

SNCF - Centre d'Ingénierie du Matériel
4 Allée des Gémeaux
72100 Le Mans

G2ELAB INPG-UJF UMR 5269 CNRS
11 rue des Mathématiques
BP 46
38402 Saint Martin d'Hères cedex

Système de dégivrage pantographe

Loïc MICHEL

Rapport d'activité final 2014-2015

(1er juin 2015)

Table des matières

Préambule	4
1 Introduction	5
1.1 Objet	5
1.2 Présentation du contexte des travaux	5
1.3 Etat de l'art	6
1.3.1 Solutions mises en œuvre dans le domaine industriel (ferroviaire ou non) . .	6
1.3.1.1 Traçage	6
1.3.1.2 Flux d'air chaud	8
1.3.1.3 Actions électrodynamiques	8
1.3.1.4 Magnétostriction	8
1.3.2 Bibliographie	10
1.4 Autres solutions envisagées	11
1.4.1 Génération de courants de Foucault	11
1.4.2 Micro-ondes	11
1.4.3 Autres solutions	12
1.5 Modélisation envisagée	13
1.5.1 Périmètre de la modélisation	13
1.5.2 Support technique du G2Elab	14
2 Eléments de conception du dispositif de dégivrage	15
2.1 Objectif et stratégie envisagée	15
2.2 Caractéristiques électriques principales	17
2.3 Topologie du convertisseur de puissance	17
2.3.1 Convertisseur de classe E	17
2.3.2 Mise en œuvre d'un convertisseur à courants pulsés	18
2.3.3 Modélisation et simulation	19
Hypothèses et notation	19
Modélisation	19
Remarque sur la forme du courant d'induction	20
2.3.4 Formes d'ondes expérimentales	22
2.4 Bobines d'induction	23
2.4.1 La bobine d'induction "plate"	23
2.4.1.1 Généralités	23
2.4.1.2 Etude théorique	24
Simulations FEMM	24

2.4.2	La bobine avec noyau magnétique	25
2.4.2.1	Généralités	25
2.4.2.2	Etude théorique	26
	Simulations FEMM	27
2.4.3	Comparaison qualitative des configurations	28
2.5	Modélisation des courants de Foucault	29
3	Expérimentation du dispositif de dégivrage	31
3.1	Contexte et objectifs des manipulations	31
3.2	Premiers résultats expérimentaux	31
3.2.1	Démarche expérimentale pour le premier prototype	31
3.2.2	Premières conclusions	33
3.3	Structures de bobines testées	35
3.4	Essais de dégivrage sur archet complet	39
3.4.1	Configuration des sondes thermocouple	39
3.4.2	Essais à température ambiante	40
3.4.2.1	Bobines avec noyau en U	40
	Cas d'un espacement de 2 X 22 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 1 et 5)	40
	Cas d'un espacement de 2 X 11 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 2 et 4))	40
3.4.2.2	Bobines plates de type industrielles	42
	Cas d'un espacement de 2 X 11 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 2 et 4)	42
3.4.3	Bilan d'efficacité	43
3.4.4	Essais en conditions climatiques	43
3.5	Points techniques à améliorer	47

Préambule

En période hivernale, le givre ou des pluies verglaçantes viennent déposer une enveloppe de glace sur la caténaire et sur les bandes de frottement. Lors de la mise en service du train, le conducteur lève le pantographe pour alimenter son train. La glace déposée sur les bandes de frottement et la caténaire dégrade la liaison électrique, voire la rend impossible dans des situations extrêmes. Le captage électrique est très mauvais : la pellicule de glace entre la caténaire et les bandes de frottement empêche le contact physique, un arc se crée pour établir la liaison électrique. Cet arc électrique, quasi permanent tant qu'il y a de la glace, dégrade l'infrastructure ainsi que certains constituants du train et peut entraîner de grands retards voire des transbordements, d'où la recherche de solutions de dégivrage des bandes de frottement des pantographes. Dans cet objectif, un projet de développement SNCF en partenariat avec le G2Elab-CNRS a pour objectif d'analyser les différentes possibilités permettant de faciliter le contact électrique entre le pantographe et la caténaire afin que les conditions givrantes ne constituent plus un obstacle à la mise en circulation des engins.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Objet

Ce document a pour objet de rassembler l'état de l'art des solutions actuellement disponibles pour répondre à la problématique considérée, de définir les pistes de nouvelles solutions dont la faisabilité reste à démontrer et enfin de cibler celles qui donneront lieu à une modélisation et caractérisation des performances dans la suite du projet. Le document précise également les besoins en matière de modèles mathématiques nécessaires pour la réalisation du projet.

1.2 Présentation du contexte des travaux

La présence d'eau gelée ou de glace empêche l'établissement correct du contact électrique entre la caténaire et le pantographe et nécessite donc un traitement approprié, appelé dans toute la suite simplement "dégivrage", qui permet de supprimer suffisamment de glace afin de créer le contact électrique grâce à des moyens magnétiques, mécaniques ou électriques.

L'étude porte principalement sur la mise en œuvre d'un dispositif permettant le dégivrage des archets du pantographe (voir Fig. 1.1), pièces qui sont donc directement en contact avec la caténaire et qui sont donc susceptibles de geler et d'empêcher le contact électrique avec la caténaire. L'objectif est de chauffer la bande de frottement, qui constitue la partie haute de l'archet, à l'aide d'un dispositif embarqué et placé au plus près de l'archet. Ce dispositif, ne doit ni encombrer significativement les emplacements disponibles en toiture, ni perturber la dynamique de fonctionnement du pantographe. De plus, en supposant que le système de dégivrage n'est mis en service qu'en position baissée du pantographe, il doit maintenir un certain niveau de température de la bande de frottement une fois que la tête du pantographe est en mouvement pour entrer en contact avec la caténaire. La glace peut également être présente sur l'ensemble de la structure du pantographe et geler les articulations, ce qui peut empêcher tout mouvement du pantographe. Il pourrait donc être envisageable d'étendre les propriétés du dispositif de dégivrage à l'ensemble de la partie mobile du pantographe de manière à pouvoir chauffer en plus les articulations mécaniques.



Figure 1.1 – Exemple de pantographe baissé en toiture.

1.3 Etat de l'art

1.3.1 Solutions mises en œuvre dans le domaine industriel (ferroviaire ou non)

Nous supposons que le dégivrage ne concerne que l'établissement du premier contact électrique. En particulier, le procédé de dégivrage ne fonctionne que lorsque le pantographe passe de la position basse à la position haute. Aucune modification significative de la structure du pantographe n'est envisagée et l'encombrement ainsi que les conditions d'exploitation du dispositif de dégivrage doivent satisfaire les critères normatifs en vigueur. Il est notamment souhaitable que le dispositif ne présente que peu d'encombrement vis-à-vis de la place disponible en toiture, et provoque le moins possible de perturbations électromagnétiques.

Les solutions existantes suivantes ont été étudiées.

1.3.1.1 Traçage

La solution par "traçage électrique", qui consiste à utiliser un cordon chauffant (ex. Fig. 1.2) intégré à la bande de frottement de l'archet, est actuellement commercialisée, notamment par les établissements Stemmann (<http://www.stemmann.de>). Cette technique permet de chauffer directement l'archet avec un minimum d'électronique de commande en amont. En revanche, l'intégration

s'avère plus difficile car les bandes de frottement doivent être fabriquées en incluant ce système de traçage (Fig. 1.3), qui doit pouvoir être connecté à sa source d'alimentation à l'aide de câbles portés par la structure du pantographe (Fig. 1.4).



Figure 1.2 – Exemple de cordon chauffant (illustration issue de la doc. des produits de la société Sopara).

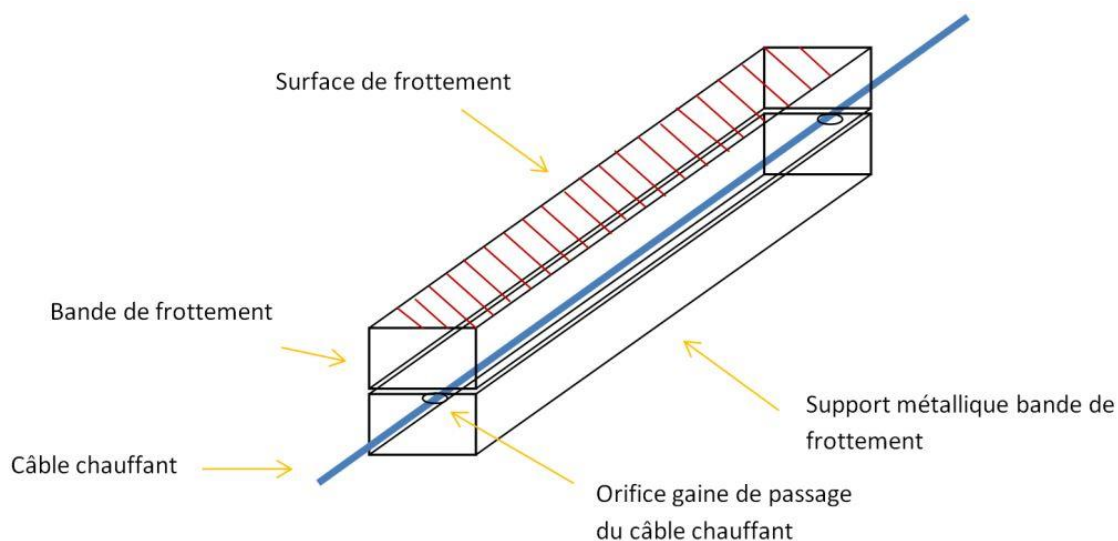


Figure 1.3 – Principe du fil chauffant intégré à la bande de frottement.

D'après la documentation fournie par la société Stemmann, très peu d'informations sont données à propos de l'implémentation du dispositif de traçage sur archet. En particulier, on ne connaît ni



Figure 1.4 – Dispositif de traçage électrique intégré à la structure de pantographe (illustration issue de la doc. des produits de la société Stemmann).

la nature du convertisseur de puissance qui alimente le fil chauffant, ni pourquoi il y a une limite de fonctionnement en tension fixée à 750 V.

1.3.1.2 Flux d'air chaud

La solution par "flux d'air chaud" consiste à produire de l'air chaud (par exemple, grâce à une résistance chauffante) puis de l'envoyer en direction des bandes de frottement à la manière d'un sèche-cheveux. Bien que le dispositif de génération d'air chaud soit logé à proximité des bandes de frottement et que l'électronique de commande soit assez réduite (semblable *a priori* à l'alimentation du fil chauffant), ce dispositif contient des pièces mécaniques mobiles qui peuvent également geler et se bloquer.

1.3.1.3 Actions électrodynamiques

La méthode des actions dynamiques consiste à utiliser des fils conducteurs placés en parallèle et alimentés par des courants pulsés. Ces courants, grâce au phénomène d'induction, créent un travail mécanique et génèrent des forces de Laplace de nature vibratoire. Une telle solution permettrait ainsi de faire vibrer le support de l'archet et donc de "décoller" la glace par vibrations mécaniques. La génération de courants pulsés nécessite une électronique de commande plutôt spécifique, capable de délivrer des forts courants, ainsi qu'un dimensionnement géométrique assez contraignant car les fils doivent interfacer mécaniquement le support des bandes avec les bandes de frottement. On peut ainsi considérer que les bandes de frottement sont montées sur ressorts excités à haute fréquence vibratoire.

La Fig. 1.5 présente le cas élémentaire de la loi des actions électrodynamiques. Puisque les fils s'attirent s'ils sont parcourus par un courant de même sens ($I_1 I_2 > 0$) et se repoussent dans le cas contraire ($I_1 I_2 < 0$), alors l'alimentation des fils par des courants périodiques permet d'obtenir un comportement de nature vibratoire.

Pour illustrer numériquement, considérons deux conducteurs parallèles rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance d de 1 m, l'un de l'autre dans le vide. La force produite entre ces conducteurs est égale à $2 \cdot 10^{-7}$ N par mètre de longueur.

1.3.1.4 Magnétostriction

La magnétostriction désigne la propriété que possèdent les matériaux ferromagnétiques de se déformer sous l'effet d'un champ magnétique (schéma de principe, Fig. 1.6). L'utilisation du

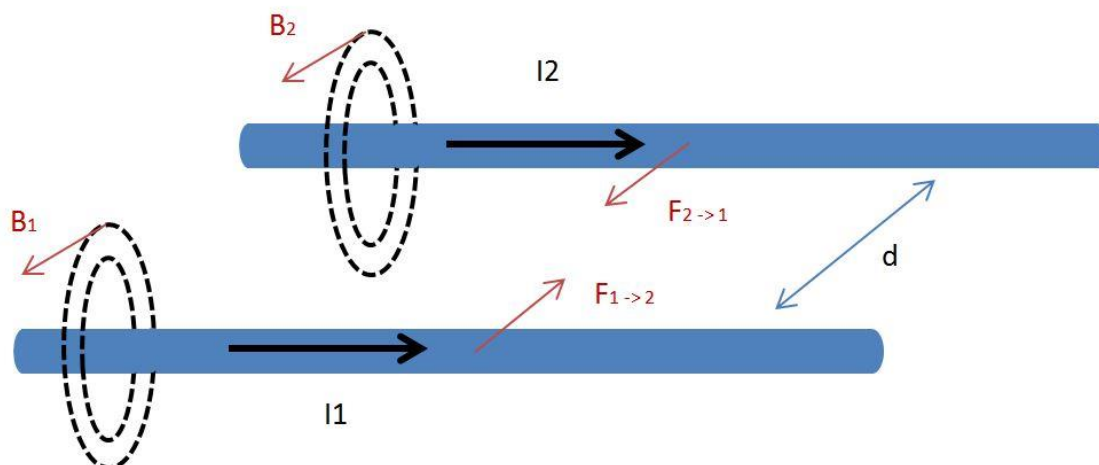


Figure 1.5 – Exemple de deux câbles alimentés par un courant continu et qui produisent des forces de Laplace (cas $I_1 I_2 > 0$).

phénomène de magnétostriction est similaire aux actions électrodynamiques puisque l'objectif est dans ce cas de faire vibrer le matériau magnétostrictif de manière à "décoller" la glace.

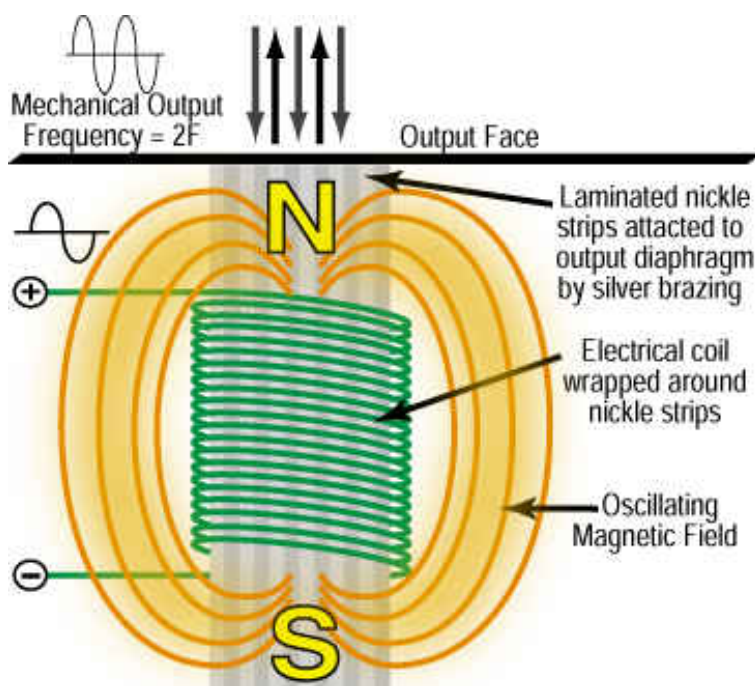


Figure 1.6 – Principe de l'effet magnétostrictif qui consiste à déformer un métal sous l'action d'un champ magnétique périodique (tiré du site www.ctgclean.com/).

Par conséquent, la mise en œuvre de la magnétostriction est identique à la mise en œuvre de la méthode des actions électrodynamiques en terme de complexité de dimensionnement du dispositif électromécanique (notamment, l'assemblage du matériau magnétostrictif au sein l'archet en vue de

l'interfaçage de la bande de frottement avec le support d'archet via le matériau magnétostrictif) et du convertisseur de puissance, qui doit être capable de générer de fortes tensions afin de créer une induction magnétique suffisante pour permettre une déformation consécutive du matériau (la Fig. 1.7 présente la réponse mécanique du Nickel en fonction de l'excitation magnétique).

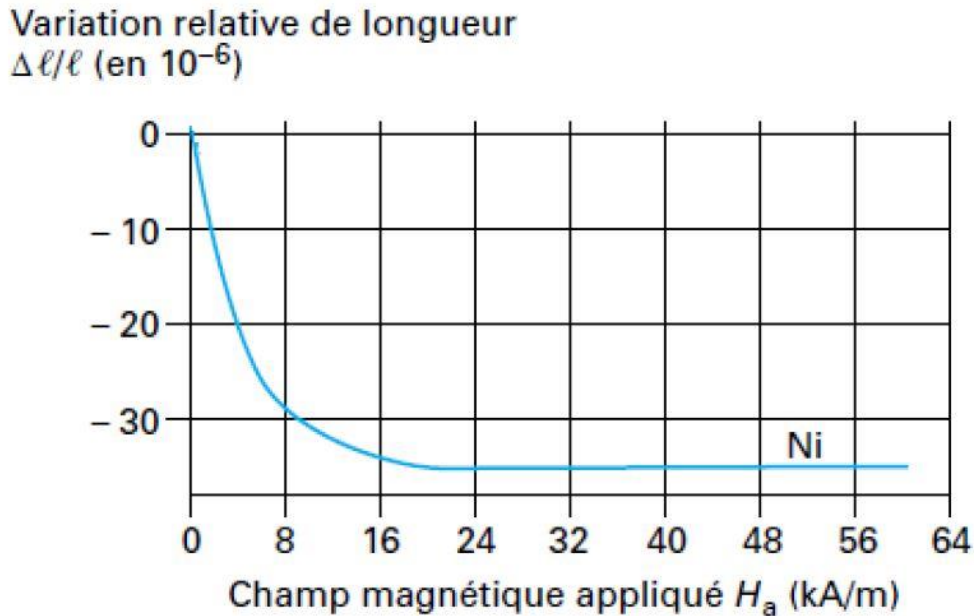


Figure 1.7 – Exemple d'évolution de la déformation du Nickel en fonction du champ magnétique (graphe tiré de P. Hartemann, "Effets et matériaux magnétostrictifs", techniques de l'ingénieur, 1999).

En conclusion, l'utilisation de procédés magnéto-mécaniques tels que la vibration de la bande de frottement provoquée, soit par des forces de Laplace, soit par magnétostriction, implique une ré-étude complète de la structure de l'archet, qui doit donc non seulement intégrer de nouveaux éléments qui génèrent des efforts vibratoires, mais également supporter les contraintes mécaniques engendrées par un tel travail mécanique, comme des problèmes avec les soudures, voire des déformations mécaniques irréversibles des matériaux constitutifs de l'archet. De plus, le fait que les matériaux utilisés dans les procédés magnéto-mécaniques soient en contact physique avec les structures conductrices de l'archet, implique que le dispositif de dégivrage soit nécessairement au potentiel électrique de l'archet (par exemple, 25 kV), ce qui peut poser d'importantes contraintes d'isolation électrique qui tendent à complexifier le dimensionnement du dispositif.

1.3.2 Bibliographie

- S. Zinn et S.L. Semiatin, "Elements of Induction heating : Design, Control and Applications", ASM International, 1988.
- A. Rumeau, "Modélisation comportementale en génie électrique sous représentation diffusive : Méthodes et applications", thèse de doctorat, Université P. Sabatier - Toulouse, 2009.

- Y. Le Bras, "Etude et mise en œuvre de résonateurs magnétostrictifs, application à la mesure de givrage", thèse de doctorat, Université du Maine - Le Mans, 2011.
- O. Lucia, P. Maussion, E. Dede et J.M. Burdio, "Induction heating technology and its applications : Past developments, current technology and futures challenges", IEEE. trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2509-2520, 2013.
- AN-9012, "Induction heating system topology review, notice technique", Fairchild, 2000.
- C. Zorni, "Contrôle non destructif par courants de Foucault de milieux ferromagnétiques : de l'expérience au modèle d'interaction", thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, 2012.
- J.P. Pérez, R. Carles et R. Fleckinger, "Electromagnétisme : Fondements et Applications", Dunod, 2002.
- P. Hartemann, "Effets et matériaux magnétostrictifs", Techniques de l'ingénieur, doc.E1880, 1-13, (1999).

1.4 Autres solutions envisagées

1.4.1 Génération de courants de Foucault

Puisque les matériaux constituant les supports d'archet sont de nature métallique, il est alors possible d'utiliser les propriétés du magnétisme pour chauffer directement ces supports. Une solution alternative à l'exploitation des procédés magnéto-mécaniques présentés précédemment, serait de générer des courants de Foucault à l'intérieur des supports d'archet grâce à une bobine magnétique placée à proximité des archets. Le principe de base (Fig. 1.8) est de générer un champ magnétique variable, grâce à un bobinage typiquement circulaire, à proximité de pièces métalliques que l'on souhaite chauffer. Ce champ magnétique induit des courants circulaires ou courants de Foucault dans le métal, qui vont être la source d'un certain échauffement par effet Joule en fonction de la résistivité de ce métal (en l'occurrence, les métaux ferromagnétiques sont à privilégier).

Ce principe, basé uniquement sur des interactions magnéto-thermiques et qui est largement utilisé dans le chauffage par induction, permettrait une intégration assez optimale du dispositif de chauffage de l'archet car aucune modification majeure de la structure du pantographe n'est à prévoir : les éléments inductifs sont au mieux fixés sur le pantographe à proximité des archets et reliés à leur source d'alimentation grâce à du câblage. L'électronique de commande reste également standard, et plutôt proche des structures utilisées dans les fours à induction.

L'application du chauffage par courants de Foucault pour dégivrer l'archet de pantographe a récemment été brevetée par la SNCF¹.

1.4.2 Micro-ondes

Par extension du principe de chauffage par les courants de Foucault, il est possible de généraliser la création d'un champ magnétique variable, à l'émission d'un rayonnement électromagnétique haute fréquence, dans la gamme des micro-ondes, permettant ainsi de ne chauffer que la glace (par excitation moléculaire) et donc de ne pas chauffer l'archet. Cette solution, qui nécessite un générateur de micro-ondes disposé près de la surface de la bande de frottement (Fig. 1.9), élimine

1. D. Goeres, "Pantographe pour véhicule ferroviaire comportant des moyens de dégivrage et procédé de dégivrage d'un pantographe", Numéro et date de priorité du brevet : FR1358098 - 2013-08-21.

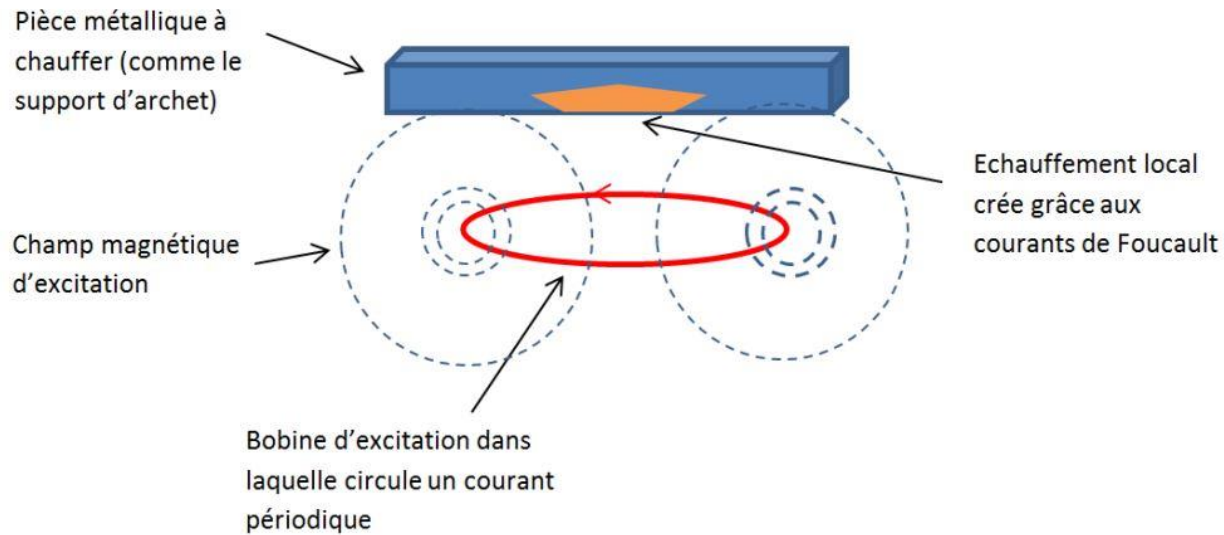


Figure 1.8 – Principe de l'échauffement de pièces métalliques par courants de Foucault.

les problèmes de contraintes physiques sur les matériaux de l'archet, mais impose en revanche plus de contraintes sur la conception du convertisseur de puissance (qui doit être capable de découper dans le GHz, tout en permettant le transfert de courant de quelques ampères) afin de provoquer la fusion de la glace. De plus, l'usage des micro-ondes étant de nature plutôt nocive pour les êtres vivants, d'importantes précautions devront être mises en place afin de limiter la dispersion à l'air libre et donc de pouvoir absorber le rayonnement au delà du gabarit électrique du pantographe.

Cette solution a récemment fait l'objet d'une demande officielle de brevet auprès de l'INPI.

En conclusion, l'utilisation de procédés électromagnétiques tels que le chauffage par induction ou bien la génération de micro-ondes élimine le problème d'isolation électrique² car il n'y a plus de contact physique avec les pièces qui sont sous tension et qui sont à proximité de la caténaire³.

1.4.3 Autres solutions

D'autres alternatives qui dérivent du dispositif à courants de Foucault visent à combiner un échauffement par conduction thermique avec un échauffement créé par courants de Foucault. Une

2. Ce problème d'isolation électrique se pose lorsque des pièces électriques (en l'occurrence les éléments inductifs pour les courants de Foucault ou le générateur micro-ondes) alimentées à basse tension sont placées à proximité de pièces alimentées à haute tension (en l'occurrence, le pantographe) ; des arcs électriques peuvent alors survenir et détruire les pièces mises sous basse tension. Pour y remédier, soit le système basse tension a son potentiel de référence porté au potentiel de la haute tension, soit un important dispositif d'isolation électrique doit "séparer" la haute tension, de la basse tension ; une combinaison de ces deux solutions permet de générer au mieux le problème d'isolation électrique. Le fait que le procédé électromagnétique envisagé ne soit *de facto* pas en contact physique avec le pantographe résout partiellement le problème d'isolation, mais une étude approfondie de la compatibilité des potentiels entre le circuit de puissance et le pantographe doit être menée.

3. Les contraintes d'intégration électriques, CEM et mécaniques doivent satisfaire les normes respectives EN 50124, EN50121 et EN60068.

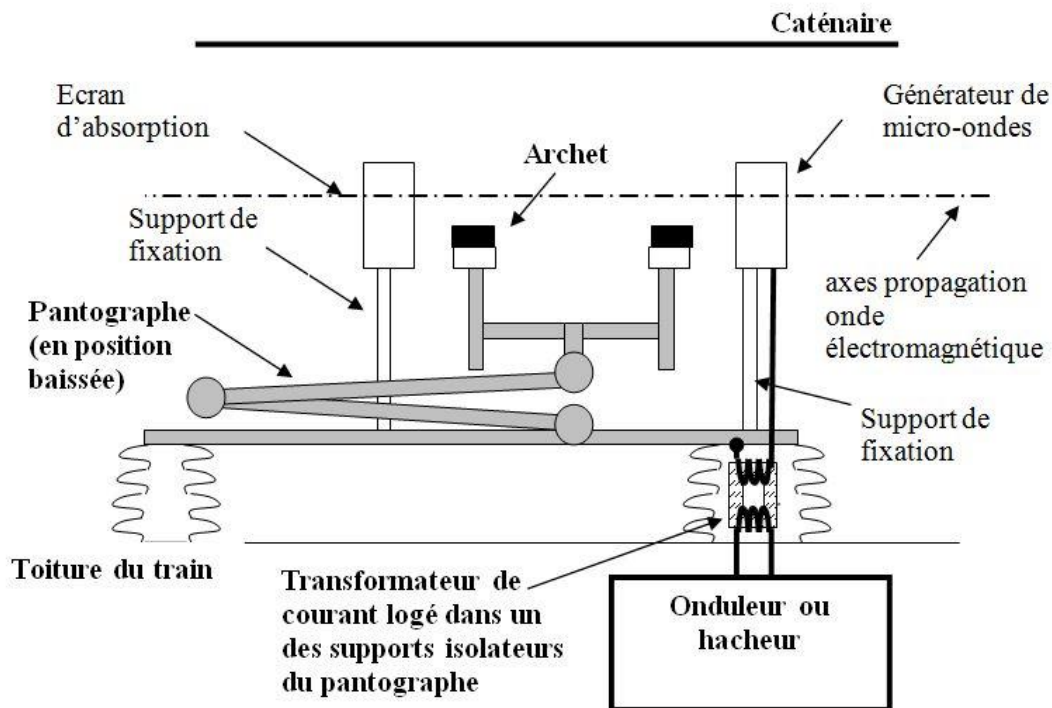


Figure 1.9 – Principe de la fusion de la glace par micro-ondes (schéma extrait de la demande de brevet).

étude approfondie des conditions de magnétisation du support d'archet est en cours de validation et une demande de brevet est en préparation, donc non diffusable à l'heure actuelle.

1.5 Modélisation envisagée

1.5.1 Périmètre de la modélisation

Bien que la modélisation constitue théoriquement l'étape préliminaire à l'expérimentation en vue de prévoir le comportement du dispositif de dégivrage, les difficultés d'emploi et de configuration de certains simulateurs tendent à rendre les résultats peu fiables et fortement dépendants du paramétrage des solveurs. Il n'est donc pas recommandé d'effectuer initialement des simulations sur la seule base des concepts théoriques de la physique générale, mais il est souhaitable d'établir quelques référentiels qui permettront de calibrer les modèles en simulation. Nous avons ainsi priorisé l'étape de réalisation d'un premier prototype expérimental avec lequel différentes mesures et différents tests pratiques permettront d'établir des lois comportementales, qui seront utilisées comme référentiel expérimental par rapport au dispositif de dégivrage envisagé. La modélisation, ainsi que les simulations qui en découlent, doivent donc être calibrées à partir des données expérimentales obtenues dans le cadre de la solution de dégivrage par courants de Foucault, que nous retenons comme solution la plus intéressante. Par hypothèse, nous utiliserons des configurations magnétiques très simples associées à des géométries élémentaires de pièces

métalliques afin de pouvoir développer en parallèle des simulations une modélisation empirique et/ou semi-analytique des transitoires magnéto-thermiques. Le périmètre de la modélisation et de la simulation comprend donc :

- Modélisation du comportement thermo-mécanique de la glace (modèle de glaciologie de Bueler (<http://bueler.github.io/>)⁴.
- Simulation du convertisseur de puissance permettant la génération des courants de Foucault.
- Modélisation semi-analytique et simulation par éléments finis de la création de champ magnétique non statique et de la création des courants de Foucault induits dans de simples pièces métalliques.
- Modélisation semi-analytique et simulation par éléments finis des phénomènes magnéto-thermiques entre le champ magnétique et l'échauffement des pièces métalliques⁵.

L'objectif de l'étape de modélisation et de simulation est, premièrement, de pouvoir prédire le fonctionnement des cas plus complexes, difficilement accessibles expérimentalement et deuxièmement, de permettre (à court terme) d'optimiser le dispositif de dégivrage en fonction de plusieurs configurations préalablement identifiées comme étant importantes vis-à-vis du fonctionnement du pantographe. En particulier, la température ambiante à proximité du pantographe et la densité / épaisseur de glace seront des éléments sensibles qui permettront de tester les différents modèles numériques.

1.5.2 Support technique du G2Elab

Le G2Elab, équipe EP⁶, supporte à la fois la confection, les essais (et mesures) et le dépannage du premier prototype expérimental, ainsi que la fourniture de logiciels permettant de simuler certaines parties du dispositif de dégivrage. Les logiciels PSIM, FLUX2D / 3D et MacMMens sont mis à disposition pour pouvoir simuler certains aspects du projet (PSIM, est disponible au CIM-SNCF). La suite de logiciels Flux, développée et commercialisée par la société Cedrat (www.cedrat.com), fournit des logiciels dédiés à la simulation multi-physique, donc particulièrement adaptés pour la simulation et l'étude de l'échauffement créé par les courants de Foucault. Enfin, MacMMens, développé au G2Elab, associé au logiciel Cades, permet de définir une modélisation semi-analytique de la loi des actions électrodynamiques appliquée à des configurations géométriques particulières⁷. Le personnel de l'équipe MADEA⁸ a également pris part aux essais pour la caractérisation de la perméabilité des ferrites (les ferrites sont associées à la bobine et sont essentielles pour générer des courants de Foucault), certains essais complémentaires qui utilisent des noyaux ferreux et a pris part à la modélisation de la bobine d'induction utilisée dans le dispositif de dégivrage⁹.

4. A l'origine, ce modèle a été choisi dans le but de pouvoir déterminer une estimation de la puissance thermique nécessaire à la fusion totale de la glace. Ce modèle n'a pas été utilisé puisque les facilités expérimentales ont directement permis d'apprécier *in fine* le pouvoir d'échauffement du dispositif de dégivrage en contact avec de la glace à -10 °C (cf. § 3.4.4).

5. La modélisation ou la simulation des phénomènes magnéto-thermiques se sont avérées très complexes à mettre en œuvre à cause des difficultés d'utilisation des logiciels Flux 2D et MacMMens.

6. "Electronique de Puissance"

7. L'utilisation des logiciels Flux et MacMMens est très difficile ; ce point est précisé dans le § 2.5.

8. "Matériaux, machines et Dispositifs Electromagnétiques Avancés"

9. Nous remercions M. Olivier Ghibaudo pour le fort intérêt qu'il a montré pour ce projet, son implication et sa participation très active à l'établissement de certains résultats décisifs dans l'étape de prototypage.

Chapitre 2

Eléments de conception du dispositif de dégivrage

2.1 Objectif et stratégie envisagée

L'objectif est de mettre en œuvre expérimentalement la solution qui consiste à dégivrer un archet, constitué d'un barreau métallique sur lequel est fixée une bande de frottement, en utilisant le chauffage par induction. C'est grâce à la génération de courants de Foucault au sein de la partie métallique de l'archet (cf. 1.4.1), qu'une élévation de température de l'archet par effet Joule est possible. La partie métallique de l'archet constitue *la pièce à chauffer*. Le dispositif de dégivrage envisagé, dont le schéma synoptique est présenté Fig. 2.1, comprend un convertisseur de puissance (composé d'interrupteurs / transistors permettant le découpage), alimenté par la batterie du train, ainsi qu'un système de bobines d'induction magnétique¹, placées au plus près de la partie métallique de l'archet². Il est envisagé de placer les éléments du dispositif de dégivrage en toiture ; la Fig. 2.2 présente un exemple d'implémentation dans lequel les bobines d'induction sont fixées sur l'archet.

L'objectif étant d'augmenter la température au sein de l'archet grâce au chauffage par induction, on définit le *pouvoir d'échauffement* comme étant la réponse thermique de l'archet suite à son excitation magnétique. Par exemple, considérons deux archets constitués de matériaux différents et soumis à la même "puissance magnétique". Le matériau ayant le plus mauvais pouvoir d'échauffement sera le siège d'une élévation de température moins élevée, que dans le cas d'un matériau ayant un bon pouvoir d'échauffement. Le pouvoir d'échauffement est une propriété magnétique intrinsèque des matériaux (lié à la perméabilité magnétique) qui met en évidence le fait que certains matériaux sont beaucoup plus propices à être chauffés par les courants de Foucault. L'exemple le plus typique est la comparaison du pouvoir d'échauffement dans le cas de l'aluminium et du fer / acier. La réponse thermique est très mauvaise dans le cas de l'aluminium et se situe à l'opposé de la réponse thermique dans le cas de l'acier / fer.

Le dispositif de dégivrage a pour but de transformer l'énergie de forme "continue" provenant de la batterie du train, en une forme de nature "périodique" et si possible "pulsatoire" qui doit

1. Le terme exact est "bobine d'excitation magnétique" ; on conservera le terme de "bobine d'induction" par commodité dans toute la suite.

2. La partie de supervision / commande numérique n'est pas traité dans ce rapport et le convertisseur fonctionne en boucle ouverte.

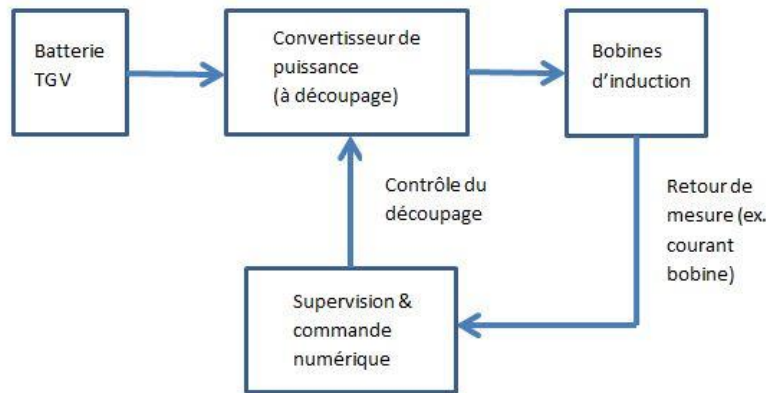


Figure 2.1 – Schéma synoptique du dispositif de dégivrage.

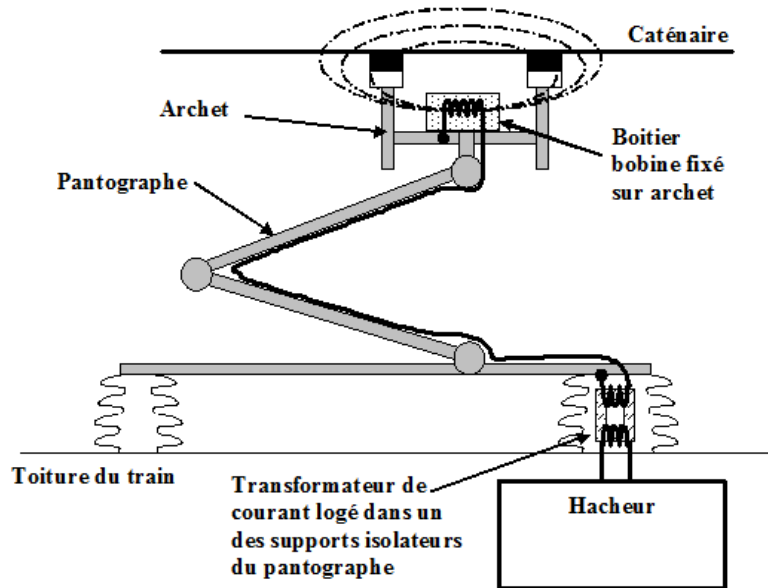


Figure 2.2 – Exemple d'implémentation en toiture du dispositif de dégivrage (schéma extrait de la demande de brevet).

permettre aux bobines d'induction de fournir un champ magnétique suffisamment intense pour générer des courants de Foucault à l'intérieur de la structure métallique de l'archet. On appelle *courant d'induction*, le courant qui permet la magnétisation des bobines d'induction en vue de la génération de courants de Foucault. La forme du signal est également un élément très important puisqu'elle conditionne le pouvoir d'échauffement et il est impératif de générer un courant d'induction de nature périodique afin de magnétiser les bobines d'induction. Dans un souci de minimisation de l'encombrement du dispositif de dégivrage, ainsi que de sa complexité de mise

en œuvre, il est souhaitable de pouvoir augmenter la puissance électrique de magnétisation des bobines d'induction, tout en diminuant le nombre d'interrupteurs à l'intérieur du convertisseur. Ce compromis exclura *de facto* l'usage de topologies d'onduleur en pont complet, qui présentent en plus certains inconvénients relatifs à la puissance délivrée (ce point est détaillé dans la partie expérimentale - voir § 3.2.2) et privilégiera les structures mono-interrupteurs³. Une isolation électrique vis-à-vis du 25 kV est également nécessaire pour une partie ou la totalité du dispositif de dégivrage.

2.2 Caractéristiques électriques principales

Les caractéristiques électriques découlent de la stratégie souhaitée, précédemment décrite.

- Sans tenir compte de l'isolation électrique, le convertisseur de puissance doit pouvoir prélever de l'énergie sur la tension batterie de 72 V, traiter cette énergie (adapter les formes d'ondes), et la restituer aux bobines d'induction avec le moins de pertes possible, en utilisant le minimum d'interrupteurs de puissance.
- Dans la mesure du possible, l'isolation électrique ne doit pas complexifier et ajouter des éléments de conversion de puissance.
- Les bobines d'induction, qui sont placées sous l'archet, doivent présenter un encombrement minimum. On précise que l'impédance électrique des enroulements doit être nécessairement adaptée à la puissance que peut délivrer le convertisseur.
- La puissance absorbée par le convertisseur ne doit pas excéder 200 W pour une durée de fonctionnement maximum de 30 minutes.

2.3 Topologie du convertisseur de puissance

2.3.1 Convertisseur de classe E

Le convertisseur de classe E est un convertisseur dc/ac qui ne possède qu'un seul interrupteur et qui est donc particulièrement adapté pour le découpage haute fréquence.

La Fig. 2.3 présente le schéma d'un convertisseur de classe E standard. Ce convertisseur est constitué de l'étage d'entrée du convertisseur élévateur de tension (V_{in} , L_1 , T et C_1) qui fait office de *pompe de courant*. L'étage de sortie est constitué d'un filtre résonant R , L_2 et C_2 . On identifie la bobine L_2 à la bobine d'induction qui génère les courants de Foucault dans l'archet.

Le principal avantage de cette topologie est de pouvoir générer un courant I_R ayant une forme d'onde de type sinusoïdale, donc plutôt adaptée à la génération de courant de Foucault (puisque qu'un champ magnétique périodique est nécessaire). En revanche, l'inconvénient majeur de ce circuit est un assez faible courant de sortie⁴ I_R , insuffisant pour générer des courants de Foucault si on considère de faibles valeurs de V_{in} (typiquement de l'ordre de 72 V).

3. Voir notamment l'article suivant pour un résumé des topologies existantes : O. Lucia *et al.*, "Induction heating technology and its applications", IEEE. trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2509-2520, 2013.

4. La pompe de courant de l'étage d'entrée a pour but d'augmenter la valeur maximale de la tension aux bornes de C_1 , qui est de nature triangulaire. Par le principe de conservation de la puissance $V_{in} \cdot I_L = V_{out} \cdot I_R$, plus la valeur de la tension aux bornes de C_1 sera élevée, plus la tension V_{out} sera élevée, donc plus le courant de sortie I_R sera diminué.

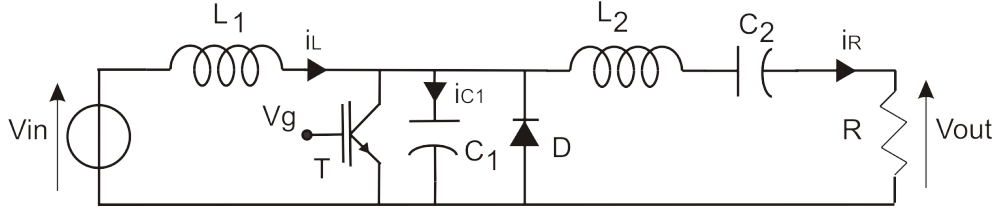


Figure 2.3 – schéma d'un convertisseur de classe E.

2.3.2 Mise en œuvre d'un convertisseur à courants pulsés

Nous proposons une modification simple du convertisseur de classe E⁵ afin de bénéficier d'un courant d'induction suffisante qui possède une forme d'onde de nature périodique (Fig. 2.4).

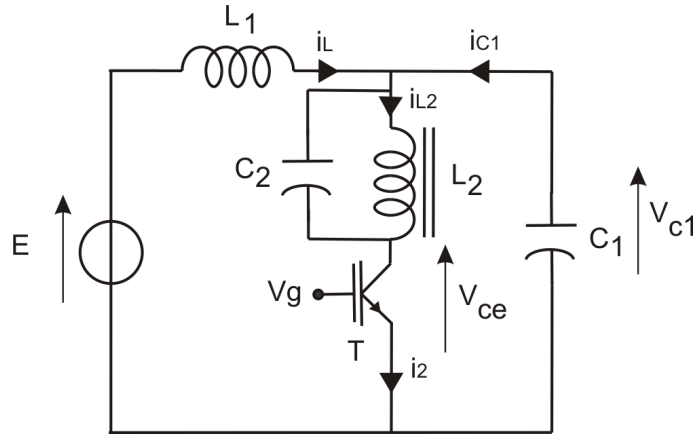


Figure 2.4 – Schéma du convertisseur de classe E* à l'étude.

Cette modification part du constat suivant. Explicitons les deux phases de fonctionnement du convertisseur de classe E (Fig. 2.3) en fonction de l'état du transistor T et supposons que la bobine d'induction corresponde à la bobine L_2 :

- Lorsque l'interrupteur T est ouvert, alors le courant i_L charge la capacité C_1 et alimente le circuit résonant R, L_2 et C_2 . La bobine d'induction est donc alimentée par le courant $i_R = i_L - i_{C1}$.
- Lorsque l'interrupteur T est fermé, alors le courant i_L , ainsi que le courant de décharge du condensateur C_1 sont équivalents à de l'énergie "perdue" qui retourne directement à la masse via le transistor T (donc sans alimenter la bobine d'induction L_2).

Une solution assez évidente serait de faire en sorte que le courant qui circule dans le transistor T lorsque celui-ci est fermé, puisse alimenter la bobine d'induction. Nous proposons la structure de convertisseur décrite dans la Fig. 2.4, que nous appellerons convertisseur de classe E*, dans lequel la bobine d'induction⁶ est placée dans la maille contenant le transistor T . Il n'y a plus de circuit

5. Une présentation intéressante se trouve sur <http://www.powersoc.org/PwrSOC08/Presentations/Received/Invited%20Talk%20S1x5-%20Richard%20Redl%20-%20Fundamental%20considerations%20for%20very%20high%20frequency%20power%20conversion.pdf>.

6. Un condensateur C_2 de faible capacité est connecté aux bornes de la bobine d'induction L_2 afin d'absorber le courant de décharge de L_2 lorsque T s'ouvre et donc d'atténuer les surtensions inductives aux bornes de T . Expérimentalement, cette capacité est indispensable si un transistor de faible calibre en tension est utilisé.

résonant et la capacité C_1 a pour double rôle de "pomper" le courant i_L lorsque T est ouvert, et donc d'alimenter, en plus du courant i_L , la bobine d'induction lorsque T est fermé; en d'autres termes, le courant d'induction lorsque T est fermé vaut $i_L + i_{C1}$ donc il y a un "apport virtuel" d'énergie dans la bobine d'induction.

Le convertisseur de classe E^* ⁷ permet non seulement d'obtenir un courant d'induction qui est périodique (en l'occurrence, non alternatif), mais permet également de bénéficier d'un courant dont l'amplitude maximale peut être supérieure à l'amplitude maximale du courant i_L qui provient de la source E . Le convertisseur de classe E^* est donc équivalent à une pompe de courant.

2.3.3 Modélisation et simulation

Hypothèses et notation On suppose qu'il n'y a pas de capacité C_2 aux bornes de la bobine d'induction (ce qui compliquerait largement le modèle); on suppose que le transistor T possède une résistance r_{on} (typiquement proche de 0) à l'état passant et une résistance très grande r_{off} à l'état bloqué. Enfin, on suppose que les inductances L_1 et L_2 possèdent respectivement une faible résistance interne R_1 et R_2 . On pose : $i_1 = i_{L1}$ et $i_2 = i_{L2}$.

Modélisation Les équations du circuit sont :

$$\begin{cases} E - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - u_{c1} = 0 & (a) \\ i_1 - i_2 - C_1 \frac{du_{c1}}{dt} = 0 & (b) \\ u_{c1} - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - u_T = 0 & (c) \end{cases} \quad (2.1)$$

Après quelques manipulations algébriques, on peut montrer que la dérivée du courant i_2 vérifie l'inégalité suivante⁸ :

$$\frac{di_2}{dt} \leq \frac{r_{off}(1 - \bar{u})i_2}{L_2} \quad (2.2)$$

dans laquelle \bar{u} est une variable continue comprise entre 0 et 1 qui exprime *le rapport cyclique moyen* de commutation du transistor T . Rappelons que la variable \bar{u} est en général l'entrée de commande en tension / courant des convertisseurs⁹. Dans toute la partie expérimentale, nous fixons $\bar{u} = 0,5$.

La Fig. 2.5 montre quelques résultats de simulation du convertisseur de classe E^* , qui montrent clairement l'effet de pompage du courant : pour un courant d'entrée i_1 qui se stabilise autour de 1,5 A, le courant dans la bobine d'induction i_{L2} possède une forme en dents de scie dont la valeur maximale se situe autour de 3A. Les transitoires sont donc abruptes et donc de forme idéale pour la création de courants de Foucault.

7. La topologie de ce convertisseur s'apparente à une source de Howland (http://www.circuit-fantasia.com/circuit_stories/understanding_circuits/current_source/howland_current_source/howland_current_source.htm) dont le but est de maintenir un courant constant dans une charge en utilisant une maille d'alimentation principale "basic current source" sur le schéma, et une maille d'alimentation auxiliaire "helping current source", qui permet de compenser les variations de courant engendrées par la charge, sur la maille principale.

8. La démonstration de cette inégalité va être proposée dans une soumission d'article de recherche.

9. On conseille l'excellent ouvrage d'introduction à l'électronique de puissance : Ph. Barrade, "Electronique de Puissance - Méthodologie et Convertisseurs Elémentaires", PPUR, 2006.

L_1 (H)	L_2 (H)	C_1 (F)	$\max i_1$ (A)	Δi_1 (A)	$\max i_2$ (A)	$\frac{\max i_2}{\max i_1}$ (1)	$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$ (Hz)
25u	25u	500u	1.6	0	3	1,875	1,4k
25u	25u	200u	1.6	0.2	3	1,875	2,2k
25u	25u	50u	1.75	1.25	3.25	1,85	4,5k
25u	25u	1u	—	—	—	< 1	31 k
250u	250u	500u	—	—	—	< 1	450
250u	250u	200u	—	—	—	< 1	711
250u	250u	50u	0.2	0	0.4	2	1,42k
250u	250u	1u	—	—	—	< 1	10 k
250u	25u	500u	1.6	0	3	1.875	450
250u	25u	200u	1.6	0	3	1.875	711
250u	25u	50u	1.6	0.01	3	1.875	1,42k
1u	1u	500u	—	—	—	< 1	7.11k
1u	1u	200u	—	—	—	< 1	11k
1u	1u	1u	—	—	—	< 1	15k
1u	200u	200u	—	—	—	< 1	11k
1u	200u	1u	—	—	—	< 1	15k
20u	20u	500u	2	0	4	2	1,6k
20u	20u	200u	2	0.01	4	2	2,5k
20u	20u	50u	2.5	1.5	4	1,6	5k
20u	20u	1u	—	—	—	< 1	35k
20u	200u	1u	—	—	—	< 1	35k
20u	200u	500u	—	—	—	< 1	1,6k

Table 2.1 – Propriétés du convertisseur de classe E* pour quelques combinaisons d'éléments L_1 , L_2 , C_1 .

Suite aux simulations, le tableau 2.1 présente quelques combinaisons de valeurs pour L_1 , L_2 , C_1 qui peuvent donner un effet de pompe de courant donc un *rapport de pompe* $\frac{\max i_2}{\max i_1} > 1$ (7ème colonne). Dans ce tableau, pour chaque combinaison de paramètres L_1 , L_2 , C_1 , sont présentés, la valeur du courant maximum d'entrée i_1 (4ème colonne), l'ondulation résiduelle sur le courant i_1 (5ème colonne), la valeur maximale du courant i_2 (6ème colonne) et la fréquence de résonance du circuit $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$ (8ème colonne). A partir des données de ce tableau, nous pouvons déduire deux possibles critères de choix simultanés (conditions nécessaires mais non suffisantes) des valeurs de L_1 , L_2 , C_1 : le rapport de pompe *peut* vérifier $\frac{\max i_2}{\max i_1} > 1$ si la fréquence de résonance du circuit vérifie $f_0 \leq 5$ kHz, et, l'ondulation résiduelle Δi_1 *semble* tendre vers 0 pour une fréquence f_0 qui diminue.

Remarque sur la forme du courant d'induction Les courants de Foucault sont créés à partir d'un courant d'induction qui doit être nécessairement variable avec des variations importantes. Contrairement au cas de l'onduleur de tension, où la bobine d'induction tendrait à lisser le courant, le convertisseur de classe E* agit comme une source de courant avec un effet de pompe et dont le taux de variation du courant d'induction par unité de temps est assez important. La forme en dent de scie qui en résulte est donc une possibilité de forme d'onde plutôt adaptée.

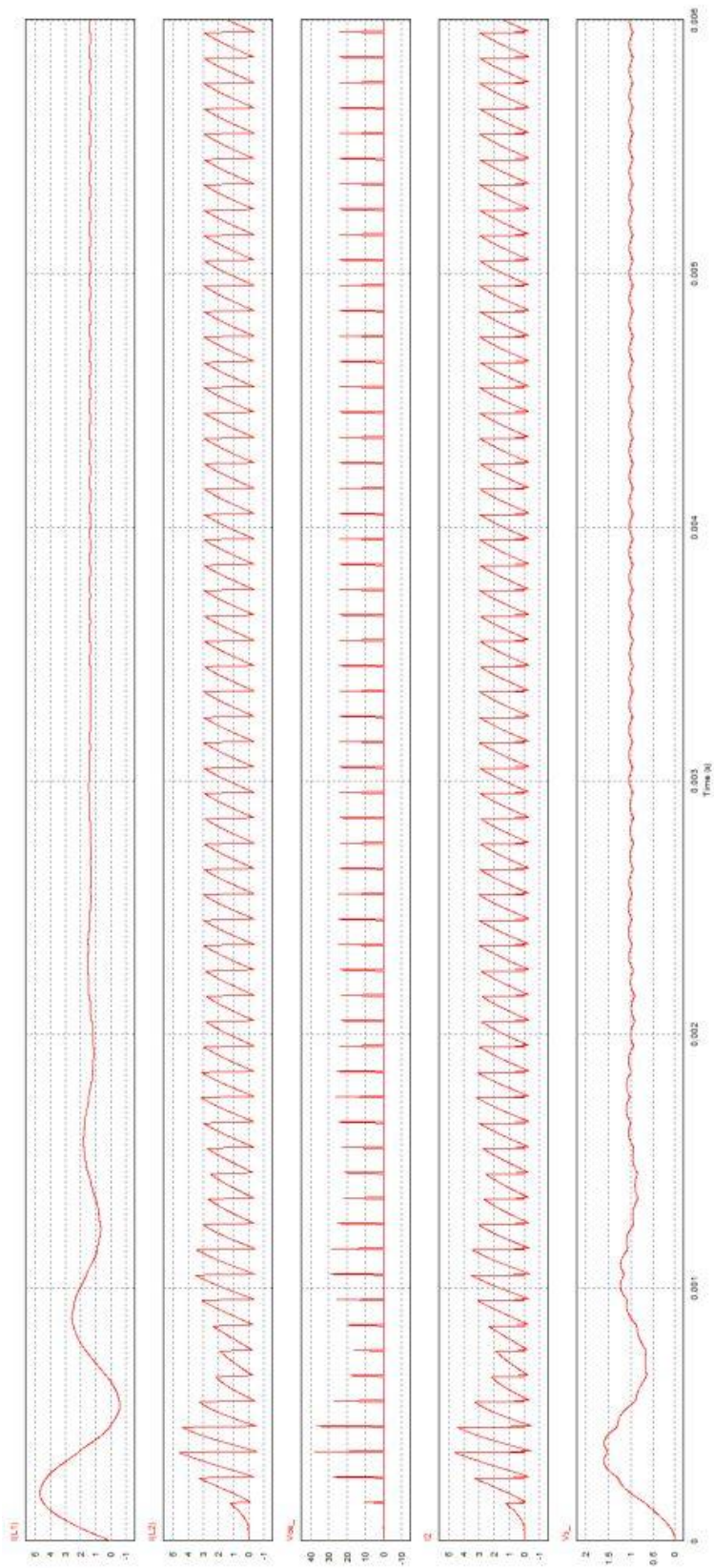


Figure 2.5 – Formes d’ondes en simulation PSIM pour $E = 1 \text{ V}$, $L_1 = 25 \mu\text{H}$, $L_2 = 25 \mu\text{H}$, $C_1 = 500 \mu\text{F}$ et $C_2 = 0.33 \mu\text{F}$.
On fixe $\bar{u} = 0.5$. De haut en bas, sont tracés : i_1 , i_{L2} , v_T , i_2 et u_{C1} .

2.3.4 Formes d'ondes expérimentales

Comme le montre la Fig. 2.6, pour les signaux observés, les formes d'ondes expérimentales sont similaires aux formes d'ondes obtenues en simulation¹⁰.

- Le signal en jaune représente la tension de grille V_{ge} de l'IGBT, signal carré positif, de rapport cyclique $\bar{u} = 50 \%$ et d'amplitude 10 V
- Le signal en bleu représente la tension V_{ce} aux bornes de l'IGBT, tension qui a une allure impulsionnelle. En effet, lorsque l'IGBT conduit, sa tension est nécessairement très proche de 0 V (entre 0,1 V et 1,5 V selon le calibre de l'IGBT), tandis que lorsque l'IGBT est bloqué, l'évolution de la tension V_{ce} est imposée par l'environnement immédiat de l'IGBT, comme formulé par l'équation (2.1), mais sa valeur maximale ne peut excéder la valeur de la tension aux bornes de C_1 (le courant étant nul dans la bobine d'induction, la tension V_{ce} est nécessairement fixée par la source tension la plus "proche", soit la capacité C_1).
- Le signal en violet représente le courant dans la bobine d'induction i_{L2} . Il a une allure en dent de scie. Nous montrerons dans le chapitre expérimental qu'une forme d'onde en dent de scie rend compte d'un bien meilleur pouvoir d'échauffement qu'une forme d'onde de nature sinusoïdale pour de faibles tension E .



Figure 2.6 – Formes d'ondes expérimentales.

10. L'inégalité (2.2) (si elle est confirmée par publication) met en évidence le fait que le di_2/dt augmente si le rapport cyclique \bar{u} diminue mais ne permet pas de conclure quant au transfert de puissance dans la bobine d'induction et en particulier sur la valeur maximale de i_2 . De ce fait, nous fixons le rapport cyclique à 50 % car nous pensons qu'il est important de conserver un certain équilibre entre la phase de conduction et la phase de non-conduction de l'IGBT de manière à permettre non seulement de "cycler" l'échauffement de la bobine d'induction, mais également de transférer un maximum de puissance dans la bobine d'induction, en conservant un bon ratio di_2/dt ; ce compromis correspondrait en définitive à $\bar{u} \rightarrow 0,5$ par valeurs inférieures.

2.4 Bobines d'induction

Différentes formes de bobines d'induction ont été étudiées en se basant sur l'hypothèse de travail que la pièce à chauffer, en l'occurrence, la barre métallique de l'archet, ne peut pas être entourée d'une bobine d'induction¹¹ et doit donc être chauffée nécessairement avec une bobine d'induction placée à proximité. La forme de bobine qui est commercialisée pour des applications de chauffage par induction pour le grand public correspond à une bobine de type "plate". Nous avons mis au point un nouveau type de bobine d'induction qui utilise un noyau magnétique. Ce travail a fait l'objet d'un récent dépôt de brevet SNCF.

2.4.1 La bobine d'induction "plate"

2.4.1.1 Généralités

La bobine plate est constituée d'un câble électrique, généralement conçue à partir de fil de Litz¹² enroulé en spirale autour d'un centre à air. Le diamètre global est typiquement d'environ 30 cm et il peut exister plusieurs "étages" de câbles disposés en spirale. Afin d'améliorer la concentration du champ magnétique au centre de la bobine, des petites plaquettes de ferrites sont disposées en étoile en dessous de la bobine comme le montre la Fig. 2.7, qui présente un modèle commercial destiné à la vente.

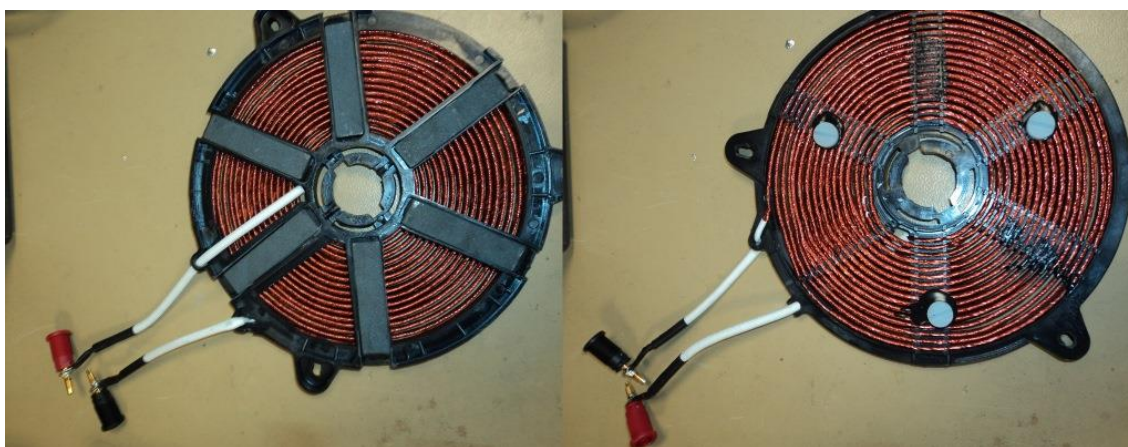


Figure 2.7 – Bobine industrielle de type plate pour chauffage à induction en vue de dessous à gauche (avec les ferrites) et en vue de dessus à droite.

La bobine industrielle, semblable à celle présentée Fig. 2.7, qui a été utilisée dans le cadre de cette étude contient initialement un premier étage de 15 spires et un second étage de 9 spires parfaitement superposés.

11. Comme par exemple un solénoïde qui entoure un barreau de métal http://fr.wikipedia.org/wiki/Chauffage_par_induction.

12. Une définition se trouve sur http://fr.wikipedia.org/wiki/Fil_de_Litz.

2.4.1.2 Etude théorique

Cette étude théorique a pour but de mettre en place le formalisme mathématique permettant notamment de démontrer qu'il existe une disposition et une répartition optimale des spires en fonction du diamètre et du nombre d'étages¹³ en tenant compte de la présence des plaquettes de ferrite. Notons k la position d'un étage au sein de la bobine d'induction (si $k = 1$, alors il s'agit de l'étage le plus bas, si $k = 2$, alors c'est la superposition d'un nouvel étage au dessus de l'étage le plus bas ... etc); notons k_{max} le nombre maximal d'étages et notons $n(k)$ le nombre de spires que contient le k ème étage. Dans l'exemple ci-dessus, la bobine étudiée contient un premier étage de 15 spires et un second étage de 9 spires. Cela s'écrit dans notre notation $n(k) = 15$ pour $k = 1$ et $n(k) = 9$ pour $k = 2$ et $k_{max} = 2$. On appelle *profil de la bobine d'induction* la distribution des $n(k)$ en fonction de k .

A partir des lois de l'électromagnétisme et en utilisant un algorithme d'optimisation, nous mettons en évidence le fait que le profil de la bobine d'induction possède un profil de type pyramidal par morceau¹⁴, comme le montre la Fig. 2.8.

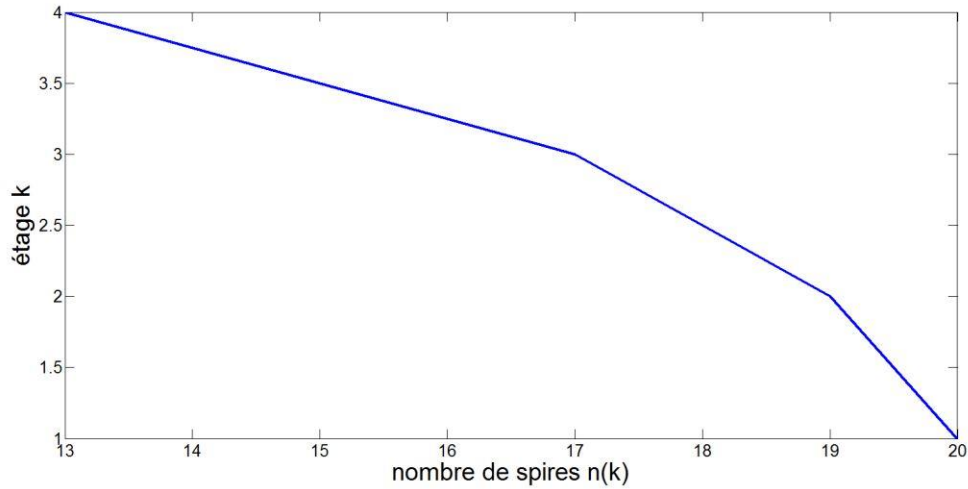


Figure 2.8 – Répartition du nombre de spires par étages $n(k)$ en fonction du nombre d'étages k pour $k_{max} = 4$.

Cette disposition mathématiquement optimisée conférerait à la bobine d'induction, le pouvoir de générer un champ magnétique au centre de la bobine qui soit le plus intense possible. Pour illustrer en simulation, la Fig. 2.15 à gauche, dans le § 2.4.3, montre schématiquement la circulation théorique des lignes de champ magnétique à travers la bobine d'excitation et la pièce à chauffer. Pour compléter cette étude, l'estimation de l'ordre de grandeur de la valeur du champ magnétique au centre de la bobine est envisagé.

Simulations FEMM Le logiciel libre FEMM¹⁵ permet de réaliser des simulations pour cartographier les lignes de champ magnétique. Un exemple de simulation, que nous présentons Fig. 2.9,

13. La démonstration de ce résultat va être proposée dans une soumission d'article de recherche.

14. Autrement dit, la bobine aurait alors un profil de type volcan dans lequel plus on avance vers le centre de la bobine, plus le nombre d'étages augmente.

15. Disponible sur <http://www.femm.info/>.

présente les schémas d'une bobine d'induction sans ferrite (à gauche) et une bobine d'induction avec ferrites (à droite) avec $\mu_r = 10^6$. La Fig. 2.10 présente les niveaux de champ magnétique correspondants. Le niveau d'induction magnétique en présence de ferrites est supérieur au niveau d'induction sans ferrites.

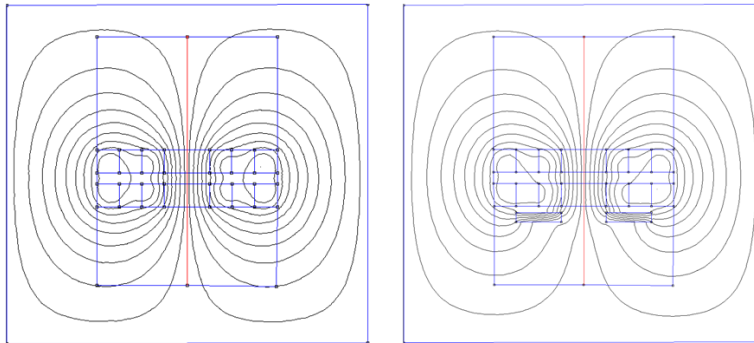


Figure 2.9 – Schémas réalisés sous FEMM pour simuler la cartographie des lignes de champ magnétique d'une bobine d'induction sans ferrites (à gauche) et avec ferrites (à droite).

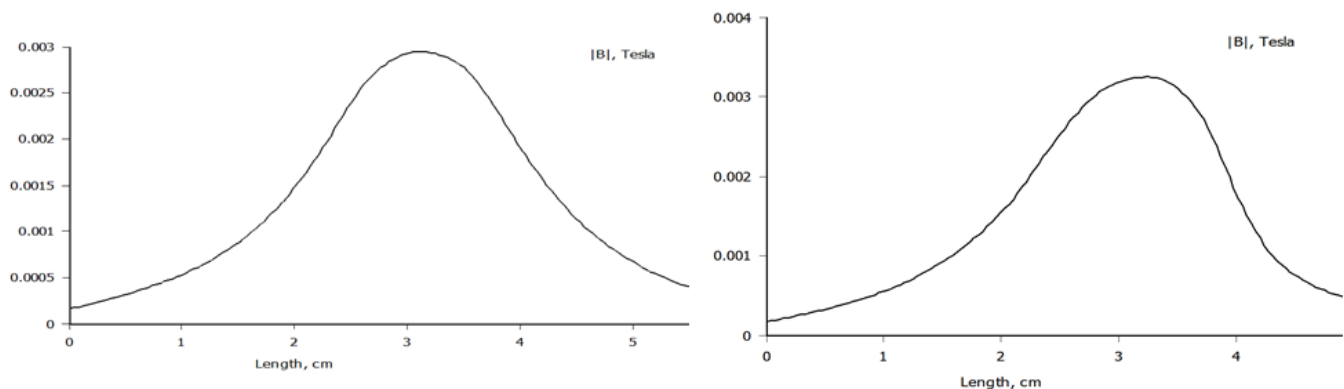


Figure 2.10 – Niveaux d'induction magnétique correspondants au circuit magnétique (Fig. 2.9) en coupe verticale sur la ligne rouge.

2.4.2 La bobine avec noyau magnétique

2.4.2.1 Généralités

La bobine avec noyau magnétique est constituée d'un noyau de ferrite, typiquement de forme en "U", sur lequel est bobinée au moins une bobine, comme le montre la Fig. 2.11. Tout comme la bobine plate, dans laquelle les lignes de champ magnétique passent par le centre de la bobine, les extrémités du "U" constituent "des points d'émission" du champ magnétique. Dans les deux cas, l'archet se situe au dessus de la bobine d'induction et dans le cas du noyau magnétique, c'est l'archet lui-même, qui, étant placé à une distance très proche du noyau, vient fermer le circuit

magnétique. Plus de détails techniques sur la circulation des lignes de champ sont donnés dans le § 2.4.3.

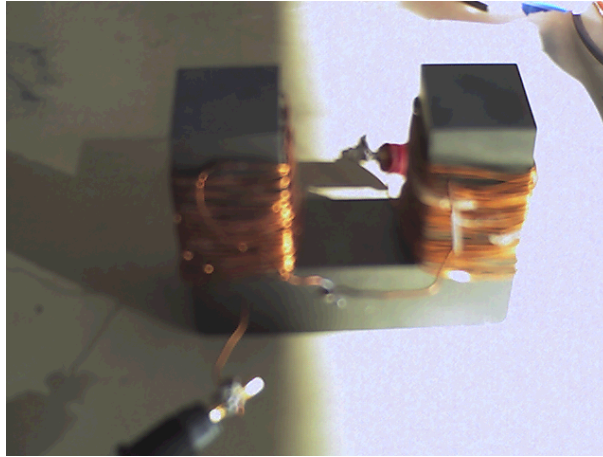


Figure 2.11 – Bobine d’induction montée sur noyau magnétique.

2.4.2.2 Etude théorique

Cette étude théorique¹⁶ a pour but de mettre en place le formalisme mathématique permettant d’estimer la valeur du champ magnétique à l’intérieur de la pièce à chauffer¹⁷. Nous mettons également en évidence que, ni le noyau magnétique, ni la pièce à chauffer ne seront magnétiquement saturées pour les puissances considérées. Il s’agit d’une étape essentielle du dimensionnement car une éventuelle saturation du noyau magnétique conduirait celui-ci à perdre ses propriétés magnétiques (en particulier, une diminution significative de sa perméabilité magnétique), et donc de ne plus permettre une circulation suffisante des lignes magnétiques pour permettre la création de courants de Foucault.

La Fig. 2.12 présente les points de fonctionnement calculés (d’après les paramètres magnétiques estimés de la pièce à chauffer et du noyau magnétique¹⁸) dans les diagrammes $B - H$ de chacun des matériaux. Ces points de fonctionnement indiquent que l’amplitude maximale considérée de l’excitation magnétique ne permet pas aux matériaux magnétiques de ”fonctionner” dans leurs zones respectives de saturation magnétique, ce qui aurait pour effet de diminuer considérablement la perméabilité magnétique et donc de diminuer significativement le pouvoir d’échauffement. Ce pouvoir d’échauffement diminuerait également significativement si l’entrefer (distance d’air entre le noyau et la pièce à chauffer) augmente. La meilleure configuration théorique est celle dans laquelle l’entrefer est quasi-nul. Le circuit magnétique est alors complètement fermé, les pertes magnétiques sont minimisées et le pouvoir d’échauffement est maximal.

16. Travail complet réalisé par M. Olivier Ghibaudo, doctorant équipe MADEA du G2Elab.

17. La démonstration de ce résultat va être proposée dans une soumission d’article de recherche.

18. Quelques données se trouvent dans les Techniques de l’Ingénieur <http://www.techniques-ingenieur.fr/>.

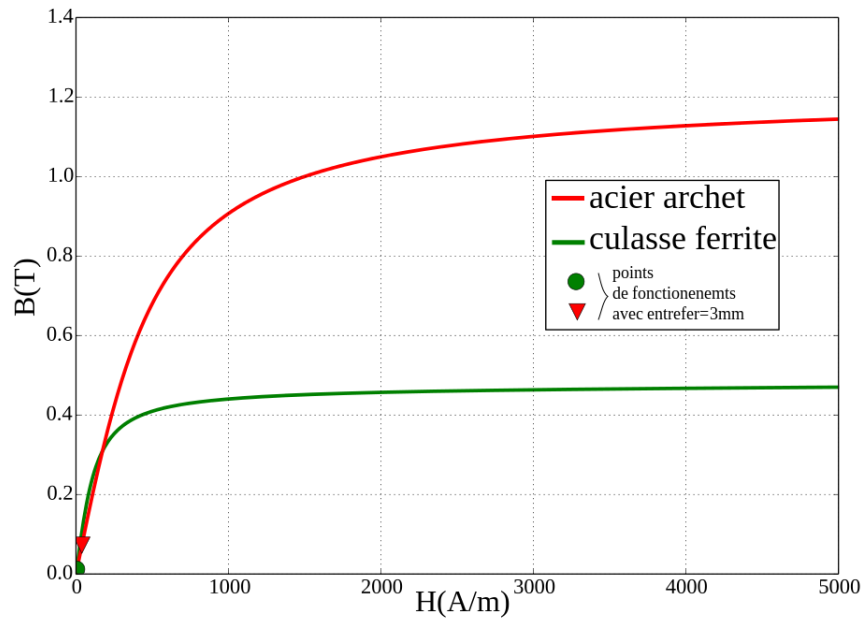


Figure 2.12 – Points de fonctionnement relatifs à l'excitation magnétique des matériaux dans le diagramme $B - H$.

Simulations FEMM Un exemple de simulation, que nous présentons Fig. 2.13, présente le schéma de deux bobines d'induction en regard de la pièce à chauffer. Nous simulons les extrémités du "U" sans noyau magnétique afin d'évaluer la répartition des ligne de champ magnétique à l'intérieur de la pièce à chauffer. La Fig. 2.14 montre que la magnitude du champ est relativement constante à l'intérieur de la pièce à chauffer ce qui implique une répartition plutôt homogène *a fortiori* des courants de Foucault. L'ajout d'un noyau magnétique dans la simulation ajouterait un gain de champ magnétique à l'intérieur de la pièce.

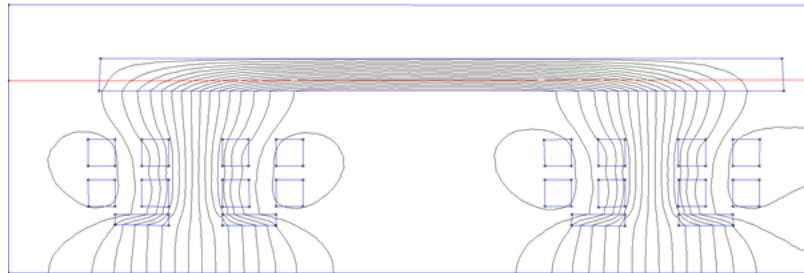


Figure 2.13 – Montage à deux bobines d'induction pour la simulation du champ à l'intérieur de la pièce à chauffer.

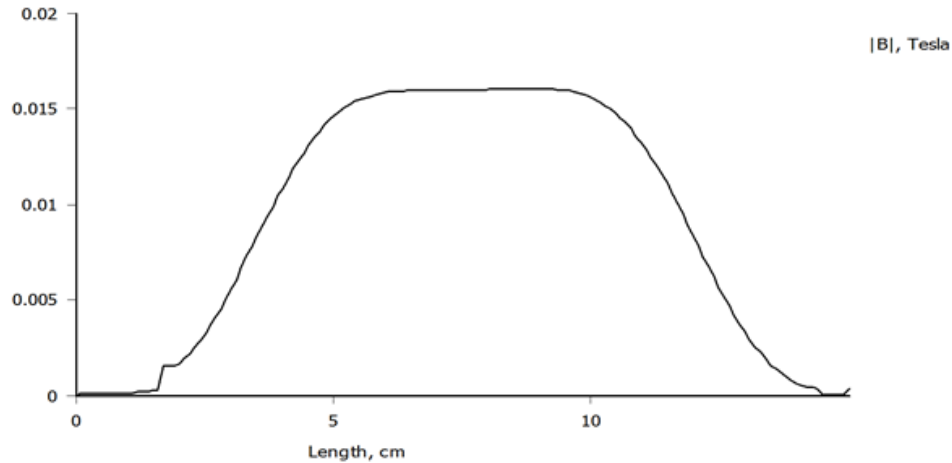


Figure 2.14 – Niveaux d’induction magnétique correspondants au circuit magnétique (Fig. 2.13) en coupe horizontale sur la ligne rouge.

2.4.3 Comparaison qualitative des configurations

L’usage de bobines d’induction de profil plat, bobinées en spirale, et qui sont situées en dessous de la pièce à chauffer exploitent les propriétés qu’ont les inducteurs de pouvoir magnétiser les pièces métalliques à distance. L’exemple typique est celui de la casserole pour laquelle la bobine d’induction, typiquement de forme plate et placée en dessous, est de diamètre similaire au diamètre du fond de la casserole. La présence de ferrites est souvent nécessaire afin de concentrer et donc d’amplifier le champ magnétique au voisinage de la pièce à chauffer.

Lorsque les dimensions de la pièce à chauffer sont très grandes, il est toujours possible d’augmenter le nombre de spires de la bobine de manière à ce que le champ magnétique puisse couvrir une grande majorité de la surface de la pièce (utilisation d’une bobine plate de grand diamètre lorsque la pièce est très volumineuse). Cette augmentation du nombre de spires augmente le champ magnétique généré, mais implique également une élévation de l’impédance de la bobine d’induction qui tend à fortement diminuer le courant magnétisant, à mesure que le nombre de spires augmente. De telles bobines d’induction nécessitent donc un dispositif d’alimentation qui puisse générer de fortes tensions électriques, nécessaires à l’obtention de forts courants électriques. Ces fortes tensions sont difficilement accessibles pour des applications mobiles à partir de sources de tension de type batterie (cf. les caractéristiques électriques § 2.2). De plus, compte-tenu du nombre de spires, un fort courant engendre nécessairement des pertes par effet Joule dans la bobine inductive qui va donc chauffer en conséquence. Des solutions techniques, comme l’usage de fil de Litz, permettent d’améliorer la technologie du matériau constituant la bobine inductive afin de diminuer sensiblement les pertes dans le bobinage.

L’inconvénient majeur d’utiliser une bobine d’induction plate de grand diamètre, éventuellement munie de ferrites, est une circulation des lignes de champ magnétique principalement dans l’air ce qui engendre des pertes magnétiques et finalement diminue l’efficacité de l’échauffement de la pièce à chauffer (schéma de principe Fig. 2.15, à gauche et Fig. 2.16). Dans le cas du noyau magnétique, puisque la pièce à chauffer est placée à proximité immédiate du noyau, alors la circulation des lignes de champ s’effectuera majoritairement dans la pièce à chauffer, ce qui contribue grandement à améliorer le pouvoir d’échauffement (schéma de principe Fig. 2.15, à droite). Les propriétés phy-

siques des bobines, qui sont enroulées autour du noyau magnétique sont identiques aux propriétés de la bobine plate (problèmes d'impédance si le nombre de spires reste trop élevé), échauffement...).

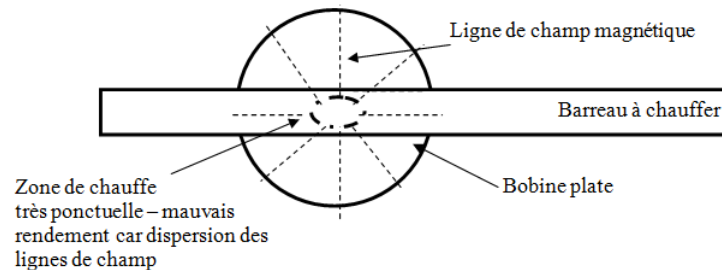
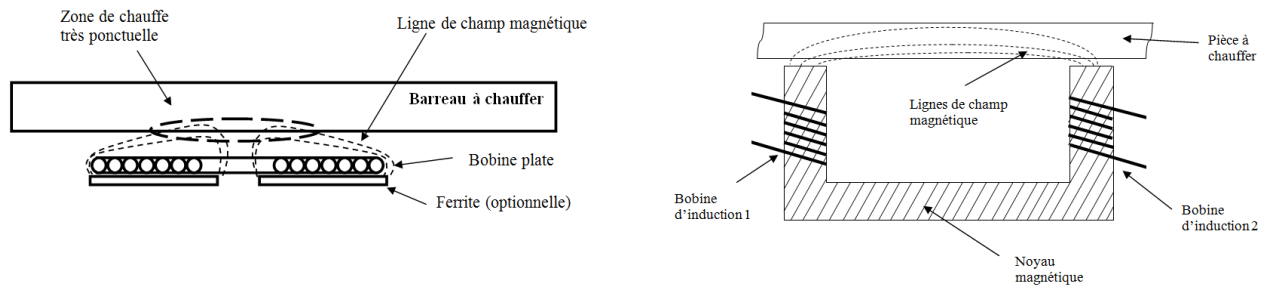


Figure 2.16 – Schématisation de la circulation des lignes de champ magnétique dans le cas de la bobine plate en vue de dessus.

2.5 Modélisation des courants de Foucault

Il existe une formule empirique qui donne la puissance des courants de Foucault en fonction notamment du champ magnétique qui traverse la pièce à chauffer¹⁹.

Compte-tenu du nombre important de paramètres nécessaires pour utiliser cette formule, paramètres qui dépendent notamment de la géométrie de la bobine d'induction et de la géométrie de la pièce à chauffer, il est difficile de pouvoir quantifier la puissance des courants de Foucault générés par le dispositif de dégivrage en fonction des pertes dans le convertisseur de puissance, des différentes pertes magnétiques dans la bobine d'induction... Nous avons tenté une modélisation sous le logiciel Flux 2D d'une association très simple de bobine d'induction élémentaire avec un parallélépipède rectangle en guise de pièce à chauffer, mais les résultats obtenus montrent toute la difficulté et la délicatesse de régler les paramètres du logiciel afin d'obtenir des résultats cohérents.

19. Voir le document [chauffage-par-induction.pdf](http://fr.leonardo-energy.org/wp-content/uploads/2008/01/chauffage-par-induction.pdf), p. 8.

<http://fr.leonardo-energy.org/wp-content/uploads/2008/01/chauffage-par-induction.pdf>

Chapitre 3

Expérimentation du dispositif de dégivrage

3.1 Contexte et objectifs des manipulations

Chronologiquement, nous avons commencé par démonter complètement une petite plaquette de chauffage par induction commerciale, ce qui a permis de fixer le cadre et les besoins en matériel expérimental. Après quelques modifications substantielles de la carte électronique commerciale afin de la conformer au convertisseur de puissance, de classe E^* que nous proposons, nous avons pratiqué plusieurs expériences visant à comparer plusieurs structures de bobines, plusieurs structures de conversion de puissance, afin d'en déduire les conditions les plus favorables pour le pouvoir d'échauffement. Nous mettons également en évidence le pouvoir d'échauffement supérieur que procure la bobine d'induction à noyau magnétique. Enfin, des tests en chambre climatique confirment le fonctionnement du prototype dispositif de dégivrage.

Nous remercions Dr Benoît Sarrazin et M. Alexis Derbey, pour la mise à disposition du matériel expérimental au G2Elab et leur soutien technique.

3.2 Premiers résultats expérimentaux

3.2.1 Démarche expérimentale pour le premier prototype

Ce premier prototype est constitué d'une source à courant continu, d'un petit convertisseur de puissance (pour lequel nous testons à la fois la topologie de classe E^* , qui génère des courants pulsés et un classique onduleur pont-complet à résonance), de la bobine d'induction qui génère le champ magnétique, d'un isolant thermique de 2 cm d'épaisseur et d'une pièce métallique qui représente un morceau de support d'archet (voir photo en Fig. 3.1). Il permet de caractériser et de quantifier l'ensemble des phénomènes thermiques associés aux courants de Foucault pour la fréquence de travail de 10 kHz (sauf mention contraire indiquée dans les graphes). La température ambiante est comprise entre 24,5 et 25 °C. Plusieurs protocoles sont évalués.

- L'évolution de la température en fonction de la puissance électrique à l'entrée du convertisseur, notée P_m , pour différents types de bobines en considérant un seul type de pièce métallique et pour des courants pulsés (Fig. 3.2).

- L'évolution de la température en fonction de la distance d'éloignement entre la bobine plate et la pièce métallique à puissance donnée (env. $P_m = 200$ W) et pour des courants pulsés (Fig. 3.3).
- L'évolution de la température en fonction de la puissance P_m dans le cas des courants pulsés et de l'onduleur à résonance (qui fournit un courant sinusoïdal) (Fig. 3.4). Bien que le convertisseur qui délivre des courants pulsés demande plus de puissance que le convertisseur à résonance, le domaine de fonctionnement de chaque convertisseur est testé pour un courant allant de 1 à 4 A. L'onduleur à résonance nécessite donc plus de tension pour un courant moindre, tandis que le convertisseur à courants pulsés fournit comparativement plus de courant pour une plus faible tension.
- Un essai de fusion de glace a été mené : la photo de la Fig. 3.5 présente un morceau de glace placé sur une assiette en plastique et la Fig. 3.6 montre l'image thermique du début de fusion au bout de 15 minutes ; la surface de la bande frottement est à environ 60 °C. Nous observons une pellicule d'eau qui se forme en dessous du morceau de glace et qui tend à rendre la glace mobile dans l'assiette.

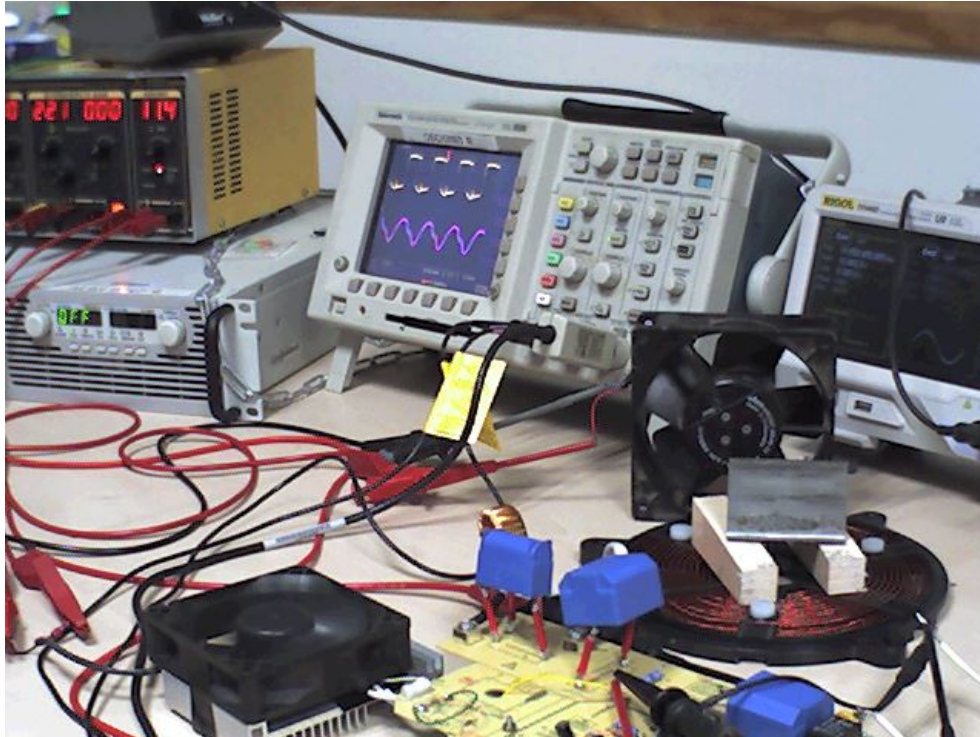


Figure 3.1 – Montage expérimental pour les essais du premier prototype.

Nous avons constaté que l'usage des ferrites est absolument primordial afin de provoquer un échauffement significatif de la pièce métallique. Une rapide dégradation des performances d'échauffement apparaît lorsque le nombre de ferrites n'est pas suffisant ou bien que la disposition des ferrites ne permet pas de canaliser les lignes de champ magnétique correctement dans la pièce à chauffer.

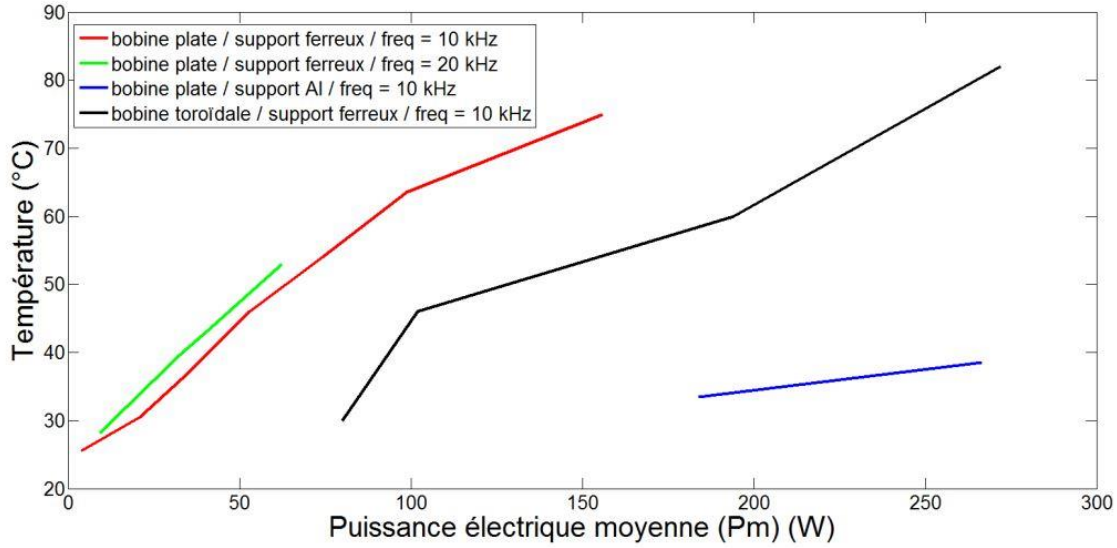


Figure 3.2 – Évolution de la température en fonction de P_m pour différents type de bobines.

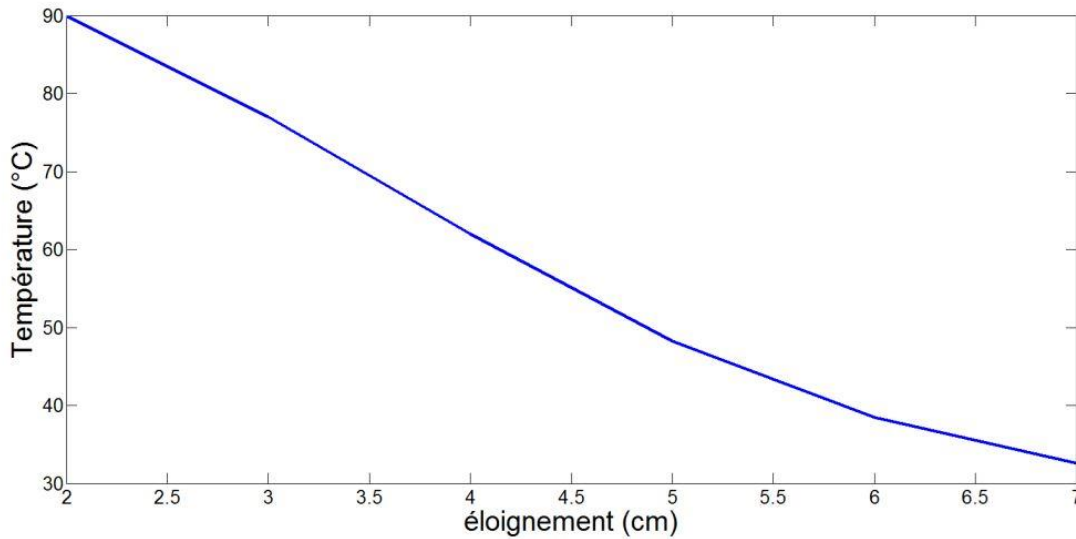


Figure 3.3 – Évolution de la température en fonction de la distance d'éloignement à puissance donnée (env. $P_m = 200$ W).

3.2.2 Premières conclusions

Ces premiers essais mettent en évidence le fait qu'une bobine exclusivement de type circulaire, possédant un certain nombre de spires et ayant suffisamment de ferrites, permet un échauffement significatif de la pièce métallique. Nous avons développé une structure de conversion de puissance qui délivre des courants pulsés et qui n'utilise qu'un seul interrupteur de puissance. La structure de classe E* que nous proposons est plus compacte que l'onduleur à résonance et nécessite une plus faible tension d'alimentation, donc potentiellement plus adaptée vis-à-vis des sources de tension disponibles en toiture de train. De plus, nous constatons que la puissance P_m , nécessaire pour

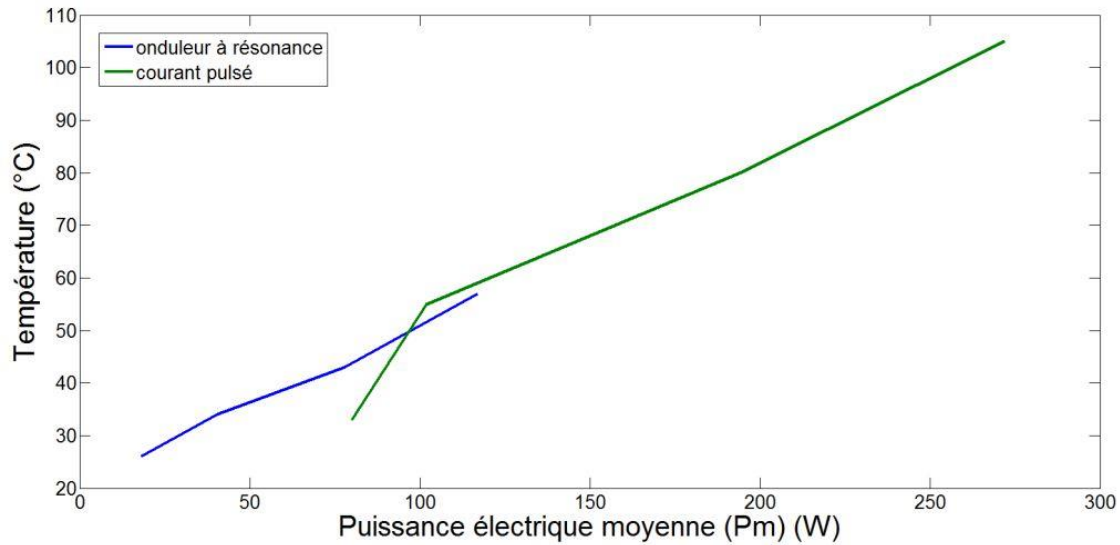


Figure 3.4 – Évolution de la température en fonction de P_m relativement à la topologie du convertisseur de puissance.



Figure 3.5 – Essai de fusion de glace - un morceau de glace est placé sur une assiette en plastique au dessus de la bande de frottement.

produire un échauffement de la pièce métallique qui tend vers 80-90 °C pour un faible éloignement, est d'une centaine de watts (cf. Fig. 3.3), donc relativement faible...

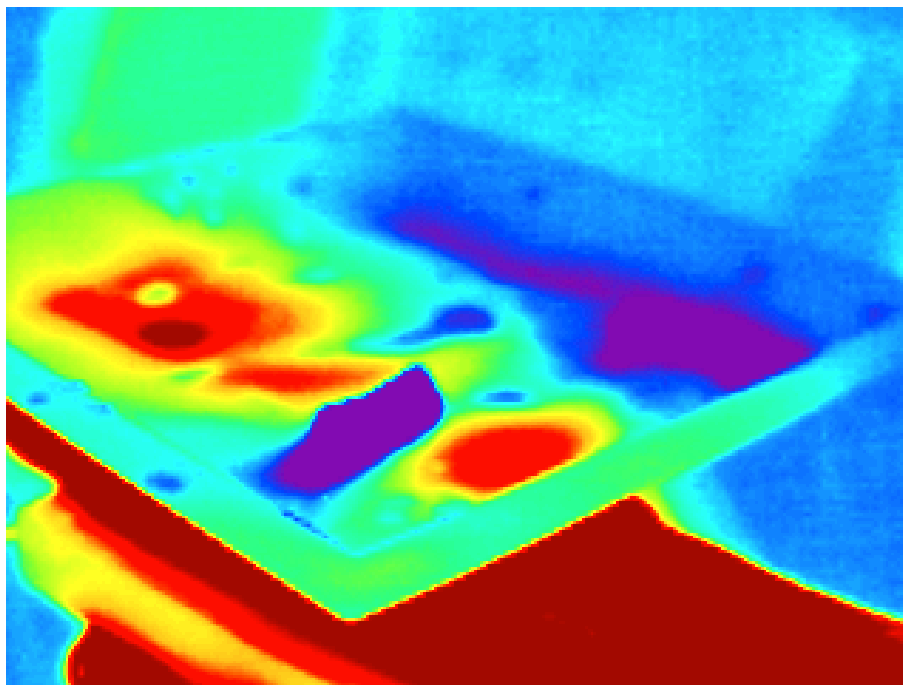


Figure 3.6 – Image thermique du début de fusion de glace au bout de 20 minutes.

3.3 Structures de bobines testées

Outre la bobine plate, décrite dans le chapitre précédent, nous avons testé d'autres formes de bobines, qui peuvent présenter éventuellement de meilleures qualités du point de vue mécanique. Parmi les essais réalisés, quelques configurations ont été intéressantes à étudier.

- **La bobine en tore ou bobine "donut"** (Fig. 3.7) constituée de 20 spires de câble électrique classique réparties en toron de manière grossière. La répartition des ferrites est identique au cas de la bobine plate. Le principal avantage de cette bobine est qu'elle est très facile à réaliser, mais ses performances sont nécessairement moins bonnes que la bobine plate. Une application de cette bobine est de la placer au sein d'un circuit magnétique de fer doux comme le montre la Fig. 3.8.
- **La bobine en ruban de cuivre** (3.9), également d'une vingtaine de spires est constituée à partir d'un ruban de cuivre d'une largeur approximative de 5 cm. Plutôt facile à réaliser, son pouvoir d'échauffement est médiocre et il est nécessaire de maîtriser la distance entre chaque spire.
- **La bobine extra-plate** (3.10), constituée d'un fil de cuivre fin, a pour but de mettre en évidence le comportement de l'impédance à 10 kHz en fonction du type de câble et du nombre de spires. Étant donné que le bobinage est dans ce cas assez précis, la superposition de plusieurs bobines a notamment permis de vérifier les variations de champ magnétique (via mesure de la réponse thermique) en fonction du nombre d'étages de la bobines (cf. § 2.4.1.2) et de la répartition $n(k)$ des spires par étages (ex. Fig. 3.11).
- **La bobine rectangulaire** (3.12) dont la forme épouse la forme de l'archet. Aucun pouvoir d'échauffement significatif n'est mesuré. En particulier, les symétries habituelles des formes circulaires de bobines ne sont pas préservées dans ce cas, ce qui ne permet pas une circulation

efficace des lignes de champ magnétique.



Figure 3.7 – Bobine en tore.

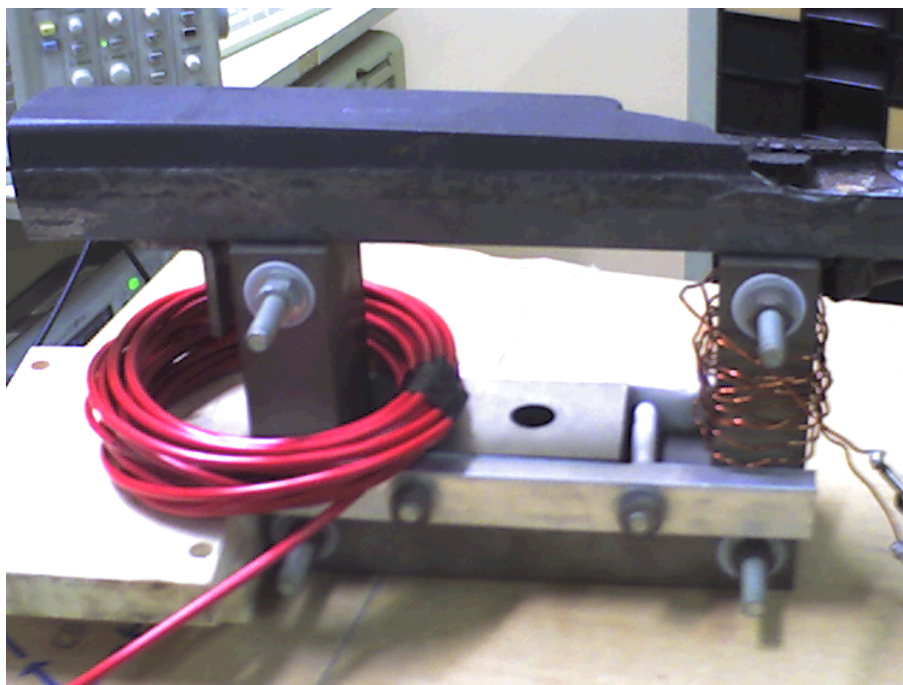


Figure 3.8 – Bobine en tore incluse dans un imposant noyau magnétique de fer doux.

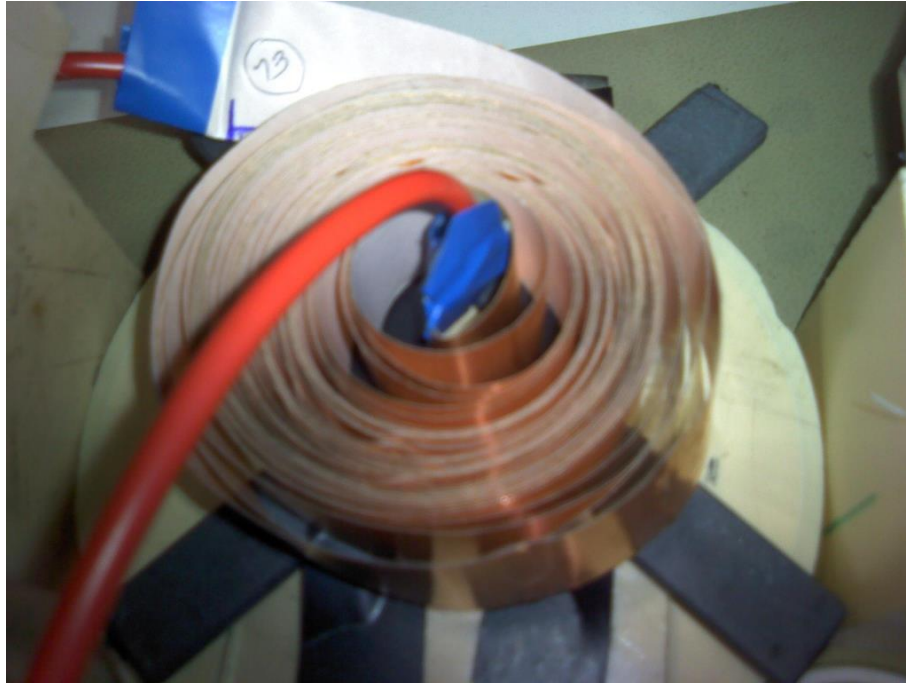


Figure 3.9 – Bobine en ruban de cuivre.

La bobine en forme de tore est la bobine qui se rapproche le plus de la bobine plate en terme de performances.

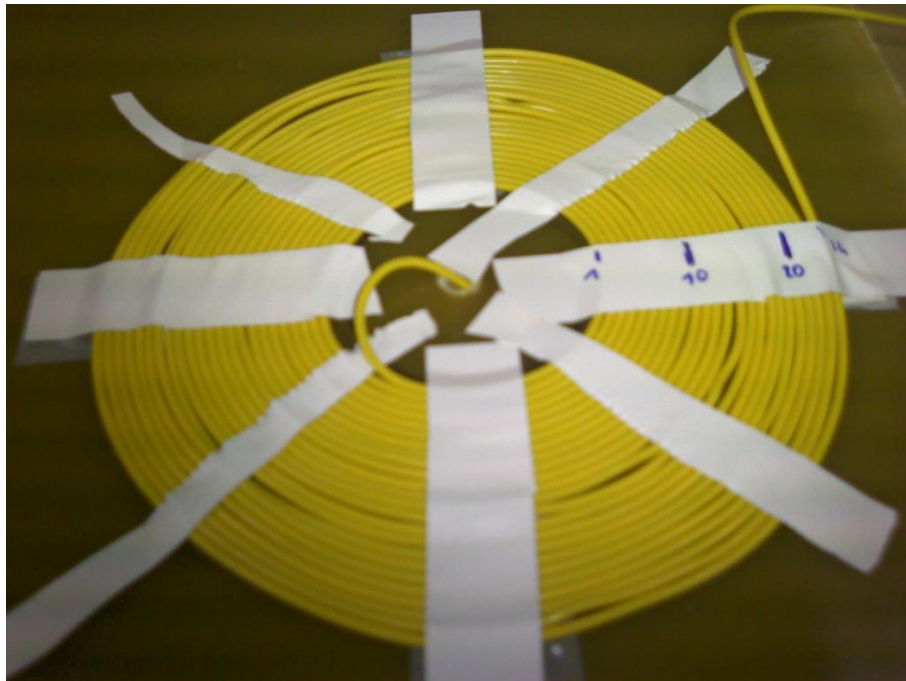


Figure 3.10 – Bobine ultra-plate.

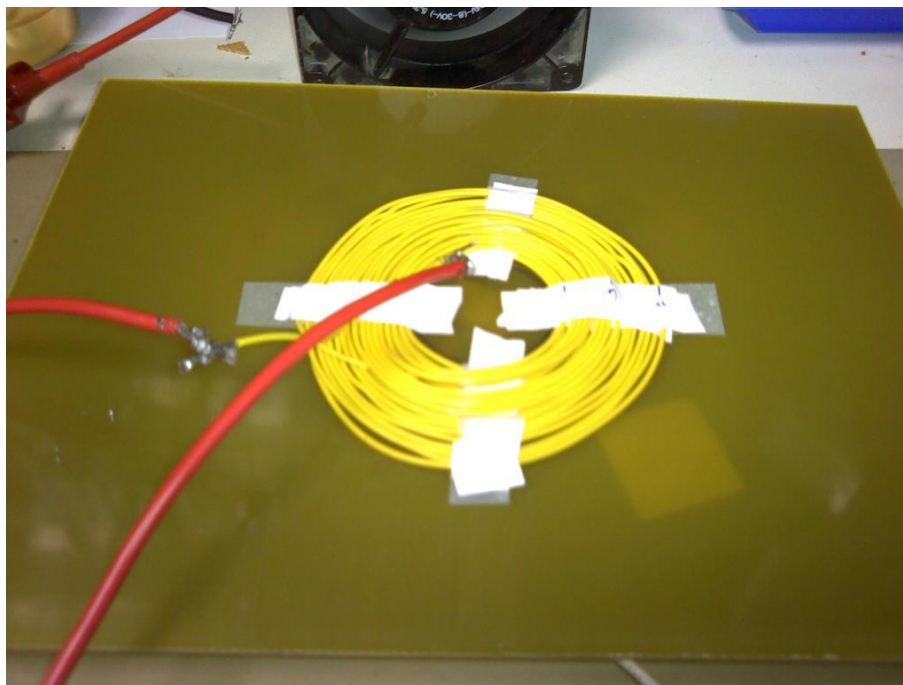


Figure 3.11 – Empilement de bobine ultra-plate.

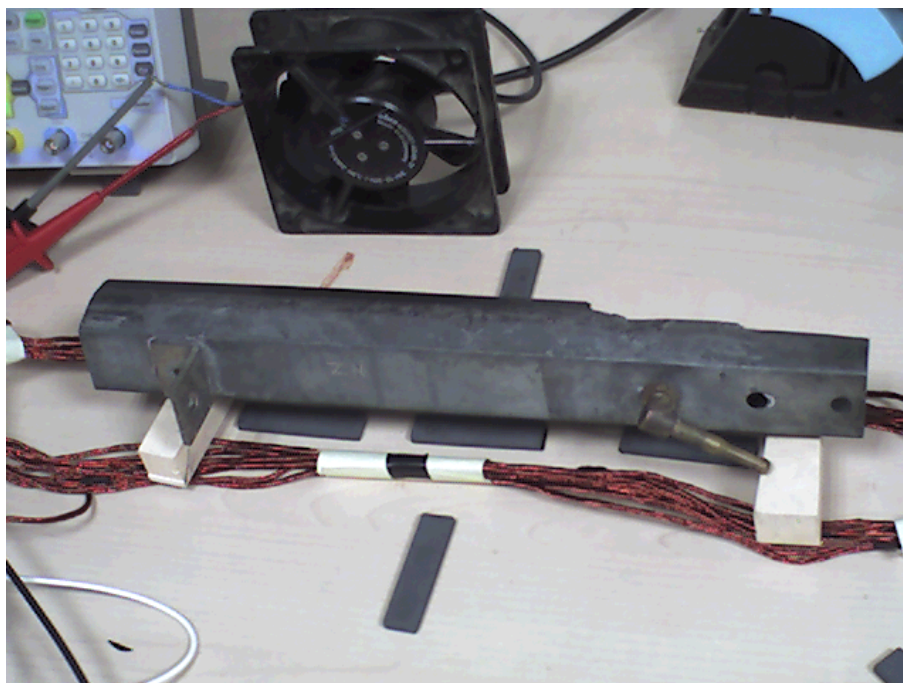


Figure 3.12 – Bobine plate large.

3.4 Essais de dégivrage sur archet complet

L'objectif est de mesurer le pouvoir d'échauffement du dispositif de dégivrage d'archet dans un environnement placé successivement à température ambiante et en conditions climatiques. Les mesures sont effectuées à l'aide de sondes thermiques et par imagerie thermographique¹. Une caméra vidéo permet d'apprécier l'évolution de la fusion de la glace en conditions climatiques. La section 3.4.1 présente quelques éléments relatifs à la mise en place de sondes thermiques de type thermocouple à l'intérieur de la bande de carbone. La section 3.4.2 présente trois essais d'échauffements réalisés à température ambiante pour lesquels nous évaluons les performances de la bobine "plate" et du noyau magnétique en "U". La section 3.4.4 présente des essais réalisés en étuve / conditions climatiques à l'AEF. Nous remercions le personnel de l'AEF, en particulier Mme Anne-Marie Maréchal et M. Pascal Pierlot pour la mise à disposition de l'étuve, l'accueil et le bon déroulement des essais.

3.4.1 Configuration des sondes thermocouple

On fixe 5 sondes de type thermocouple à l'intérieur de la bande carbone, régulièrement espacées de 11 cm et placées à une distance de 3 mm de la surface (Fig. 3.13). En vue de dessus, les extrémités des sondes sont alignées sur l'axe de symétrie longitudinal de la bande carbone (qui mesure 50 mm de largeur) et sont placées à 25 mm du bord longitudinal de la bande carbone.

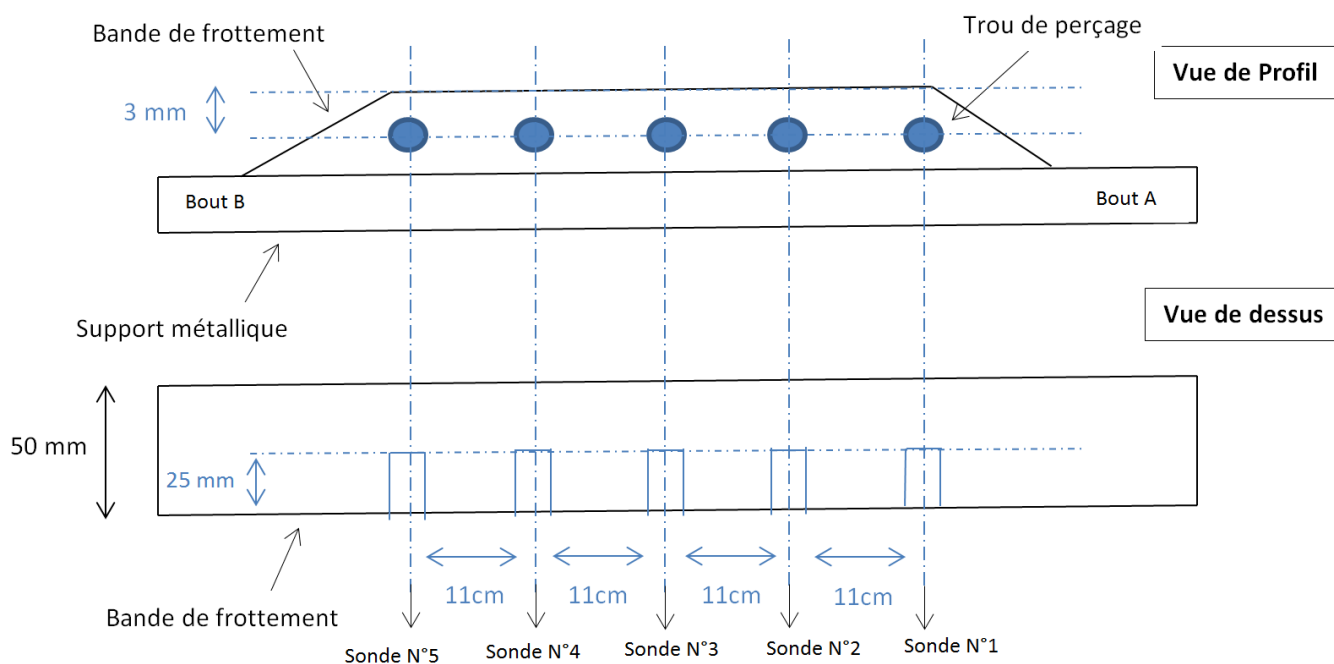


Figure 3.13 – Schéma de perçage pour l'introduction des sondes thermocouple – vue de profil de l'archet. Les sondes, numérotées de 1 (à droite) à 5 (à gauche) sont équiréparties le long de l'archet.

1. Les essais ont été effectués avec M. Pascal Bigeard, agent du CIM, que nous remercions pour sa disponibilité, son efficacité et sa bonne humeur !!

Sont mesurées et enregistrées, avec un enregistreur «LDS / VISION » (Fig. 3.14) : les mesures de température en provenance des 5 sondes, la tension moyenne d'alimentation E et le courant moyen i_L débités par le générateur qui alimente le convertisseur de dégivrage. La puissance moyenne P_{moy} s'écrit : $P_{moy} = E.i_L$.



Figure 3.14 – Appareillage pour l'enregistrement et le traitement des données mesurées.

3.4.2 Essais à température ambiante

Deux bobines d'induction sont placées à équidistance de l'axe de symétrie vertical de l'archet et l'entrefer (distance verticale archet-bobine) est fixé à 1 cm (Fig. 3.15). Les centres magnétiques de chaque bobine sont placés à la verticale des sondes correspondantes.

3.4.2.1 Bobines avec noyau en U

Cas d'un espacement de 2 X 22 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 1 et 5) Pour une puissance P_{moy} (non constante) max. de 98,2 W et une température ambiante de 16-17 °C, la température au centre de l'archet (sonde 3) est de 20 °C et la température en périphérie (sonde 1 et 5) est d'env. 40 °C, au bout de 20 min de fonctionnement (Fig. 3.16).

Cas d'un espacement de 2 X 11 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 2 et 4)) Pour une puissance P_{moy} (non constante) max. de 138 W et une température ambiante de 17-18 °C, la température au centre de l'archet (sonde 3) est de 67 °C et la température en périphérie

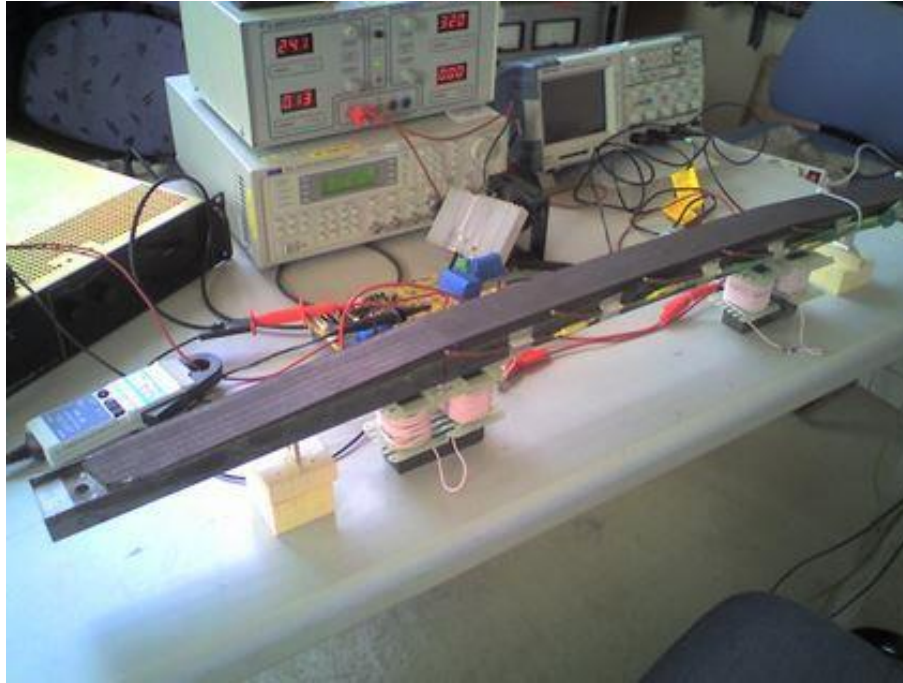


Figure 3.15 – Montage du dispositif de dégivrage avec bobines d'induction montées sur noyau magnétique en U (illustration avec les bobines placées face aux sondes 1 et 5).

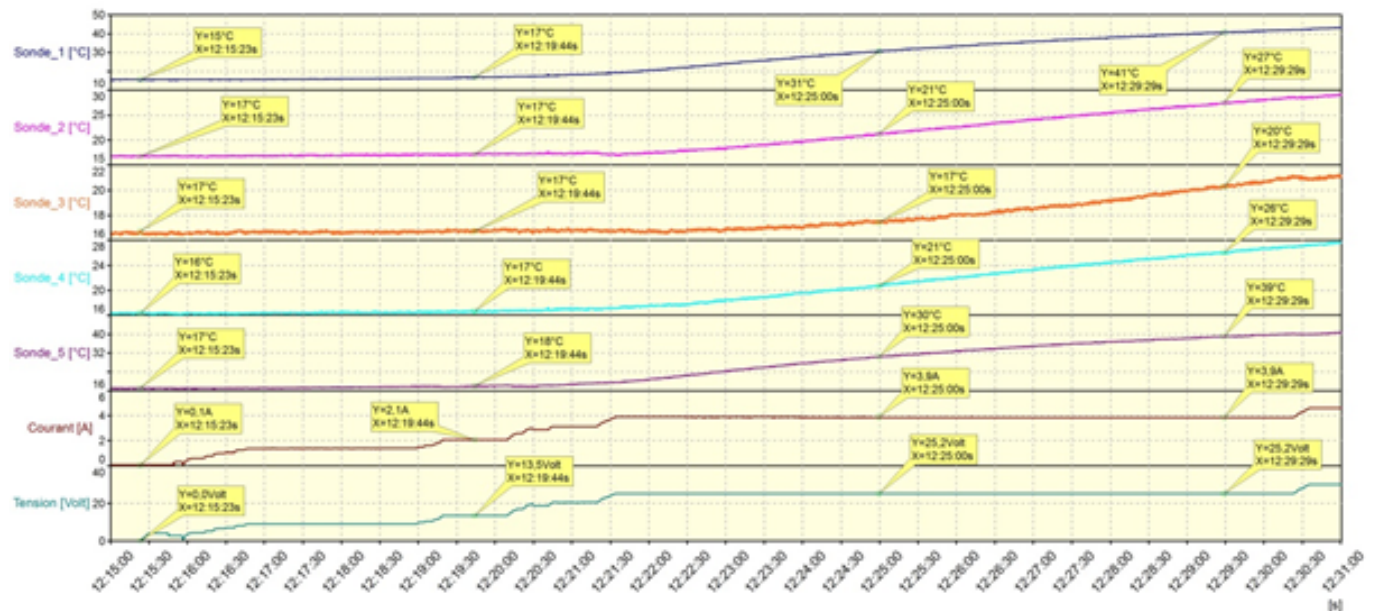


Figure 3.16 – Essai d'échauffement avec espacement de 2 X 22 cm et noyaux en U.

(sonde 1 et 5) est d'env. 44 °C, au bout de 20 min de fonctionnement (Fig. 3.17). L'archet est en inertie thermique pendant les 20 min suivantes.

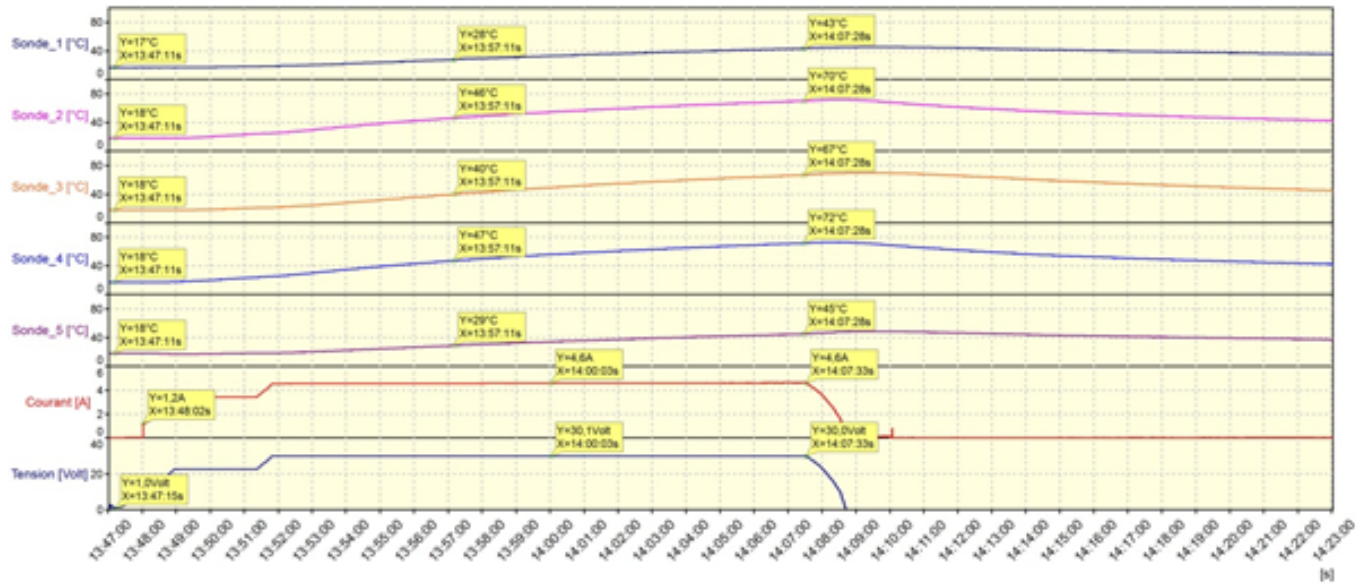


Figure 3.17 – Essai d'échauffement avec espacement de 2 X 11 cm et noyaux en U.

3.4.2.2 Bobines plates de type industrielles

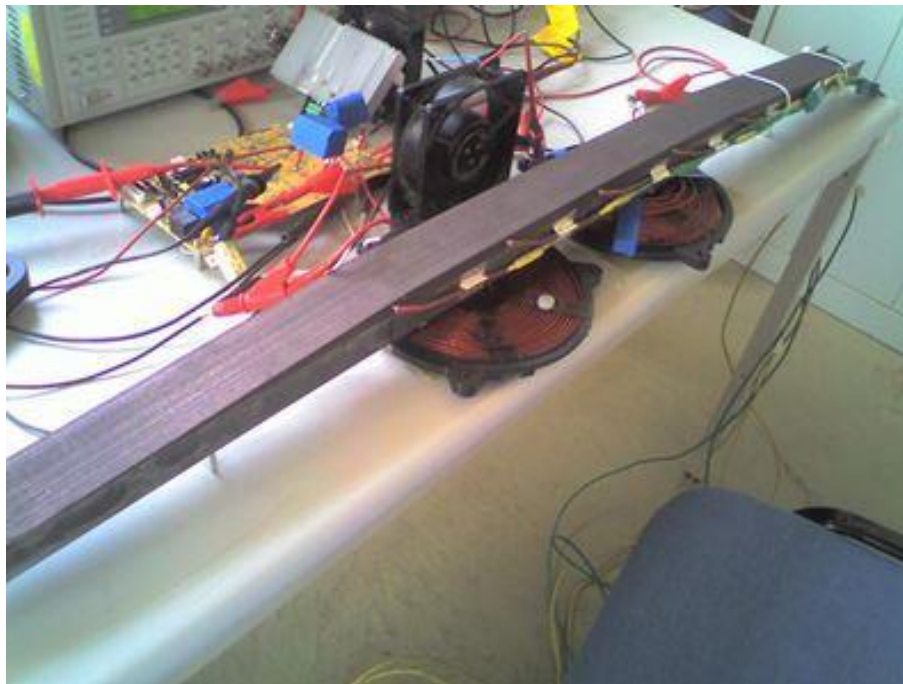


Figure 3.18 – Montage du dispositif de dégivrage avec bobines d'induction montées sur noyau magnétique en U (illustration avec les bobines placées face aux sondes 2 et 4).

Cas d'un espacement de 2 X 11 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 2 et 4) Pour une puissance P_{moy} (non constante) max. de 108 W et une température ambiante

de 19-20 °C, la température au centre de l'archet (sonde 3) est de 50 °C et la température en périphérie (sonde 1 et 5) est d'env. 35 °C, au bout de 20 min de fonctionnement.

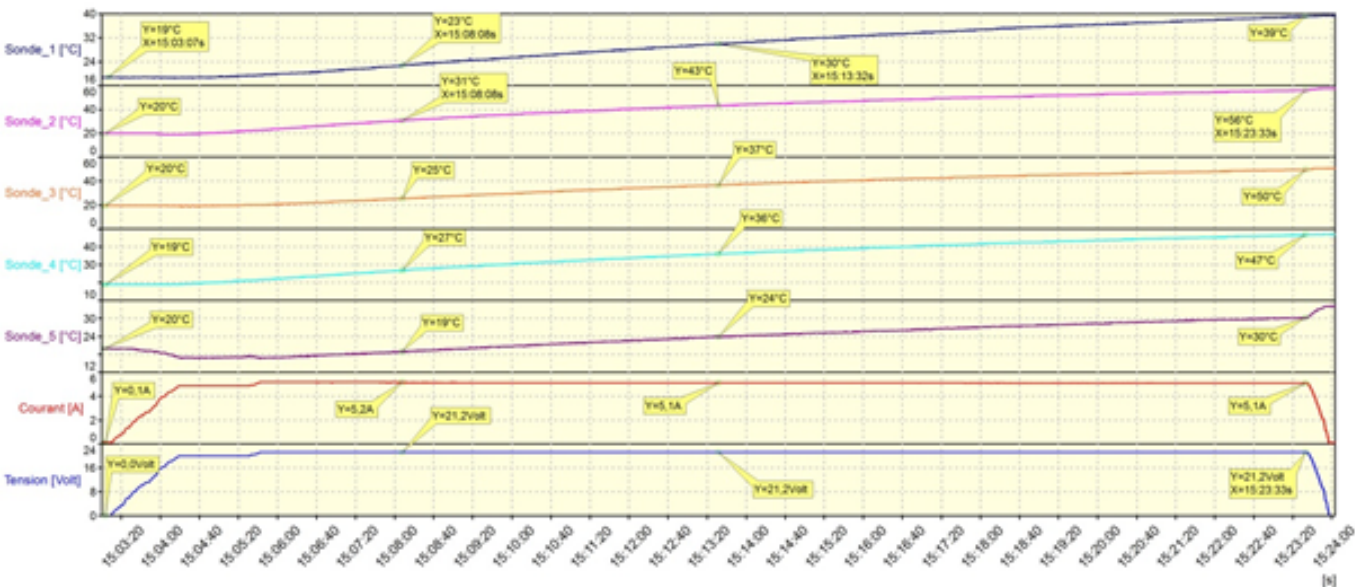


Figure 3.19 – Essai d'échauffement avec espacement de 2 X 11 cm et bobines plates.

3.4.3 Bilan d'efficacité

Le tableau suivant compare les propriétés d'échauffement des configurations testées. Les valeurs en rouge indiquent des valeurs critiques : soit la température est trop basse (ligne 1), soit le courant est trop élevé (ligne 3) ; les valeurs en vert indiquent de très bonnes performances en température.

type bobine	E (V)	i_L (A)	P_{moy} (W)	T sonde 3 (°C)	T sonde 1 et 5 (°C)
Bobine en U - 2X22cm	25,2	4,2	98,2	26	40
Bobine en U - 2X11cm	30	4,6	138	67	44
Bobine plate - 2X11cm	21,2	5,1	108	50	35

3.4.4 Essais en conditions climatiques

La Fig. 3.20 montre une vue globale du banc d'essai avec l'étuve. Les Fig. 3.21 et 3.22 présentent respectivement le circuit du prototype du convertisseur de dégivrage et l'archet en place dans l'étuve muni de ses bobines d'induction et de glaçons. Une petite caméra permet de filmer la surface de la bande de frottement 3.23. Les Fig. 3.24 et 3.25 montrent les images thermiques de la bande de frottement au bout de 20 min. Des petits cubes de glace (env. 3,5 cm X 3,5 cm) sont disposés le long de l'archet et on considère un espacement de 2 X 11 cm entre les bobines d'induction (face aux sondes 2 et 4). La température dans l'étuve est fixée à -10 °C. La puissance électrique injectée dans le convertisseur de dégivrage est de 28,6 V * 4 A = 115 W. Les références des certificats d'étalonnage de l'instrumentation sont données Fig. 3.26.



Figure 3.20 – Banc d'essai de dégivrage archet à l'AEF.

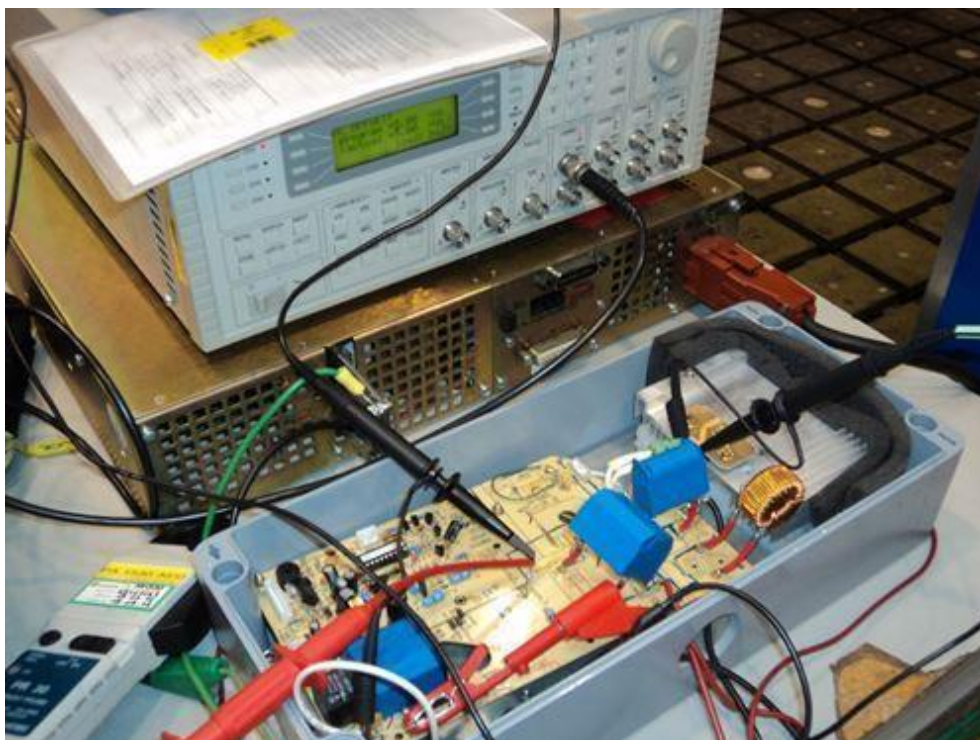


Figure 3.21 – Prototype du convertisseur de dégivrage.

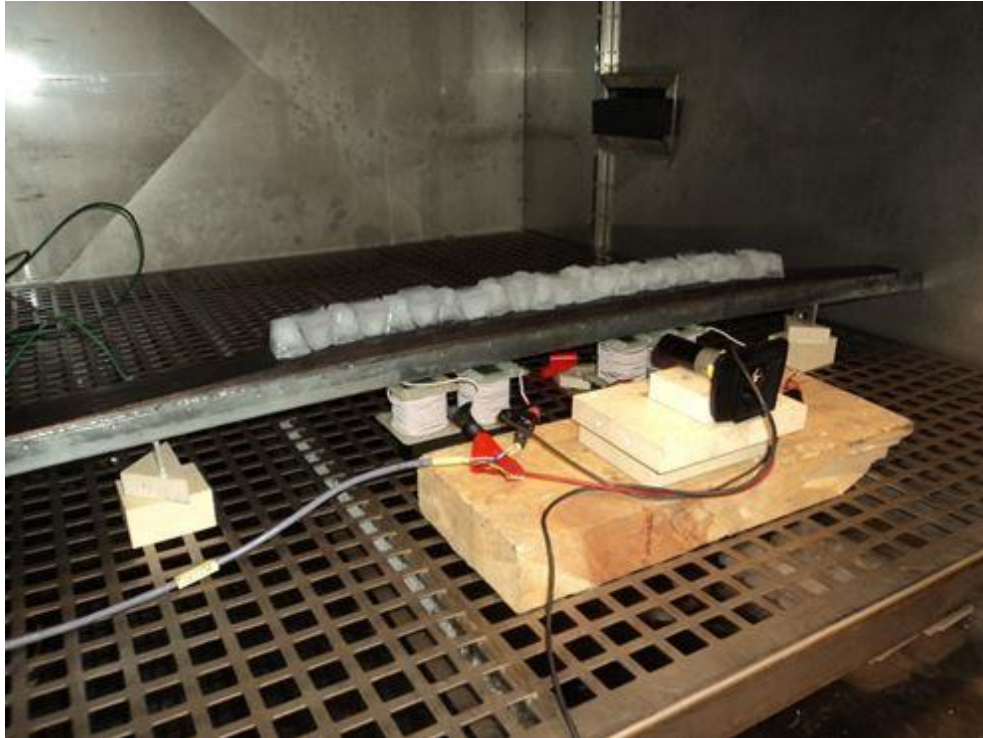


Figure 3.22 – Archet muni de glaçons et système de bobinage avec noyaux en U.



Figure 3.23 – Caméra vidéo à l'intérieur de l'étuve et moniteur de contrôle.

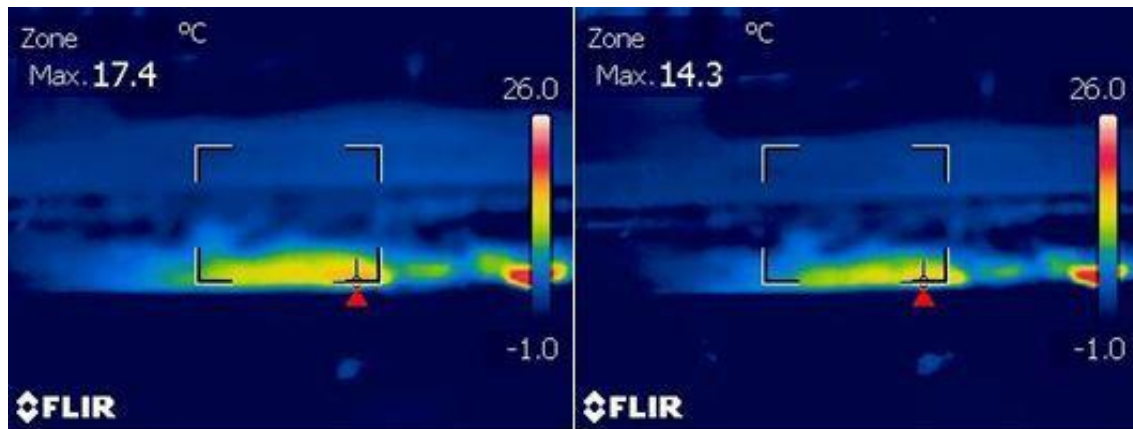


Figure 3.24 – Images IR des zones du support d’archet, qui sont en regard des bobines d’induction, au bout des 20 min - Mesure de la température max. au point de contact magnétique.

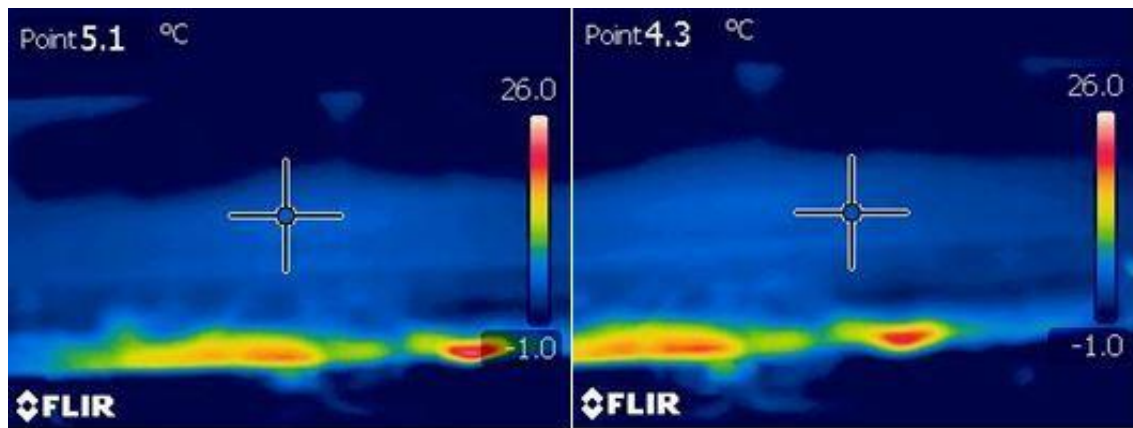


Figure 3.25 – Images IR des zones de la surface de bande de frottement, qui sont en regard des bobines d’induction, au bout des 20 min – Mesure de la température à la verticale des axes magnétiques des bobines.

Désignation	Marque	Type	N° enregistrement	Date de vérification	Date limite d'utilisation	N° du PV	Suivi	Remarques
Caméra thermique	FLIR	T 200	CTH 4881 AED	10/12/2014	10/12/2019	83LM8088	5	
Enregistreur	LDS	VISION	EN 1647 AED	12/11/2014	12/11/2016	68LL0794	2	
Pince amp.	LEM	PR30	PA 0930 AED	19/03/2014	19/03/2016	68LC0261	2	

Figure 3.26 – Références des certificats d’étalonnage des appareils de mesures.

3.5 Points techniques à améliorer

Parmi les points techniques à améliorer, du côté du convertisseur de dégivrage, une étude complète de la CEM du convertisseur et la commande du convertisseur (en vue de réguler le courant d'excitation) restent à définir. Du côté des bobines d'induction, il reste à définir : la disposition la mieux adaptée et le nombre de bobines à disposer en fonction des dimensions de l'archet et de l'encombrement disponible en toiture ; la tenue au choc du noyau et enfin l'espacement minimum envisageable entre le bobinage et l'archet afin de maximiser les courants de Foucault. Le rayonnement des bobines d'induction devra également être minimisé tandis qu'il reste toujours possible d'améliorer la configuration du noyau magnétique, en particulier le choix du matériau constituant le noyau magnétique (augmenter si possible la perméabilité). Enfin une étude vibratoire, la tenue en température, ainsi que l'étude de la mise au potentiel 25 kV du dispositif seront nécessaires. Du point de vue de la fonction de dégivrage en général, il reste à définir la durée maximale d'échauffement envisageable dépendamment des fonctions du train qui consomment de l'énergie au démarrage (comme l'éclairage en cabine) et du dimensionnement des batteries, ainsi que l'étude et l'intégration en cabine de conduite du schéma basse tension de contrôle / commande du système de dégivrage.