de 10 H. Cette bobine est construite en forme de solénoïde avec du matériau NbTi. Le solénoïde est imprégné par une résine assurant le maintien mécanique du fil supraconducteur. La bobine est suspendue par moyen des tiges en fibre de verre de 8 mm et immergée dans l'hélium liquide dans son intégralité. L'amplitude de I_a est affectée par le stockage de H_2 dans les tuyaux d'alimentation.

Tableau II-2: Paramètres de la bobine supraconductrice de 10 H

Symbole	Signification	Valeur	Unité
R_{ex}	Rayon extérieur	10	cm
R_{in}	Rayon intérieur	5,9	cm
H	Hauteur	20	cm
Sc	Section fil supraconducteur Nio-bium-Titan	0,5	mm ²
T	Température de fonctionnement	4,2	K
He	Réfrigérant : Hélium liquide	8	L
S	Section	82	cm ²
N	Tours	16735	Tr
W	Energie stockée	41,4	kJ
L	Inductance	10	H
J	Densité de courant	182	A/mm ²

II.2.4 Validation du modèle

Nous avons besoin de confirmer si le modèle de la PEMFC couplé avec une bobine supraconductrice peut fonctionner correctement dans plusieurs cas de fonctionnement. Par conséquent, nous allons utiliser les résultats de l'expérience qui a été effectuée avec une PEMFC en [102], pour reproduire son comportement avec le modèle électrique du système qui a été choisi en section II.2.2. Ce modèle ainsi établi, va nous permettre de simuler le couplage de la pile à combustible avec une bobine supraconductrice d'une inductance beaucoup plus importante (10 H). Cette procédure est faite pour estimer les énergies mises en jeu, par mesure de précaution, afin d'éviter la destruction de la pile et ou de la bobine de haute inductance.

La Figure II-5 montre les résultats expérimentaux pile-bobine 4 mH, avec une résistance totale estimé de $4 \text{ m}\Omega$ ($R_{\text{wire}} + R_{\text{SC}}$) déterminés par la variation dans l'amplitude dans la tension de pile. Il s'agit des réponses en tension et en courant de la PEMFC à un échelon de débit d'hydrogène de 0,1 à 0,14 L·min⁻¹, ce qui correspond à un échelon de courant de consigne I_{set} de 15 à 20 A. Le courant I_{fc} se comporte comme un premier ordre et atteint la valeur de consigne au bout de 28 s. Le débit d'hydrogène suit bien l'échelon imposé par la valeur de consigne en I_{set} . Dans ce test la réponse du I_{fc} est justifiée par l'inertie du débitmètre d'hydrogène. De même, la faible valeur d'inductance favorise une réponse rapide en la valeur de I_{fc} .

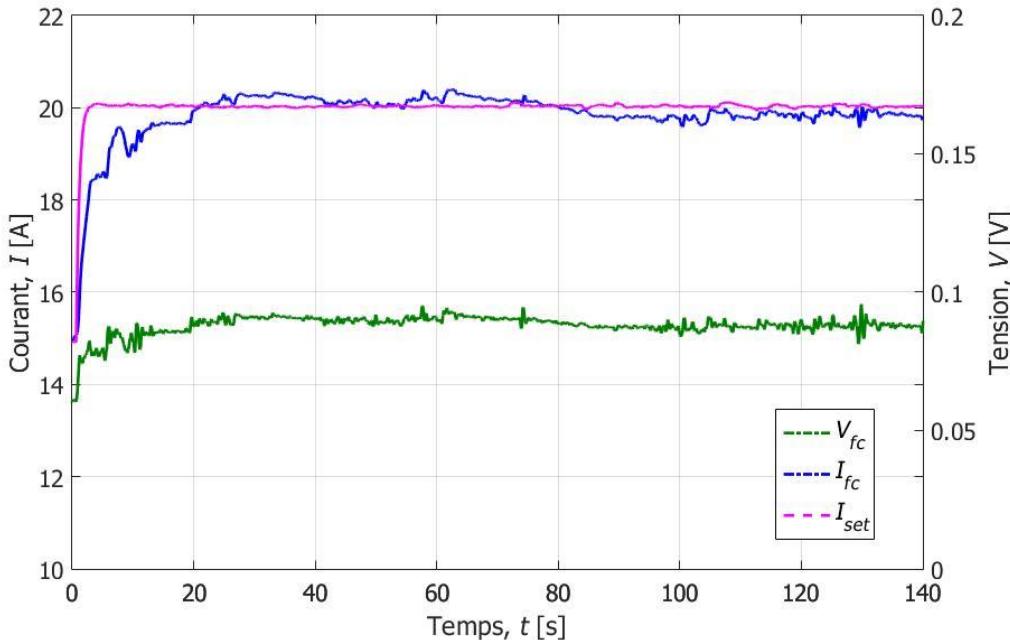


Figure II-5. Résultats expérimentaux obtenus avec une PEMFC alimentant une bobine supraconductrice de 4 mH, résistance de câblage de $4 \text{ m}\Omega$. Réponse du système à un échelon dans la consigne d'hydrogène de 0,1 à 0,14 L·min⁻¹ correspondant à un échelon dans le courant I_{set} de 15 jusqu'à 20 A.

La Figure II-6 montre les résultats de la simulation avec les paramètres correspondant à l'expérience représentée sur la Figure II-5. Le comportement de la PEMFC a été reproduit grâce à la simulation. Comme on peut le voir, le modèle représente de manière assez fidèle le comportement dynamique de la pile. Certaines valeurs des éléments internes de la PEMFC sont difficiles à déterminer avec

précision, telles que les capacités de double couche $C_{DLa,c}$. A cela s'ajoute le fait que dans notre modèle, la résistance de membrane et les capacités de double couche sont supposées constantes alors qu'en réalité elles varient avec la valeur du courant de pile, ce qui peut justifier les différences entre les résultats. Notre modèle de pile a pour but d'appréhender le comportement de la pile lorsque celle-ci alimente une bobine supraconductrice fortement inductive, une étude qualitative suffit donc.

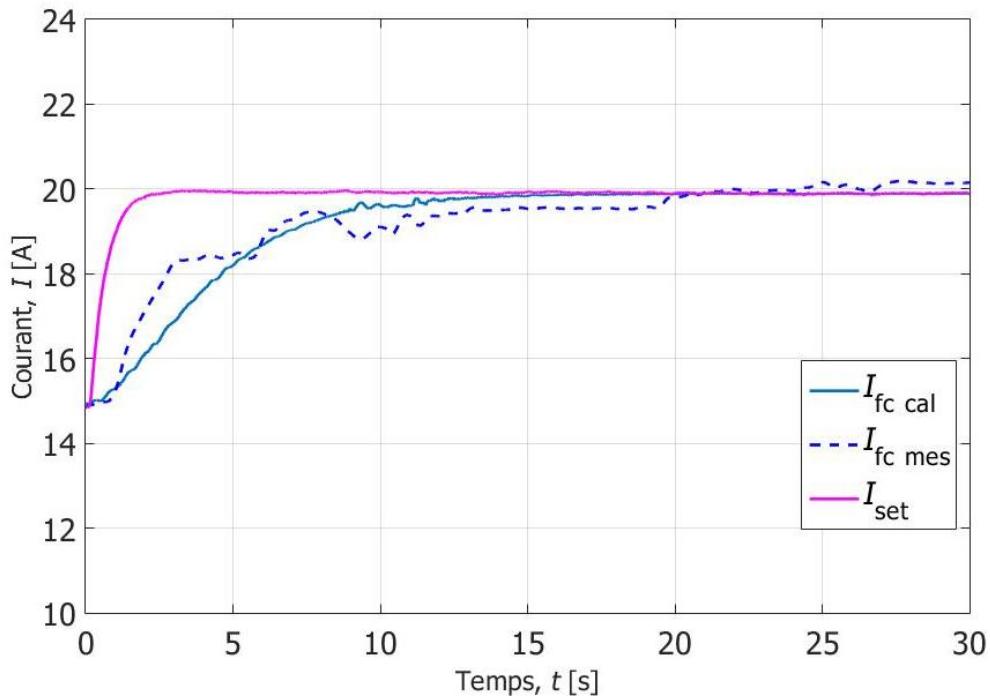


Figure II-6. Courant simulé de la pile à combustible $I_{fc\ cal}$ et courant de pile mesuré $I_{fc\ mes}$ obtenu avec une PEMFC reliée par un fil de $4\ m\Omega$ à une bobine supraconductrice de $4\ mH$. Réponse d'un échelon dans I_{set} de 15 à $20\ A$.

II.2.5 Résultats et discussion

La connexion d'une PEMFC avec une bobine supraconductrice est totalement inédite et a été simulée avec succès dans la section II.2.4. Le schéma équivalent d'une pile à combustible associée à une bobine peut laisser penser qu'il existe des risques de régime oscillant. En effet, la pile comporte une capacité de couche douche $C_{DLa,c}$ assez élevée et alimente une bobine d'inductance élevée L_{sc} et d'une résistance de liaison nulle. Les valeurs de ces capacités de double couche ont été mesurées sur notre banc expérimental.

Comme mentionné dans la section II.1, les dispositifs supraconducteurs de grande taille peuvent avoir une valeur d'inductance de plusieurs dizaines de henry. Dans les simulations suivantes, la valeur d'inductance de la bobine a été fixée à $10\ H$ tandis que la résistance du fil est maintenue à $4\ m\Omega$. La Figure II-7, montre le temps de réponse de la pile à un échelon de courant consigne, I_{set} , de 0 à $20\ A$. Des ondulations sont observées sur I_{fc} dans le régime établi et la tension de pile à combustible prend des valeurs négatives. Ces ondulations de courant sont indésirables et peuvent entraîner des effets supplémentaires (pertes) dans la bobine supraconductrice.

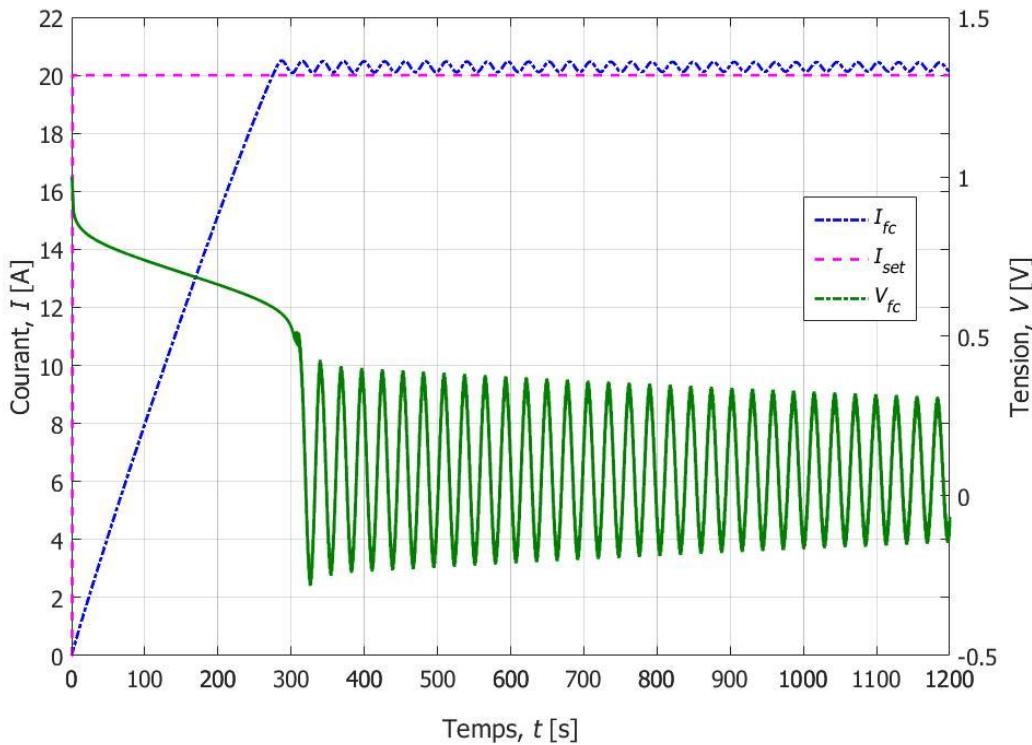


Figure II-7. I_{fc} et V_{fc} fonction du temps après un échelon de consigne en courant I_{set} de 0 à 20 A.

Cependant, l'amplitude des oscillations de courant est de l'ordre de 2,5 % de la valeur de consigne. Cette amplitude n'est pas suffisante pour générer des pertes importantes dans le supraconducteur. Cependant, dans quelques applications où une haute stabilité de l'induction magnétique est demandée, ceci peut entraîner des problèmes de fonctionnement. En revanche, les ondulations de tension peuvent être dommageables à la pile. En effet, certaines valeurs négatives de la tension conduisent à des dommages irréversibles. Ainsi, contrôler ces oscillations est nécessaire afin d'éviter à la PEMFC d'être soumise à une tension inverse.

Il a été mis en évidence dans la Figure II-7 que le courant de pile à combustible I_{fc} suit lentement le point de consigne de courant I_{set} . Ce résultat est principalement dû à la valeur élevée de l'inductance de la bobine et de la basse tension qui peut être délivré par une seule cellule de pile à combustible en court-circuit. Le régime transitoire de I_{fc} se caractérise par une augmentation quasi linéaire de 0 à 20 A et une constante de temps de 280 s. Pour réduire la durée de ce régime transitoire, l'utilisation de plusieurs cellules en série peut être pertinente afin d'augmenter la tension de la source (la pile). Dans tous les cas, la bobine doit être alimentée avec une variation de courant de l'ordre de 1 A/s pour éviter la perte accidentelle de l'état supraconducteur. En effet, une variation rapide du courant peut faire transiter le matériau.

La résistance des fils de connexion à la pile à combustible, R_{wire} , a une influence sur les ondulations du courant I_{fc} dans le régime établi. Par conséquent, l'utilisation d'une résistance de contrôle de valeur variable R_{co} en série avec la bobine peut servir comme élément permettant la suppression des

ondulations de courant (Figure II-8). La valeur de la résistance de contrôle est adaptée pour le régime transitoire et le régime établi de I_{fc} (deux valeurs). La valeur de la résistance de contrôle R_{co} , doit travailler dans une plage de valeurs finies, délimitées par une valeur minimale proche du 0Ω , afin d'augmenter la vitesse de charge de la bobine, ainsi que par une valeur maximale pour limiter les oscillations du courant dans le régime établi sans produire la perte du mode de fonctionnement en source de courant. Dans une autre configuration, si ce n'est pas nécessaire, cette valeur de résistance de contrôle peut être définie à une seule valeur. Cette solution devient très complexe à réaliser car il faut trouver une résistance variable de faible valeur pouvant conduire un courant élevé. Ce qui nous amène à utiliser un interrupteur de puissance Mosfet dans une configuration particulière : résistance contrôlée par tension [104]. Ceci va à l'encontre de notre objectif de simplification du système, mais on ne peut pas éviter l'emploi de dispositifs permettant d'assurer le maintien des conditions opératoires.

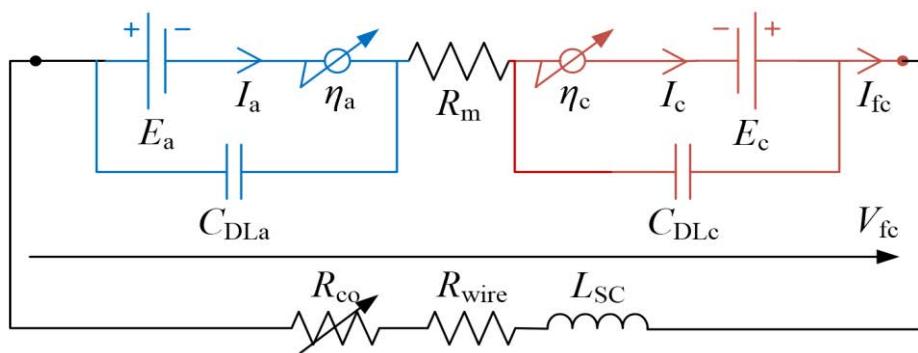


Figure II-8. Modèle équivalent circuit électrique d'une pile à combustible monocellule connectée à une bobine supraconductrice. La résistance variable R_{co} aide à la gestion des ondulations de courant.

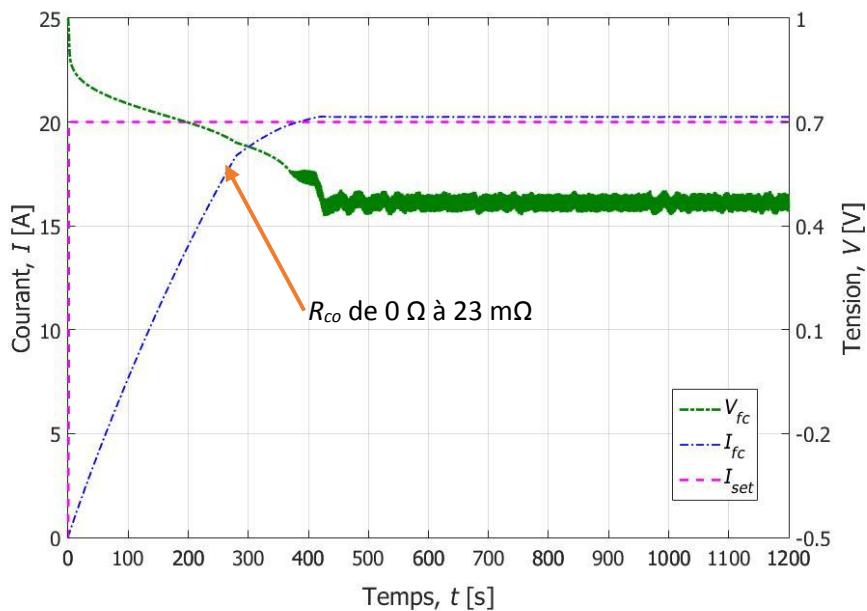


Figure II-9. Réponse de la pile à un échelon de consigne I_{set} de 0 à 20 A. Variation de la valeur de R_{co} de 0 à 23 mΩ à 280 s produisant une réduction des ondulations de I_{fc} .

Les réponses de I_{fc} et V_{fc} à un échelon en consigne de courant I_{set} de 0 à 20 A sont à nouveau représentées sur la Figure II-9, mais cette fois, avec une résistance de contrôle R_{co} . Durant le régime transitoire, la valeur de R_{co} est maintenue à zéro afin de conserver la vitesse de montée du courant I_{fc} élevée. Dans ce cas, une valeur de 23 mΩ pour la résistance de contrôle R_{co} en $t = 280$ s, conduit à une suppression totale des ondulations de courant I_{fc} . Par conséquent, la nécessité d'un système de contrôle est évidente.

Cette dernière valeur de R_{co} annule les ondulations du courant dans la bobine et empêche donc la tension V_{fc} de prendre des valeurs négatives. La mise en œuvre d'une résistance électronique variable commandée qui fonctionnerait à la place de R_{co} , peut affecter le contrôle, le rendement et la stabilité du système, car cette résistance doit être capable de supporter des valeurs élevées de courant. La difficulté de trouver des valeurs assez faibles dans la résistance directe du Mosfet, peut aussi affecter les modes de fonctionnement du système. Cet solution a besoin d'une mise en œuvre très minutieuse pouvant augmenter le temps de préparation de la partie expérimentale. Cette solution a été abandonné mais elle a apporté des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement du système.

Une deuxième solution tout aussi efficace consisterait en l'installation d'une boucle de régulation du courant de référence de telle manière que la valeur de consigne décrive une rampe. Ce contrôle direct des ondulations de courant de pile est la solution la plus appropriée, car il peut être intégré dans le système de contrôle de la pile déjà existant. L'étude avec une rampe de courant I_{set} est réalisée avec les mêmes valeurs électriques utilisées dans l'étude de l'échelon dans le courant. La valeur de la pente de I_{set} a été établie à 0,025 A/s selon la constante de temps du système. Cette pente ne doit en aucun cas être supérieure à la pente choisie pour la bobine, cela garantit une tension de pile toujours positive.

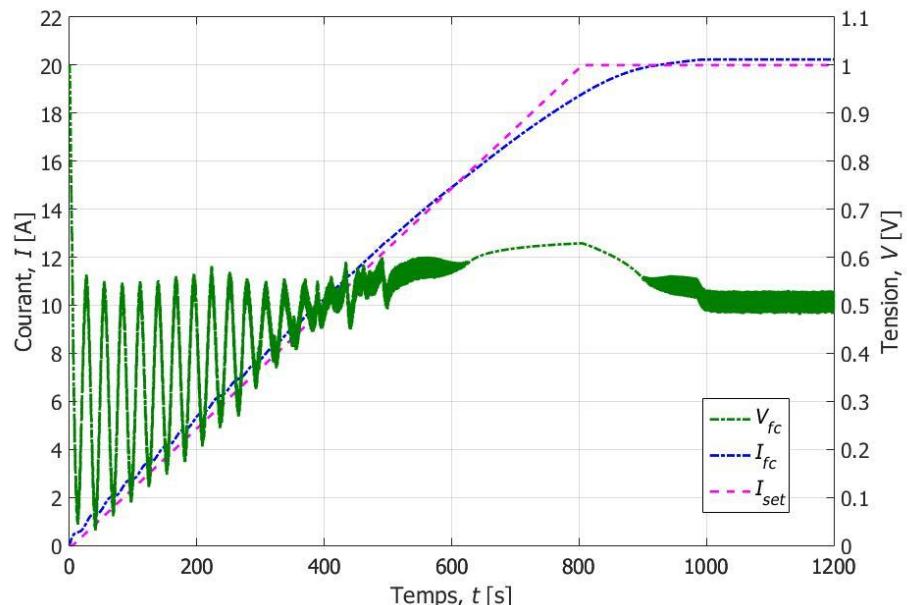


Figure II-10. Réponse du système à une rampe dans la consigne I_{set} .

La Figure II-10 montre les réponses dans I_{fc} et V_{fc} pour ce régime. La durée du régime transitoire a augmenté de 3,2 fois en comparaison avec l'étude précédente. Les ondulations de courant sont également annulées et V_{fc} ne prend pas de valeurs négatives. L'emploi d'une rampe pour le contrôle de la PEMFC peut être adapté sans le rajout de la résistance R_{co} . Ceci se traduit par une connexion quasi directe entre les deux dispositifs comprenant la pile à combustible et la bobine supraconductrice. Par conséquent, la réalisation d'un système composé d'une pile à combustible comme source d'alimentation d'un système supraconducteur est tout à fait possible. Il existe une série d'autres facteurs qui doivent être résolus pour sécuriser les deux dispositifs avant d'effectuer le test expérimental. Un élément d'importance pour le fonctionnement de la bobine supraconductrice a été peu étudié précédemment : la résistance de protection (employée pour dissiper l'énergie stockée dans la bobine en cas de quench) a un impact sur l'atténuation des oscillations du courant de pile. Nous avons introduit la résistance de protection dans le modèle du système.

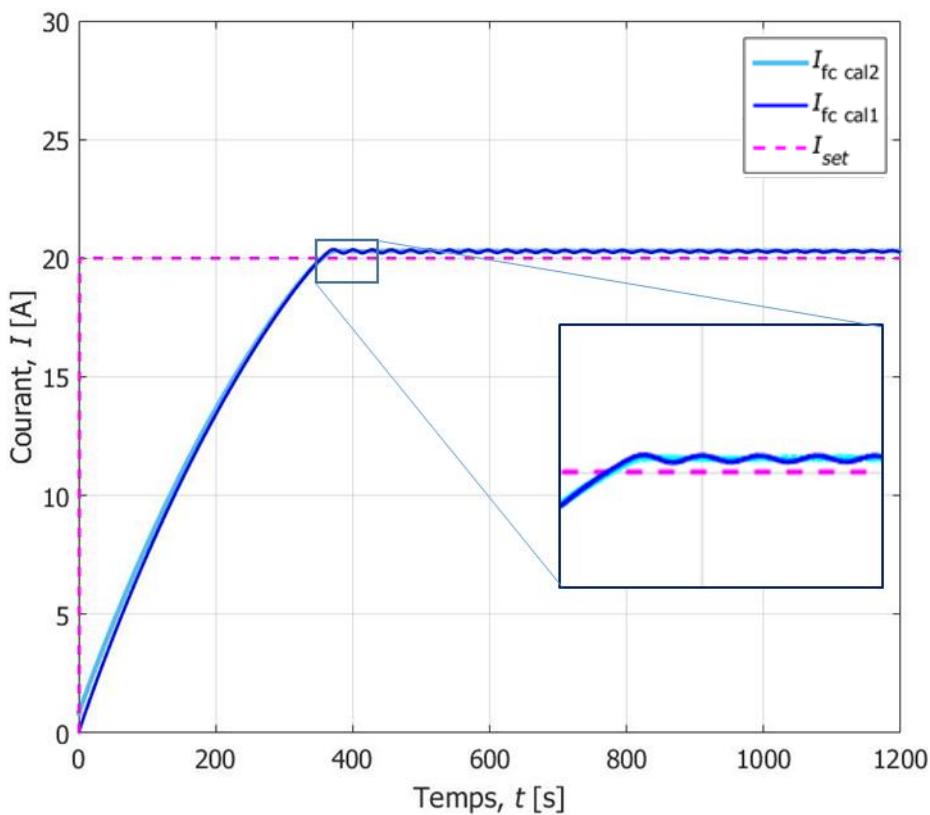


Figure II-11 Influence de la résistance de protection dans le courant de pile.

Dans la Figure II-11, nous avons calculé la réponse du circuit sous l'influence de la résistance de protection R_{pro} ($I_{fc\ cal2}$ courbe bleu clair). Le courant I_{fc} est comparé avec le résultat de calcul sans la présence de la résistance de protection dans le circuit montrant une réduction significative des oscillations. Donc nous pouvons affirmer que cette résistance peut contribuer à atténuer les oscillations du courant I_{fc} .

La valeur de cette résistance est imposée à 1Ω et elle est connectée en parallèle à la bobine supraconductrice. Cette résistance est utilisée pour la protection contre les défaillances de la bobine supraconductrice et sa valeur ne peut pas être modifiée pour l'adapter à notre système.

Nous pouvons affirmer que la résistance de protection contribue à l'amortissement des oscillations dans le courant de la pile à combustible. Même si la valeur de R_{pro} est très supérieure à la valeur de résistance de charge, elle est court-circuitée par la résistance nulle de la bobine supraconductrice. Donc le courant qui circule à travers la résistance de protection reste très faible par rapport au courant dans la bobine supraconductrice et peut donc être considéré comme un courant de fuite en régime permanent.

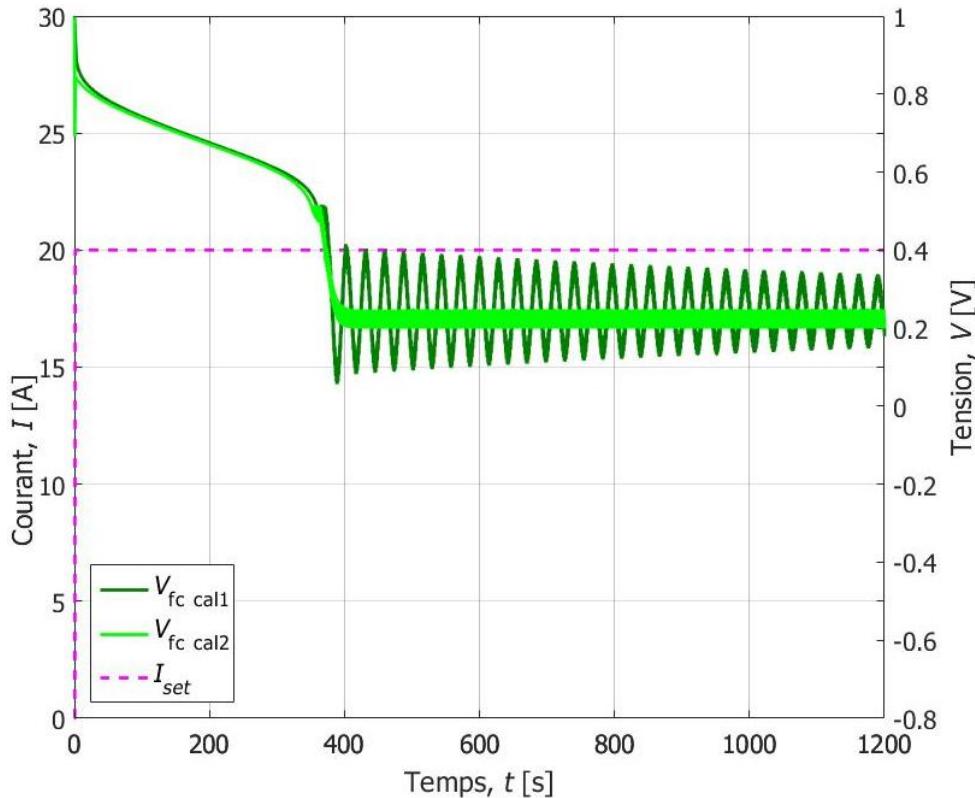


Figure II-12 Influence de la résistance de protection sur la tension de pile.

La Figure II-12 montre une comparaison entre les résultats de simulation entre les valeurs de tension de pile avec (cal2) et sans (cal1) la résistance de protection de la bobine supraconductrice. Les oscillations de tension sont également atténuées. Ce qui confirmerait que grâce à la présence de la résistance de protection, les oscillations observées dans les simulations précédentes ne seront pas visibles dans l'essai expérimental ou avec une oscillation moins importante.

Nous allons présenter dans la section suivante le banc expérimental comprenant la PEMFC et la bobine supraconductrice de 10 H.

II.3 Banc expérimental d'une pile à combustible alimentant une bobine supraconductrice de 10 H

II.3.1 Système de contrôle pour la connexion entre la pile à combustible et la bobine supraconductrice

La pile à combustible a besoin d'un système de gestion qui va contrôler et surveiller les différentes variables pendant son fonctionnement. Ce système est composé de régulateurs de débit de gaz, régulateurs de température, système d'humidification de l'air, systèmes de protection contre les défauts et d'une interface homme-machine, Figure II-13.

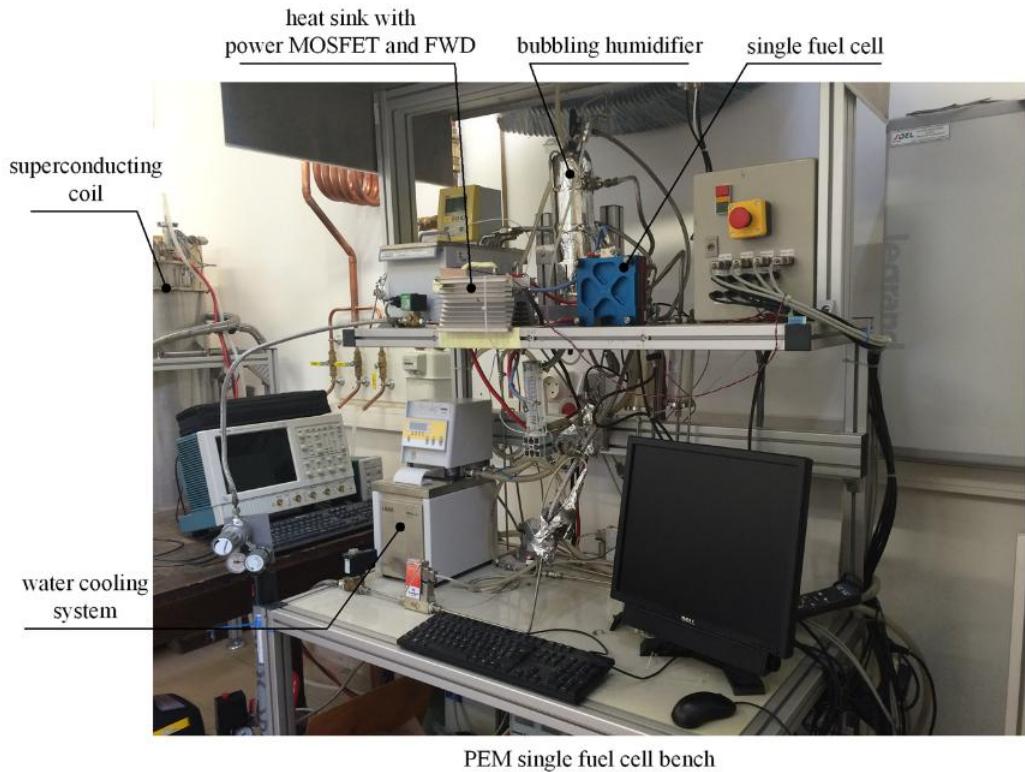


Figure II-13. Banc d'essai de connexion bobine supraconductrice – pile à combustible.

Pour la connexion entre la pile à combustible et la bobine supraconductrice, il a été nécessaire de concevoir un système supplémentaire pour la protection de la pile à combustible (la bobine supraconductrice peut résister mieux aux défauts). Les critères imposés par la simulation faite dans la section II.2 ont montré une série de contraintes à prendre en compte. Ce système doit protéger les deux éléments contre ses dysfonctionnements. Côté pile à combustible, les défauts à éviter sont l'inversion du courant I_{fc} (courant entrant dans la pile) et la tension négative V_{fc} . La bobine supraconductrice est plus robuste contre les défauts que la pile à combustible, mais les dysfonctionnements qu'elle peut subir peuvent affecter la pile à combustible. Un des défauts les plus fréquents dans une bobine supraconductrice est la génération d'un quench. Ceci se produit quand la bobine perd son état supraconducteur brutalement. Pour cela, elle requiert généralement des protections, notamment un système capable

de détecter le quench et de dissiper l'énergie. La génération d'un quench peut occasionner une libération d'énergie stockée de la bobine vers la source.

Une des contraintes de ce montage est la limitation de la longueur des câbles de connexion qui doivent être les plus courts possible (résistance la plus faible possible).

II.3.2 Choix d'une pile à combustible mono-cellule

Pour ce premier test, l'étude de faisabilité a été réalisée avec les simulations de la section II.2.4. Il reste à définir si la pile doit comporter une ou plusieurs cellules. Le régime en court-circuit de la pile à combustible reste un régime complexe et le comportement d'une cellule de pile en court-circuit peut être différent de celui d'un stack comportant plusieurs cellules (possibilité d'inversion de tension pour certaines cellules), par conséquent une étude plus approfondie reste à faire dans ce cas. L'emploi des cellules en parallèle augmente aussi la complexité du système multipliant le nombre des éléments de contrôle de débits de gaz, circuits de régulation de température, etc. Un autre facteur d'importance est la compacité du système de la pile et la simplicité de remplacement de la membrane. Une pile ne comportant qu'une cellule répond parfaitement à ces exigences. Le courant maximal que peut fournir la pile dépend de sa surface active. Par conséquent, pour augmenter le courant, il suffit d'augmenter la section de pile, dans notre cas la pile utilisée de surface active de 100 cm^2 peut fournir jusqu'à 50 A nominal et 100 A en court-circuit.

II.3.3 Structure de l'alimentation pour la bobine supraconductrice

La structure électrique est représentée en Figure II-14. Elle se compose d'une pile à combustible de type PEM composée d'une cellule de 100 cm^2 de surface active, d'un transistor MOS de puissance comme élément de connexion (nécessaire en cas d'arrêt d'urgence), d'une diode de roue libre (FWD) pour confiner le courant libéré par la bobine sur elle-même et d'une bobine supraconductrice avec sa résistance de protection R_{pro} connectée en parallèle. La résistance de contrôle R_{co} a été négligée pour ce premier test. En remplacement, nous avons utilisé une boucle de régulation PI qui va contrôler le courant de référence I_{set} (qui peut également servir à la gestion des oscillations ou dépassement de consigne). Les instruments de mesure de tension et de courant sont placés côté pile à combustible et côté bobine supraconductrice respectivement.

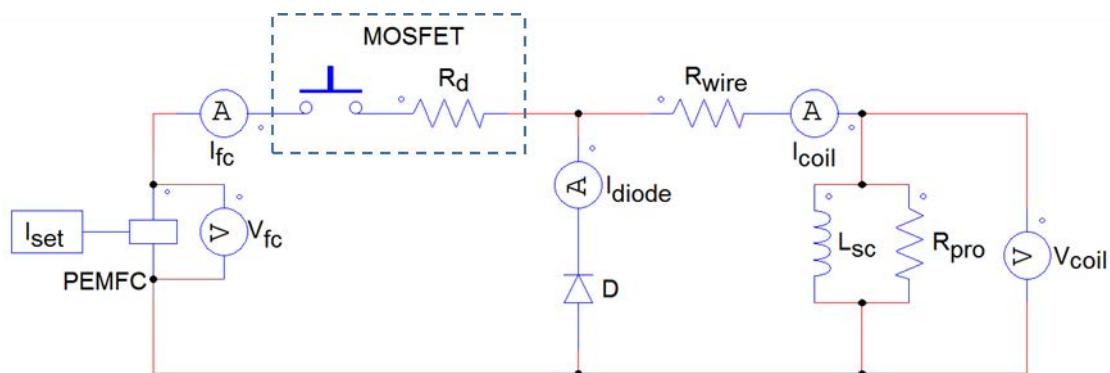


Figure II-14. Structure de l'alimentation en courant de la bobine supraconductrice.

Pour la mise en œuvre de l'expérience, le banc d'essai a été configuré de la façon suivante :

La cellule est alimentée en air sec et en hydrogène pur. La température de la cellule est régulée à 60 °C par un bain thermostaté. La température de l'air d'entrée est de 54 °C et son humidité relative est d'environ 75 %. Les pressions des gaz sont 1 atm à l'anode et à la cathode. Les stœchiométries des gaz ont été fixées à $\zeta_a = 1$, $\zeta_c = 4$ pendant toute la durée de l'essai. L'interrupteur servant à connecter la pile à sa charge est un transistor MOSFET de 100 V et 1200 A, sa résistance à l'état de conduction est d'environ 1 mΩ lorsque la tension de grille est de 15 V. Par conséquent, la résistance totale de la boucle comprenant l'interrupteur et les fils de connexion est d'environ 2 mΩ. Pour que le point de fonctionnement se situe dans la zone de travail en source de courant de la PEMFC, il est nécessaire de maintenir la valeur totale de résistance de charge aussi faible que possible ($R_{wire} + R_d + R_{sc} \approx 0$). Le MOSFET a été choisi à l'aide de ce critère. La bobine supraconductrice est refroidie par de l'hélium liquide. Il s'agit d'une bobine NbTi et la valeur de son inductance est de 10 H. Elle est protégée par une résistance R_{pro} de 1 Ω à 4,2 K (1 Ω à température ambiante). La résistance de liaison entre la bobine et la diode de roue libre FWD est d'environ 10 mΩ. La diode de roue est employée pour la limitation de la tension négative vue par la pile à combustible et elle va devenir passant quand la bobine supraconductrice est en convention génération.

II.3.4 Expérimentation

II.3.4.1 Composition du banc d'essai

Le banc d'essai est composé de trois éléments principaux, de mesure et de contrôle. Le transistor MOSFET est utilisé comme interrupteur de mise en marche de l'alimentation de la bobine supraconductrice mais également d'arrêt d'urgence en cas de défaut, il sépare la source (la pile) de sa charge (la bobine supraconductrice) (Figure II-14). En cas de défaut la diode de roue libre (FWD diode) conduit, dissipant ainsi une partie de l'énergie stockée dans la bobine. La bobine supraconductrice présentée en Figure II-15 mesure 120 cm de haut et pèse un peu plus de 80 Kg avec le cryostat. Cette bobine est refroidie à l'hélium liquide à une température de 4,2 K. A l'état supraconducteur, cette bobine peut générer une induction magnétique de 4 T. Habituellement, elle est alimentée au moyen d'une source spéciale pour systèmes supraconducteurs avec un contrôleur et un absorbeur d'énergie construits respectivement par TDK-Lambda et AMI, American magnetics. La source d'alimentation est une TDK-Lambda GEN 10-330 DC Power supplies. Elle possède les caractéristiques électriques suivantes : Tension d'alimentation : 200-240 VAC ± 10 %, Fréquence d'opération : 50-60 Hz, Courant maximal fourni : 330 A +10 Vdc, Puissance maximale de sortie 3,3kW, poids : 13 kg, dimensions : 423 mm W, 88 mm H, 442,5 mm D. Le contrôleur est un AMI 420 Digital Power Supply Programmer, avec les caractéristiques électriques suivantes : Tension d'alimentation : 200-240 VAC ±10%, Fréquence d'opération : 50-60 Hz, Résolution de mesure @ 300 A : 0,6 mA, Taux minimal de rampe : 1 mA/min, Taux maximal de rampe : 60 A/s, poids : 4,2 kg, dimensions : 89 mm H, 483 mm W, 191 mm D. L'absorbeur d'énergie est un AMI Model 601 Energy Absorber 5V-130A @ 25°C, avec les caractéristiques électriques

suivantes : Tension d'alimentation : 100 to 240 VAC \pm 10%, Fréquence d'opération : 50/60 Hz, Courant nominal maximum de l'aimant : 130 A @ 25 °C, résistance en série interne : 2 mΩ \pm 1mΩ. Cette source d'alimentation et l'absorbeur vont être remplacés par une monocellule de pile à combustible.

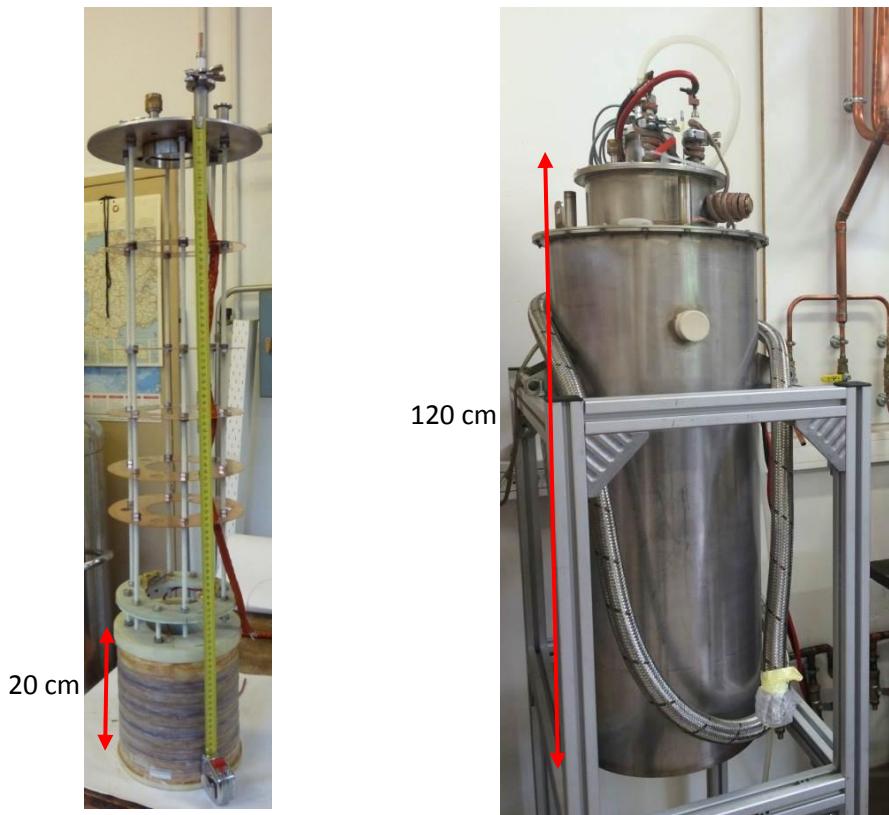


Figure II-15. Bobine supraconductrice d'inductance 10 H.

La pile à combustible PEMFC produite par UBZM possède les caractéristiques électriques suivantes : Tension de sortie : 1 V, Courant max de sortie : 50 A, Puissance de sortie : 50 W, dimensions : 140 mm H X 140 mm W X 80 mm D, poids : 2 kg. Ce qui représente une grande réduction en taille et poids en comparaison avec la source d'alimentation précédente.

Le système pile est constitué lui-même d'éléments de régulation de température, régulation de l'humidité de l'air et régulateurs du débit de gaz (Figure II-13). Ce qui augmente l'encombrement et le poids de la source, cependant le système n'est pas du tout optimisé pour cet usage et reste un dispositif expérimental de laboratoire sur-instrumenté.

L'acquisition se fait à l'aide de deux oscilloscopes numériques de 4 canaux. L'un d'entre eux va acquérir les mesures de V_{fc} , I_{fc} , I_{set} et d_{H2} et le deuxième oscilloscope va acquérir les mesures de V_{coil} , I_{coil} et I_{diode} . Ils sont synchronisés manuellement. Les données des courbes sont traitées sous Matlab.

II.3.4.2 Résultats

La première partie de l'essai reproduit le comportement du système pour un échelon de courant de référence I_{set} de 0 à 20 A et est considéré comme la mise en route du banc. La circulation des gaz et

l'humidification de la pile doit être réalisée préalablement, comme cela a été montré dans la section II.2.4.

La constante de temps est définie avec l'équation (II-9) où la résistance électrique du circuit de puissance peut être déterminée.

$$\tau = \frac{L_{SC}}{R_{wire} + R_d + R_{SC}} \quad (\text{II-9})$$

La Figure II-16 montre les mesures visualisées à l'oscilloscope lors de la mise en marche du banc (côté pile à combustible). Le courant de pile I_{fc} a une constante de temps bien plus élevée (environ 500 s, Figure II-16a), que la constante de temps de 300 s obtenue par simulation montrée dans la Figure II-7. Ce temps est lié au dépassement de 35 % par rapport à la valeur de consigne, qui provient de l'hydrogène restant stocké dans les tuyaux d'alimentation, les couches de diffusion et les canaux de diffusion des gaz.

Cela veut dire que l'hydrogène est encore présent dans le système interne une fois que le débitmètre d'hydrogène est fermé et continue à produire du courant jusqu'à sa consommation totale (560 s courbe bleue). L'échelon dans le courant de consigne impose au système de régulation un excédent en pression d'hydrogène pour compenser l'erreur sur la valeur du courant de la bobine. C'est-à-dire que la boucle de régulation va envoyer en excès d'hydrogène pour compenser l'erreur entre le courant de consigne et le courant de pile. Dans le modèle du système ce stockage d'hydrogène a été représenté par une capacité électrique qui va augmenter l'amplitude du courant anodique.

Ainsi, le contrôle du courant de la pile à combustible par le débit d'hydrogène ne peut pas être assuré pendant un régime transitoire assez rapide comme celui imposé par un échelon.

La Figure II-16b présente les mesures de tension aux bornes de la pile, V_{fc} , et du courant dans la diode FWD, I_{diode} . La tension de la pile à combustible reste assez élevée pendant le régime transitoire, ne permettant pas à la pile à combustible d'être dans la zone en mode source de courant. Ce mode d'opération apparaît une fois que le régime établi est acquis.

A partir de ces deux graphiques, un comportement indésirable apparaît : la tension fournie par la pile à combustible devient négative lorsque I_{fc} a une pente négative (560 ... 640 s). Cela signifie que la bobine se décharge sur la pile et devient génératrice, le courant produit par la pile est inférieur au courant stocké dans la bobine. La tension vue par la pile devient alors négative polarisant la diode de roue libre qui se met à conduire à partir de 560 s. Cette diode de roue libre est employée pour aider la limitation de la tension négative vue par la pile à combustible. Donc la tension de pile ne peut dépasser la valeur de tension en direct de la diode, soit -0,7 V.

Ce comportement souligne l'importance de la diode de roue libre qui entre en fonctionnement et reconduit une partie du courant fourni par la bobine dans une boucle fermée. Pour l'alimentation d'une bobine supraconductrice, l'échelon n'a pas de sens, normalement la mise sous courant se fait suivant une rampe avec une variation de courant de l'ordre de 1 A/s pour la bobine supraconductrice employée dans cette expérience.

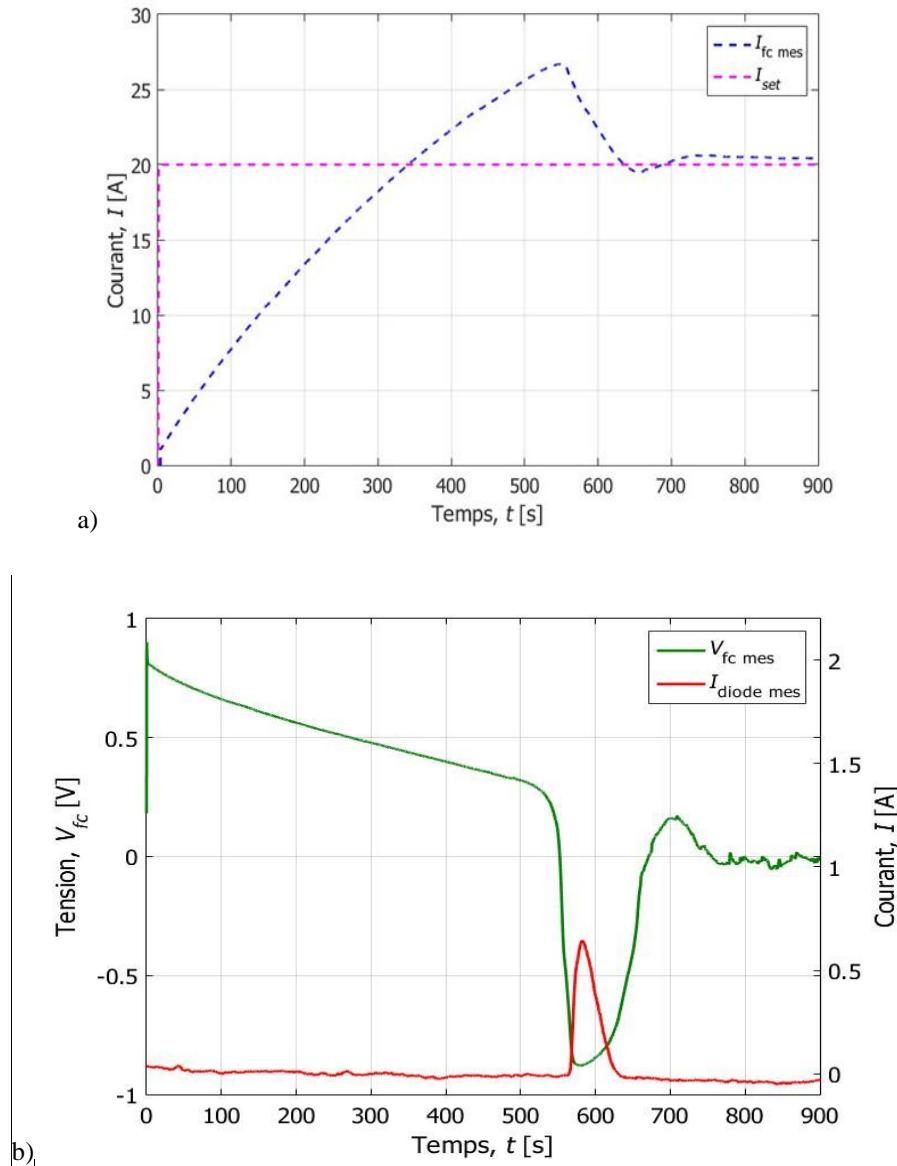


Figure II-16. a) Réponse du courant de pile I_{fc} à un échelon dans le courant de consigne I_{set} de 0 à 20 A. b) Réponse de la tension de pile V_{fc} et du courant dans la diode I_{diode} .

Donc la pile devient réceptrice comme l'indique l'inversion de tension à ses bornes. Le circuit présente trois étapes de fonctionnement, la première décrite dans la Figure II-17 pour le régime transitoire où la pile à combustible fournit de l'énergie à la bobine supraconductrice directement ($t = 0 \dots 560$ s), une deuxième étape comprise entre $t = 560 \dots 640$ s, où la diode de roue libre est passante avec une tension de pile de -0,5 V (Figure II-18).

Cependant le système opère sous les deux formes de fonctionnement étudiés de la pile à combustible, pendant le régime transitoire, la pile se comporte comme une source de tension. Ainsi le fonctionnement en source de courant est acquis pendant le régime établi (troisième étape) quand la diode est à nouveau bloquée et le circuit se comporte alors comme dans la Figure II-17.

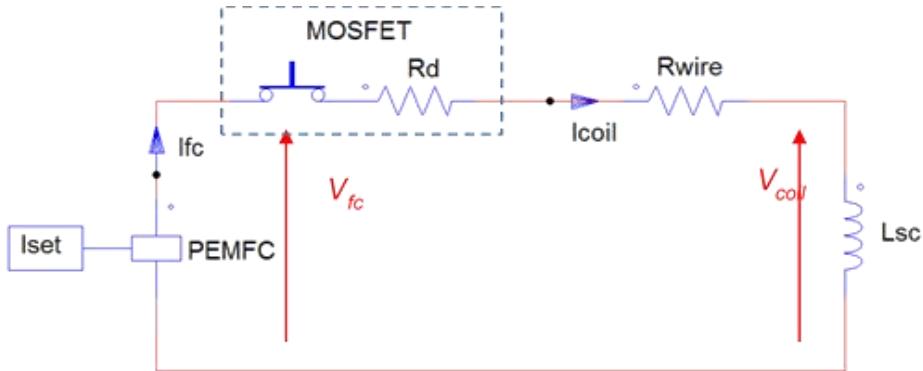


Figure II-17. Circuit de fonctionnement pendant le régime transitoire et le régime établi.

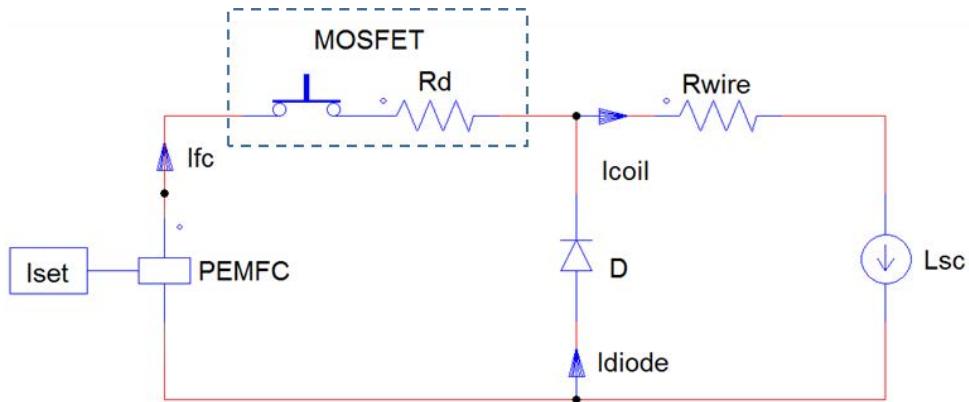


Figure II-18. Circuit de fonctionnement pendant la diode de roue libre est passante.

Dans la Figure II-19 le courant I_{fc} mesuré est comparé avec le courant I_{fc} calculé par le modèle du système tenant compte de la totalité des éléments intervenants dans le fonctionnement du circuit. Les éléments ont été étudiés de façon individuelle pouvant décrire leur contribution dans le fonctionnement du système. La valeur de la résistance de charge et la résistance de protection sont responsables de l'établissement et du maintien du fonctionnement en source de courant et de la réduction des oscillations dans le courant de pile. Le volume de gaz contenu dans les tuyaux et canaux placés entre le débitmètre d'hydrogène et la membrane va contribuer, dans la production d'un excès de courant dans le cas de changements de charge très dynamiques.

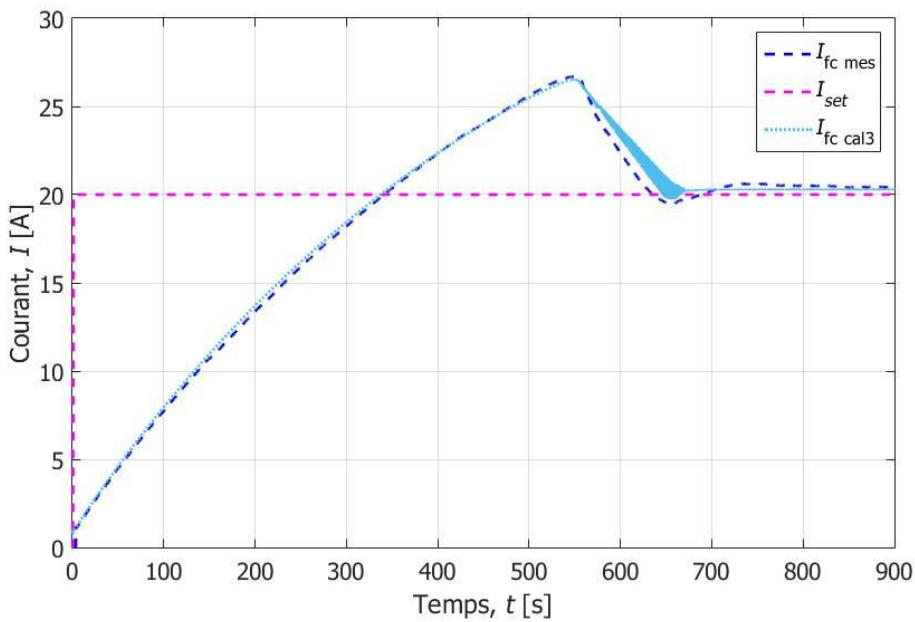


Figure II-19 Comparaison entre les courants de pile à combustible en tenant compte de l'excès d'hydrogène stocké et la diode de roue libre.

La deuxième partie expérimentale a consisté à la mise en place de la procédure pour le contrôle du courant de la pile à combustible dans le régime établi (mode de fonctionnement en source de courant). Cela se fait par une rampe dans le courant de consigne I_{set} . Dans le premier test de mise en route du banc, la rampe a été imposée par l'inductance élevée du système à 0,057 A/s. Afin de maintenir la pile à combustible dans la zone de fonctionnement comme source de courant et d'annuler la tension négative dans la pile, la rampe a été calculée à 0,025 A/s (Figure II-10). La pente à employer doit être inférieure à cette valeur, ce critère peut s'imposer par un seuil dans la tension de pile fixée, par la chute de tension dans l'ensemble des résistances et par la chute de tension dans la bobine.

Un débit d'hydrogène a été imposé pour avoir une variation du courant de référence de 0,01 A/s. Cette valeur de pente va assurer le non dysfonctionnement du système pendant le régime transitoire (perte du mode de fonctionnement en source de courant), dans ce cas le courant de la pile à combustible peut être contrôlé directement par le débit d'hydrogène. Cela confirme que le système peut fonctionner dans un état simplifié avec le minimum d'éléments complémentaires (diode de roue libre et un transistor MOSFET). Dans la Figure II-20, les différentes valeurs de courant et tension mesurées et calculées sont ainsi comparées. La tension de la pile à combustible reste positive et n'acquiert pas une valeur élevée provoquant la sortie du mode source de courant.

Le courant mesuré $I_{fc\ mes}$ suit parfaitement la consigne I_{set} , ce qui s'adapte aux résultats du calcul du courant avec le modèle du système $I_{fc\ cal3}$. Les valeurs de tension $V_{fc\ mes}$ et $V_{fc\ cal3}$ montrent une bonne similitude entre la valeur mesurée et la valeur de tension calculée. La valeur de tension reste assez

faible comme pour assurer le maintien du mode en source de courant. La diode de roue libre reste pendant toute la durée du test bloquée ($I_{diode} = 0$) indiquant que la bobine supraconductrice reste réceptrice et que la pile fournie directement de l'énergie à la charge (Figure II-21).

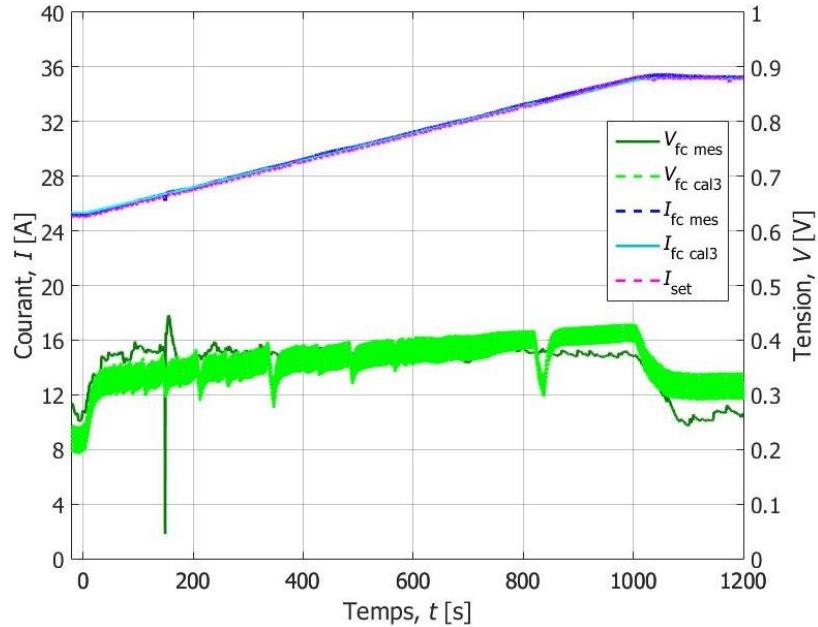


Figure II-20. Rampe positive de courant de consigne de 25 à 35 A.

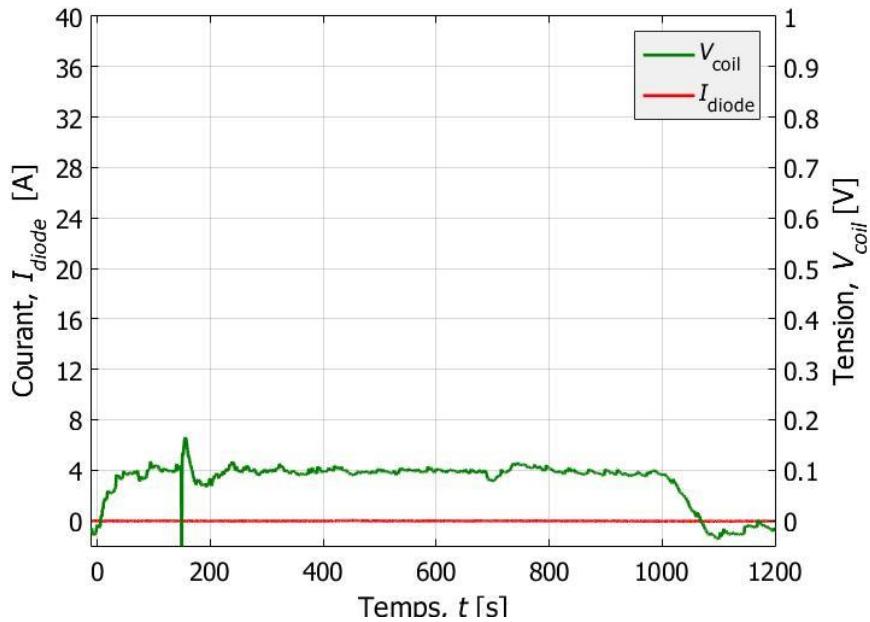


Figure II-21. Courant dans la diode pendant la rampe positive I_{set} de 25 à 35 A et la tension dans la bobine $V_{coil\ mes}$.

Les performances du système pendant l'essai avec une rampe en I_{set} , ont confirmé que sur une grande inductance, la pile à combustible peut fournir du courant totalement contrôlé par le débit d'hydrogène. Les deux courbes de courant se suivent parfaitement. La bobine supraconductrice a produit une induction magnétique stable et sans perturbation.

Une deuxième rampe a été mise en place pour l'arrêt du système et elle est montrée dans la Figure II-22. Cette variation dans le courant a été fixée à -0,02 A/s, de 35 à 25 A. Le fonctionnement en source de courant pour la pile à combustible est respecté (V_{fc} proche de 0 V et toujours positive). La variation du courant est deux fois plus rapide que dans l'essai fait avec la rampe positive. Cela confirme que la variation du courant pendant la phase d'arrêt du système peut être plus rapide sans remettre en cause l'état supraconducteur de la bobine. Les valeurs calculées par le modèle du système sont également représentées sur la figure et montrent une bonne précision et capacité de prédiction des résultats ($V_{fc\ cal3}$, $I_{fc\ cal3}$).

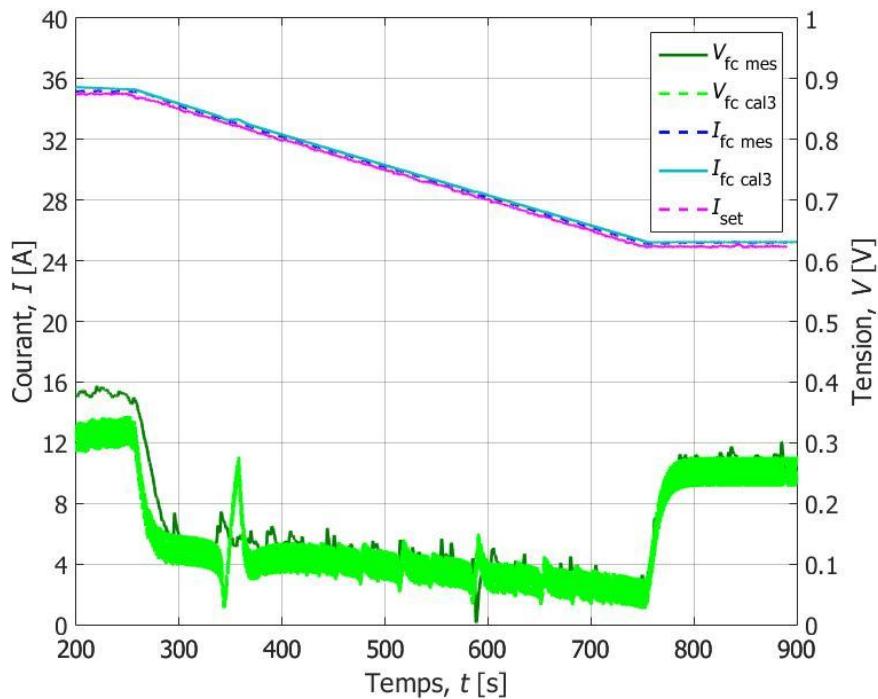


Figure II-22. Rampe négative de courant de consigne de 35 à 25 A.

II.4 Conclusions

Une nouvelle application pour la pile à combustible a été testée expérimentalement avec succès. L'objectif principal était de montrer la faisabilité et l'intérêt qu'il peut exister quant à l'utilisation d'une monocellule de pile à combustible comme source de courant continu. En effet, d'une part on s'affranchit du réseau électrique d'alimentation et de tous les problèmes de pollution harmonique qui peut en découler et, d'autre part, on est assuré d'avoir un courant continu de qualité : pas de découpage dû aux composants de puissance dans le cas d'une source électronique, et absence d'ondulation. De plus, si le dispositif est optimisé en taille et en poids, il présente l'intérêt d'être autonome et moins

encombrant que les sources de courant continu basse tension usuelles que l'on trouve sur le marché. Un avantage que présente également la pile est l'augmentation du courant qui peut se faire par une simple augmentation de taille de cellule (augmentation de la surface active) ou par l'interconnexion de plusieurs cellules en parallèle. Le voltage peut également être augmenté par la connexion de cellules en série, passage d'une monocellule à un stack de pile à n cellules. La mise en œuvre du fonctionnement en source de courant dans le cas d'une bobine supraconductrice, où les contraintes à respecter pour éviter que la bobine ne transite sont assez sévères, souligne le potentiel prometteur d'une telle utilisation de la pile à combustible. Cette étude reste bien évidemment à être approfondie, notamment sur la partie électrochimique et concernant les matériaux qui ne sont pas traités dans cette thèse. Il reste par exemple à vérifier si, dans ces conditions, la distribution du courant à l'intérieur de la pile ne produit pas de détériorations dans la cellule. Le mode de fonctionnement en courant d'une pile à combustible alimentant une bobine supraconductrice reste une expérience inédite. La mise en œuvre de tous les éléments impliqués a représenté un défi important, notamment logistique. Il a également été difficile de trouver des références bibliographiques hormis celles produites par notre laboratoire.

III- Dimensionnement d'un aimant vectoriel supraconducteur

III.1 Introduction

Avec les résultats obtenus dans le chapitre 2, nous avons montré par des moyens expérimentaux que l'emploi d'une pile à combustible comme source d'alimentation pour une bobine supraconductrice est tout à fait pertinent. Le fonctionnement de ce système composé de ces deux éléments a été réalisé tout en assurant la protection de la pile à combustible contre le défaut de courant inversé. Cette protection a été réalisée grâce un composant de puissance, le MOSFET et une diode de roue libre.

Néanmoins, l'essai précédent avec la bobine de 10 H et l'essai avec la bobine 4 mH ne sont pas des cas ordinaires où une source de courant spéciale pour dispositifs supraconducteurs est demandée. Les bobines supraconductrices commercialisées sont généralement de plusieurs dizaines d'henry, ce qui se traduit par une variation encore plus lente du courant dans la pile à combustible que celle obtenue avec l'inductance de 10 H.

Nous souhaitons pouvoir essayer cette nouvelle application de la pile à combustible avec une bobine supraconductrice de forte inductance, représentant plus fidèlement des systèmes supraconducteurs déjà commercialisés. Pour cela, nous nous sommes orientés sur une charge qui peut aussi être valorisée comme plateforme de caractérisation d'échantillons supraconducteurs de grandes tailles, à savoir, un aimant vectoriel. La réalisation de ce dernier essai est importante car il reste à étudier le comportement électrique de la pile à combustible avec des inductances de grandes valeurs et surtout, vérifier la capacité de la pile à combustible à fournir l'amplitude du courant demandé.

Nous envisageons la construction de cet aimant vectoriel composé de plusieurs bobines supraconductrices avec une inductance totale de 60 H refroidie à l'hélium liquide. Cet aimant vectoriel va être employé dans l'étude magnétique de matériaux supraconducteurs. Il est en effet intéressant de caractériser ces matériaux sous des champs magnétiques ayant des directions variables.

Les supraconducteurs sont majoritairement employés pour la production de champs magnétiques élevés, ce qui permet de réaliser des aimants très puissants, utilisés par exemple dans la recherche sur les matériaux ou dans la recherche biomédicale. Dans ces domaines, il est parfois nécessaire d'avoir un champ magnétique intense qui peut être orienté sans avoir besoin de modifier la position de l'échantillon. Dans la recherche sur les matériaux supraconducteurs, cette tâche devient compliquée car les échantillons supraconducteurs doivent être refroidis à des températures cryogéniques. Concevoir un système mécanique qui peut orienter un échantillon à de très basses températures et en minimisant les pertes thermiques devient une tâche difficile.

Les matériaux impliqués dans la construction du système mécanique doivent avoir des coefficients de dilatation thermique proches pour éviter une perte de mobilité à basse température. Parfois, si le champ appliqué est très important, le porte-échantillon doit résister aux efforts électromagnétiques produits dans le système.

Comme une solution ambitieuse, un aimant vectoriel peut s'adapter à ces exigences. Le porte-échantillon et le système de refroidissement peuvent être simplifiés réduisant significativement la durée des tests.

Dans cette application, l'uniformité du champ magnétique produite est essentielle pour la considération constante dans le domaine d'étude. Nous allons d'abord étudier divers types de bobines, spécialement conçues pour la génération de champs magnétiques uniformes.

III.2 État de l'art des bobines de champ magnétique uniforme

L'uniformité du champ magnétique est essentielle pour l'étude que nous envisageons pratiquer sur des échantillons supraconducteurs. Dans la physique des matériaux, un champ magnétique uniforme permet de maintenir les trajectoires des particules, et de les placer dans des conditions d'équilibre magnétique, ce qui facilite l'étude et la compréhension de leurs comportements.

Dans l'étude des matériaux supraconducteurs sous champ uniforme, celui-ci facilitera leur caractérisation ou la validation de nouveaux modèles capables de prédire leur comportement. L'aimant vectoriel semble répondre à cette demande, mais il a besoin de bobines adaptées pour la production du champ homogène. Nous avons besoin que la norme de l'induction magnétique reste la même dans un volume défini. Par la suite, nous montrerons quelles bobines sont capables de produire un champ homogène et évaluerons si elles peuvent être utilisées dans un aimant vectoriel.

III.2.1 Le solénoïde

Un solénoïde est constitué de plusieurs spires circulaires placées et connectées en série les unes à côté des autres sur un même axe d'une longueur finie (Figure III-1). Sa construction est simple, ce qui favorise son utilisation dans de nombreuses applications.

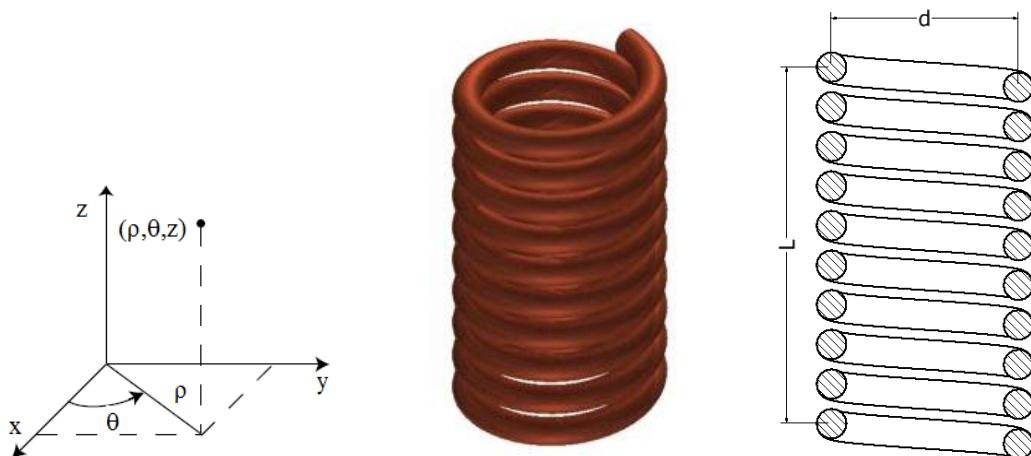


Figure III-1. Illustration d'un solénoïde.

La géométrie du solénoïde produit une concentration d'induction magnétique en son centre qui peut être considérée homogène. Par contre, cette région uniforme n'est pas assez grande pour

certaines expériences et cette géométrie empêche la libre manipulation des échantillons dans un plan perpendiculaire au solénoïde [105], [106]. La densité de flux magnétique \mathbf{B} générée par le solénoïde est composée par $B_\rho(\rho, z)$ et $B_z(\rho, z)$, ce sont les composantes suivant les coordonnées ρ et z . L'expression pour le calcul de \mathbf{B} pour un solénoïde est montrée en détail dans l'annexe VII.1.

III.2.2 Bobine de Helmholtz

La bobine de Helmholtz reçoit son nom du physicien Hermann von Helmholtz (1821-1894), elle consiste en deux solénoïdes de section ronde ou carrée de n tours chacune placée sur un axe commun séparé par une distance égale au rayon des bobines (Figure III-2). Elle produit un volume au centre des bobines où la première et deuxième dérivée de l'induction magnétique sont égales à zéro [107].



Figure III-2. Schéma de la Bobine de Helmholtz.

Son application principale se situe dans la compensation des champs magnétiques parasites de faible intensité et la calibration des sondes magnétiques. Cette bobine est employée communément comme référence dans l'étude de l'homogénéité des champs magnétiques. Sa construction est simple, ce qui réduit son coût de production.

Le calcul de la densité de flux magnétique \mathbf{B} doit tenir compte de la position de chaque bobine (B_1 et B_2) par rapport à l'origine en ajoutant un terme $d/2$ qui représente la séparation entre les bobines sur l'axe z étant égal au rayon des bobines R .

Des calculs numériques ont montré l'influence de la forme de la section d'une bobine sur l'uniformité de la densité de flux magnétique au centre des bobines [6]. Dans la Figure III-3a, trois bobines de même valeur de section de forme rectangulaire sont proposées, avec les dimensions de côté suivantes : $a = 2b$ pour le premier cas, $a = b$ pour le deuxième cas et $a = 1/2b$ pour le troisième cas. Ces différentes sections de bobine vont créer différents gradients de \mathbf{B} affectant l'homogénéité au centre. Dans la Figure III-3b les résultats montrent l'effet sur l'induction magnétique le long de l'axe z des différentes sections rectangulaires des bobines. L'homogénéité a été évaluée sur 100 mm le long de l'axe z . Les valeurs de H_0 pour chaque cas sont les suivantes : cas 1 : 98,91%, cas 2 : 98,75% et cas 3 : 98,59%.

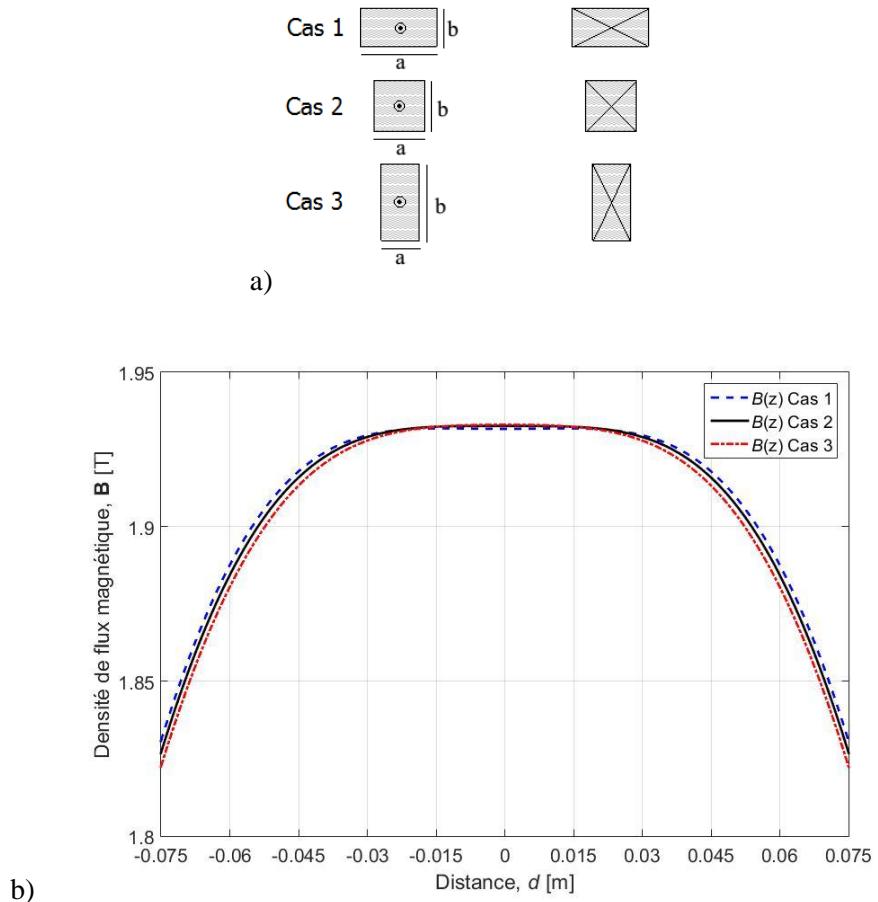


Figure III-3. Densité de flux magnétique produite par différentes sections rectangulaires de bobine de Helmholtz.

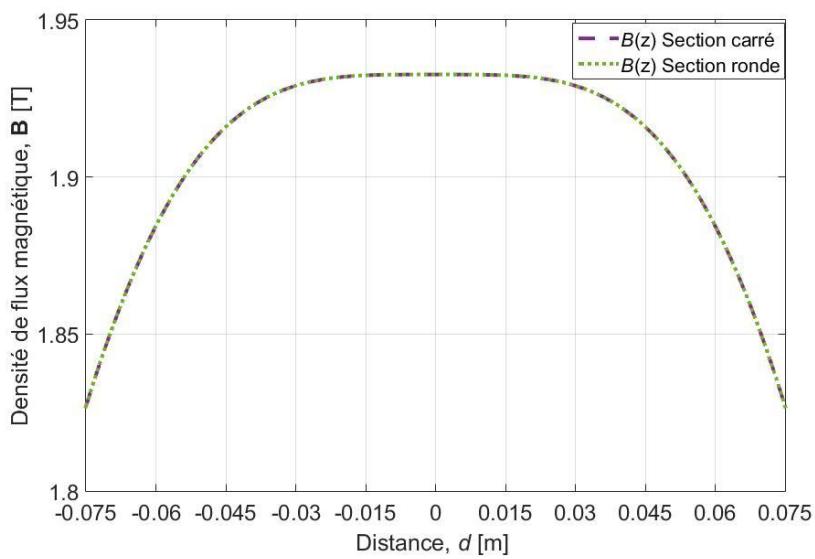


Figure III-4. Densité de flux magnétique produit par des bobines de Helmholtz de même section, carrée et ronde.

Ces résultats nous permettent de déduire qu'une bobine de Helmholtz parfaitement carrée (cas 2) nous permet d'obtenir une uniformité importante de la densité de flux magnétique dans la région centrale. Le cas 1 semble le plus homogène, mais la forme de la bobine va contribuer à augmenter les dimensions de l'aimant vectoriel. Le même constat se répète avec le cas 3, donc pour des raisons de compacité et de facilité de construction, une bobine de section carrée est plus intéressante.

La Figure III-4, montre une dernière comparaison entre deux bobines de Helmholtz, une à section circulaire et une autre à section carrée de même valeur. Ces résultats ne montrent pas de différence significative. Les homogénéités calculées dans une sphère de 100 mm de diamètre, placée au centre des bobines, sont de 97,949 % pour la bobine de section carrée et 97,954 % pour la bobine de section circulaire. Ces résultats permettent de confirmer qu'une bobine de Helmholtz de section carrée peut représenter la meilleure option pour la fabrication des bobines. Il existe certainement un gain en homogénéité dans une bobine de section circulaire, mais sa fabrication serait plus complexe.

III.2.3 Bobine de Lee-Whiting

Parmi les divers types de bobines utilisées pour la production de champs magnétiques homogènes, la bobine Lee-Whiting est largement employée en biologie [108]. La région, où la densité de flux magnétique est homogène, est supérieure de cinq fois à celle de la bobine de Helmholtz.

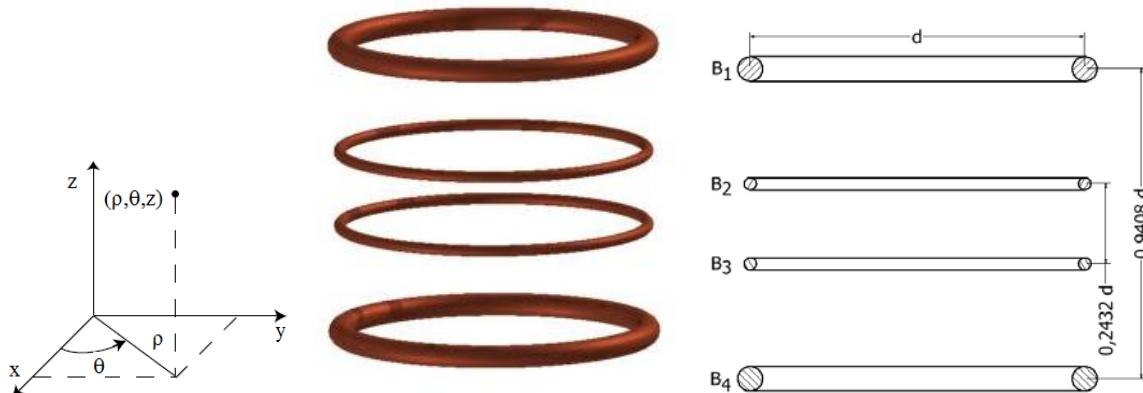


Figure III-5. Schéma de la bobine de Lee-Whiting.

Sa structure consiste en quatre bobines circulaires de même rayon et de section ronde ou carrée placées sur un axe commun avec une distance entre les bobines égale à $0,9408 d/2$ pour les bobines extérieures et de $0,2432 d/2$ pour les bobines intérieures, d étant toujours le diamètre des bobines. Le rapport de spires entre les bobines extérieures et intérieures est de 9/4 (Figure III-5).

III.2.4 Bobine de Merritt

Il s'agit d'un système composé de trois ou quatre bobines qui vont générer un champ magnétique avec une région uniforme plus grande que celle produite par la bobine de Helmholtz, par exemple.

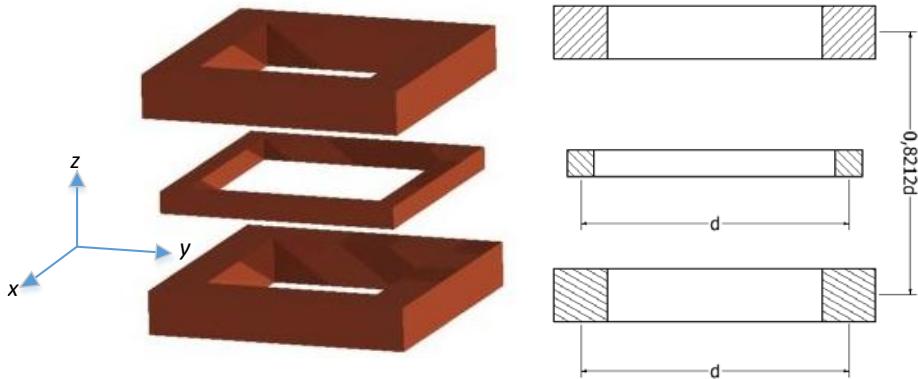


Figure III-6. Schéma de la Bobine de Merritt à trois bobines.

Ces bobines ont été développées par R. Merritt dans les années 1980. Ce système est constitué de trois bobines carrées ayant pour côté d , placées sur un axe commun (Figure III-6) et d'un rapport entre le nombre de spires des bobines externes et centrales de 39/20. Sa construction est assez complexe à cause des côtés droits des bobines carrées. Elle est généralement employée dans des recherches scientifiques en biologie et en médecine. La bobine de Merritt produit une zone du champ homogène de presque quatre fois supérieure à celle produite par la bobine de Helmholtz [109].

III.2.5 Bobine par secteurs

Un autre type de bobine de champ magnétique uniforme est la bobine par secteur. Sa construction est plus complexe que la bobine de Merritt. La forme et la disposition des spires sont dessinées en fonction de l'homogénéité dans la région de fonctionnement. Elles sont largement employées dans les accélérateurs de particules. Un de ses avantages est le haut niveau d'homogénéité (proche de 1 ppm) qui peut être obtenu. La distribution des spires se fait en forme de secteurs permettant la réduction des harmoniques de champ magnétique, d'ordre six, dix et quatorze [110]. Un des inconvénients est la procédure de fabrication, laquelle a besoin d'un positionnement précis des spires [18]. Ces systèmes de bobines sont employés dans la production de champs homogènes. Mais il reste un inconvénient à franchir : peuvent-ils contribuer à la construction d'un aimant vectoriel ?

La réponse à cette question a été trouvée après des vérifications dans des littératures disponibles sur les aimants vectoriels. Ces bobines sont employées la plupart du temps sur des aimants d'un seul axe. Les aimants de plus d'un axe sont souvent construits avec des arrangements de solénoïdes et des bobines « split ». Une configuration « split » signifie : un aimant vectoriel constitué de deux bobines espacées d'une distance qui ne respecte pas forcément le critère des bobines d'Helmholtz.

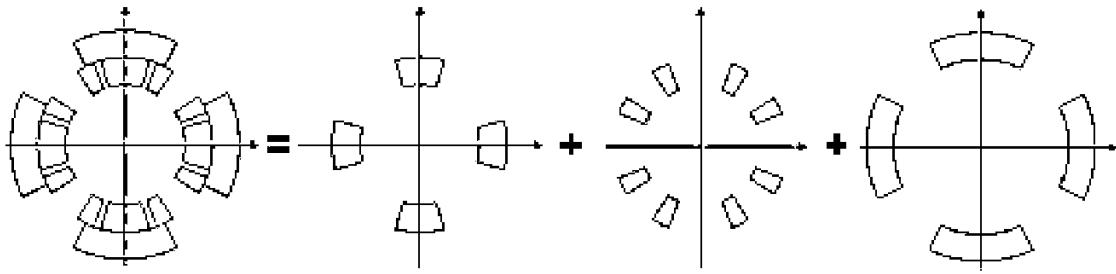


Figure III-7. Coupe latérale d'une bobine quadripôle composée par trois secteurs [110].

Si la région de fonctionnement a besoin d'une homogénéité très élevée, les arrangements de bobines sont plus complexes (e.g. les bobines par secteur) et ont besoin d'un système de contrôle du courant d'alimentation très précis et coûteux, comme ceux produits par American Magnetics Inc., avec une stabilité de l'amplitude du courant de 0,01 % [100].

Comme nous l'avons étudié dans la section I.3.4, il est nécessaire d'avoir au moins un point d'accès à l'échantillon pour placer le cryostat. Seulement certaines bobines, de forme circulaire ou carrée, permettent cet accès. Nous envisageons de construire un aimant vectoriel de trois axes, composé de bobines qui doivent faciliter le placement de chaque groupe de bobines évitant tout chevauchement.

Dans la section suivante nous allons présenter une comparaison entre les bobines les plus favorables pour la construction de notre aimant vectoriel ainsi que notre cahier des charges.

III.3 Evaluation des bobines pour notre aimant vectoriel

III.3.1 Cahier des charges et comparaison des bobines

Dans un premier temps, le cahier des charges a été défini en fonction des tests prévus sur des échantillons supraconducteurs à haute température critique. L'induction magnétique et le volume de travail ont été définis à 3 T et une sphère de diamètre 100 mm respectivement. Le champ magnétique comporte trois composantes B_x , B_y , B_z , ce qui permettra l'orientation du vecteur \mathbf{B} dans toutes les directions. L'accès à l'échantillon dans le volume de travail a été conçu comme un conduit qui passe à travers les bobines, ce système permet d'avoir deux accès au centre. Le cahier des charges est exprimé dans le Tableau III-1. Pour le choix des bobines de l'aimant vectoriel, nous avons étudié les principales caractéristiques des bobines montrées dans la section précédente (III.2), afin de choisir l'assemblage le moins complexe possible et ne présentant pas de grande complexité lors de sa fabrication. Nous avons employé la bobine de Helmholtz comme point de départ pour l'analyse entre les différentes bobines.

Ensuite, certains arrangements de bobines ont été comparés, en fonction de l'homogénéité, et de la facilité de construction (coût). Les types étudiés ont été : Merrit, Lee-Whiting [96], Helmholtz [112], qui sont les arrangements les plus favorables en termes d'homogénéité du champ. Le solénoïde

et la bobine secteur n'ont pas été pris en compte dans cette comparaison. En effet, nous souhaitions au départ avoir plus de deux accès au centre et le solénoïde ne le permet pas. La conception d'un aimant avec trois accès dans la région d'étude demande la fabrication en même temps des bobines et du cryostat. Donc une fois le cryostat terminé, il est très difficile de d'effectuer une réparation en cas de défaillance dans les bobines. Pour finir, l'option avec trois voies d'accès a été abandonnée. L'évaluation de chaque système de bobines par rapport au volume de travail permet d'estimer les dimensions totales de l'aimant vectoriel. Ceci sert à comparer quel système de bobines est le plus compacte en termes de matériau supraconducteur et de masse froide.

Tableau III-1: Cahier des charges.

Nom	Description	Valeur	Unités
$\ \mathbf{B}\ $	Module de la densité de flux magnétique	3	T
$\ \mathbf{B}_{x,y,z}\ $	Module de la densité de flux magnétique par axe	1,73	T
H_0	Homogénéité dans le volume de travail	> 95	%
Coût	Coût d'investissement	50 k	€
D_t	Diamètre de travail	100	cm

Chaque système a été construit en 3D et différentes contraintes d'espacement ont été évaluées. Pendant cette étape les bobines de Merrit et Lee-Whitting ont montré des complications au moment de les combiner pour former un aimant à trois axes.

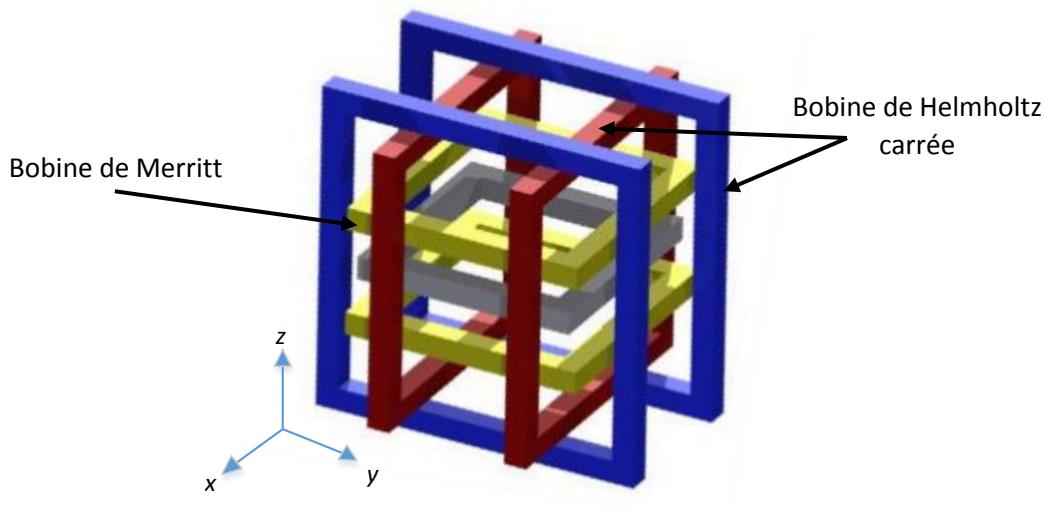


Figure III-8. Aimant vectoriel composé d'une bobine de Merritt et deux bobines Helmholtz carrées.

Même si la région de champ uniforme est prometteuse, la fabrication avec ce type de bobines devient complexe. Il est impossible d'avoir accès au volume de travail si l'aimant vectoriel est construit avec trois bobines Merritt par axe.

La solution la plus probable est l'emploi de différentes configurations comme dans la Figure III-8, où l'accès dans la région de travail a été possible avec la combinaison des deux configurations de bobines, Merritt suivant l'axe z et deux Helmholtz carrées imbriquées suivant les axes x et y.

En revanche, les angles droits des bobines carrées peuvent fragiliser le fil supraconducteur. Certains fils ont un rayon minimal de courbure. Quand ce rayon n'est pas respecté, le fil est détruit localement engendrant une dissipation importante d'énergie. La difficulté dans la fabrication des bobines parfaitement carrées est liée au placement des spires. Si les spires ne sont pas correctement placées dans le côté rectiligne de la bobine, la qualité de la forme et donc l'homogénéité est affectée. La bobine peut aussi être abîmée lors de la mise en fonctionnement à cause des mouvements des conducteurs sous l'influence des efforts électromagnétiques. Une bobine ronde ne présente pas la même problématique car le fil n'est pas soumis à des angles droits. Le placement des spires est plus simple car la forme ronde facilite la distribution régulière des efforts sur le fil supraconducteur.

La bobine de Lee-Whitting présente la même problématique que la bobine de Merritt. Ces configurations ne se montrent pas adéquates pour la fabrication de l'aimant vectoriel et leur étude n'a pas été analysée plus en détail.

Parmi les bobines étudiées, la plus prometteuse a été la bobine de Helmholtz, son montage 3D s'est montré plus simple. Sa géométrie promet une réduction de la complexité de fabrication des supports, mais sa région homogène est moins importante en comparaison avec les bobines de Lee-Whitting et Merritt [96].

III.3.2 Homogénéité de l'induction magnétique

L'uniformité de la densité de flux magnétique de l'aimant vectoriel imposé par le cahier des charges doit être supérieure à 95 %. Cette uniformité doit être évaluée avec la valeur de la densité de flux magnétique calculée dans la sphère de travail de 100 mm de diamètre.

L'expression (III-1) représente l'estimation de l'homogénéité dans ce volume de travail et cette valeur est représentative. L'expression (III-2) est la valeur d'homogénéité évaluée par axe. Elles utilisent la valeur moyenne, maximale et minimale du module de la densité de flux magnétique. Comme la valeur d'homogénéité exigée par le cahier des charges n'est pas très élevée, ces équations sont suffisantes. Dans le cas d'une homogénéité beaucoup plus précise, d'autres outils de calcul seront nécessaires.

$$H_0 = \left(1 - \frac{\max(|\mathbf{B}|) - \min(|\mathbf{B}|)}{\text{moy}(|\mathbf{B}|)} \right) \times 100 [\%] \quad (\text{III-1})$$

$$H_{0,x,y,z} = \left(1 - \frac{\max(|B_{x,y,z}|) - \min(|B_{x,y,z}|)}{\langle |B_{x,y,z}| \rangle} \right) \times 100 [\%] \quad (\text{III-2})$$

III.3.3 Configurations d'aimant vectoriel retenues

Nous avons proposé deux possibles variations de cet aimant vectoriel. Une bobine Helmholtz a été utilisée comme point de comparaison, cette bobine a été calculée pour produire une induction magnétique de 1,73 T au centre. Le courant d'alimentation a été imposé à 56 A car il s'agissait du courant pouvant être fourni par une pile à combustible de 500 W. Ces critères arbitraires ont été utilisés pour définir les paramètres de la bobine Helmholtz de référence montrés dans le Tableau III-2.

Tableau III-2: Paramètres des bobines étudiées

Nom	Helmholtz (référence)	Aimant vectoriel « Split »	Aimant vectoriel 3 Helmholtz	Unités
Diamètre de bobine	300	300	300-355-435	mm
Section de bobine	900	900	900	mm ²
Nombre de tours	5184	5184	5184	tr
Longueur totale	10	30	34	km

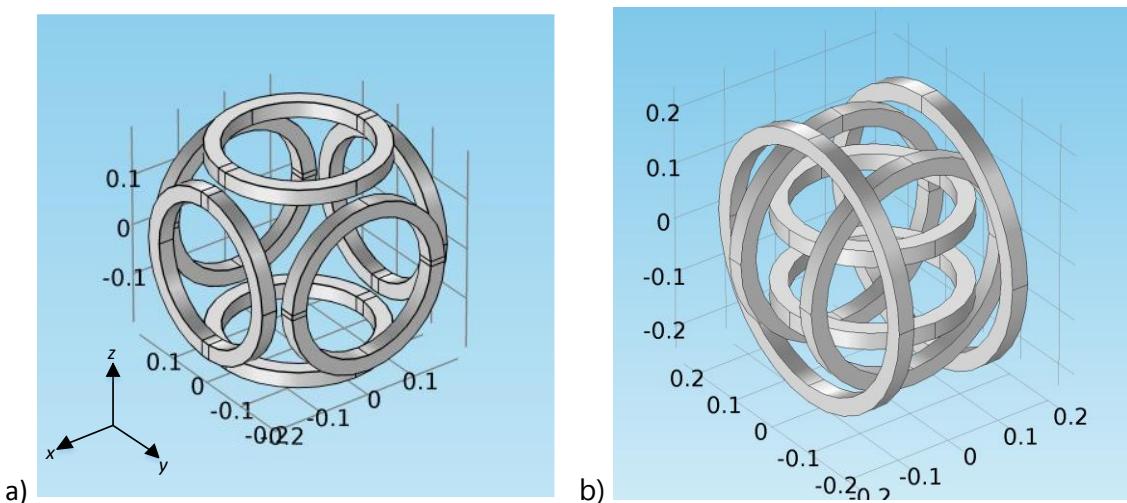


Figure III-9. Aimants vectoriels sujets à l'étude. a) Bobines split, b) trois bobines Helmholtz.

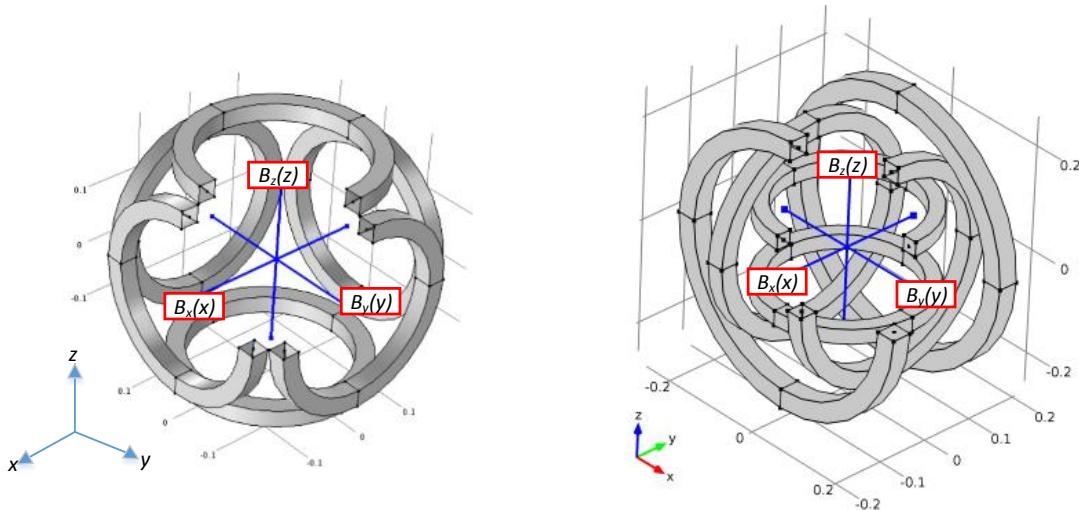


Figure III-10. Axes de mesure des composantes, $B_x(x)$, $B_y(y)$ et $B_z(z)$ pour l'aimant vectoriel « Split » et Helmholtz.

A partir de cette bobine de référence, nous avons défini le diamètre de chaque bobine, la section des bobines, le nombre de tours et la quantité de fil nécessaire en km, qui vont être utilisés pour évaluer quel aimant vectoriel présente le meilleur compromis avec le cahier des charges. A partir de ces paramètres de référence, les aimants vectoriels « split » et Helmholtz ont été définis. Le premier aimant vectoriel est composé par des bobines « split », séparés par une distance égale à leur diamètre multiplié par un facteur de correction $f_c = 1,2$ (pour éviter le chevauchement entre les bobines) et placées par paires suivant les axes x, y et z (Figure III-9a).

Cette géométrie est une des moins complexes à réaliser, cependant l'homogénéité est inférieure à celle obtenue avec les bobines Helmholtz. Un deuxième aimant vectoriel, est composé par trois bobines de Helmholtz de même section, chacune placée à l'intérieur de l'autre suivant chaque axe x, y et z (Figure III-9b).

La Figure III-10 montre les axes où seront tracées les composantes calculées de \mathbf{B} sur l'aimant vectoriel Helmholtz et « Split ». Les valeurs des composantes de \mathbf{B} seront tracées de la même façon dans les deux configurations d'aimant vectoriel étudiées.

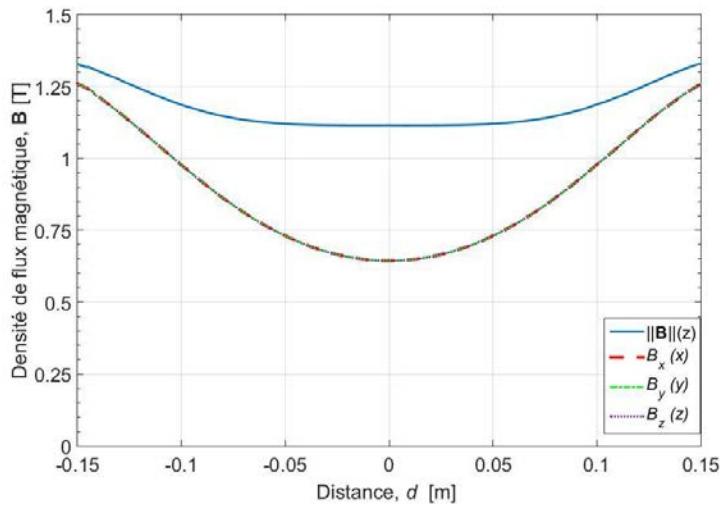


Figure III-11. Module de \mathbf{B} et composantes $B_x(x)$, $B_y(y)$, $B_z(z)$, de la densité de flux magnétique de l'aimant vectoriel de type « split ».

La Figure III-11, représente les résultats du calcul du module de \mathbf{B} sur l'axe z et des composantes $B_x(x)$, $B_y(y)$ et $B_z(z)$, de la densité de flux magnétique pour l'aimant vectoriel « split ». La séparation des bobines d'une distance plus éloignée que dans la configuration de Helmholtz, produit des gradients différents suivant les axes, engendrant un gradient important de la densité de flux magnétique par axe au centre. Un autre facteur qui a accentué ce gradient de \mathbf{B} est l'emploi du coefficient f_c . Ce coefficient va augmenter la séparation des bobines pour respecter la symétrie de l'aimant vectoriel « split ». Pour la suite nous avons tracé un plan de coupe horizontal (xOy , Figure III-12a), dans le volume de travail (de 100 mm de diamètre).

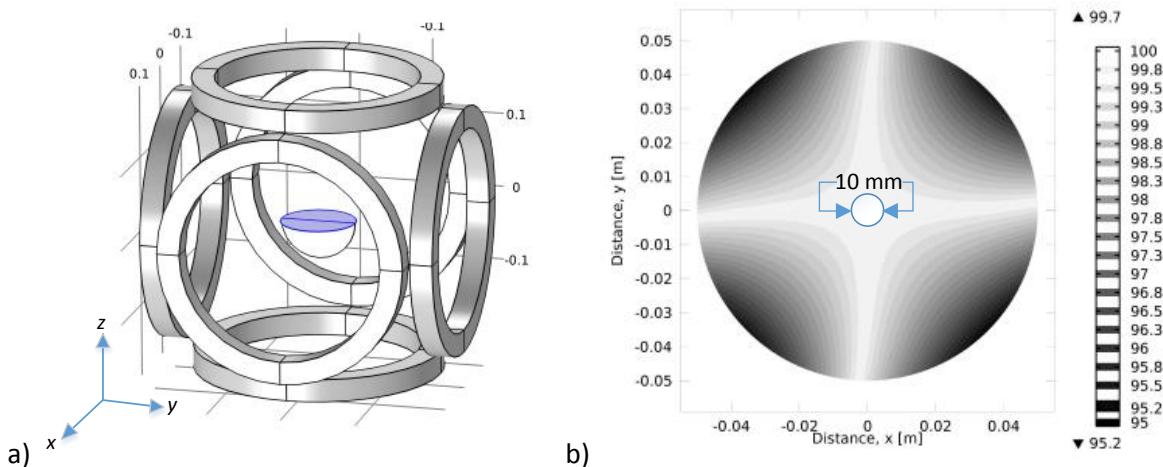


Figure III-12. Evaluation de l'homogénéité dans le plan xOy du volume de travail de l'aimant vectoriel de type « split ».

Nous avons ensuite effectué une évaluation de la distribution de l'homogénéité du module de la densité de flux magnétique sur ce plan et il est montré dans la Figure III-12b.

Le module de \mathbf{B} est représenté par des zones de même valeur d'homogénéité (contour plot). Dans ce type d'arrangement de bobines « split » on ne peut pas arriver à des valeurs d'uniformité de \mathbf{B} élevées dans un volume important. Ce type d'aimant vectoriel doit être utilisé pour des applications moins exigeantes avec une zone d'homogénéité réduite. Dans ce cas une sphère de 10 mm de diamètre pour une uniformité de \mathbf{B} supérieure à 99,99 %. La Figure III-13 montre les résultats des composantes $B_x(x)$, $B_y(y)$ et $B_z(z)$, pour l'aimant vectoriel composé par des bobines de Helmholtz de même section. On remarque que la différence de taille de chaque bobine affecte l'amplitude de chaque composante de la densité de flux magnétique pour une même amplitude de courant d'alimentation.

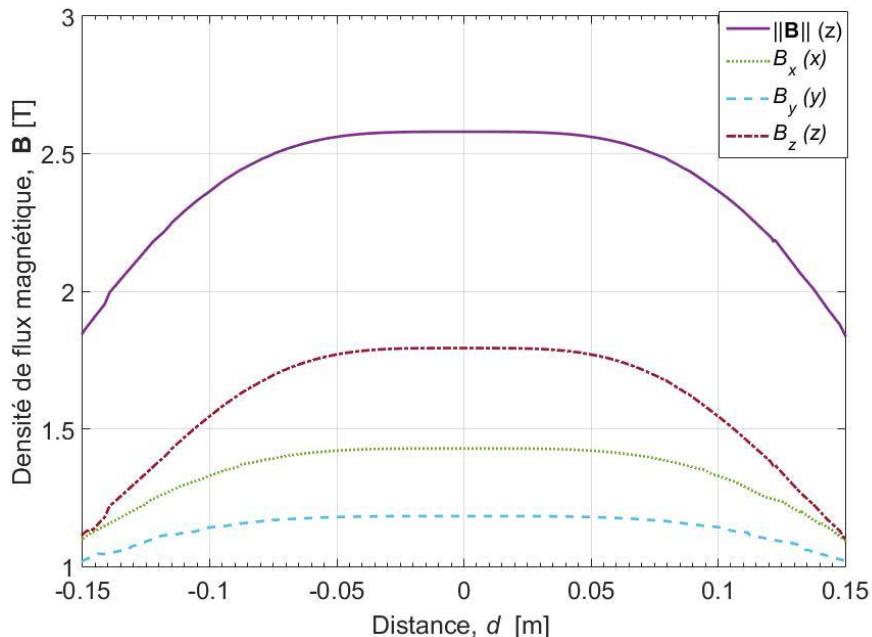


Figure III-13. Module de \mathbf{B} et composantes $B_x(x)$, $B_y(y)$, $B_z(z)$, et de la densité de flux de champ magnétique de l'aimant vectoriel type « Helmholtz ».

Les valeurs sont uniformes sur une plus grande distance que celle de l'aimant vectoriel « split ». Ce qui nous donne un volume d'étude plus important avec un gradient de champ plus faible. L'emploi de bobines de même section et de rayons différents pour la construction d'un aimant vectoriel implique l'utilisation de plusieurs amplitudes de courant d'alimentation par axe pour une même valeur d'amplitude de la densité de flux magnétique par axe, rendant le système de contrôle légèrement plus complexe.

L'évaluation de l'homogénéité de $||\mathbf{B}||$ se fait, avec deux plans de coupe dans la région de travail, le plan horizontal, $x0y$ et un plan vertical $y0z$. Ceci nous permet de visualiser la région où la densité de flux magnétique acquiert une uniformité très élevée. On peut alors observer des zones très uniformes supérieures à 99,99 % dans 40 mm de diamètre (Figure III-14).

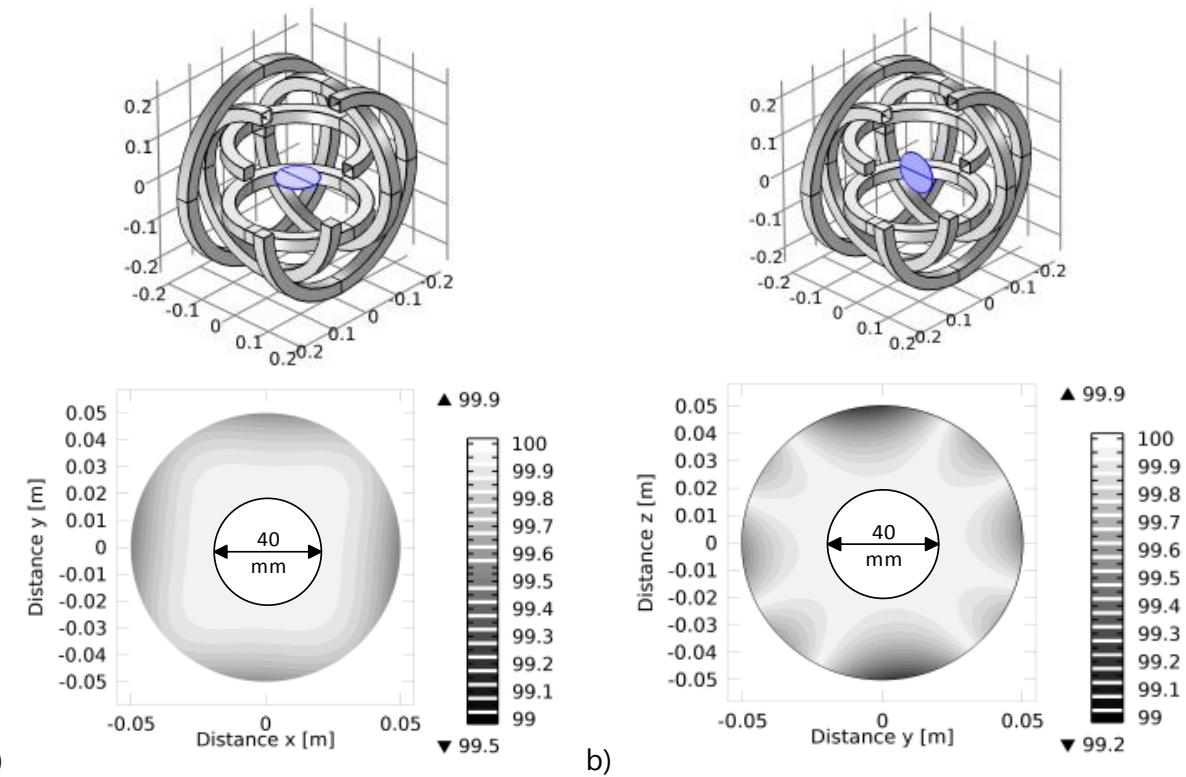


Figure III-14. Evaluation de l'homogénéité dans les plans $x0y$ (a) et $y0z$ (b) dans le volume de travail de l'aimant vectoriel à bobines type « Helmholtz ».

La bobine Helmholtz de référence possède une homogénéité H_0 de 97,947 % à l'intérieur du volume de travail. L'aimant vectoriel de type split a une homogénéité H_0 de 85,68 % et l'aimant vectoriel de type Helmholtz une homogénéité H_0 de 98,65 %. Ce résultat montre une claire différence entre les deux aimants vectoriels, notamment par rapport au cahier des charges, favorisant notre choix vers un aimant vectoriel de type Helmholtz. Les résultats sont reportés dans le Tableau III-3.

Tableau III-3: Homogénéité des bobines étudiées

Nom	Helmholtz (référence)	Aimant vectoriel « Split »	Aimant vectoriel 3 Helmholtz
H_0	97,947 %	85,68 %	98,65 %
H_0^x	-	87,10 %	99,43 %
H_0^y	-	87,10 %	99,80 %
H_0^z	98,707 %	87,10 %	98,70 %

Cette évaluation nous a permis d'obtenir un point de comparaison très important : la quantité de fil nécessaire. Comme le montre le Tableau III-2, l'aimant vectoriel « split » a besoin de 30 km de fil

pour obtenir une zone homogène faible tandis que l'aimant vectoriel Helmholtz requiert un peu plus de fil pour obtenir des résultats beaucoup plus intéressants.

Avec cette discussion, nous avons pu établir les possibilités des différents types de bobines pour concevoir un aimant vectoriel. Quelques-unes ont été écartées dès la lecture de références bibliographiques, les autres ont suscité notre intérêt et ont été étudiées.

Finalement, l'arrangement de bobines qui s'adapte le mieux au cahier de charges est la configuration de Helmholtz. Sa construction n'est pas nécessairement la moins complexe et la plus rapide à cause de l'imbrication des bobines, mais promet une densité de flux magnétique uniforme sans avoir recours à des bobines de compensation.

III.4 Aimant vectoriel de type Helmholtz

III.4.1 Validation du modèle 3D

Une fois la structure de bobines de l'aimant vectoriel choisie (Figure III-9b), un modèle analytique est utilisé pour valider le modèle 3D à réaliser sur le logiciel Comsol. Cette procédure assure la capacité du modèle 3D à prédire le comportement magnétique de l'aimant vectoriel en termes de précisions et de temps de calcul. Le calcul analytique de la densité de flux magnétique a été effectué par les équations décrites dans l'annexe VII.1.

La bobine de Helmholtz utilisée pour la validation est composée de deux solénoïdes de section carrée. Une distribution discrète matricielle des spires a été faite, avec des points représentant les fils. Chaque fil va produire une densité de flux magnétique B_i propre et la densité de flux magnétique totale de la bobine est calculée en sommant vectoriellement chaque contribution.

Tableau III-4: Paramètres de la bobine de Helmholtz pour le modèle analytique

Nom	Description	Valeur	Unités
B_0	Module de la densité de flux magnétique	3	T
I	Courant de fonctionnement	95	A
N_s	Nombre de tours de chaque bobine	5329	tr
D	Côtés des bobines Helmholtz	0,4	m
S_b	Section de bobine	1600	mm ²
d_{fil}	Diamètre du fil	0,54	mm
N_p, Nz	Nombre de fil suivant p et z	73	-
Δ_p, Δ_z	Séparation entre les centres de spires	0,54	mm

A = ampère, tr = tours, m = mètre, $N_s = N_p, Nz$

Les équations analytiques décrivant une bobine Helmholtz ont été introduites dans l'environnement de calcul numérique MatLab. Dans le logiciel de calcul magnétique Comsol, divers outils sont employés pour la construction de la bobine de Helmholtz, permettant d'ajouter et de modifier les

paramètres de façon interactive. Les paramètres de la bobine utilisés dans la modélisation sont montrés dans la Tableau III-4.

Nous avons retenu les mêmes dimensions de la bobine de Helmholtz de référence utilisée dans la section précédente. La valeur de courant d'alimentation a été établie de façon arbitraire et à 95 A et le nombre de spires a été fixé pour produire 3 T au centre. La longueur de fil nécessaire est de 10 km. La Figure III-15 montre la géométrie utilisée pour le modèle analytique.

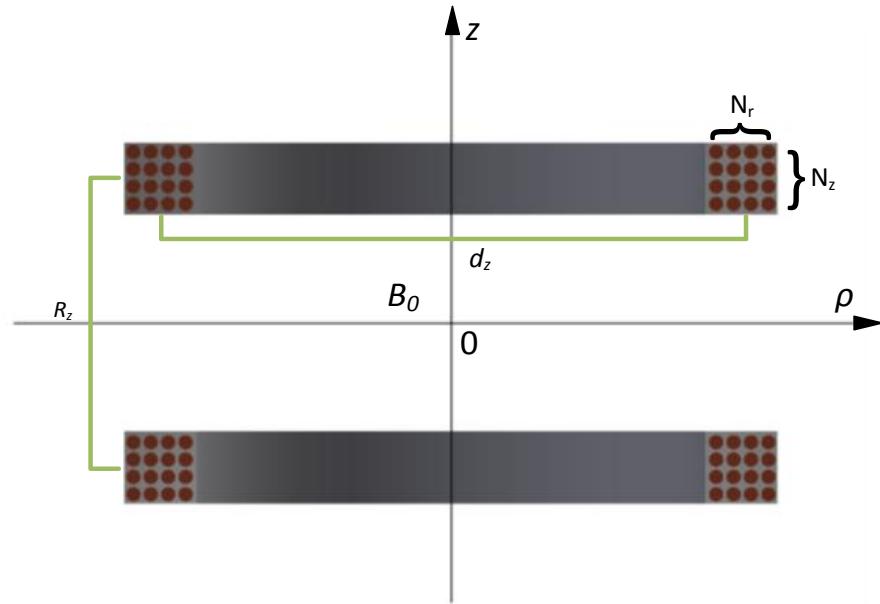


Figure III-15. Schéma et discrétisation de la bobine de Helmholtz utilisée pour comparaison avec le modèle analytique.

La bobine est discrétisée en éléments représentant chaque spire positionnée dans un repère cylindrique. Les dimensions sont prises en compte ainsi que la distribution des spires dans la section de la bobine. La densité de flux magnétique \mathbf{B} produite par l'ensemble des spires peut alors être calculée dans n'importe quel point dans l'espace.

Les résultats sont présentés la Figure III-16. Les deux modèles montrent un comportement similaire et la marge d'erreur est très faible. Pendant la réalisation de cette validation, nous avons pu rencontrer des problèmes avec la configuration sur Comsol qui produisait des erreurs de l'ordre de 4 % dans la valeur de $\|\mathbf{B}\|$ au centre des bobines. Ces problèmes ont été identifiés et résolus grâce à cette validation par le calcul analytique.

Un des problèmes trouvés concernait le chemin imposé au courant dans la bobine. Une autre source d'erreur était liée à la taille du maillage utilisée et aux conditions aux limites trop proches. Les logiciels de calcul comme Comsol utilisant la méthode des éléments finis, ils ont recours à la construction d'un maillage permettant le calcul des diverses variables. Un maillage plus fin assure une évaluation précise, en contrepartie d'une augmentation du temps de calcul.

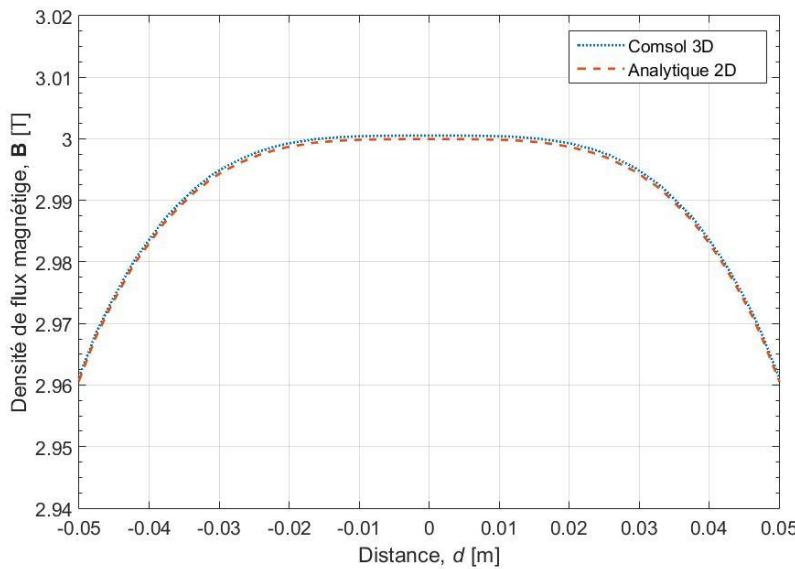


Figure III-16. Valeur du $\|\mathbf{B}\|$ calculée sur l'axe z, comparaison entre des résultats numériques 3D sous Comsol et des résultats analytiques 2D.

III.4.2 Modélisation 3D de la structure définitive de l'aimant vectoriel

L'aimant vectoriel choisi est celui illustré dans la Figure III-20. La bobine placée suivant l'axe z est celle qui a la plus petite taille. Elle est de grande importance car elle définit l'uniformité minimale du champ dans le volume de travail. Pour cette raison elle est employée comme la référence pour le dimensionnement des autres bobines. Donc le rayon $R_z = R$ de la bobine suivant l'axe z est pris comme référence, c'est la valeur de R qui va imposer la taille totale de l'aimant vectoriel. L'axe z sera le canal d'accès au volume de travail.

Les autres rayons sont calculés par rapport à R_z avec des coefficients d agrandissement ; $R_x = f_x \times R_z$ pour la bobine Helmholtz suivant l'axe x et $R_y = f_y \times R_z$ pour la bobine Helmholtz suivant l'axe y. Le calcul des facteurs f_x et f_y a été réalisé en fonction d'éviter le chevauchement des bobines. Chaque valeur a été déterminée en définissant la position où se trouve le point de contact entre deux bobines empêchant les bobines de se toucher.

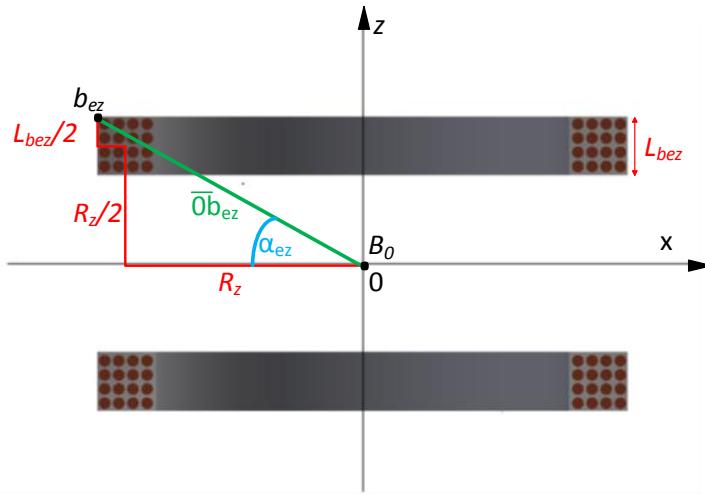


Figure III-17. Bord extérieur « b_{ez} » de la bobine Helmholtz suivant l'axe z.

La Figure III-17 montre la décomposition en vecteurs d'une bobine Helmholtz. Le vecteur $\overrightarrow{0b_{ez}}$, définit le bord extérieur de la bobine de l'axe z, ceci est le bord le plus proche du bord intérieur de la bobine de l'axe x. Ce groupe de vecteurs est employé pour permettre au logiciel Comsol de construire chaque bobine en évitant tout contact.

La valeur de chaque vecteur est définie par les valeurs de quelques paramètres de la géométrie, comme les rayons R_x , R_y , R_z et la section des bobines, ($S_{bz} = L_{bez}^2$). Le contrôle de ces paramètres nous permettra de réaliser des calculs paramétriques dans Comsol pendant l'optimisation. Pour définir le point de contact entre les deux bobines, il est également nécessaire d'identifier le bord intérieur de la bobine de l'axe x (Figure III-18), ceci est décrit par $\overrightarrow{0b_{ix}}$. La condition à imposer pour éviter le contact entre les deux bobines est $\|\overrightarrow{0b_{ez}}\| < \|\overrightarrow{0b_{ix}}\|$.

L'amplitude de $\|\mathbf{B}\|$ dans le centre du système est définie par $B_0 = \|\mathbf{B}(0,0,0)\|$, et elle est employée pour définir la droite de travail du système de bobines.

Le facteur f_x est alors calculé en fonction des rayons R_z et R_x . La même procédure d'identification est employée pour le facteur f_y entre les bobines R_y et R_z en fonction de R_z .

Une fois que les bobines sont placées sans contact entre elles, il faut tenir compte des supports de bobine. Une distance de séparation est prévue entre les bobines pour permettre leur placement, il faut alors compenser les facteurs déjà établis f_x et f_y avec les paramètres dimensionnels des bobines par un autre facteur de correction prévu pour le placement des supports. Un point important dans le calcul des facteurs f_x et f_y , est leur influence directe sur la valeur de l'induction magnétique maximale B_{max} , appliquée sur le fil supraconducteur et sur la quantité de fil à employer. Plus les bobines sont éloignées entre elles, plus la valeur de B_{max} va être réduite. Par ailleurs, au fur et à mesure que la séparation devient importante, la quantité de fil augmente pour une valeur de $\|\mathbf{B}\|$ donnée au centre des bobines. Plusieurs critères s'imposent lors du calcul des facteurs d'espacement des bobines : espace pour le placement des supports, quantité de fil et diminution de B_{max} .

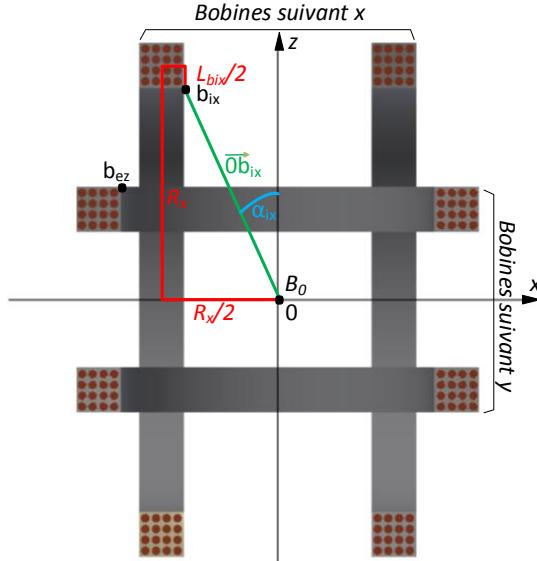
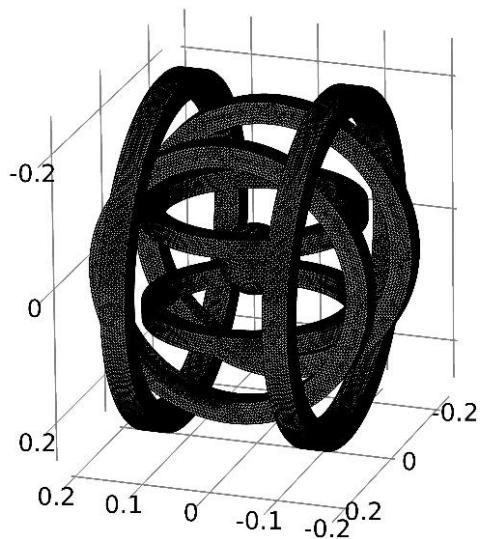


Figure III-18. Bord intérieur « b_{ix} » de la bobine Helmholtz suivant l'axe x.

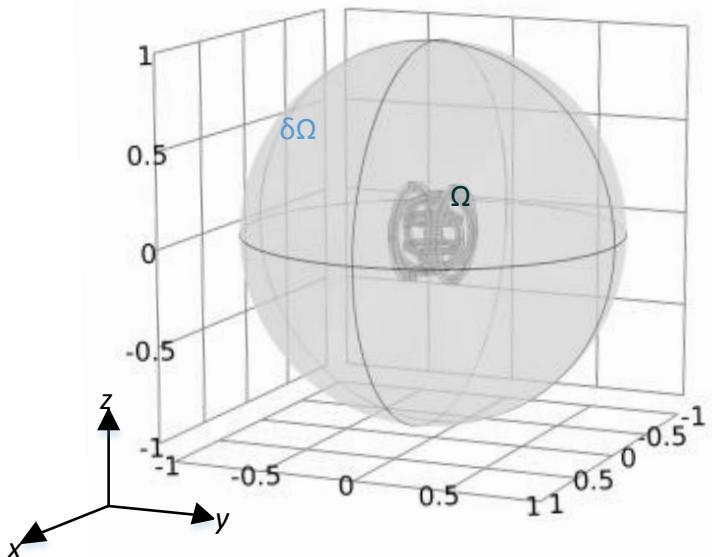
Le modèle 3D est composé uniquement par des bobines placées dans l'air. Aucun élément ferromagnétique n'a été employé. En effet, la saturation magnétique du fer peut affecter l'homogénéité et la direction de \mathbf{B} dans le volume de travail. Les bobines seront soutenues par une structure en G11 qui va permettre de maintenir le système en position, orthogonalement. Ceci est possible grâce à la bonne résistance mécanique du matériau aux efforts, à la procédure d'usinage des pièces et à la conception du système de support. Il est en effet important d'assurer la tenue des bobines, elle influence directement la qualité de l'homogénéité. La géométrie mise en œuvre pour l'aimant vectoriel est montrée dans la Figure III-19a.

Le modèle a été conçu avec le module électromagnétique « magnetic fields » de Comsol. Les bobines ont alors été paramétrées avec la fonction Multi-turn coil. Cela permet de gérer un grand nombre de spires et assure l'uniformité dans la distribution spatiale des spires. Un maillage très fin a été mis en place dans tout le système de bobines (Figure III-19a) où les éléments du maillage ont une taille < 4 mm, pour réduire au maximum les perturbations produites par une défaillance dans le maillage.

Chaque bobine est soumise au calcul de l'induction magnétique à travers les équations (III-3) déclarées pour tous les domaines conducteurs Ω , (Figure III-19b). L'aimant vectoriel est à l'intérieur d'une sphère d'un mètre de rayon, isolée magnétiquement ($\delta\Omega$) à travers l'équation (III-4).



a)



b)

Figure III-19. a) Maillage des domaines représentants les six bobines de l'aimant vectoriel. b) Domaines représentants les bobines à l'intérieur d'une sphère isolée magnétiquement.

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \end{cases}, [\Omega] \quad (\text{III-3})$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{0}, [\partial\Omega] \quad (\text{III-4})$$

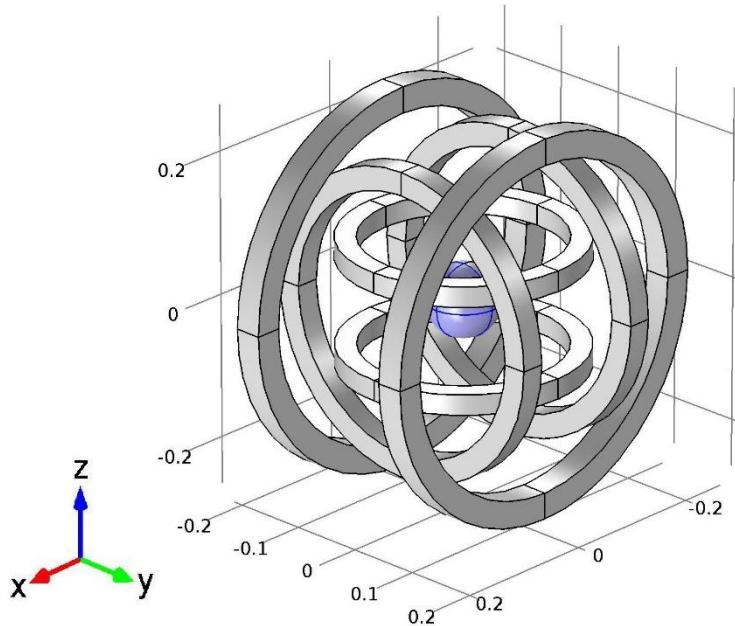


Figure III-20. Aimant vectoriel : Trois bobines de Helmholtz placées suivant les axes cartésiens. La zone de travail est représentée par la sphère au centre.

Nous allons décrire quelques différences avec l'aimant vectoriel précédent (Figure III-9b), où la section de chaque bobine est la même. Dans ce nouveau modèle, les différentes sections de chaque groupe de bobines ont été calculées pour produire la même amplitude de la densité de flux magnétique pour une même valeur de courant d'alimentation. Cela engendre différents nombres de spires N_x , N_y et N_z .

III.4.3 Fil supraconducteur NbTi

Le choix du fil supraconducteur a été délimité par des conditions de prix et de transport du courant. Le fil NbTi offre un bon rapport performance/prix. D'autres options plus intéressantes en termes de transport du courant auraient pu être trouvées, mais elles ne correspondaient pas aux exigences de l'aimant vectoriel. Le fil Nb₃Sn, dans les conditions nominales de fonctionnement, ne représente pas une grande différence en termes de transport de courant, cependant, le coût est supérieur en comparaison avec le fil NbTi.

Pour la fabrication de notre aimant vectoriel, nous avons choisi le fil NbTi car il représente la meilleure option pour ce type d'application et avec le budget disponible. Nous avons déjà utilisé ce type de fil pour d'autres équipements supraconducteurs déjà développés au GREEN. Ce fil a été également employé pour la fabrication de la bobine de 10 H utilisée dans le test de connexion pile à combustible avec une bobine supraconductrice.

Le fil NbTi SC56S53 de SuperCon Inc. [7] a été choisi pour sa grande proportion en matériau supraconducteur (0,9 :1) (Sc: Cu). Il peut donc transporter une densité de courant importante

permettant l'emploi d'une faible quantité de fil. En revanche, sa stabilité thermique est inférieure à d'autres fils car la concentration de l'élément de stabilisation thermique, le cuivre (Cu), est moins importante.

Le fil NbTi est composé de 56 filaments supraconducteurs à l'intérieur d'une matrice en cuivre, cela le rend plus fragile qu'un fil massif de cuivre. On doit donc tenir compte des limitations mécaniques afin d'éviter des dommages sur le fil. Son rayon minimal de courbure ne doit pas excéder deux fois le diamètre du fil selon son fabricant. Il possède la caractéristique $I_c(\|\mathbf{B}\|)$ montrée dans la Figure III-21.

Pour éviter la transition de l'état supraconducteur à l'état normal, le système de bobines doit avoir une droite de charge qui ne dépasse pas la caractéristique du fil. Cette droite de charge dépend de la valeur maximale B_{max} de la densité de flux magnétique générée dans le volume du bobinage en fonction du courant d'alimentation.

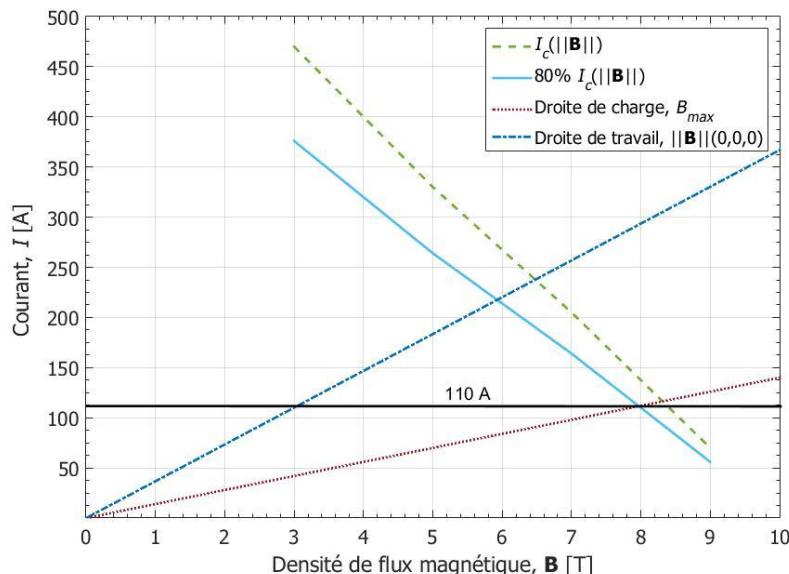


Figure III-21. Caractéristique du fil NbTi SC56S53 de SuperCon Inc. Avec une marge de sécurité de 20 %. Droite de charge, B_{max} et la droite de travail, $\|\mathbf{B}\| (0,0,0)$ pour $R_z = 15$ cm.

Quand l'aimant vectoriel est en cours de fonctionnement, la valeur de B_{max} se trouve en un point sur la surface ou à l'intérieur des bobines. Cette valeur de B_{max} va donc conditionner l'amplitude maximale du courant admissible, qui lorsqu'il est dépassé ne garantit plus l'état supraconducteur.

Les supraconducteurs à basse température critique comme le NbTi utilisé pour la fabrication de l'aimant vectoriel, ont une transition à l'état normal très rapide. Pour cela, une marge de 20 % sur la droite $I_c(\|\mathbf{B}\|)$ est proposée comme un critère de sécurité. Cela doit garantir le fait que le courant nominal n'engendre pas de transition de l'état supraconducteur vers l'état normal de manière accidentelle.

La droite de travail représente la valeur de $\|\mathbf{B}\|$ produite par l'aimant vectoriel au centre des bobines en fonction du courant d'alimentation. Il est important de noter que les deux droites, charge et travail ont des pentes différentes et la valeur de B_{max} dans le cas étudié peut valoir plusieurs fois l'amplitude de $\|\mathbf{B}\|$ au centre du système de bobines (B_0). Les résultats du calcul magnétique seront alors comparés avec la droite correspondante à 80 % de la caractéristique $I_c(\|\mathbf{B}\|)$ afin de déterminer les points de fonctionnement ne produisant pas de quench.

III.4.4 Etude paramétrique

Cette étude est réalisée afin de comparer plusieurs tailles d'aimant vectoriel en respectant le cahier des charges imposé. La taille de l'aimant vectoriel va définir la valeur de la masse froide, l'espace disponible pour le placement, la voie d'accès au volume de travail et la quantité de fil requis.

Elle est aussi employée pour définir la droite de charge et la droite de travail de l'aimant vectoriel. On souhaite éviter une transition du matériau supraconducteur avant d'atteindre l'objectif de 3 T. Un aimant vectoriel capable de produire une densité de flux magnétique de 3 T dans toutes les directions représente une structure avec une quantité de fil supraconducteur de plus de 55 km. Dans ce cas, la masse froide et le volume total auraient nécessité un cryostat de taille importante dont le prix n'aurait pu être compris dans le budget disponible pour ce projet. Ainsi l'aimant vectoriel a dû être conçu pour produire une densité de flux magnétique maximale de 3 T dans le volume de travail quand les trois composantes de \mathbf{B} ont la même amplitude et de 2 T dans tous les autres cas.

La structure complexe de cet aimant produit une différence importante entre les amplitudes de B_{max} et B_0 . Cette différence implique que l'amplitude de courant d'alimentation ne peut pas être élevée à cause de la valeur de B_{max} et du risque d'engendrer un quench.

Dans ce cas, la solution la plus adéquate à adopter est l'augmentation du nombre de spires, ce qui va entraîner la réduction du courant d'alimentation. Le système va donc continuer à produire la même amplitude de B_0 avec une valeur de courant d'alimentation inférieure. L'étude paramétrique est délimitée par la variation de la valeur du rayon de la bobine z (R_z) entre 10 et 19 cm, et par le courant d'alimentation entre 100 et 120 A.

Tableau III-5: Paramètres d'entrée pour l'aimant vectoriel utilisés dans le modèle 3D

Nom	Description	Valeur	Unités
B_0	Induction magnétique de fonctionnement	3	T
I	Courant d'alimentation	100-120	A
$B_{0x, y, z}$	Induction magnétique par axe	1,73	T
d_{fil}	Diamètre du fil SC53S56	0,54	mm
R_y	Rayon des bobines Helmholtz axe y	10-19	cm
H_0	Homogénéité dans le volume de travail	> 95	%
$f_{z, x, y}$	Facteurs de correction	1 ; 1,31 ; 1,644	-

Chaque groupe de bobines a été calculé pour avoir la même droite de travail, cela rend plus facile la procédure d'optimisation.

Le récapitulatif des paramètres d'entrée employés dans le modèle 3D est montré dans le Tableau III-5. Ces paramètres sont principalement composés par des valeurs physiques et des conditions du cahier des charges. A partir de ces valeurs, le logiciel Comsol va réaliser l'étude paramétrique.

III.5 Simulations

Les conditions de fonctionnement imposées seront relatives au régime où le point de fonctionnement permettra de produire une valeur de B_0 de 3 T. L'aimant est sensé produire son maximum d'induction magnétique dans la région de travail, quand les trois bobines Helmholtz sont alimentées avec le même courant. De cette manière, la densité de flux magnétique maximale B_{max} sur les bobines est la plus grande possible.

L'endroit précis où B_{max} est localisé, est obtenu à l'aide du modèle 3D de la structure complète de l'aimant vectoriel (Figure III-22). Sans apriori, c'est l'unique façon de trouver l'endroit précis où se trouve B_{max} . Les nombreux points de calcul nécessaires avec un calcul analytique causeraient un temps de calcul similaire à celui employé par la méthode des éléments finis utilisé par Comsol. Pour cela, nous avons préféré la méthode des éléments finis. Nous avons donc construit divers modèles sur Comsol, un premier modèle avec la structure complète de l'aimant vectoriel et un deuxième modèle sur un huitième de la structure de l'aimant vectoriel (Figure III-23) afin de trouver plus précisément la valeur de B_{max} .

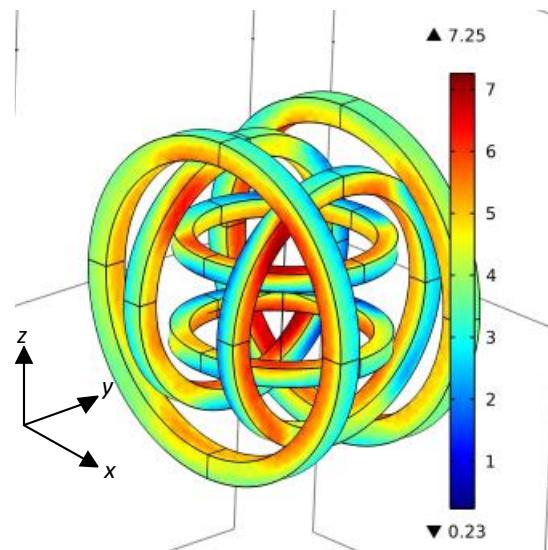


Figure III-22. Représentation de $\|B\|$ sur la surface des bobines dans un modèle complet du système de bobines.

Le problème posé n'étant pas symétrique et pour trouver une solution, nous avons configuré trois systèmes symétriques sur 1/8 de la géométrie et nous avons appliqué le principe de

superposition, car tout est linéaire. Dans ce cas, les bobines sont alimentées par un courant équivalent au courant d'alimentation utilisé dans le modèle complet de l'aimant vectoriel.

L'intérêt de l'emploi des deux modèles sur Comsol, est la possibilité d'augmenter le niveau de maillage sur le modèle 1/8, afin d'obtenir un résultat sur la valeur de B_{max} plus précis que sur le modèle avec la géométrie entière. Cela permet également d'obtenir un gain de temps car les calculs sont effectués sur une fraction de la géométrie.

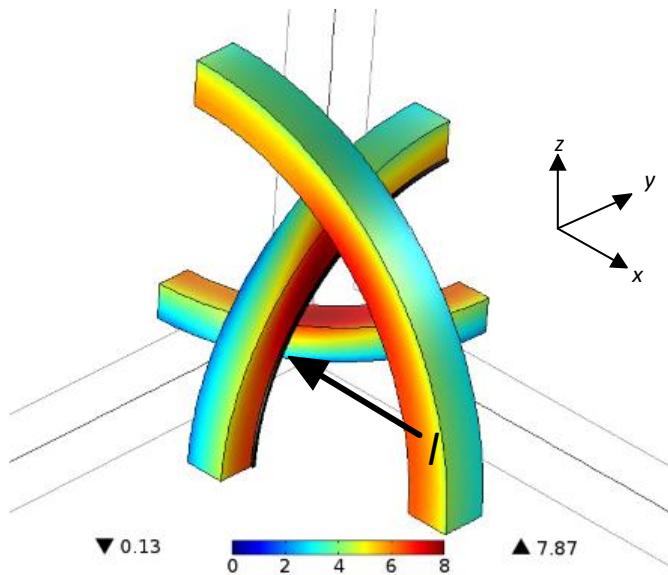


Figure III-23. Représentation de la norme de \mathbf{B} sur un modèle 1/8 du système de bobines avec $\|\mathbf{B}\|$ calculé le long de I .

Avec les résultats obtenus avec la géométrie entière, nous allons identifier l'endroit sur les bobines où le module de la densité de flux magnétique, $\|\mathbf{B}\|$ devient maximal B_{max} . La Figure III-23 montre l'endroit sur la bobine suivant l'axe x , où B_{max} va être localisé, il est signalé par la lettre « I » et est situé sur un des bords intérieurs.

III.6 Résultats

En utilisant la simulation de l'aimant vectoriel, les résultats que nous cherchons à obtenir sont : la densité de flux magnétique \mathbf{B} dans le volume de travail, l'homogénéité H_0 dans le volume de travail, la densité de flux magnétique maximale B_{max} sur le fil supraconducteur en tenant compte de la variation du nombre de spires pour chaque bobine de Helmholtz, N_x , N_y , N_z et du courant d'alimentation, I .

L'étude paramétrique a été exécutée pour treize tailles possibles d'aimant vectoriel. Chaque aimant vectoriel a été ensuite évalué en fonction des paramètres définis dans le cahier des charges, ce qui nous a permis de réduire le nombre de tailles possibles à dix.

La taille qui nous semble intéressante est celle avec un rayon $R_z = 19$ cm possédant une homogénéité H_0 de 99,5 % (Figure III-24). Mais pour des raisons d'ordre économique et de masse froide, le rayon $R_z = 15$ cm peut également correspondre aux conditions souhaitées ($H_0 = 98,9 \%$). En effet, pour

une différence de seulement 0,6 % d'amélioration d'homogénéité, le prix du fil augmente d'environ 10 k€.

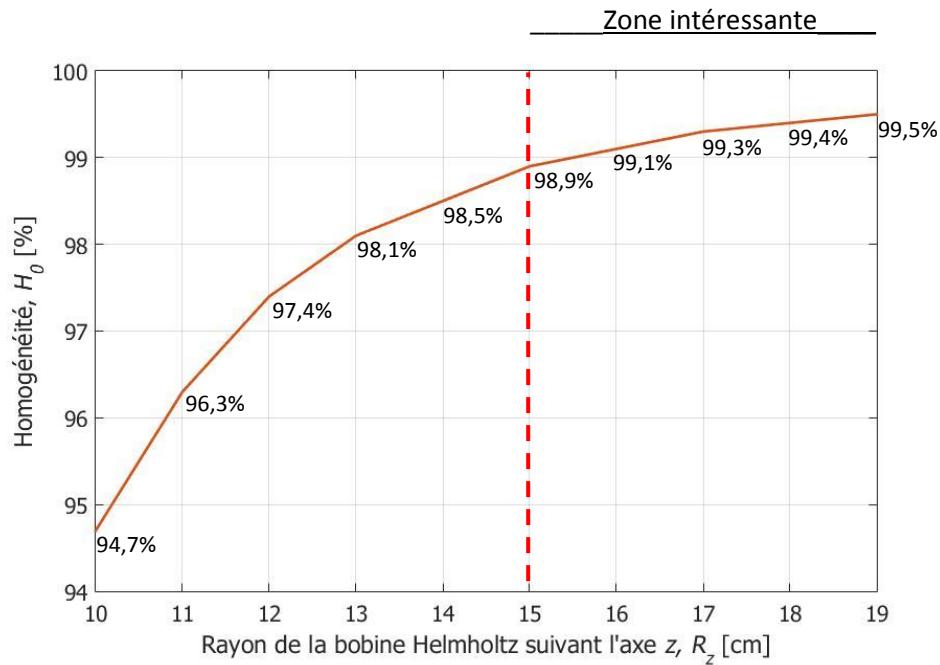


Figure III-24. Homogénéité calculée pour différentes tailles de l'aimant vectoriel en fonction de la variation du rayon de référence R_z .

La masse du fil augmente aussi de 16,7 kg ce qui induit également une augmentation du volume de l'aimant vectoriel et des pièces de support. Ce qui aura donc aussi une répercussion directe sur les dimensions et le coût du cryostat.

Dans le Tableau III-6 nous pouvons observer la différence du coût par rapport aux performances magnétiques de l'aimant vectoriel. De même, pour les valeurs de R_z entre 15 et 19 cm, l'amélioration de H_0 est peu significative (Figure III-24). Par conséquent, le prix et la masse du fil supraconducteur ont des impacts plus importants lorsque l'on souhaite avoir une meilleure qualité dans l'homogénéité ($> 98.9\%$).

Tableau III-6: Longueur, masse et coût total du fil SC56S53 en fonction de rayon R_z

R_z	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
L	11,9	14,4	17,1	20,1	23,3	26,8	30,5	34,4	38,6	43,0
M	12,3	14,9	17,7	20,8	24,1	27,7	31,5	35,5	39,8	44,4
Coût	7,1	8,6	10,3	12,1	14,0	16,1	18,3	20,6	23,2	25,8

Longueur L = kilomètres, Masse m = kilogramme, Coût = k€.

Il reste à évaluer si les coûts associés par une meilleure homogénéité peuvent être justifiés, mais dans notre cas cette amélioration ne nous semble pas assez significative.

Le deuxième paramètre évalué est la densité de flux magnétique B_0 au centre des bobines. La génération de 3 T au centre de l'aimant est employée comme référence. Dans le Tableau III-7, sont montrées les valeurs de B_0 , en fonction du rayon de la bobine de référence R_z et du courant d'alimentation I . Les valeurs du courant d'alimentation ont été établies pour générer une densité de flux magnétique proche de 3 T sans faire varier la quantité de fils nécessaire, tout en respectant le courant que peuvent délivrer les sources d'alimentation utilisées au laboratoire, i.e. pile à combustible et alimentation à découpage.

Un des problèmes trouvés dans la conception de l'aimant vectoriel est le rapport entre la densité de flux magnétique B_0 et la densité de flux magnétique maximale B_{max} trouvé sur le fil supraconducteur.

La solution la moins complexe fut la réduction du courant d'alimentation avec une augmentation du nombre de spires par bobine afin de maintenir la valeur de B_0 constante. Au contraire, si on augmente la valeur du courant, le nombre de spires est réduit mais l'effet trouvé n'est pas celui recherché, car la valeur du courant de fonctionnement va se rapprocher du courant critique.

Tableau III-7: Module de la densité de flux magnétique B_0 au centre de l'aimant vectoriel en fonction de R_z et I

$I \backslash R_z$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
100	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
110	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
120	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	3,27

Dans le Tableau III-7 et le Tableau III-8 les valeurs du module de \mathbf{B} et les valeurs maximales de champ sur fil B_{max} , sur l'aimant vectoriel mesurées sur le bord de la bobine suivant x sont montrées en fonction de la variation du courant d'alimentation entre 100 et 120 A. Les tableaux doivent être lus ensemble car ils sont interdépendants.

Ces tableaux nous montrent quelles tailles sont possibles pour la fabrication de l'aimant vectoriel et la valeur du courant d'alimentation admissible. Seulement les valeurs en gris peuvent être considérées comme « réalisables », car elles correspondent à $I < 80\% I_c(B_{max})$.

Tableau III-8: Valeurs de champ sur fil B_{max} , sur l'aimant vectoriel en fonction de R_z et I

$I \backslash R_z$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
100	6,52	6,65	6,64	6,93	7,03	7,34	7,66	7,66	7,77	7,81
110	7,25	7,31	7,31	7,62	7,73	8,08	8,43	8,43	8,55	8,60
120	7,90	7,98	7,97	8,31	8,43	8,81	9,19	9,20	9,33	9,38

A partir des résultats obtenus, pour H_0 , B_{max} , et B_0 , et après l'évaluation de chaque élément on peut établir la taille la plus adéquate pour l'aimant vectoriel. Les valeurs d'homogénéité obtenues dans tous les cas sont admissibles pour la fabrication de l'aimant.

Les tailles comprises entre $R_z = 10$ et 14 cm sont mises en cause par le cryostat. Nous avons défini une région de travail de rayon de 100 mm, donc ces tailles empêchent le placement d'un cryostat efficace à cause d'un manque d'espace. Le niveau de température à isoler dans cet endroit est compris entre $4,2$ à 300 K, il est donc nécessaire d'avoir un cryostat avec une double paroi, d'une épaisseur totale de l'ordre de 2 cm.

Les valeurs de B_{max} et B_0 correspondantes sont comparées avec la droite de charge du fil employé, montrée dans la Figure III-21. Avec cette valeur de R_z de 15 cm le courant ne peut dépasser 110 A car la valeur correspond à la limite fixée à 80% I_c (B_{max}).

Avec les contraintes précédemment évoquées, la taille la plus favorable à nos besoins est de 15 cm. Des tailles supérieures augmenteront peu le niveau d'homogénéité, entraînant des surcoûts inutiles.

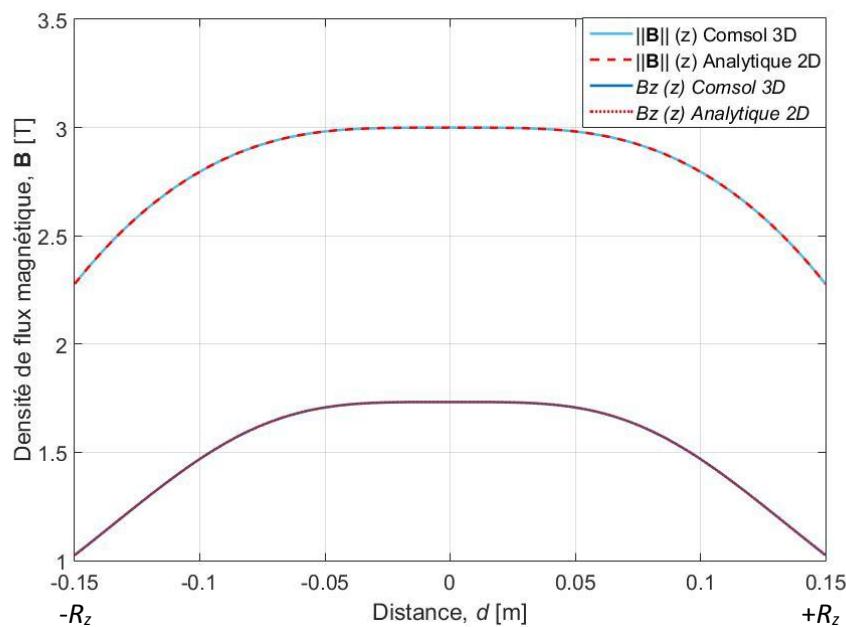


Figure III-25. Valeurs de $B_z(z)$ et $\|B\|(z)$ obtenues avec $R_z = 15$ cm et $I = 110$ A. Comsol 3D et parc calcul analytique 2D.

La Figure III-25 représente une comparaison entre les valeurs calculées de la densité de flux magnétique $\|B\|(z)$ et $B_z(z)$, réalisés à travers le modèle complet sous Comsol et le modèle analytique, permettant de vérifier l'exactitude du calcul. Ils correspondent au calcul utilisant les paramètres des bobines créées à partir du rayon de $R_z = 15$ cm et pour un courant d'alimentation de 110 A. La distance d représente la valeur en mètres de la longueur de l'axe z. Le diamètre du volume de travail correspond

alors à $-0.05 \text{ m} < d < 0.05 \text{ m}$. C'est dans cette zone que les différentes valeurs d'homogénéité sont évaluées.

Le nombre de degrés de libertés calculés par Comsol est supérieur à 11 millions pour un temps de calcul de 35 minutes, sur un ordinateur double cœur de 2,83 GHz, 64 bits et 20 Go RAM. La valeur de l'inductance a été réalisée à partir de l'énergie magnétique stockée dans l'aimant vectoriel. L'inductance avec la totalité de bobines connectées en série est estimée à 61 H. La valeur individuelle de chaque bobine a été estimée à : 7,62 H pour la bobine suivant l'axe z, 17,9 H pour la bobine de l'axe x et 36,3 H pour la bobine de l'axe y. Pour arriver à ce résultat, le processus d'optimisation utilisé par l'étude paramétrique a permis de produire des champs individuels B_x , B_y et B_z d'une même amplitude de 1,73 T pour une même valeur de courant d'alimentation de 110 A dans chaque bobine. Avec ce mode opératoire, la droite de travail du système est unique, ce qui va rendre plus simple le contrôle du vecteur \mathbf{B} . Par ailleurs, les valeurs des composantes de \mathbf{B} sont homogènes à 98,9 % dans la zone de travail.

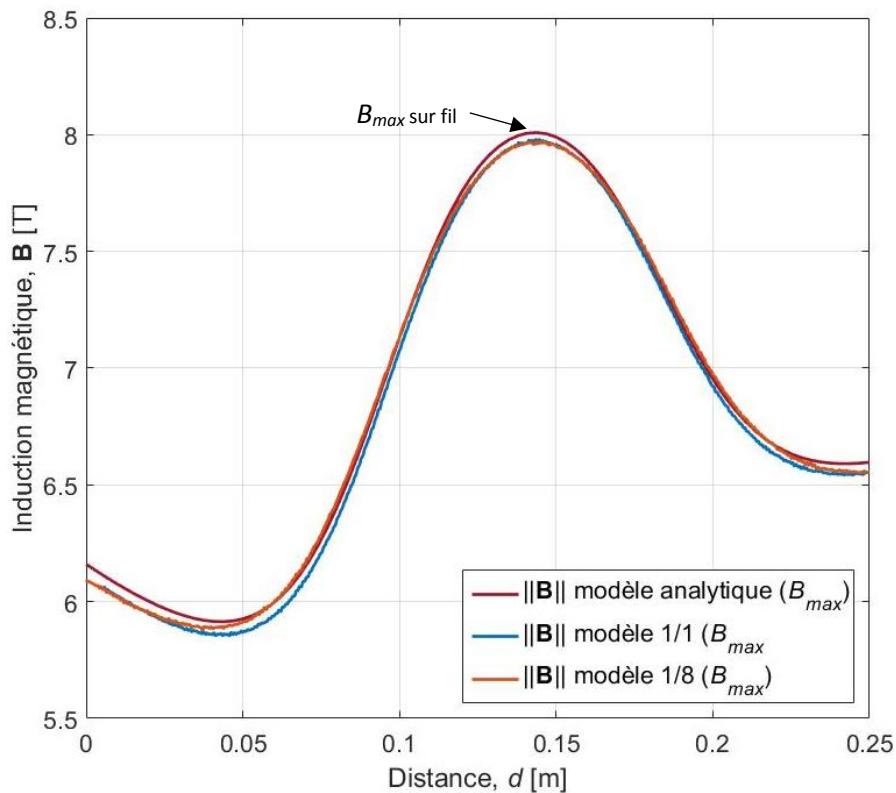


Figure III-26. Densité de flux magnétique de l'aimant vectoriel. Les valeurs sont calculées sur le bord intérieur de la bobine suivant l'axe x, avec $R_z = 15 \text{ cm}$ et $I = 110 \text{ A}$.

La Figure III-26 montre les valeurs de $\|\mathbf{B}\|$ calculées sur le bord « I » de la bobine x indiqué Figure III-23. Cet endroit a été identifié grâce au modèle complet et nous a permis de valider les deux modèles réalisés sur Comsol. Une deuxième validation a été réalisée avec le modèle analytique, permettant de confirmer le résultat de B_{max} pour l'aimant vectoriel de façon certaine.

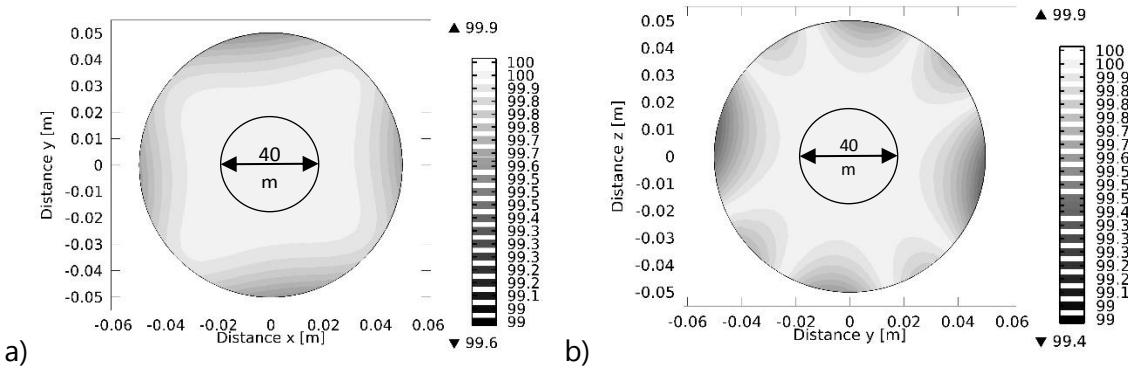


Figure III-27. Coupe transversale du volume de travail sur le plan x0y (a) et z0y (b) avec l'évaluation de l'homogénéité de l'intensité de flux magnétique pour l'aimant vectoriel de rayon $R_z = 15\text{cm}$.

Dans la Figure III-27, on montre la valeur de H_0 évaluée à l'intérieur du plan x0y du volume de travail. Nous pouvons déterminer le niveau d'homogénéité selon la taille de l'échantillon qui sera étudié, e.g. un échantillon supraconducteur de taille inférieure à 4 cm de diamètre peut être soumis à une densité de flux magnétique d'homogénéité supérieure à 99,99 %.

Les valeurs de fonctionnement de $\|\mathbf{B}\|$ sur les axes x , y et z sont montrées dans le Tableau III-9. Quand l'aimant vectoriel positionne \mathbf{B} seulement suivant un axe, la valeur de son module ne pourra être plus élevée que les valeurs montrées dans le Tableau III-9 avant la perte de l'état supraconducteur. Par exemple, la valeur maximale produite au centre de l'aimant vectoriel suivant l'axe x est de 2,1 T. L'aimant vectoriel peut alors produire une valeur maximale de 3 T uniquement lorsque les trois bobines de Helmholtz sont alimentées par la même amplitude de courant.

Tableau III-9: Valeurs de fonctionnement pour l'aimant vectoriel complet

Nom	Description	Valeur	Unités
B_0	Densité de flux magnétique au centre des bobines	3	T
$I_{z, x, y}$	Courant d'alimentation	140 ; 130 ; 120	A
B_{0z}	Densité de flux magnétique axe z	2,2	T
B_{0x}	Densité de flux magnétique axe x	2,1	T
B_{0y}	Densité de flux magnétique axe y	2	T
H_0	Homogénéité dans le volume de travail	> 99	%

T = tesla, A = ampère

III.7 Conception des supports

Le critère employé pour la conception des supports des bobines a été l'obtention d'une structure de l'aimant vectoriel avec une masse froide minimale. La masse froide détermine la quantité nécessaire d'hélium liquide pour le maintien et la mise en froid du système. Pour cela, une première structure a été conçue avec des épaisseurs minimales pour les éléments de support avec un espace suffisant pour placer tous les éléments de soutien dans un volume réduit. La structure imbriquée de

cet aimant vectoriel requiert un assemblage assez complexe, permettant de résister mécaniquement aux forces électromagnétiques produites au sein de l'aimant vectoriel. Le dessin des pièces a été orienté vers des éléments géométriquement simples et faciles à faire usiner permettant de réduire des coûts d'usinage. La Figure III-28 montre le premier modèle structurel d'aimant vectoriel réalisé sous l'environnement 3D Inventor. Ce modèle permet d'évaluer les contraintes de fabrication et d'assemblage de la partie structurelle de l'aimant vectoriel. Il a permis d'évaluer également la taille, le poids des supports, le poids total (avec tiges, écrous, fils) et de visualiser les possibilités d'optimisation, de fabrication et de montage.

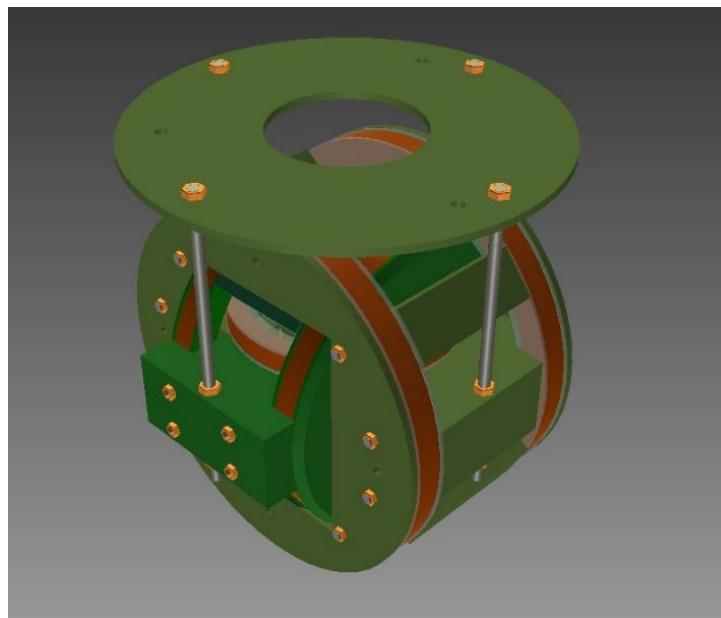


Figure III-28. Dessin 3D des structures de support de l'aimant vectoriel.

Pour les environnements cryogéniques, le matériau le plus courant pour la fabrication des supports est le G11. Ce matériau est composé d'une résine époxy et de fibre de verre, formant un composé très solide et résistant. Il permet aussi de n'avoir aucun effet magnétique et une bonne isolation thermique. Le G11 semble être le meilleur choix pour ce type d'application.

Ce matériau a une densité moyenne de 1,9 gr/cm³ avec laquelle nous avons estimé la masse de l'ensemble des supports à 60 kg, le poids du bobinage étant de 27,7 kg. Ces valeurs de masse sont essentielles pour le dimensionnement du cryostat. Un autre facteur d'importance concerne les dimensions de l'ensemble de l'aimant vectoriel afin d'assurer l'espace nécessaire dans le cryostat.

La première structure a été soumise à des calculs d'efforts pour vérifier sa résistance mécanique. Le calcul des efforts a été réalisé sur Comsol avec le module de calcul électromagnétique « magnetic fields ». Les paramètres électriques et géométriques montrés dans le Tableau III-10 correspondent à la taille de l'aimant vectoriel retenue soit $R_z = 15$ cm.

Tableau III-10. Paramètres de fabrication de l'aimant vectoriel retenu.

Bobine	Nombre spires [tr]	Section [mm ²]	Rayon int. [mm]	Rayon ext. [mm]
B_{z1} et B_{z2}	2627	784	262	318
B_{x1} et B_{x2}	3441	1024	412	158
B_{y1} et B_{y2}	4319	1296	512	220

Les résultats du calcul d'efforts sont montrés dans le Tableau III-11. Ils représentent la valeur des composantes de la force appliquée sur chaque bobine.

Tableau III-11: Evaluation des efforts sur chaque bobine

Bobine	f_x	f_y	f_z	Unité
B_{z1}	27	12,5	-60,1	kN
B_{z2}	-27	-12,5	60,1	kN
B_{x1}	-103,1	53,3	97,6	kN
B_{x2}	103,1	-53,3	-97,6	kN
B_{y1}	171,7	-162,4	83,4	kN
B_{y2}	-171,7	162,4	-83,4	kN

N = newton

Ensuite, ces données ont été introduites dans le module « Stress - Solid mechanics » de Comsol, avec un facteur de déformation égal à 1. Il nous permettra de visualiser les éventuels points de défaut et déformations du matériau. Dans la Figure III-29, les résultats obtenus ont montré de possibles défauts des pièces de support pour les bobines suivant l'axe y. Ces bobines ont le plus grand diamètre et elles doivent résister aux efforts d'attraction suivant la direction y de l'ordre de 162 kN et 171 kN suivant la direction x. Les pièces sont soumises à une pression maximale de $2,17 \times 10^9$ Pa. A titre d'exemple, un morceau de G11 d'une épaisseur de 0,125 inches (3,175 mm) possède une résistance à la flexion longitudinale d'environ $4,15 \times 10^8$ Pa (suivant la direction de la chaîne du tissu de fibre de verre ou direction y du plan x0y du matériau) et $3,45 \times 10^8$ Pa transversalement (suivant la direction de la trame du tissu de fibre de verre ou direction x du plan x0y du matériau). Ces valeurs sont des valeurs moyennes et dépendent de chaque fabricant. Le résultat obtenu a montré la faiblesse dans certaines régions de la structure. On observe particulièrement des déformations autour de la voie d'accès à la région de travail. C'est la plus affectée car il n'y a pas la place nécessaire pour le placement de pièces de support supplémentaires, qui sont trop faibles à cet endroit. Ces déformations représentent un risque élevé de fracture. Les supports des bobines suivant les axes x et z ont résisté et n'ont pas besoin d'être optimisés ou modifiés. Avec les données obtenues, nous avons procédé à la modification de la structure pour la rendre naturellement résistante aux efforts. La première modification a été réalisée sur la pièce « A » (Figure III-29). L'épaisseur a été élargi de 5 à 25 mm jusqu'à se trouver à la limite du cryostat.

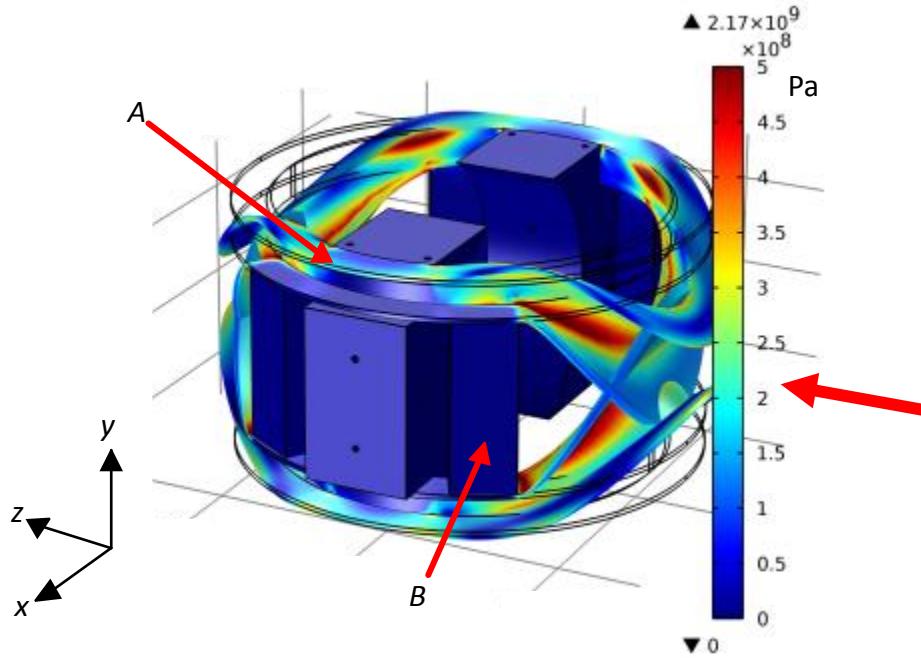


Figure III-29. Calcul d'efforts mécaniques sur le premier support.

Ensuite, des pièces qui servent de colonnes « B » ont été élargies afin d'augmenter la zone de contact avec les pièces « A ». D'autres éléments structuraux ont été modifiés afin de soutenir ces modifications. Les supports des bobines z ont été les moins affectés. Malheureusement les modifications réalisées ont engendré quelques pièces plus complexes et difficiles à réaliser.

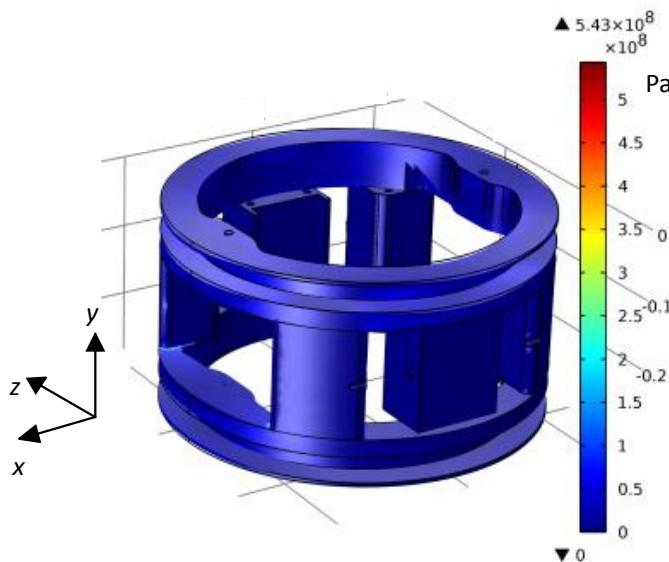


Figure III-30. Calcul des efforts mécaniques sur le support après amélioration.

Les calculs ont été refaits avec les mêmes conditions de forces appliquées. Les résultats obtenus sont montrés dans la Figure III-30. Dans ce nouveau test, la structure ne montre pas de signes de déformation ou de défaut important. Les régions où le risque de fracture était élevé ont été réduites significativement. Le système est considéré comme mécaniquement stable et résistant et les effets de déformation de la structure sur l'homogénéité ne sont pas étudiés. La procédure de vérification mécanique a été faite en échange continu avec Fabrum [113], entreprise spécialisée dans la fabrication de pièces en G11. Le dessin original a été modifié à plusieurs endroits et plusieurs pièces ont été modifiées ce qui a augmenté le poids total du support de l'aimant vectoriel à 85 kg, soit 25 kg de plus qu'à l'origine. L'effet des efforts sur la structure des bobines n'était pas l'objet d'étude.

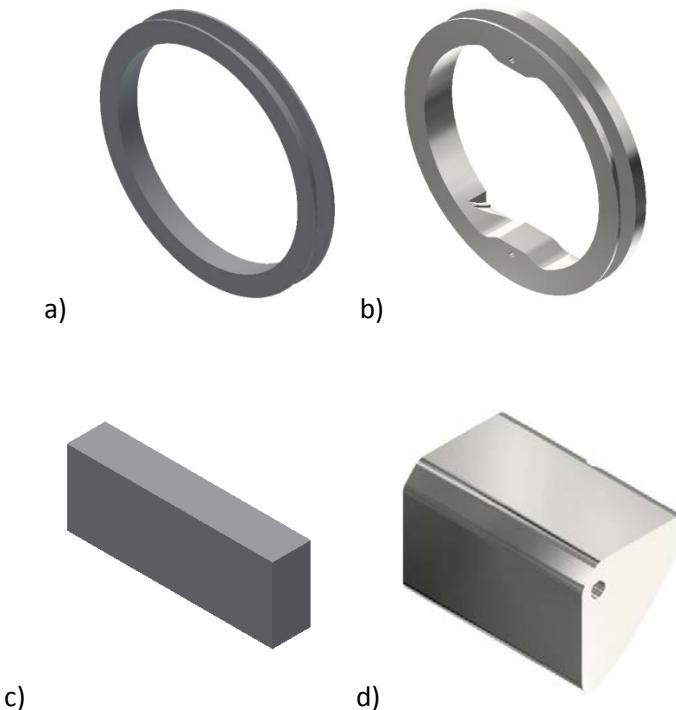


Figure III-31 a) Pièce « A » avant modification. b) Pièce « A » après modification. c) Pièce « B » avant modification. d) Pièce « B » après modification.

La Figure III-31 montre les pièces « A » et « B » avant et après les corrections effectuées. Nous pouvons apprécier sur la pièce « A » qu'un des côtés a été largement agrandi et qu'elle a bénéficié d'éléments de support supplémentaires permettant d'aider son maintien dans la structure. La pièce « B » a été élargie sur le côté de sorte que l'aire de support soit le plus grande que possible.

La Figure III-32 montre les pièces usinées en G11. On peut apprécier l'orifice d'entrée vers la zone de travail dans le centre. Les pièces sont assemblées avec une grande précision et soutenues à travers des tiges filetées en acier de 16 mm. L'ensemble forme une structure très solide et va être suspendu à la partie supérieure du cryostat. La masse totale de l'aimant vectoriel doit dépasser les 115 kg avec le fil supraconducteur et les autres éléments de support additionnels.



Figure III-32. Supports de l'aimant vectoriel en G11, arrivés au laboratoire.

III.8 Cryostat

Le cryostat n'était pas soumis à une procédure de dimensionnement. Etant donné l'ampleur de ce projet, il a été commandé chez CryoDiffusion [114], en utilisant les dimensions et la masse froide obtenue de l'aimant vectoriel définitif avec les corrections effectuées dans les supports en G11. La Figure III-33a montre les dimensions nécessaires pour le dimensionnement du cryostat. Le diamètre extérieur et le diamètre de la voie d'accès ont été définis respectivement à 600 et 145 mm. La Figure III-33b montre l'ouverture du cryostat où l'aimant vectoriel va être positionné et la voie d'accès dans la région de travail. Des plans plus détaillés seront montrés en annexes.

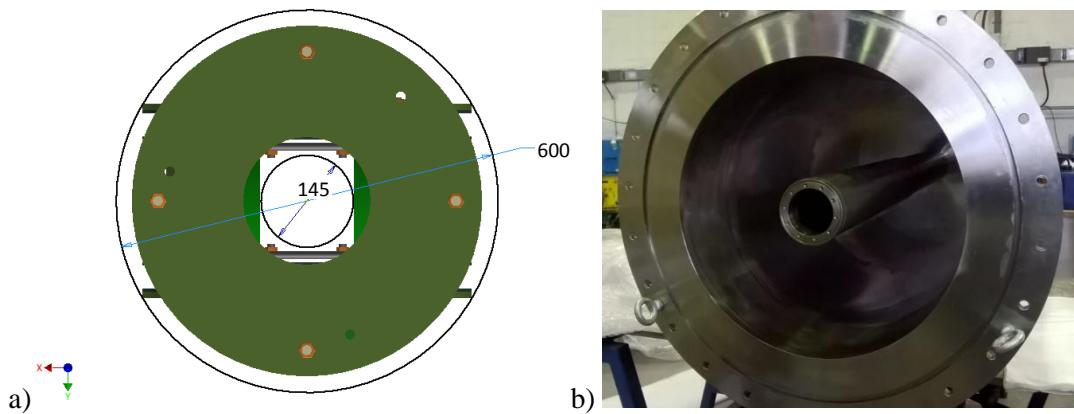


Figure III-33. a) Espace disponible pour le cryostat, b) Intérieur du cryostat.

III.9 Conclusion

L'objectif de ce chapitre a été d'étudier la conception d'un aimant vectoriel supraconducteur, capable de produire une densité de flux magnétique élevée, orientable et uniforme. Les résultats ont montré qu'un système de trois bobines Helmholtz peut s'adapter à ces exigences. Un point important est que sa construction va être moins complexe et plus rapide que d'autres aimants vectoriels.

La présence de trois composantes de grande amplitude B_x , B_y et B_z de la densité de flux magnétique sur le fil supraconducteur réduit significativement ses performances magnétiques. En effet, la grande valeur de B_{max} limite l'amplitude du courant d'alimentation. Il est évident que cette valeur de B_{max} est une variable très importante pour la conception de l'aimant vectoriel.

Les structures de support ont une importance vitale dans le maintien de la qualité de l'homogénéité de **B**. Elles vont être soumises à des efforts très importants et elles doivent pouvoir assurer la fiabilité du système. Pour cela est indispensable pouvoir

IV- Conclusion générale

Nous avons montré que la pile à combustible peut fonctionner comme source de courant contrôlé par le débit d'hydrogène alimentant ainsi une bobine supraconductrice fortement inductive. La consigne en courant imposée par le débit d'hydrogène correspond parfaitement au courant mesuré. Le dispositif de protection mis en place a bien assuré sa fonction en se mettant en route au moment opportun.

Une seule cellule de pile à combustible de 100 cm² de surface active a permis d'alimenter une bobine supraconductrice de 10 H qui produit un champ de 4 T. L'augmentation du courant maximal d'alimentation nécessitera d'augmenter la surface de la pile et le débit des gaz, ce qui augmentera peu la partie source en poids et en volume. La qualité du courant généré par la pile n'a pas affecté le maintien de l'état supraconducteur de la bobine.

Concernant l'aimant vectoriel, les résultats obtenus durant la conception ont permis d'évaluer différentes tailles d'aimant vectoriel en fonction du cahier des charges. Nous avons retenu celui qui présentait un bon compromis prix/performances magnétiques. Nos besoins initiaux d'avoir deux accès à la sphère de travail de 100 mm de diamètre ont été abandonnés en raison des contraintes de fabrication. Nous avons également renoncé à une version d'aimant vectoriel produisant un champ maximal de 3 T sur chaque axe, car les coûts auraient été bien plus importants que prévus. La version retenue de l'aimant vectoriel peut générer un champ magnétique maximal de 2 T sur chacun des axes séparément et un champ total de 3 T lorsque toutes les bobines sont alimentées. Les efforts électromagnétiques ont également été évalués et utilisés pour le dimensionnement des supports en G11. Ces supports sont capables de supporter et maintenir les bobines à leur place, assurant une qualité de l'homogénéité supérieure à 95 %. Le dimensionnement magnétique et celui des supports ont permis d'évaluer la masse totale et les dimensions maximales de l'aimant vectoriel pour la conception du cryostat à l'hélium liquide construit par CryoDiffusion.

Malheureusement, les délais liés à la procédure d'usinage et de livraison des pièces de support ont empêché de finaliser l'assemblage complet avant la fin de la thèse. Par ailleurs, la préparation du banc d'essai et des éléments nécessaires pour la connexion directe de la pile à combustible avec une bobine supraconductrice a déjà nécessité un effort logistique assez complexe à gérer.

V- Perspectives

En ce qui concerne l'aimant vectoriel, la procédure de bobinage doit être réalisée en tenant compte de la position des spires. Elles doivent par conséquent être imprégnées avec de la résine sans générer de surépaisseur pour ne pas se confronter à des problèmes lors l'assemblage des pièces. Une fois le bobinage finalisé, l'assemblage sous forme d'aimant vectoriel devra être fait et placé à l'intérieur du cryostat. Les dimensions finales de la masse à refroidir et de la taille du cryostat à hélium liquide vont être responsables de coûts de fonctionnement importants notamment lors de la mise en froid. Ceci nécessitera donc une planification rigoureuse.

Ensuite, l'aimant vectoriel devra être caractérisé en régime nominal afin de définir les conditions de fonctionnement et ainsi vérifier qu'il remplit bien le cahier des charges tel qu'il a été défini, en termes d'homogénéité, de densité de flux magnétique et de courant.

Enfin, le fonctionnement proprement dit de l'aimant vectoriel quant à son usage pour la caractérisation de pastilles supraconductrices de grandes tailles dans différentes directions devra aussi être validé.

En ce qui concerne la pile, le fonctionnement en source de courant a été peu étudié et nous avons donc besoin de comparer le vieillissement subi par les cellules dans ce mode de fonctionnement avec celui de cellules en fonctionnement usuel, e.g. dans un système contenant des convertisseurs de puissance. L'importance de cette expérimentation est de vérifier que le fonctionnement en source de courant ne dégénère pas la cellule plus que son utilisation habituelle ou du moins d'estimer le degré d'altération. Nous avons initié une procédure de détection du vieillissement par mesure du champ magnétique.

Les résultats obtenus se sont montrés prometteurs, mais ils demandent néanmoins à être approfondis. Le champ magnétique produit par la pile à combustible est très faible et des problèmes de mesures parasites provenant des électrovannes avoisinantes se posent. Les premières études menées nous ont permis de nous orienter vers un choix de capteurs de champs suffisamment sensibles et de vérifier expérimentalement que les premiers résultats sont exploitables. Les résultats de simulations ont mis en évidence que si la répartition de la densité de courant change, cela affecte le champ magnétique autour de la pile. Pour vérifier ce phénomène, des capteurs magnétiques à haute sensibilité ont été placés en périphérie d'une cellule de pile à combustible située au centre d'un stack de 500 W comportant 16 cellules. Ces capteurs ont permis de mesurer des variations très faibles de champ magnétique, de l'ordre de 0,5 Gauss. Les premiers tests expérimentaux ont également permis de percevoir une variation du champ magnétique lorsque la pile est sous-alimentée ou lorsque les gaz ne sont plus humidifiés. De ces résultats préliminaires, nous espérons pouvoir approfondir nos recherches dans cette direction et ainsi dégager une signature spécifique à certains défauts, par exemple, en remontant à la distribution de densité de courant dans la pile par cartographie du champ magnétique rayonné.

VI- Bibliographie

- [1] B. Schwartz, *Superconductor Applications: SQUIDs and Machines*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] P. Tixador and Y. Laumond, "Projets et développements en cryoélectrotechnique," *J. Phys. III*, vol. 1, no. 2, pp. 225–240, Feb. 1991.
- [3] P. M. Grant and T. P. Sheahen, "Cost Projections for High Temperature Superconductors," *ArXivcond-Mat0202386*, Feb. 2002.
- [4] M. Morpurgo, "Design and construction of a superconducting aluminium stabilized solenoid," *Cryogenics*, vol. 17, no. 2, pp. 89–90, Feb. 1977.
- [5] S. Claudet, P. Gayet, P. Lebrun, L. Tavian, and U. Wagner, "Economics of Large Helium Cryogenic Systems: Experience from Recent Projects at CERN," in *Advances in Cryogenic Engineering*, Q.-S. Shu, Ed. Springer US, 2000, pp. 1301–1308.
- [6] P. Vedrine *et al.*, "The Whole Body 11.7 T MRI Magnet for Iseult/INUMAC Project," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, pp. 868–873, Jun. 2008.
- [7] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, "Comparative study of different fuel cell technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 981–989, Jan. 2012.
- [8] "Applications of proton exchange membrane fuel cell systems (PDF Download Available)," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/222518279_Applications_of_proton_exchange_membrane_fuel_cell_systems. [Accessed: 12-May-2017].
- [9] "Hydrogen Energy Storage: A New Solution To the Renewable Energy Intermittency Problem." [Online]. Available: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/07/hydrogen-energy-storage-a-new-solution-to-the-renewable-energy-intermittency-problem.html>. [Accessed: 12-May-2017].
- [10] A. Al-Ahmed, S. Hossain, B. Mukhtar, S. U. Rahman, H. Abualhamayel, and J. Zaidi, "Hydrogen highway: An overview," in *Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International*, 2010, pp. 642–647.
- [11] L. Schlapbach and A. Züttel, "Hydrogen-storage materials for mobile applications," *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 353–358, Nov. 2001.
- [12] M. C. Williams, *Fuel Cell Seminar 2010*. The Electrochemical Society, 2011.
- [13] "Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan | Department of Energy." [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development-and-22>. [Accessed: 12-May-2017].
- [14] D. T. Swift-Hook, "Alternative sources of power," *Electron. Power*, vol. 28, no. 1, pp. 89–93, Jan. 1982.
- [15] T. Strasser *et al.*, "A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 4, pp. 2424–2438, Apr. 2015.
- [16] A. Kirubakaran, S. Jain, and R. K. Nema, "A review on fuel cell technologies and power electronic interface," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2430–2440, Dec. 2009.
- [17] "Recent Advances in Application of Chitosan in Fuel Cells (PDF Download Available)." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/268811074_Recent_Advances_in_Application_of_Chitosan_in_Fuel_Cells. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [18] "Direct Borohydride Fuel Cells," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/223931438_Direct_Borohydride_Fuel_Cells. [Accessed: 28-Mar-2017].
- [19] J. Ma, N. A. Choudhury, and Y. Sahai, "A comprehensive review of direct borohydride fuel cells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, pp. 183–199.
- [20] R. O'Hayre, S.-W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley & Sons, 2016.

- [21] "A novel high power density borohydride-air cell." [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775399002591>. [Accessed: 03-Sep-2016].
- [22] R. O. Stroman and G. S. Jackson, "Understanding Direct Borohydride – Hydrogen Peroxide Fuel Cell Performance with a Calibrated Numerical Model," *Meet. Abstr.*, vol. MA2014-02, no. 21, pp. 1107–1107, Aug. 2014.
- [23] H. Dohle, J. Mergel, and D. Stolten, "Heat and power management of a direct-methanol-fuel-cell (DMFC) system," *J. Power Sources*, vol. 111, no. 2, pp. 268–282, Sep. 2002.
- [24] A. S. Aricò, V. Baglio, and V. Antonucci, "Direct Methanol Fuel Cells: History, Status and Perspectives," in *Electrocatalysis of Direct Methanol Fuel Cells*, H. Liu and J. Zhang, Eds. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, pp. 1–78.
- [25] H. Dohle, H. Schmitz, T. Bewer, J. Mergel, and D. Stolten, "Development of a compact 500 W class direct methanol fuel cell stack," *J. Power Sources*, vol. 106, no. 1–2, pp. 313–322, Apr. 2002.
- [26] T. Schaffer, V. Hacker, and J. O. Besenhard, "Innovative system designs for DMFC," *J. Power Sources*, vol. 153, no. 2, pp. 217–227, Feb. 2006.
- [27] N. H. Behling, "Chapter 7 - History of Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Direct Methanol Fuel Cells," in *Fuel Cells*, Elsevier, 2013, pp. 423–600.
- [28] W. Vielstich, "Electrochemical energy conversion: methanol fuel cell as example," *J. Braz. Chem. Soc.*, vol. 14, no. 4, pp. 503–509, Aug. 2003.
- [29] L. Jiang and G. Sun, "FUEL CELLS – DIRECT ALCOHOL FUEL CELLS | Direct Ethanol Fuel Cells," in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ed. Amsterdam: Elsevier, 2009, pp. 390–401.
- [30] S. Abdullah, S. K. Kamarudin, U. A. Hasran, M. S. Masdar, and W. R. W. Daud, "Modeling and simulation of a direct ethanol fuel cell: An overview," *J. Power Sources*, vol. 262, pp. 401–406, Sep. 2014.
- [31] D. E. Eapen, S. R. Suseendiran, and R. Rengaswamy, "2 - Phosphoric acid fuel cells," in *Compendium of Hydrogen Energy*, F. Barbir, A. Basile, and T. N. Veziroğlu, Eds. Oxford: Woodhead Publishing, 2016, pp. 57–70.
- [32] J. M. Andújar and F. Segura, "Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 9, pp. 2309–2322, Dec. 2009.
- [33] E. Audasso, L. Barelli, G. Bidini, B. Bosio, and G. Discepoli, "Molten Carbonate Fuel Cell performance analysis varying cathode operating conditions for carbon capture applications," *J. Power Sources*, vol. 348, pp. 118–129, Apr. 2017.
- [34] J.-H. Wee, "Carbon dioxide emission reduction using molten carbonate fuel cell systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 178–191, Apr. 2014.
- [35] "NASA Hydrogen Fuel Cells - Pics about space." [Online]. Available: <https://pics-about-space.com/nasa-hydrogen-fuel-cells?p=1#>. [Accessed: 04-Jun-2017].
- [36] F. Ramadhan, M. A. Hussain, H. Mokhlis, and S. Hajimolana, "Optimization strategies for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) application: A literature survey," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 460–484, Sep. 2017.
- [37] K. Fischer and J. R. Seume, "Impact of the Temperature Profile on Thermal Stress in a Tubular Solid Oxide Fuel Cell," *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 011017-011017-9, Nov. 2008.
- [38] T. Yamanaka, T. Takeguchi, G. Wang, E. N. Muhamad, and W. Ueda, "Particle size dependence of CO tolerance of anode PtRu catalysts for polymer electrolyte fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 19, pp. 6398–6404, Oct. 2010.
- [39] P. P. Lopes, E. A. Ticianelli, and H. Varela, "Potential oscillations in a proton exchange membrane fuel cell with a Pd–Pt/C anode," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 1, pp. 84–89, Jan. 2011.
- [40] Y. M. Ferng, A. Su, and J. Hou, "Parametric investigation to enhance the performance of a PBI-based high-temperature PEMFC," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 431–437, Feb. 2014.
- [41] M. Moradi, A. Moheb, M. Javanbakht, and K. Hooshyari, "Experimental study and modeling of proton conductivity of phosphoric acid doped PBI-Fe₂TiO₅ nanocomposite membranes for

- using in high temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC)," *Int. J. Hydrol. Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2896–2910, Jan. 2016.
- [42] Y. Wan, J. Guan, and S. Xu, "Improved empirical parameters design method for centrifugal compressor in PEM fuel cell vehicle application," *Int. J. Hydrol. Energy*, vol. 42, no. 8, pp. 5590–5605, Feb. 2017.
- [43] A. A. Fardoun, H. A. N. Hejase, A. Al-Marzouqi, and M. Nabag, "Electric circuit modeling of fuel cell system including compressor effect and current ripples," *Int. J. Hydrol. Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1558–1564, Jan. 2017.
- [44] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and T. J. Harris, "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell I . Mechanistic Model Development," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 142, no. 1, pp. 1–8, Jan. 1995.
- [45] A. Kazim, H. T. Liu, and P. Forges, "Modelling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields," *J. Appl. Electrochem.*, vol. 29, no. 12, pp. 1409–1416, Dec. 1999.
- [46] D. A. Noren and M. A. Hoffman, "Clarifying the Butler–Volmer equation and related approximations for calculating activation losses in solid oxide fuel cell models," *J. Power Sources*, vol. 152, pp. 175–181, Dec. 2005.
- [47] D. S. Falcão, V. B. Oliveira, C. M. Rangel, C. Pinho, and A. M. F. R. Pinto, "Water transport through a PEM fuel cell: A one-dimensional model with heat transfer effects," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 9, pp. 2216–2225, May 2009.
- [48] V. Ionescu and N. Buzbuchi, "PEMFC Two-dimensional FEM Model to Study the Effects of Gas Flow Channels Geometry on Reactant Species Transport," *Energy Procedia*, vol. 112, pp. 390–397, Mar. 2017.
- [49] W. Li *et al.*, "Experimental and numerical analysis of a three-dimensional flow field for PEM-FCs," *Appl. Energy*, vol. 195, pp. 278–288, Jun. 2017.
- [50] S. Shimpalee, V. Lilavivat, H. Xu, C. Mittelsteadt, and Y. Khunatorn, "Experimental Investigation and Numerical Determination of Custom Gas Diffusion Layers on PEMFC Performance," *Electrochimica Acta*, vol. 222, pp. 1210–1219, Dec. 2016.
- [51] S. Yuvarajan and D. Yu, "Characteristics and modelling of PEM fuel cells," in *2004 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (IEEE Cat. No.04CH37512)*, 2004, vol. 5, p. V-880-V-883 Vol.5.
- [52] D. Yu and S. Yuvarajan, "A novel circuit model for PEM fuel cells," in *Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04*, 2004, vol. 1, p. 362–366 Vol.1.
- [53] "Analysis for the Effect of Inverter Ripple Current on Fuel Cell Operating Condition | Journal of Fluids Engineering | ASME DC." [Online]. Available: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1429781>. [Accessed: 05-Jun-2017].
- [54] R. Seyezhai and B. L. Mathur, "Modeling and control of a PEM fuel cell based hybrid multilevel inverter," *Int. J. Hydrol. Energy*, vol. 36, no. 22, pp. 15029–15043, Nov. 2011.
- [55] S. C. Page, A. H. Anbukey, S. P. Krumdieck, and J. Brouwer, "Test Method and Equivalent Circuit Modeling of a PEM Fuel Cell in a Passive State," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 3, pp. 764–773, Sep. 2007.
- [56] C. Wang, M. H. Nehrir, and S. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 2005, p. 2115 Vol. 3-.
- [57] M. Alaraj, Z. J. Ren, and J.-D. Park, "Microbial fuel cell energy harvesting using synchronous fly-back converter," *J. Power Sources*, vol. 247, pp. 636–642, Feb. 2014.
- [58] "Test of a PEM fuel cell with low voltage static converter (PDF Download Available)," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/222649084_Test_of_a_PEM_fuel_cell_with_low_voltage_static_converter. [Accessed: 28-Apr-2017].

- [59] B. Wahdame *et al.*, "Impact of power converter current ripple on the durability of a fuel cell stack," in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 1495–1500.
- [60] M. Hinaje, S. Raël, J.-P. Caron, and B. Davat, "An innovating application of PEM fuel cell: Current source controlled by hydrogen supply," *Int. J. Hydrot. Energy*, vol. 37, no. 17, pp. 12481–12488, Sep. 2012.
- [61] "An innovating application of PEM fuel cell: Current source controlled by hydrogen supply." [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912013365>. [Accessed: 19-Aug-2016].
- [62] C. Bonnet *et al.*, "Can PEM Fuel Cells Experience Appreciable Degradation at Short Circuit?," *Fuel Cells*, p. n/a-n/a, Jun. 2016.
- [63] H. K. Onnes, "Further experiments with Liquid Helium. G. On the Electrical Resistance of Pure Metals, etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears.," in *Through Measurement to Knowledge*, K. Gavroglu and Y. Goudaroulis, Eds. Springer Netherlands, 1991, pp. 267–272.
- [64] J. G. Bednorz and K. A. Müller, "Possible highTc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system," *Z. Für Phys. B Condens. Matter*, vol. 64, no. 2, pp. 189–193, Jun. 1986.
- [65] M. K. Wu *et al.*, "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 9, pp. 908–910, Mar. 1987.
- [66] C. W. Chu, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, and Y. Q. Wang, "Evidence for superconductivity above 40 K in the La-Ba-Cu-O compound system," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 4, pp. 405–407, Jan. 1987.
- [67] R. P. Gupta *et al.*, "Possible observation of superconductivity at 300K," *Pramana*, vol. 30, no. 1, pp. L71–L73, Jan. 1988.
- [68] R. P. Smith *et al.*, "Superconductivity in graphite intercalation compounds," *Phys. C Supercond. Its Appl.*, vol. 514, pp. 50–58, Jul. 2015.
- [69] G. Larkins, Y. Vlasov, and K. Holland, "Evidence of superconductivity in doped graphite and graphene," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1, p. 015015, 2016.
- [70] P. Vedrine *et al.*, "Iseult/INUMAC Whole Body 11.7 T MRI Magnet Status," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, no. 3, pp. 696–701, Jun. 2010.
- [71] "Structural investigation of La(2-x)Sr(x)CuO(4+y) - Following staging as a function of temperature (PDF Download Available)," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/293632910_Structural_investigation_of_La2-xSrxCuO4y_-_Following_staging_as_a_function_of_temperature. [Accessed: 29-May-2017].
- [72] "Les supraconducteurs TIXADOR Pascal," *Librairie Lavoisier*. [Online]. Available: <https://www.lavoisier.fr/livre/physique/les-supraconducteurs/tixador/descriptif-9782866015053>. [Accessed: 29-May-2017].
- [73] M. L. Cohen, "Limitations on the Theories of High Temperature Superconductors," in *New Horizons in Low-Dimensional Electron Systems*, H. Aoki, M. Tsukada, M. Schlüter, and F. Lévy, Eds. Springer Netherlands, 1992, pp. 191–199.
- [74] A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, and S. I. Shylin, "Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system," *Nature*, vol. 525, no. 7567, pp. 73–76, Sep. 2015.
- [75] K. Berger, *Etude des phénomènes couplés magnétothermiques dans les supraconducteurs à haute température*. Nancy 1, 2006.
- [76] G. Grissonnanche *et al.*, "Direct measurement of the upper critical field in cuprate superconductors," *Nat. Commun.*, vol. 5, p. ncomms4280, Feb. 2014.
- [77] "PJSRR (2016) 2(1): Effect of Yb₂O₃ Nanoparticle Addition on Superconducting Properties of BSCCO (2223)/Ag Tapes by Acetate Precipitation Method (PDF Download Available)," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/308983900_PJSRR_2016_21_Effect_of_Yb2O3_Nanoparticle_Addition_on_Superconducting_Properties_of_BSCCO_2223Ag_Tapes_by_Acetate_Precipitation_Method. [Accessed: 31-May-2017].

- [78] "Superconductivity." [Online]. Available: <http://users-phys.au.dk/philip/pictures/physicsfigures/node12.html>. [Accessed: 31-May-2017].
- [79] A. A. Abrikosov, "The magnetic properties of superconducting alloys," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 2, no. 3, pp. 199–208, Jan. 1957.
- [80] "Nexans: Kabel, Kabelsysteme, Kabelhersteller, Glasfaserkabel, LAN, Energienetze, Brandschutzkabel, halogenfreie Kabel, Photovoltaik - Nexans." [Online]. Available: http://www.nexans.de/eservice/Germany-de_DE/navigate_-21/Nexans_Cables_electrical_cables_manufacturer_fibre_optic_cables_accessories_LAN_Fire_safty_cables_Photovoltaic.html. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [81] G. Didier, C. H. Bonnard, B. Douine, and J. Leveque, "Power system stability improvement with superconducting fault current limiter," in *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (Cistem)*, 2014, pp. 1–6.
- [82] "Plots - MagLab." [Online]. Available: <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots>. [Accessed: 01-Jun-2017].
- [83] "2G HTS Wire." [Online]. Available: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [84] "Welcome to Supercon, Inc. | Supercon Inc." [Online]. Available: <http://www.supercon-wire.com/>. [Accessed: 17-Aug-2016].
- [85] "National Institute for Materials Science | NIMS." [Online]. Available: <http://www.nims.go.jp/eng/>. [Accessed: 30-Aug-2017].
- [86] H.-G. Lee, G.-W. Hong, J.-J. Kim, and M.-Y. Song, "Role of silver on phase formation and texture development in Ag/BSCCO composites," *Mater. Lett.*, vol. 23, no. 1, pp. 65–68, Apr. 1995.
- [87] "Sumitomo Corporation." [Online]. Available: <http://www.sumitomocorp.co.jp/english/>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [88] "2G HTS Wire." [Online]. Available: <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire#Manufacturing Capability>. [Accessed: 02-Jun-2017].
- [89] A. Godeke *et al.*, "Limits of NbTi and Nb3Sn, and Development of W&r Bi-2212 Highfield Accelerator Magnets," Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US), LBNL--62138-Conf., Sep. 2006.
- [90] "Oxford Instruments vector magnets - Oxford Instruments." [Online]. Available: <https://www.oxford-instruments.com/products/cryogenic-environments/superconducting-magnet-systems/wet-superconducting-magnets/rotating-magnets>. [Accessed: 13-Sep-2016].
- [91] "Multi-axis Superconducting Vector Magnets," *Cryomagnetics, inc.* .
- [92] "High Current Measurements in DC Fields - MagLab." [Online]. Available: <https://nationalmaglab.org/user-facilities/dc-field/dcfield-techniques/high-current-measurements-dc>. [Accessed: 13-Jun-2017].
- [93] J. Li *et al.*, "Design of a vector magnet for the measurements of anisotropic magnetoresistance and rotational magneto-optic Kerr effect," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 83, no. 3, p. 033906, Mar. 2012.
- [94] E. I. Demikhov, T. E. Demikhov, E. A. Kostrov, V. V. Lysenko, and N. A. Piskunov, "2T/5T Two-Axis Cryogen Free Superconducting Vector Magnet With Variable Temperature Space," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 507, no. 3, p. 032027, 2014.
- [95] C. Berriaud *et al.*, "Development of an Innovative Wide Aperture Vector Magnet: WAVE," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, pp. 1–4, Jun. 2016.
- [96] J. L. Kirschvink, "Uniform magnetic fields and double-wrapped coil systems: Improved techniques for the design of bioelectromagnetic experiments," *Bioelectromagnetics*, vol. 13, no. 5, pp. 401–411, 1992.
- [97] J. F. Douglas, "Materials science: Membrane magic," *Nature*, vol. 463, no. 7279, pp. 302–303, Jan. 2010.
- [98] M. C. Williams, "Fuel cells and the world energy future," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, 2001, vol. 1, p. 725 vol.1-vol.

-
- [99] X. Kong, L. T. Choi, and A. M. Khambadkone, "Analysis and control of isolated current-fed full bridge converter in fuel cell system," in *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, 2004, vol. 3, p. 2825–2830 Vol. 3.
 - [100] "American Magnetics Inc." [Online]. Available: <http://www.americanmagnetics.com/index.php>. [Accessed: 19-Aug-2016].
 - [101] "Oxford Instruments - superconducting magnet power supply - MercuryiPS - Oxford Instruments." [Online]. Available: <http://www.oxford-instruments.com/products/cryogenic-environments/measurement-mercury-electronics/superconducting-magnet-power-supply-mercuryips>. [Accessed: 19-Aug-2016].
 - [102] M. Hinaje, K. Berger, J. Lévéque, and B. Davat, "Using Fuel Cell as a Power Supply for Superconducting Coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 6, pp. 1–6, Dec. 2014.
 - [103] R. F. Mann, J. C. Amphlett, B. A. Peppley, and C. P. Thurgood, "Application of Butler–Volmer equations in the modelling of activation polarization for PEM fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 161, no. 2, pp. 775–781, Oct. 2006.
 - [104] "All-pass filters using DDCC- and MOSFET-based electronic resistor (PDF Download Available)," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/259682180_All-pass_filters_using_DDCC- and_MOSFET-based_electronic_resistor. [Accessed: 09-Jun-2017].
 - [105] J. D. Jackson, *Electrodynamique classique : Cours et exercices d'electromagnétisme*. Paris: Dunod, 2001.
 - [106] C.-W. Song and S.-Y. Lee, "Design of a Solenoid Actuator with a Magnetic Plunger for Miniaturized Segment Robots," *Appl. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 595–607, Sep. 2015.
 - [107] D. Cvetkovic and I. Cosic, "Modelling and design of extremely low frequency uniform magnetic field exposure apparatus for in vivo bioelectromagnetic studies," *Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf.*, vol. 2007, pp. 1675–1678, 2007.
 - [108] C. P. Gooneratne, A. Kurnicki, S. Yamada, S. C. Mukhopadhyay, and J. Kosel, "Analysis of the Distribution of Magnetic Fluid inside Tumors by a Giant Magnetoresistance Probe," *PLoS ONE*, vol. 8, no. 11, p. e81227, Nov. 2013.
 - [109] R. Merritt, C. Purcell, and G. Stroink, "Uniform magnetic field produced by three, four, and five square coils," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 54, no. 7, pp. 879–882, Jul. 1983.
 - [110] "A Method for Coil Design of Superconducting Quadrupoles Based on Sector Coils and Fourier Series (PDF Download Available)," *ResearchGate*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/224127876_A_Method_for_Coil_Design_of_Superconducting_Quadrupoles_Based_on_Sector_Coils_and_Fourier_Series. [Accessed: 30-Jun-2017].
 - [111] L. Rossi and E. Todesco, "Electromagnetic design of superconducting dipoles based on sector coils," *Phys. Rev. Spec. Top. - Accel. Beams*, vol. 10, no. 11, p. 112401, Nov. 2007.
 - [112] E. L. Bronaugh, "Helmholtz coils for calibration of probes and sensors: limits of magnetic field accuracy and uniformity," in *1995 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record*, 1995, pp. 72–76.
 - [113] "Homepage - Fabrum Solutions." [Online]. Available: <http://www.fabrumsolutions.com/>. [Accessed: 27-Aug-2017].
 - [114] "Home." [Online]. Available: <http://www.cryodiffusion.com/?lang=fr>. [Accessed: 27-Aug-2017].
 - [115] É. Durand, *Électrostatique : Par E. Durand*. Masson et Cie, 1966.

VII- Annexes

VII.1 Champ produit par une spire

Le champ produit par une spire dans un point P quelconque dans l'espace peut être calculé de forme analytique et il est représenté dans la Figure VII-1 . Où la spire est représentée par la circonférence C parcourue d'un courant I. Le potentiel vecteur est calculé selon l'expression (VII-1) [115].

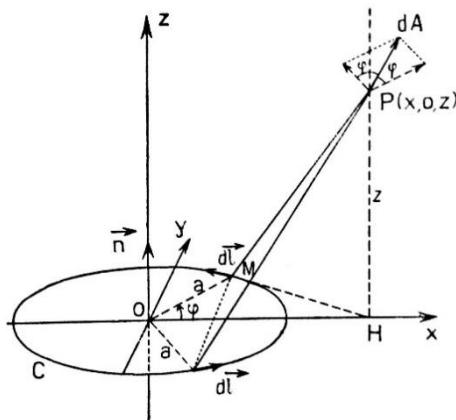


Figure VII-1 Champ magnétique créé par une spire parcourue par un courant constant dans un point quelconque.

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{l}}{r} \quad (\text{VII-1})$$

Pour calculer l'induction magnétique et le potentiel vecteur produit par la spire C dans le point P, il est nécessaire d'adapter l'expression (VII-1) aux paramètres dimensionnels définis dans la Figure VII-1 :

$$r = \sqrt{z^2 + MH^2} \quad (\text{VII-2})$$

$$dl_y = a \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \quad (\text{VII-3})$$

Donc l'expression (VII-1) dévie :

$$A_\varphi = A_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{z^2 + MH^2}} \quad (\text{VII-4})$$

Le potentiel vecteur résultant est parallèle au plan xOy. Pour faciliter le calcul, le changement de repère est important, le changement vers le repère cylindrique est établi avec le changement de variable selon les expressions suivantes :

$$\overline{MH}^2 = a^2 - 2 \cdot a \rho \cdot \cos \varphi + \rho^2 \quad (\text{VII-5})$$

$$\varphi = \pi - 2\psi \quad (\text{VII-6})$$

$$\cos \varphi = 2 \sin^2 \psi - 1 \quad (\text{VII-7})$$

$$k^2 = \frac{4a\rho}{(a+\rho)^2 + z^2} \quad (\text{VII-8})$$

$$\rho^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{VII-9})$$

L'expression (VII-4) dévient :

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I k}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}} \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{2 \cdot \sin^2 \psi - 1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} d\psi \quad (\text{VII-10})$$

On multiplie l'équation (VII-10) par $\frac{1/(1-k^2 \sin^2 \psi)}{1/(1-k^2 \sin^2 \psi)}$, et les intégrales de première K(k) et seconde espèce E(k) soient identifiables.

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} \quad (\text{VII-11})$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} d\psi \quad (\text{VII-12})$$

Donc l'expression du potentiel vecteur est simplifiée comme suit :

$$A_\varphi(\rho, z) = \frac{\mu_0 I k}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}} \cdot \left\{ \left(\frac{2}{k^2} - 1 \right) \int_0^{\pi/2} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} - \frac{2}{k^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} d\psi \right\} \quad (\text{VII-13})$$

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{k\pi} \cdot \sqrt{\frac{a}{\rho}} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{2} k^2 \right) K(k) - E(k) \right] \quad (\text{VII-14})$$

L'induction magnétique **B** est calculée en appliquant l'équation de Maxwell : $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ ce qui produit deux composants d'induction :

$$B_\rho(\rho, z) = - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z} \quad (\text{VII-15})$$

$$B_z(\rho, z) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\varphi) \quad (\text{VII-16})$$

Ce qui, après quelques simplifications, nous donne :

$$B_\rho(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{z}{\rho \sqrt{(\rho+a)^2 + z^2}} \cdot \left[\left(\frac{(a^2 + \rho^2) + z^2}{(a-\rho)^2 + z^2} \right) E(k) - K(k) \right] \quad (\text{VII-17})$$

$$B_z(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\rho+a)^2 + z^2}} \cdot \left[\left(\frac{(a^2 - \rho^2) - z^2}{(a-\rho)^2 + z^2} \right) E(k) + K(k) \right] \quad (\text{VII-18})$$

Pour le calcul de la densité de flux magnétique produite par un solénoïde les expressions deviennent :

$$B_{\rho_i}(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{z_i}{\rho \sqrt{(\rho+a_i)^2 + z_i^2}} \cdot \left[\left(\frac{(a_i^2 + \rho^2) + z_i^2}{(a_i - \rho)^2 + z_i^2} \right) E(k) - K(k) \right] \quad (\text{VII-19})$$

$$B_{z_i}(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\rho+a_i)^2 + z_i^2}} \cdot \left[\left(\frac{(a_i^2 - \rho^2) - z_i^2}{(a_i - \rho)^2 + z_i^2} \right) E(k) + K(k) \right] \quad (\text{VII-20})$$

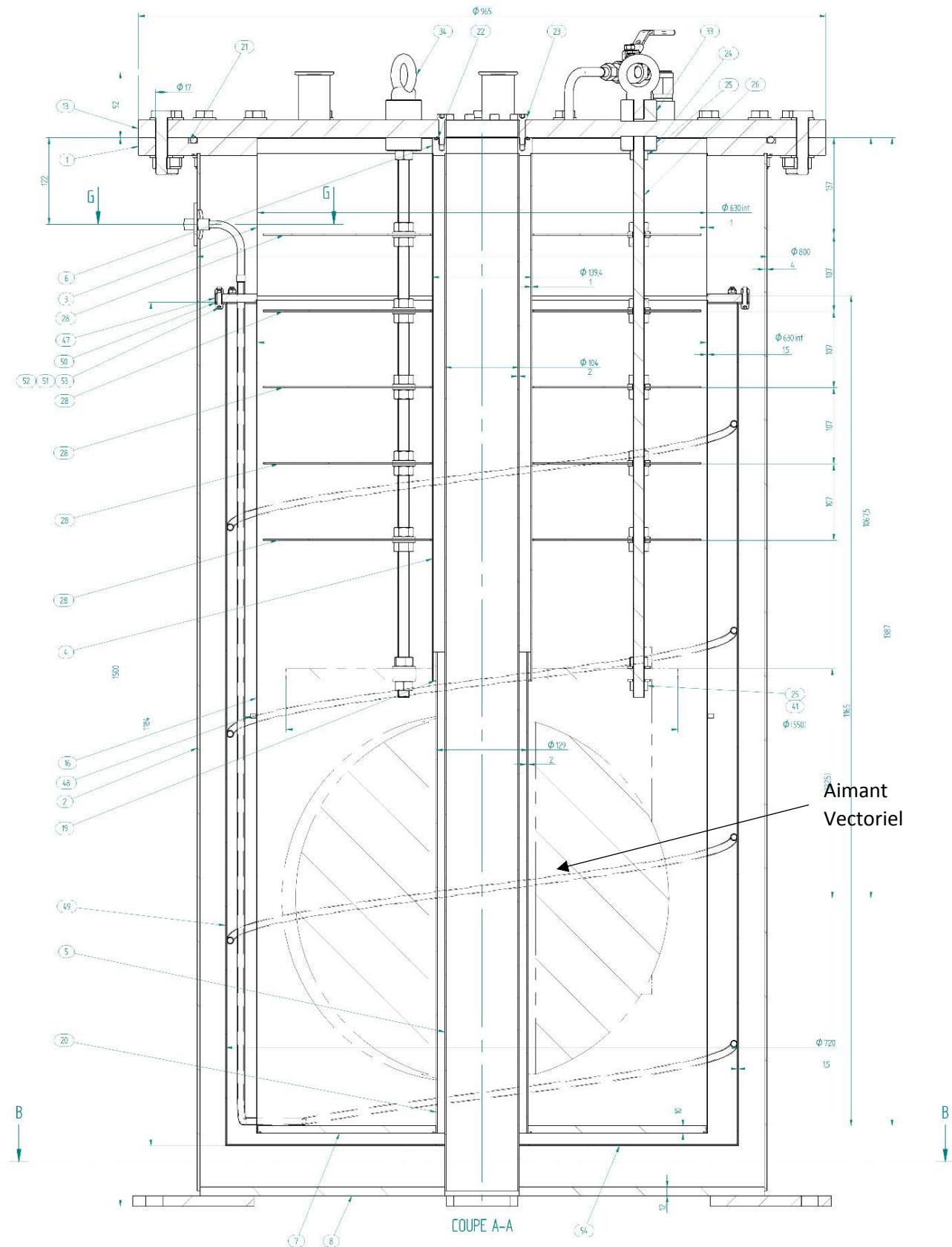
$$\mathbf{B}(\rho, z) = \sum_{i=1}^n B_{\rho_i}(\rho, z) + \sum_{i=1}^n B_{z_i}(\rho, z) \quad (\text{VII-21})$$

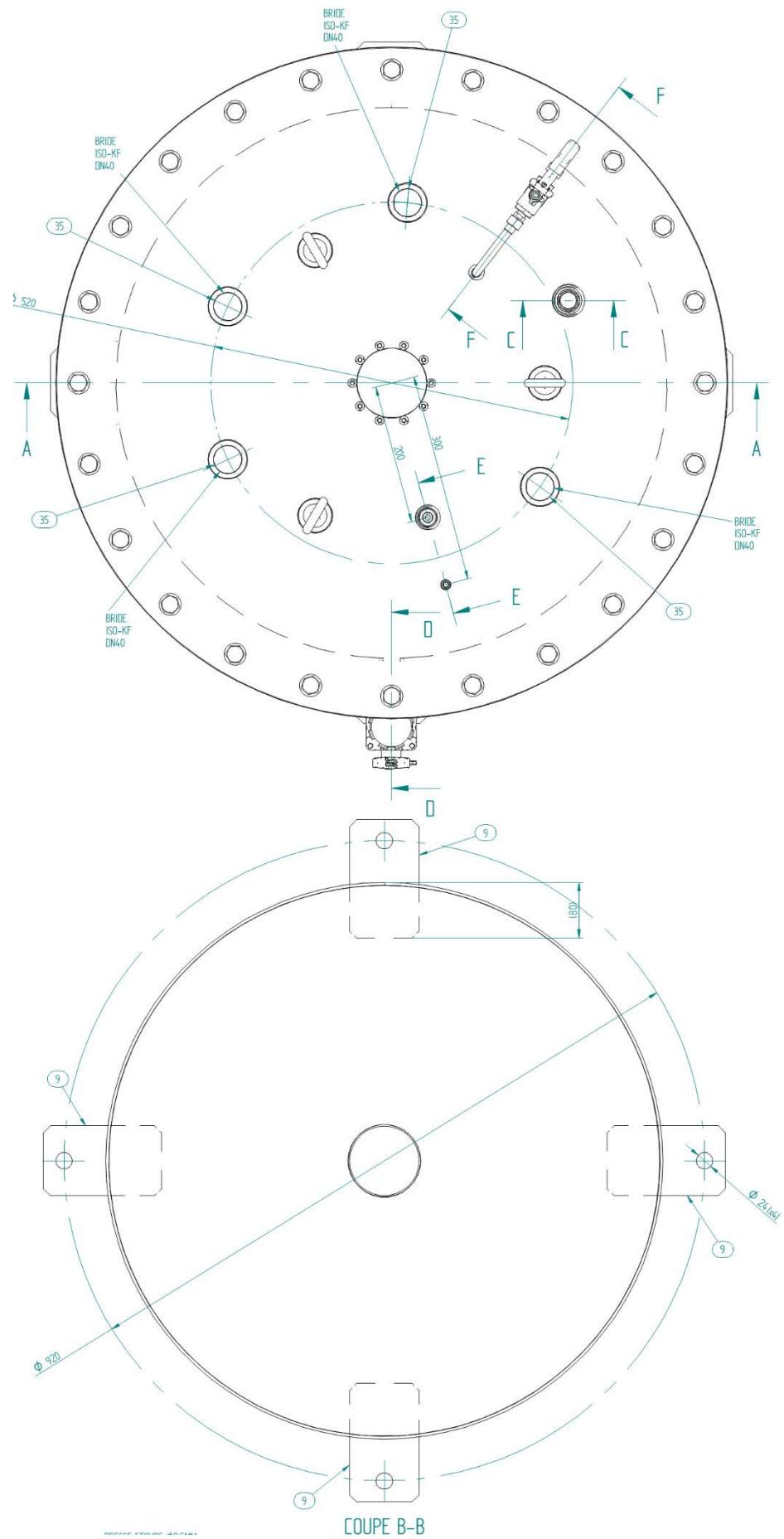
Où i est l'indice par spire et n le nombre total de spires dans le solénoïde.

Pour le calcul de la densité de flux magnétique pour une bobine de Helmholtz, il faut réaliser la somme des inductions produites par bobine. Il faut tenir compte de la position de chaque bobine ($l=R/2$, étant la séparation des bobines et R leur rayon) par rapport à l'origine :

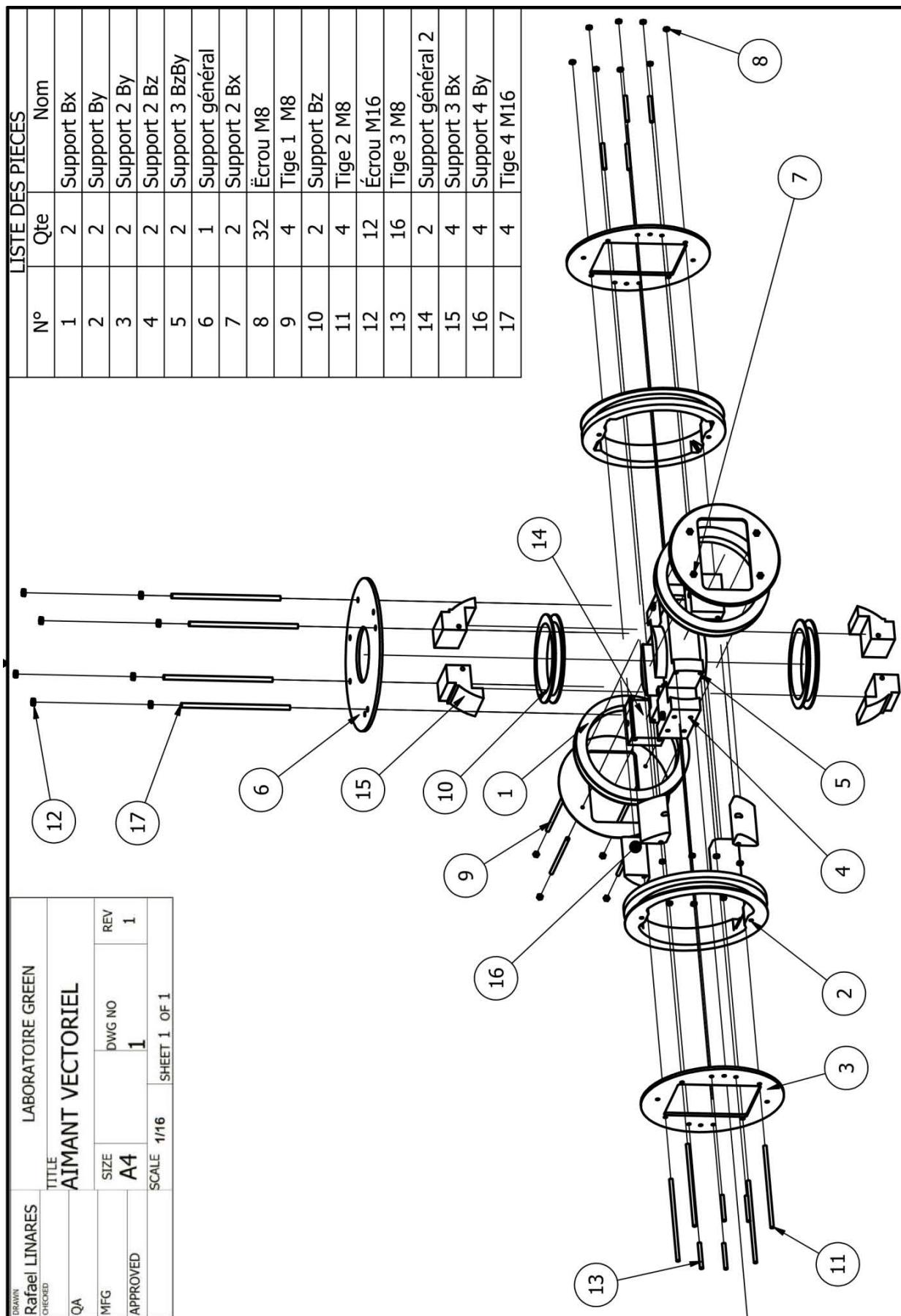
$$\mathbf{B}_{Helmholtz}(\rho, z) = B_{bobine1}(\rho, z+l) + B_{bobine2}(\rho, z-l) \quad (\text{VII-22})$$

VII.2 Plans cryostat

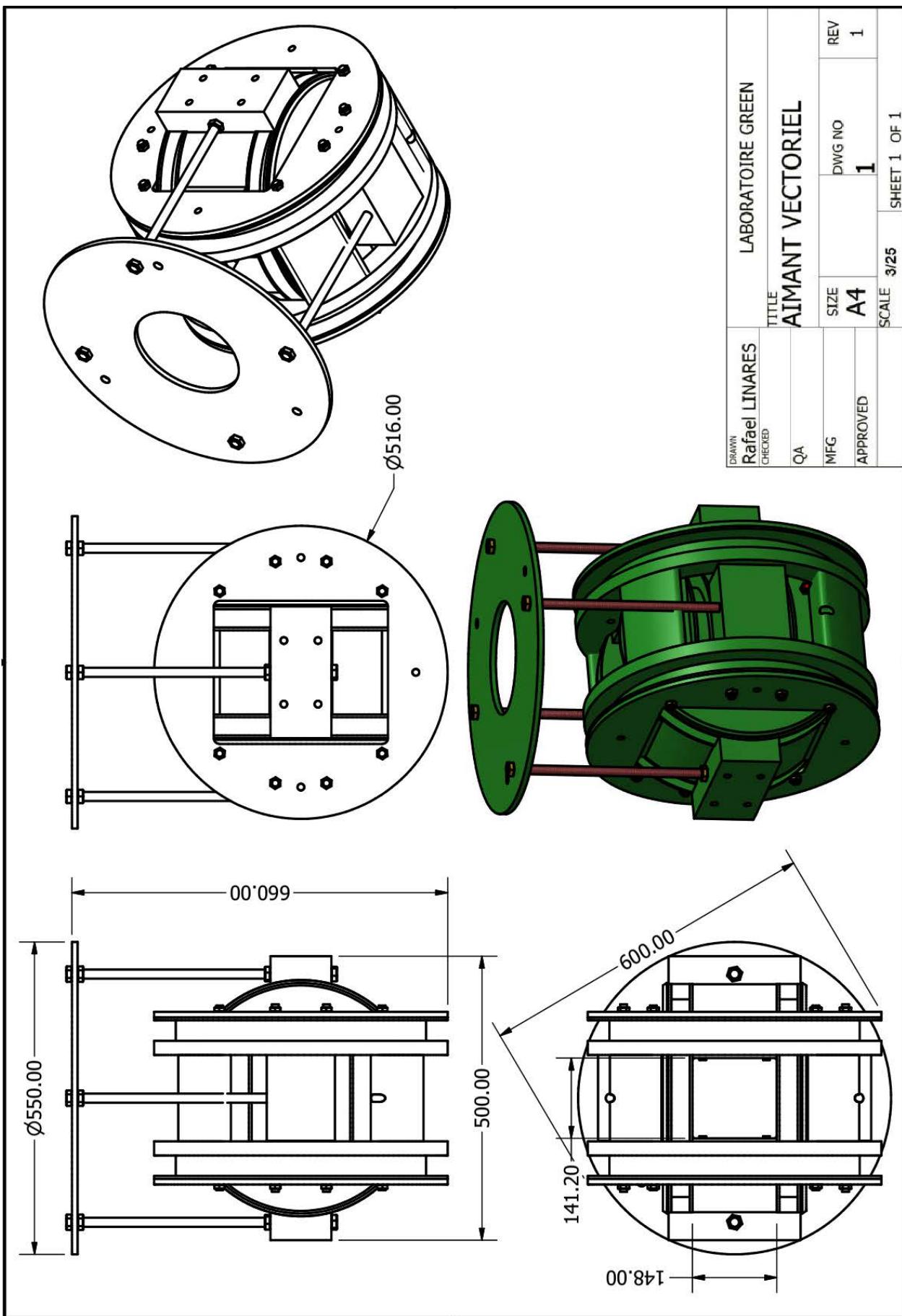




VII.3 Vue éclatée des supports en G11



VII.1 Dimensions des supports en G11



Nomenclature

	#		
κ , Constante de Ginzbourg-Landau	31		
λ , Épaisseur de pénétration	31		
φ_0 , Quantum de flux magnétique	34		
I		E	
$ \mathbf{B} $, Module de B	75	e^- , électrons	5
A		E_{NERST} , Tension de Nerst	18
Al, Aluminium	33	 	
B		F	
B , Densité de flux magnétique	41	F , Constante de Faraday	
Ba, Baryum	27	96 485.33289 C•mol ⁻¹	48
BCS, Théorie Bardeen–Cooper–Schrieffer	29	f_c , Facteur de correction	83
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+x}$, Bismuth - Strontium – Calcium - Cuivre – Oxygène	37	FWD, Diode de roue libre	62
B_{max} , Densité de flux magnétique maximale sur les bobines	90	f_x et f_y , Facteurs d'espacement	89
BSCCO, Bismuth - Strontium – Calcium - Cuivre – Oxygène	37	 	
$B_x(x)$, Densité de flux magnétique suivant axe x	41	G	
$B_y(y)$, Densité de flux magnétique suivant axe y	41	Go, Gigaoctet	101
$B_z(z)$, Densité de flux magnétique suivant axe z	41	 	
B_z , Composante suivant les coordonnee z	75	H	
B_r , Composante suivant les coordonnee r	75	H , Champ magnétique extérieur	33
C		H^+ , Ion hydrogène	8
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, Éthanol	9	H_0 , Homogénéité	80
C_{DC} , Capacités de double couche	18	H_2 , hydrogène	6
C_{DLa} et C_{DLc} , Capacités de couche double	51	H_2O , eau	6
CH_3OH , Méthanol	8	H_3PO_4 , Acide phosphorique	13
CO, Monoxyde de carbone	16	H_C , Champ magnétique critique	29
CO_2 , Dioxyde de carbone	6	H_{co} , Champ critique à 0 K	30
Co-ZrO_2 , Cobalt- Dioxyde de zirconium	12	Hg, Mercure	27
Cu, Cuivre	27	HTc, Supraconducteurs à Haute Température critique	27
D		HTS, High Temperature Superconductor	27
d , Separation entre bobines	75	 	
DBFC, Pile à combustible à hydrure de bore direct	8	I	
DC, Courant continu	23	I_a et I_c , Courants faradiques	52
d_{fil} , Diamètre du fil SC53S56	95	IBM, International Business Machines	27
d_{H2} , Débit d'hydrogène	48	I_{fc} , Courant de pile	25, 66
J		I_L , Courant limite de la pile à combustible	52
J_C , Densité de courant critique	31	IRM, Imagerie par résonance magnétique	39
K		I_{set} , Courant de référence	25, 47
KOH, Hydroxyde de potassium	6	 	
L		J	
I , Bord de calcul de B_{max}	97		
$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, Litres par minute	54		

La, Lanthane	27
L_{SC} , Inductance bobine supraconductrice	53
LTS, Low Temperature Superconductor	31

M

MCFC, Pile à combustible à carbonate fondu	11
MgB ₂ , Diborure de magnésium	38
MgB ₂ , Magnésium – Bohrium	37
MgO, Oxyde de magnésium	43

N

n , Nombre de spires	75
NaBH ₄ , borohydrure de sodium	7
Nb ₃ Sn, Niobium – Étain	37
NbTi, Niobium titane	35
Ni-ZrO ₂ , Nickel- Dioxyde de zirconium	12
N_p, N_z , Nombre de files colonnes de fil	87
N_s , Nombre de tours de chaque bobine	87
N_x, N_y, N_z , Nombres de spires par bobine.....	93

O

O ₂ , Oxygène.....	6
OH ⁻ , Hydroxyle.....	6

P

Pa, Pascal.....	28
PAFC, Pile à combustible à acide phosphorique.....	10
Pb, Plomb	27
PBI, Polybenzimidazole	13
PEMFC, Pile à combustible à membrane d'échange de protons	13
PIT, Powder In Tube	38
Pt, Platine	13

R

R , Constante des gaz 8,3144621 J•mol ⁻¹ •K ⁻¹	48
R_{ACT} , Résistance d'activation	18
R_{CO} , Résistance de contrôle de valeur variable.....	56
R_{CODE} Résistance de	18
R_d , Résistance diode roue libre.....	63
REBCO, Rare-Earth Barium Copper Oxide	28
R_{OHM} , Résistance de membrane et de contact	18
R_{SC} , Résistance bobine supraconductrice	54
R_{wire} , Résistance du câblage.....	50
R_x , Rayon de la bobine Helmholtz suivant l'axe x.....	89
R_y , Rayon de la bobine Helmholtz suivant l'axe y.....	89

R_z , Rayon de la bobine Helmholtz suivant l'axe z.....	89
---	----

S

S_b , Section de bobine	87
Sn, Étain	27
SOFC, Pile à combustible à oxyde solide.....	12

T

T_0 , Température des gaz 298.15K	48
T_C , Température critique.....	28
Tl, Thallium.....	33

V

V_{OC} , Tension à vide	25
V_{fc} , Tension de pile	25, 66
V_t , Volume de travail.....	80

Y

YBaCuO, Oxydes mixtes de Baryum de Cuivre et d'Yttrium	27
---	----

Z

$Z(\omega)$, Impédance de Warburg	20
ZrO ₂ , Zirconium	12

Δ

Δ_x, Δ_y , Séparation entre spires	87
--	----

Z

ζ_a et ζ_c , Coefficients stoechiométriques de l'anode et la cathode	48
---	----

Λ

λ_L , Longueur de pénétration magnétique de London ...	32
--	----

Ξ

ξ , Largueur de cohérence.....	31
------------------------------------	----

Ω

$\Omega, \delta\Omega$, Domaine de calculs	91
---	----

Liste de figures

<i>Figure I-1. Structure d'une pile à combustible.....</i>	5
<i>Figure I-2. Principe de fonctionnement d'une pile AFC [17].</i>	6
<i>Figure I-3. Principe de fonctionnement d'une pile DBFC [22].</i>	7
<i>Figure I-4. Principe de fonctionnement d'une pile DMFC [28].</i>	9
<i>Figure I-5. Principe de fonctionnement d'une pile DEFC.....</i>	9
<i>Figure I-6. Principe de fonctionnement d'une pile PAFC [32].</i>	10
<i>Figure I-7. a) Principe de fonctionnement d'une pile MCFC [34], b) MCFC dans un cryostat [35].</i>	11
<i>Figure I-8. a) Modèle tubulaire d'une SOFC par Siemens, b) Structure planaire d'une SOFC [37].</i>	13
<i>Figure I-9. Monocellule de pile à combustible de type PEM refroidie à l'eau.....</i>	15
<i>Figure I-10. Schéma d'un système pile à combustible de type PEM à 23 cellules.</i>	16
<i>Figure I-11. Domaines d'étude simplifiés et les conditions dans les frontières, plan de coupe x0z.....</i>	18
<i>Figure I-12. Modèle dynamique circuit électrique équivalent d'une pile à combustible de type PEM [54].....</i>	19
<i>Figure I-13. Différents modèles électriques de la PEMFC [55].</i>	19
<i>Figure I-14. Diagramme de construction d'un modèle électrique de pile à combustible sous logiciel PSPICE.</i>	20
<i>Figure I-15. Circuit électrique équivalent pour déterminer la tension à vide de la pile.</i>	21
<i>Figure I-16. Circuit électrique équivalent correspondant aux chutes d'activation.</i>	21
<i>Figure I-17. Circuit électrique équivalent correspondant aux chutes ohmiques.</i>	21
<i>Figure I-18. Circuit électrique équivalent correspondant aux chutes de concentration.....</i>	22
<i>Figure I-19. Courbe de polarisation d'une PEM avec ses zones de fonctionnement.</i>	23
<i>Figure I-20. Deux types de systèmes de conversion pour piles à combustible.</i>	24
<i>Figure I-21. Simulation (courbes bleues) vs résultats expérimentaux (courbes rouges) de courant et de tension du couplage PEMFC – supercapacitor.</i>	25
<i>Figure I-22. Résultats expérimentaux d'une PEMFC en court-circuit, le courant de la pile est contrôlé par le débit d'hydrogène [61].</i>	26
<i>Figure I-23. Chronologie des matériaux supraconducteurs. Evolution de la température critique au cours des années [71].....</i>	28
<i>Figure I-24. Résistivité d'un supraconducteur et résistivité d'un conducteur électrique en fonction de la température [75].</i>	29
<i>Figure I-25. a) Effet Meissner, les lignes de champ sont expulsées. b) Les lignes de champ pénètrent le matériau et l'état supraconducteur est détruit.</i>	30
<i>Figure I-26. Diagramme de phase des matériaux supraconducteurs de type I. Champ magnétique critique H_c en fonction de la température critique [64].</i>	31
<i>Figure I-27. Surface critique des supraconducteurs de type I.....</i>	32
<i>Figure I-28. Diagramme de phase des supraconducteurs type II, [77].</i>	33
<i>Figure I-29. Représentation des vortex pour un supraconducteur de type II dans l'état mixte [78].</i>	34
<i>Figure I-30. Densité de courant critique ingénieur en fonction du champ magnétique appliqué [82].</i>	35
<i>Figure I-31 Diagramme de phase $H_{c2}(T)$ de différents supraconducteurs employés dans la fabrication d'aimants [82].</i>	36
<i>Figure I-32. Ruban YBCO avec ses différentes couches nécessaires à sa fabrication [88].</i>	38
<i>Figure I-33. Graphique « Sokolowsky » avec les prix des principaux fils supraconducteurs.....</i>	40
<i>Figure I-34. Exemple d'aimant vectoriel suivant trois axes.</i>	41
<i>Figure I-35. Système mécanique pour l'étude angulaire du courant critique dans des rubans supraconducteurs [92].</i>	42
<i>Figure I-36. Exemples d'aimants vectoriels deux axes [93], [94].</i>	44
<i>Figure I-37. Bobines de l'aimant WAVE (CEA) [95].</i>	45
<i>Figure I-38. Groupe de six bobines pour l'étude de billes de fer micrométriques [97].</i>	46
<i>Figure II-1. Courbe de polarisation d'une PEMFC avec la zone de travail comme source de courant.</i>	48
<i>Figure II-2. Echantillon du ruban BSCCO 2212 et la bobine supraconductrice utilisé dans l'essai.</i>	49
<i>Figure II-3 Démonstration du contrôle du courant I_{fc} par le débit d'hydrogène.....</i>	49

<i>Figure II-4 Modèle dynamique électrique de la pile à combustible de type PEM.....</i>	52
<i>Figure II-5. Résultats expérimentaux obtenus avec une PEMFC alimentant une bobine supraconductrice de 4 mH, résistance de câblage d'environ 4 mΩ. Réponse du système à un échelon dans la consigne d'hydrogène de 0,1 à 0,14 L.min⁻¹ correspondant à un échelon dans le courant I_{set} de 15 jusqu'à 20 A.....</i>	54
<i>Figure II-6. Courant simulé de la pile à combustible I_{fc}, obtenu avec une PEMFC reliée par un fil de 4 mΩ à une bobine supraconductrice de 4 mH. Réponse d'un échelon dans I_{set} de 15 à 20 A.....</i>	55
<i>Figure II-7. I_{fc} et V_{fc} fonction du temps après un échelon de consigne en courant I_{set} de 0 à 20 A.....</i>	56
<i>Figure II-8. Modèle équivalent circuit électrique d'une pile à combustible monocellule connectée à une bobine supraconductrice. La résistance variable R_{co} aide à la gestion des ondulations de courant.....</i>	57
<i>Figure II-9. Réponse de la pile à un échelon de consigne I_{set} de 0 à 20 A, Variation de la valeur de R_{co} de 0 à 23 mΩ à 280 s produisant une réduction des ondulations de I_{fc}</i>	57
<i>Figure II-10. Réponse du système à une rampe dans la consigne I_{set}</i>	58
<i>Figure II-11 Influence de la résistance de protection dans le courant de pile.</i>	59
<i>Figure II-12 Influence de la résistance de protection dans la tension de pile.</i>	60
<i>Figure II-13. Banc d'essai de connexion bobine supraconductrice – pile à combustible.</i>	61
<i>Figure II-14. Structure de l'alimentation en courant de la bobine supraconductrice.</i>	62
<i>Figure II-15. Bobine supraconductrice d'inductance 10 H.</i>	64
<i>Figure II-16. a) Réponse du courant de pile I_{fc} à un échelon dans le courant de consigne I_{set} de 0 à 20 A. b) Réponse de la tension de pile V_{fc} et du courant dans la diode I_{diode}.</i>	66
<i>Figure II-17. Circuit de fonctionnement pendant le régime transitoire et le régime établi.</i>	67
<i>Figure II-18. Circuit de fonctionnement pendant la diode de roue libre est passante.</i>	67
<i>Figure II-19 Comparaison entre les courants de pile à combustible en tenant compte de l'excès d'hydrogène stocké et la diode de roue libre.</i>	68
<i>Figure II-20. Rampe positive de courant de consigne de 25 à 35 A.</i>	69
<i>Figure II-21. Courant dans la diode pendant la rampe positive I_{set} de 25 à 35 A.</i>	69
<i>Figure II-22. Rampe négative de courant de consigne de 35 à 25 A.</i>	70
<i>Figure III-1. Illustration d'un solénoïde.....</i>	74
<i>Figure III-2. Schéma de la Bobine de Helmholtz.</i>	75
<i>Figure III-3. Densité de flux magnétique produite par différentes sections rectangulaires de bobine de Helmholtz.</i>	76
<i>Figure III-4. Densité de flux magnétique produit par des bobines de Helmholtz de même section, carrée et ronde.</i>	76
<i>Figure III-5. Schéma de la bobine de Lee-Whiting.</i>	77
<i>Figure III-6. Schéma de la Bobine de Merritt à trois bobines.</i>	78
<i>Figure III-7. Coupe latérale d'une bobine quadripôle composée par trois secteurs [110].</i>	79
<i>Figure III-8. Aimant vectoriel composé d'une bobine de Merritt et deux bobines Helmholtz carrées.</i>	80
<i>Figure III-9. Aimants vectoriels sujets à l'étude. a) Bobines split, b) trois bobines Helmholtz.</i>	82
<i>Figure III-10. Axes de mesure des composantes, $B_x(x)$, $B_y(y)$ et $B_z(z)$ pour l'aimant vectoriel Helmholtz.</i>	83
<i>Figure III-11. Module de \mathbf{B} et composantes $B_x(x)$, $B_y(y)$, $B_z(z)$, de la densité de flux magnétique de l'aimant vectoriel de type « split ».</i>	84
<i>Figure III-12. Evaluation de l'homogénéité dans le plan x0y du volume de travail de l'aimant vectoriel de type « split ».</i>	84
<i>Figure III-13. Module de \mathbf{B} et composantes $B_x(x)$, $B_y(y)$, $B_z(z)$, et de la densité de flux de champ magnétique de l'aimant vectoriel type « Helmholtz ».</i>	85
<i>Figure III-14. Evaluation de l'homogénéité dans les plans x0y (a) et y0z (b) dans le volume de travail de l'aimant vectoriel à bobines type « Helmholtz ».</i>	86
<i>Figure III-15. Schéma et discréétisation de la bobine de Helmholtz utilisée pour comparaison avec le modèle analytique.</i>	88
<i>Figure III-16. Valeur du $\ \mathbf{B} \$ calculée sur l'axe z, comparaison entre des résultats numérique 3D sous Comsol et des résultats analytiques 2D.</i>	89
<i>Figure III-17. Bord extérieur « b_{ez} » de la bobine Helmholtz suivant l'axe z.</i>	90
<i>Figure III-18. Bord intérieur « b_{ix} » de la bobine Helmholtz suivant l'axe x.</i>	91

<i>Figure III-19. a) Maillage des domaines représentants les six bobines de l'aimant vectoriel. b) Domaines représentant les bobines à l'intérieur d'une sphère isolée magnétiquement.</i>	92
<i>Figure III-20. Aimant vectoriel : Trois bobines de Helmholtz placées suivant les axes cartésiens. La zone de travail est représentée par la sphère au centre.</i>	93
<i>Figure III-21. Caractéristique du fil NbTi SC56S53 de SuperCon Inc. Avec une marge de sécurité de 20 %. Droite de charge, B_{max} et la droite de travail, $\ B\ (0,0,0)$ pour $R_z = 15$ cm.</i>	94
<i>Figure III-22. Représentation de $\ B\$ sur la surface des bobines dans un modèle complet du système de bobines.</i>	96
<i>Figure III-23. Représentation de la norme de B sur un modèle 1/8 du système de bobines avec $\ B\$ calculé le long de I.</i>	97
<i>Figure III-24. Homogénéité calculée pour différentes tailles de l'aimant vectoriel en fonction de la variation du rayon de référence R_z.</i>	98
<i>Figure III-25. Valeurs de $B_z(z)$ et $\ B\ (z)$ obtenues avec $R_z = 15$ cm et $I = 110$ A. Comsol 3D et parc calcul analytique 2D.</i>	100
<i>Figure III-26. Densité de flux magnétique de l'aimant vectoriel. Les valeurs sont calculées sur le bord intérieur de la bobine suivant l'axe x, avec $R_z = 15$ cm et $I = 110$ A.</i>	101
<i>Figure III-27. Coupe transversale du volume de travail sur le plan x0y (a) et z0y (b) avec l'évaluation de l'homogénéité de l'densité de flux magnétique pour l'aimant vectoriel de rayon $R_z = 15$ cm.</i>	102
<i>Figure III-28. Dessin 3D des structures de support de l'aimant vectoriel.</i>	103
<i>Figure III-29. Calcul d'efforts mécaniques sur le premier support.</i>	105
<i>Figure III-30. Calcul des efforts mécaniques sur le support après amélioration.</i>	105
<i>Figure III-31 a) Pièce « A » avant modification. b) Pièce « A » après modification. c) Pièce « B » avant modification. c) Pièce « B » après modification.</i>	106
<i>Figure III-32. Supports de l'aimant vectoriel en G11, arrivés au laboratoire.</i>	107
<i>Figure III-33. a) Espace disponible pour le cryostat, b) Intérieur du cryostat.</i>	107
<i>Figure VII-1 Champ magnétique créé par une spire parcourue par un courant constant dans un point quelconque.</i>	119

Liste des tableaux

<i>Tableau I-1: Quelques supraconducteurs de type I avec leurs valeurs critiques</i>	33
<i>Tableau I-2: Fils supraconducteurs les plus utilisés</i>	37
<i>Tableau II-1: Paramètres utilisés dans le modèle de la pile à combustible</i>	51
<i>Tableau II-2: Paramètres de la bobine supraconductrice de 10 H.....</i>	53
<i>Tableau III-1: Cahier des charges</i>	80
<i>Tableau III-2: Paramètres des bobines étudiées.....</i>	82
<i>Tableau III-3: Homogénéité des bobines étudiées</i>	86
<i>Tableau III-4: Paramètres de la bobine de Helmholtz pour le modèle analytique</i>	87
<i>Tableau III-5: Paramètres d'entrée pour l'aimant vectoriel utilisés dans le modèle 3D.....</i>	95
<i>Tableau III-6: Longueur, masse et coût total du fil SC56S53 en fonction de rayon R_z.....</i>	98
<i>Tableau III-7: Module de la densité de flux magnétique B_0 au centre de l'aimant vectoriel en fonction de R_z et I.....</i>	99
<i>Tableau III-8: Valeurs de champ sur fil B_{max}, sur l'aimant vectoriel en fonction de R_z et I.....</i>	99
<i>Tableau III-9: Valeurs de fonctionnement pour l'aimant vectoriel complet</i>	102
<i>Tableau III-10. Paramètres de fabrication de l'aimant vectoriel retenu.</i>	104
<i>Tableau III-11: Evaluation des efforts sur chaque bobine</i>	104

Publications

Articles référencés avec comité de lecture : 6.

- [1] **R.-A. Linares-Lamus**, S. Raël, K. Berger, M. Hinaje, and J. Lévêque, “PEM single fuel cell as a dedicated power source for high-inductive superconducting coils,” *Int. J. Hydrog. Energy*, 2017.
- [2] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, M. Hinaje, and B. Davat, “Management of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell System to Feed a Superconducting Coil,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 3, Apr. 2016.
- [3] K. Berger et al., “Solar Electric Motor on Superconducting Bearings: Design and Tests in Liquid Nitrogen,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, p. 5200505, Jun. 2017.
- [4] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, M. Hinaje, B. Douine, and J. Lévêque, “Design of a Vector Magnet Generating up to 3 T with 3 Axis Orientation,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2016.
- [5] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, M. Hinaje, B. Douine, and J. Lévêque, “Conception d’un aimant vectoriel supraconducteur produisant 3 T dans une sphère de diamètre 100 mm,” *Rev. 3EI*, vol. 82, pp. 10–16, Oct. 2015.
- [6] B. Gony, **R.-A. Linares-Lamus**, Q. Lin, K. Berger, B. Douine, and J. Lévêque, “Influence of the inductor shape, and the magnetization processes on a trapped magnetic flux in a superconducting bulk,” *Phys. C Supercond. Its Appl.*, vol. 503, p. S0921453414001440, Aug. 2014

Conférences référencées avec comité de lecture et actes : 11

- [7] **R.-A. Linares-Lamus**, S. Raël, K. Berger, M. Hinaje, and J. Lévêque, “PEM single fuel cell as a dedicated power source for superconducting coils,” in *9th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-9)*, Split, Croatia, 2017, pp. 415–421.
- [8] **R.-A. Linares-Lamus**, M. Hinaje, and K. Berger, “Alimentation d’une bobine supraconductrice par une pile à hydrogène,” in *Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE’2014) - SEEDS*, Saint-Louis, France, 2014, p. 14, id. 35318, 10 pages.
- [9] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, and M. Hinaje, “Management of a fuel cell system to feed a superconducting coil,” in *EUCAS 2015 - 12th European Conference on Applied Superconductivity*, Lyon, France, 2015, p. 168, id. 3A-LS-P-06.01.
- [10] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, M. Hinaje, B. Douine, and J. Lévêque, “Design of a Low-Temperature Superconducting coils system generating up to 3 T in a 10 cm bore diameter with 3 axis orientations,” in *24th International Conference on Magnet Technology - MT24*, Seoul, South Korea, 2015, p. 74, 2PoBB_05.
- [11] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, M. Hinaje, B. Douine, and J. Lévêque, “Design of a vector magnet generating up to 3 T with 3 axis orientation,” in *EUCAS 2015 - 12th European Conference on Applied Superconductivity*, Lyon, France, 2015, p. 168, id. 3A-LS-P-06.02.

- [12] **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, M. Hinaje, B. Douine, and J. Lévêque, “Conception d’un aimant vectoriel supraconducteur produisant 3 T dans une sphère de diamètre 100 mm,” in Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE’2015), Cherbourg, France, 2015, p. 5, 8 pages.
- [13] M. Hinaje, **R.-A. Linares-Lamus**, K. Berger, O. Bethoux, G. Krebs, and B. Davat, “Caractérisation de défauts par mesures de champ,” in Jeunes Chercheurs en Génie Électrique (JCGE’2014) - SEEDS, Saint-Louis, France, 2014, p. 6.
- [14] K. Berger, **R.-A. Linares-Lamus**, T. Lubin, M. Hinaje, and J. Lévêque, “Analytical modelling of superconductors in electrical engineering applications,” in EUCAS 2015 - 12th European Conference on Applied Superconductivity, Lyon, France, 2015, p. 50, id. 3A-LS-O1.14.
- [15] K. Berger, M. Hinaje, **R.-A. Linares-Lamus**, J. Lévêque, and B. Davat, “Alimentation d’une bobine supraconductrice par une pile à combustible H₂/air,” in 11èmes Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, Aussois, France, 2015, p. page 26.
- [16] K. Berger, B. Gony, **R.-A. Linares-Lamus**, B. Douine, and J. Lévêque, “Calcul analytique de l’inductance mutuelle entre deux bobines circulaires à noyau supraconducteur,” in 11èmes Journées de Cryogénie et de Supraconductivité, Aussois, France, 2015, p. page 46.
- [17] K. Berger et al., “Solar electric motor on superconducting bearings: design, producing and potential applications,” in ASC 2016 - Applied Superconductivity Conference, Denver, Colorado, United States, 2016, p. page 201/4LPo2D-02.

Résumé

La pile à combustible convertit l'énergie chimique des réactants en énergie électrique continue, en chaleur et en eau. Elle est généralement utilisée autour d'un point de fonctionnement (ou zone) correspondant à un maximum de puissance électrique. Le courant continu produit par la réaction d'oxydo-réduction est proportionnel à la surface active de la pile et la tension, qui est d'environ 0,6 V au point de nominal de fonctionnement, peut être augmentée par la mise en série de plusieurs cellules (constituant un stack). En raison de son faible niveau de tension continue, son utilisation dans des systèmes électriques nécessite de l'associer à des convertisseurs de puissance. Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse s'intéressent au potentiel d'une source électrique continue basse tension et plus exactement à l'utilisation de la pile à combustible en fonctionnement source de courant commandée (par le débit d'un des réactants). L'expertise du laboratoire GREEN dans le domaine des supraconducteurs, nous a conduits naturellement vers une application innovante à savoir substituer les alimentations de puissance dédiées aux dispositifs supraconducteurs par une pile à combustible. Un premier essai prometteur mené sur une bobine supraconductrice de 4 mH a mis en évidence tout le potentiel d'une telle application et nous a encouragés à étendre l'étude à des bobines supraconductrices fortement inductives, des plusieurs henrys. En effet, les énergies mises en jeu sont alors plus importantes et exigent de dimensionner avec soin le banc d'essai, aussi bien du point de vue de la protection de la pile que des conditions opératoires. Pour ce faire, une modélisation et une expérimentation d'un ensemble pile à combustible/bobine supraconductrice ont également été réalisées. En parallèle du travail mené sur la partie alimentation de la bobine supraconductrice, nous avons travaillé sur le dimensionnement d'un dispositif supraconducteur innovant, communément appelé aimant vectoriel, à trois axes. Ce système peut servir comme charge pour une pile à combustible mais aussi, et surtout, comme outils de caractérisation d'échantillons supraconducteurs. Cet aimant vectoriel permet d'orienter dans les 3 directions de l'espace un champ magnétique de plusieurs teslas, uniforme à plus de 95 % dans une sphère de 100 mm de diamètre. Ce dimensionnement, nous a permis de concevoir et réaliser la structure supportant le bobinage du fil et de choisir un certain fil supraconducteur. Le système complet devant coûter moins de 50 k€, cryostat inclus, nous nous sommes orientés vers du fil supraconducteur à basse température critique, refroidi à l'hélium liquide.

Mots clés

Aimant vectoriel, pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), source de courant, supraconducteur.

Abstract

The fuel cell (FC) converts the chemical energy of the reactants into direct electrical energy, heat and water. The FC is generally used around an operating point (or area) corresponding to a maximum of electric power. The direct current produced by the redox reaction is proportional to the active surface of the single cell and its voltage, which is approximately 0.6 V at the nominal operating point, can be increase by connecting several cells in series (constituting a stack). Due to its low DC voltage amplitude, its use in electrical systems requires the use of power converters. In this work, we have been interested taking benefit of such DC low voltage power source and more precisely the use of the FC as a current source controllable by the one of the reactant flow rates. The expertise of GREEN laboratory in the field of superconductors has naturally led us to an innovative application, namely to substitute the power supplies dedicated to the superconducting devices by a FC. A first promising test conducted on a 4 mH superconducting coil highlighted the full potential of such an application and encouraged us to extend the study to highly inductive superconducting coils where the energies involved are more important. This requires to carefully design the test bench with a protection system for the FC as well as operating conditions. To this end, a FC model supplying a superconducting coil has been developed and tested experimentally. At the same time, we have focused on the supply part of the superconducting coil by designing an innovative superconducting device, commonly called a three-axis vector magnet. This system can be used as a load for a fuel cell, but also, and above all, as a tool for the characterization of superconducting samples. This vector magnet allows to orient a magnetic field of several tesla in the three space directions, with a uniformity of more than 95 % in a 100 mm sphere of diameter. This design allowed us to realize the windings supporting structure and to choose a superconducting wire. The complete system must cost less than 50 k€, including the cryostat, we have finally chosen a superconducting wire with low critical temperature, cooled by liquid helium.

Keywords

Vector magnet, proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), current source, superconductor.