



HAL
open science

Conversion de la chaleur fatale de bas niveau en énergie électrique par effet magnétocalorique

Smail Ahmim

► **To cite this version:**

Smail Ahmim. Conversion de la chaleur fatale de bas niveau en énergie électrique par effet magnétocalorique. Autre. Université Paris-Saclay, 2020. Français. NNT : 2020UPAST015 . tel-03079136

HAL Id: tel-03079136

<https://theses.hal.science/tel-03079136v1>

Submitted on 17 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Conversion de la chaleur fatale de bas niveau en énergie électrique par effet magnétocalorique

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

École doctorale n° 575, Electrical, optical, bio-physics and
engineering (EOBE)
Spécialité de doctorat: Génie électrique
Unité de recherche: Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS,
SATIE, 91190, Gif-sur-Yvette, France.
Réfèrent: ENS Paris-Saclay

**Thèse présentée et soutenue en visioconférence totale à L'ENS
Paris-Saclay, le 09/11/2020, par**

Smail Ahmim

Composition du jury:

Elie Lefeuvre Pr, Université de Paris Saclay (C2N), France	Président
Afef Kedous-Lebouc Directeur de recherche, CNRS, Université Grenoble Alpes (G2ELAB), France	Rapportrice
Thomas Mazet Pr, université de Lorraine, France	Rapporteur
Christophe Espanet Pr, Université de Franche-Comté (Institut Femto-st), France	Examineur
Vittorio Basso Chargé de Recherche, Institut National de Recherche en Metrologie (INRiM), Italie.	Examineur
Martino LoBue Directeur de Recherche CNRS, ENS Paris-Saclay (SATIE)	Directeur
Morgan Almanza Maître de conférences à l'ENS Paris-Saclay (Satie), France	Invité

Remerciements

Mes travaux de thèse ont été effectués au laboratoire SATIE de l'ENS Paris-Saclay de 2017 à 2020. Durant mes trois ans de thèse, de nombreuses personnes ont contribué à ces travaux et sans qui cette thèse n'aurait pas pu aboutir. Je souhaite donc exprimer ma gratitude à ces personnes dans ces premières lignes.

Je voudrais commencer par remercier, très sincèrement, mon encadrement. Je remercie mon directeur de thèse, Martino Lo-Bue, et mon encadrant, Morgan Almanza, pour m'avoir formé, accompagné et soutenu tout au long de ce doctorat.

Je remercie aussi, particulièrement, les membres de l'équipe MME qui ont participé à cette thèse. En premier lieu, je remercie Frédéric Mazaleyrat qui a fortement contribué à ces travaux et qui a été précieux par ces judicieuses analyses et conseils. Je remercie également Aleksandr Pasko (Sasha) qui m'a énormément aidé afin de réaliser les mesures au VSM et au DRX. Enfin, je voudrais remercier Vincent Loyau qui a été d'une aide, très précieuse, pour la partie piézoélectrique.

Je profite également, à travers ces lignes, pour remercier mon jury de thèse. Merci pour vos questions, votre honnêteté et vos encouragements.

Merci à Fabien parrain du C2N pour sa précieuse contribution. Je souhaite, également, remercier l'entreprise Vacuumschmelze pour sa générosité. Bien sur, mes remerciements vont, tout aussi bien, à Marc Ardillier et Nicolas Mercadié, techniciens à l'IUT de Cachan, sans qui aucune réalisation n'aura été possible. Loin de moi l'idée d'oublier William Eugène technicien au département EEA à l'ENS Paris-Saclay.

Je remercie tous les doctorants du Satie, qui ont toujours su créer une très bonne ambiance. Merci à Said, Amina, Rita, Taha, Benjamin, Alexiane, Mouhsin, Yoan, Véronika, Antoine et Amina.

Je veux remercier particulièrement quatre doctorants qui ont contribué à ma thèse. Je remercie mon Mehdi pour les impressions 3D, Alex, avec qui j'ai partagé mon bureau, pour ces précieux conseils, Salim pour son aide concernant les simulations en éléments finis sous Ansys et Thomas pour la mesure des tensions piézoélectriques.

Je souhaite également exprimer ma gratitude au personnel du Satie et particulièrement à Sophie Abriet.

Permettez moi, pendant ces quelques lignes, de m'éloigner et traverser la méditerranée pour me rendre en Algérie afin de remercier mes parents, même si je ne les remercierai jamais assez. Je voudrai aussi remercier mes frères.

Un grand merci à mon oncle Saad.

Enfin, je remercie ma femme pour son soutien et pour sa présence.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Récupération de l'énergie et état de l'art	3
1.1 La récupération d'énergie	3
1.1.1 Récupération de l'énergie thermique	6
1.2 Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique	7
1.2.1 Cycle de thermo-génération	11
1.2.2 Etat de l'art des générateurs thermo-magnétiques	13
1.3 Motivations	24
1.3.1 Energie thermique	24
1.3.2 Effet magnétocalorique et matériau du premier ordre	24
1.3.3 Mode de conversion Thermique-Électrique	25
2 Fonctionnement et Modélisation du générateur	27
2.1 Présentation et principe de fonctionnement	27
2.2 Le matériau actif	29
2.2.1 Mesures au DRX	31
2.2.2 Mesures au VSM	31
2.2.3 Mesure de densité	33
2.3 La source magnétique	33
2.3.1 Choix d'aimants	33
2.3.2 La source de champ : Choix de la structure	34
2.4 La poutre	36
2.5 Simulations	36
2.5.1 Détermination des forces magnétiques	37
2.5.2 Détermination de la caractéristique Force-Déplacement d'une poutre	38
2.6 Étude de l'auto-oscillation	39
2.7 Modèle thermo-mécanique	43
2.8 La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur	47
2.8.1 Les bobines	48
2.8.2 Les matériaux piézoélectriques	50
2.9 Conclusions	54
3 Premier prototype : Fabrication, Instrumentation et Études	57
3.1 Fabrication du premier prototype	58
3.1.1 Elaboration de la source de champ et de la source chaude	58
3.1.2 Fabrication de la poutre	61
3.1.3 Caractérisation de la poutre	65
3.1.4 Fabrication de la source froide	65
3.1.5 Système de fixation	68
3.2 Instrumentation : réalisation d'un banc de test	71

3.2.1	Mesure de la température	71
3.2.2	Mesure du déplacement du MMC	72
3.2.3	Mesure des tensions des piézoélectriques	73
3.2.4	Le banc de test	77
3.3	Étude du fonctionnement	78
3.3.1	Étude du cycle mécanique	81
3.3.2	Étude du cycle magnétique M-H	85
3.4	Paramètres affectant le fonctionnement du générateur	87
3.4.1	Effets des conditions aux limites	87
3.4.2	Effet de la température de la source de chaleur	90
3.5	Conclusions	93
4	Deuxième prototype	97
4.1	Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation	98
4.1.1	Présentation du prototype	98
4.1.2	Dimensionnement	99
4.1.3	Réalisation	103
4.2	Étude d'un cycle de fonctionnement	110
4.2.1	Auto-oscillation : déplacement et tensions générées	111
4.2.2	Modèle thermo-mécanique d'un cycle de fonctionnement	113
4.2.3	Étude du comportement mécanique sur un cycle dans la plan F-x	116
4.3	Effets de ΔT et x_0 sur le comportement du générateur	121
4.3.1	Variation de ΔT	121
4.3.2	Variation de x_0	123
4.4	Conclusions	129
	Conclusion générale et perspectives	133
	Bibliographie	137

Table des figures

1.1	Distribution mondiale de la chaleur perdue [1]	5
1.2	Schéma du principe de la récupération de l'énergie thermique	6
1.3	Principe de conversion thermoélectrique. (a) Générateur électrique. b) Dispositif de refroidissement.	7
1.4	Vanne de radiateur auto-alimentée [2]	7
1.5	Schéma du principe de l'effet magnéto-calorique [3]	8
1.6	Les grandeurs magnéto-caloriques de base $\Delta T_{Adiabatique}$ et ΔS définies par les courbes d'entropie $S(T, H_i)$ et $S(T, H_f)$ [4]	9
1.7	Variation de l'aimantation dans un matériau du premier ordre et de second ordre durant la phase de transition [5]	9
1.8	$\Delta T_{Adiabatique}$ en fonction de la température pour différentes compositions de LaFeSi (Calorivac C de Vaccumschmelze) sous 1,5T [6]	11
1.9	Le cycle thermomagnétique dans le plan M-H, l'aimantation en fonction du champ appliqué. Les différentes étapes du cycle avec des illustrations y sont également présentées (figure adaptée de [7]).	12
1.10	Schéma du principe d'un générateur thermo-magnétique direct	14
1.11	Schéma du principe d'un générateur thermo-magnétique indirect [8]	15
1.12	Actuateur d'Ujihara, (b) MMC en contact avec la source froide, (c) MMC en contact avec la source chaude [8].	15
1.13	Générateur de Carliz et al, (a) Prototype final, (b) Schéma du principe [9].	16
1.14	Générateur de Chun et al, Schéma du principe et vue éclatée [10]	17
1.15	Prototypes réalisés, (a) prototype à base de PVDF unimorphe, (b) prototype à base de 8 pvdf bimorphes [10]	18
1.16	Générateur de Gueltig et al (1), (a) le prototype réalisé, (b) Schéma du principe [11]	19
1.17	Générateur de Gueltig et al (2), (a) le prototype réalisé, (b) Schéma du principe [12]	19
1.18	Moteur thermomagnétique de Takahashi [13]	20
1.19	(a) Le MMC, (b) Les régénérateurs, (c) Le modèle 3D du générateur [14]. .	22
1.20	(a) Le générateur, (b) schéma du principe [15]	23
2.1	Conversions directe et indirecte de l'énergie thermique en énergie électrique.	28
2.2	Schéma du principe du générateur. a) Le MMC se déplace vers la source chaude. b) Le MMC est en contact avec la source chaude. c) Le MMC se déplace vers la source froide. d) Le MMC est en contact avec la source froide.	28
2.3	Force magnétique pour deux températures $T_1 < T_2$ et force de rappel en fonction de la position du MMC. Le cycle de fonctionnement est représenté.	30
2.4	Le générateur comme système bistable.	30
2.5	Raffinement de Rietveld des résultats du DRX	31

2.6	Caractéristiques magnétiques $M(T)$ pour un champ de 0,5 T et 1 T et pour un pas de température de $\Delta T=0,5$ K.	32
2.7	Caractéristiques magnétiques $M(H)$ à différentes températures avec un pas de champ $\Delta H=50$ mT.	32
2.8	Dispositif de mesure de densité. (a) mesure de la masse dans l'air, (b) mesure de la masse dans l'eau.	33
2.9	Différentes configurations pour la source de champ magnétique : (a) Structure simple, (b) Structure d'Halbach planaire 1, (c) Structure d'Halbach planaire 2	34
2.10	Résultats de simulation 3D par éléments finis sous Ansys-Maxwell. (1) Le champ magnétique interne d'un matériau soumis aux trois sources magnétiques (2) Les forces magnétiques appliquées par les trois configurations de source magnétiques sur un même matériau	34
2.11	Différentes poutres, (a) Poutre en porte-à-faux avec deux branches, (b) Poutre fixée d'un seul coté, (c) Poutre en porte-à-faux avec plusieurs branches, (d) Poutre en porte-à-faux avec une seule branche.	37
2.12	(a) Schéma du principe de la simulation 3D, (b) Capture de la simulation. Les extrémités de la poutre sont fixées	37
2.13	La force magnétique en fonction de la position du MMC par rapport à la source de champ pour différentes température, de 283 K (10 °C) à 333 K (60 °C).	38
2.14	(a) Schéma du principe de la simulation 3D, (b) Capture de la simulation	39
2.15	Force magnétique pour deux températures ($T_1=18$ °C et $T_2=56$ °C) et force de rappel en fonction de la position du MMC. Le cycle de fonctionnement est représenté.	40
2.16	Auto-oscillation. Système bistable, A et B représentent les deux points d'équilibre (force de rappel = force magnétique), comme la pente de la courbe magnétique est plus raide que celle de la force de rappel, il s'agit de point d'équilibre stable du point de vue mécanique.	40
2.17	Auto-oscillation. Configuration avec plusieurs points stables.	41
2.18	Forces magnétiques aux températures des sources froide et chaude (T_{froid} et T_{chaud}) et force de rappel de la poutre. $T_{froid} = T_{trans-froid}$ (point B) et $T_{chaud} = T_{trans-chaud}$ (point A).	42
2.19	Forces magnétiques aux températures T_{froid} , T_{chaud} , $T_{trans-froid}$ et $T_{trans-chaud}$ et force de rappel de la poutre. $T_{froid} \neq T_{trans-froid}$ et $T_{chaud} \neq T_{trans-chaud}$	42
2.20	Forces magnétiques aux températures T_{froid} , $T_{trans-froid}$ et $T'_{trans-froid}$ et force de rappel de la poutre. La source froide est rapprochée de la source chaude. $T_{froid} < T_{trans-froid} < T'_{trans-froid}$	43
2.21	Système étudié	44
2.22	Résultats du modèle thermo-mécanique : la position et la température du MMC en fonction du temps. 0 mm position de la source chaude, 0,8 mm position de la source froide.	46

2.23	Résultats du modèle. Le cycle dynamique dans le plan vitesse/position. Les points a' et b' correspondent au moment où le MMC se met en contact avec les sources chaude et froide respectivement. Uniquement les deux étapes 1 et 3 sont représentées, les deux étapes isochamps sont représentées par les points a et b où la vitesse du MMC est nulle. La source chaude est à 0 mm et la source froide à 0,8 mm.	47
2.24	Bobine : cas d'étude	48
2.25	Configurations de bobines. L1, bobinage placé autour du MMC. L2, bobinage placé sur le MMC. L3, bobinage placé sous les aimants.	50
2.26	Modes de vibrations piézoélectriques et coefficients de couplages associés [16, 17]	52
2.27	Courbes en large signal en fonction de l'intensité du champ électrique E a) comportement diélectrique de la polarisation P, b) comportement électromécanique de la déformation longitudinale S [18]	53
2.28	Modèle 3D sous Ansys du système étudié. 1, Une poutre en porte-à-faux. 2, le MMC. 3 et 4, des plaques piézoélectriques. Les extrémités de la poutre sont fixées.	54
3.1	Le premier prototype du générateur thermomagnétique, composé d'une poutre en (CuBe ₂) sur laquelle sont collés le MMC et quatre plaques piézoélectriques. Le MMC fait des va et vient entre une source chaude, chauffée par une résistance chauffante, et une source froide, refroidi par un échangeur à eau.	58
3.2	Aimant NdFeB (1,5 × 1,5 × 10 mm ³). Les aimants NdFeB choisis présentent un revêtement de protection en Nickel (Ni-Cu-Ni) d'une épaisseur d'environ 12 μm. [19]	59
3.3	Structure d'Halbach	59
3.4	Collage des aimants, (a) les aimants sont déposés sur une plaque en fer, (b) la colle est appliquée, les aimants sont poussés des deux cotés, (c) la plaque en fer qui transfère la chaleur de la résistance vers les aimants est posée.	60
3.5	La structure finale de la structure d'Halbach collée sur une plaque en fer (100 × 10 × 2 mm ³). Le temps de séchage complet est de 12h à 20 °C.	60
3.6	La structure finale de la source chaude avec la résistance chauffante. (1) résistance chauffante, (2) plaque en fer, (3) structure d'Halbach	61
3.7	Etude de la surface de la structure d'Halbach mesuré à l'aide du mode 3D high resolution d'un microscope numérique	61
3.8	Poutre, (a) après la découpe à jet d'eau (68 × 20 × 0.3 mm ³), (b) après collage du MMC (1) et des plaques piézoélectriques (2).	62
3.9	MMC, LaFeSi (7 × 10 × 0.25 mm ³)	63
3.10	Plaque piézoélectrique à électrodes retournées (10 × 10 × 0.3 mm ³).	64
3.11	Les différentes évolutions de la poutre. (a) poutre initiale sans ouverture, (b) poutre intermédiaire avec ouverture, (c) poutre finale avec ouverture et emplacements pour les goupilles de positionnement.	64

3.12	Banc de mesure de raideur	65
3.13	Caractéristique Force/Déplacement de la poutre. $k=3,26$ kN/m	66
3.14	La source froide ($100 \times 40 \times 2$ mm ³) est constituée d'un plot central qui va permettre d'extraire la chaleur du MMC lorsque celui-ci est en contact. Ce plot est lui même maintenu par une plaque en aluminium, qui porte les goupilles de positionnement de la poutre et des cales en PS pour ajuster la hauteur de la poutre	67
3.15	Assemblage de la poutre, de la source froide et de l'échangeur à eau (aluminium de dimensions 40×40 mm ² [20]). L'échangeur est fixé au support à l'aide d'une colle thermique.	67
3.16	Cryothermostat	68
3.17	Les différentes évolutions de la source froide, (a) la source froide initiale, (b) la source froide avec un plot central collé sur le support, (c) la source froide avec un plot central usiné et inséré dans le support et des goupilles de positionnement.	69
3.18	Méthode 1 de fixation. Utilisation de plaques en PCB.	69
3.19	Méthode 2 de fixation. Utilisation de plaques en aluminium.	70
3.20	Le premier prototype du générateur thermomagnétique.	70
3.21	Mesure des températures, (a) de la source chaude, (b) de la source froide, (c) du MMC.	72
3.22	Capteurs de position, (a) capteur inductif à courant de Foucault, (b) capteur capacitif, (c) capteur laser	73
3.23	Vue d'en haut de la mesure de déplacement du MMC. Le pointeur du capteur (point rouge) de position est pointé sur la poutre, à coté du MMC	74
3.24	Schéma du principe de la mesure de la tension générée par un piézoélectrique à travers une résistance de charge et un AOP (LT1793).	74
3.25	Modèle électrique d'un piézoélectrique connecté à une résistance de charge.	75
3.26	Schéma du principe de la technique SSHI et courbes de tension (V) et de déplacement piézoélectrique (u) [21]	75
3.27	La puissance extraite en fonction de la valeur de la résistance de charge pour les méthodes standard et SSHI en alternatif (AC) et en continue (DC) [21]	76
3.28	Le circuit expérimental qui permet de réaliser la technique Synchronous Electric Charge Extraction [22]	76
3.29	La puissance extraite en fonction de la résistance de charge (1) Méthode d'adaptation d'impédance (méthode standard) et (2) La technique Synchronous Electric Charge Extraction.[22]	77
3.30	Schéma de principe du banc de test	78
3.31	Banc de test, (1) Le prototype, (2) Capteur de position, (3) Circuit d'adaptation pour thermocouple, (4) Résistance de charge et AOP pour la mesure de tension, (5) La carte d'acquisition, (6) IHM.	78
3.32	Déplacement et température du MMC en fonction du temps. Les températures des sources chaude et froide sont de 56 et 18 °C respectivement	79
3.33	Tensions générées par les piézoélectriques en haut droite (HD), haut gauche (HG), bas à droite (BD) et bas à gauche (BG)	80

3.34	Variation de la puissance en fonction de la valeur de la résistance de charge pour les deux plaques piézoélectriques collées sur le haut de la poutre. les valeurs de la résistance de charge utilisées sont : 5 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 220 k Ω , 560 k Ω , 1 M Ω , 10 M Ω et 100 M Ω . La puissance est maximale pour R=10 M Ω pour tous les piézoélectriques sauf celui en haut à droite où R=100 M Ω	80
3.35	Le cycle théorique, aire coloriée entre les courbes des forces simulées (Éléments finis 3D) à 20 et 55 °C (courbe rouge (1) et la courbe bleu en pointillés (3)), la courbe verte est la force de rappel de la poutre. Les 4 étapes de fonctionnement sont représentées. la source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0.8 mm. A et B sont les points où le MMC s'éloigne des sources de chaleur	82
3.36	Déplacement mesuré. La source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0,8 mm. Un point d'inflexion à 0,14 mm est montré dans la sous figure. .	83
3.37	Vitesse du MMC au cours de son déplacement. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement. E_c est l'énergie cinétique associée à la vitesse maximale.	83
3.38	La force totale appliquée sur la partie mobile, extrapolée de sa masse et de la mesure de déplacement, en fonction de la position du MMC pour les étapes 1 (courbe rouge) et 3 (courbe bleu en pointillés). Les sections I, II, III, IV concernent la courbe rouge (étape 1) et sont décrites dans le texte.	84
3.39	Cycle thermodynamique dans le plan M-H. Les lignes discontinues : Courbes d'aimantations isothermes (température dans la légende), mesurées à l'aide d'un VSM. Cycle simulé (flèches rouges) prenant en compte le champ interne durant les étapes 2 et 4. $\Delta T_{adiabatique} = 0.1$ °C et 0.2 °C durant les deux étapes 1 et 3. Cycle de Brayton (flèches jaunes) : le champ appliqué durant les deux étapes 4' et 2' sont 0,27 T et 0,65 T.	85
3.40	Isothermes mesurées entre 18 °C et 56 °C (lignes pointillées colorées); le cycle rose est le cycle de fonctionnement du TMG, extrapolé des mesures sur le prototype. Le cycle noir et vert entre 18 °C et 56 °C est le cycle de fonctionnement simulé du TMG.	86
3.41	Déplacement du MMC en fonction du temps : en bleu, avec fixation libre, en noir fonctionnement normal. Le déplacement total est plus important dans le cas d'une fixation libérée. La position de la source chaude est 0 mm. Les températures des sources chaude et froide sont de 56 °C et 18 °C respectivement.	88
3.42	Vitesse du MMC au cours de son déplacement. Traits en pointillés : fonctionnement normal, traits pleins : Fixation libérée. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement.	89
3.43	Déplacement du MMC en fonction du temps après application d'une pression variable sur la fixation de gauche. La position de la source chaude est 0 mm. Les températures des sources chaude et froide sont de 56 et 18 °C respectivement.	90

3.44	La distance parcourue par le MMC, à partir de la source chaude, en fonction de ΔT . La température de la source chaude est fixée à 56 °C et la température de la source froide varie. Pour une variation de température de 1,6 °C on enregistre une variation de la distance parcourue de 0,18 mm.	91
3.45	Résultats de simulations 'résolution de l'équation de la dynamique sous Matlab'. La vitesse du MMC en fonction de la position dans le cas d'un équilibre thermique. y est le point d'équilibre stable où le MMC s'arrête. La source chaude à 0 mm et la source froide à 0,8 mm.	92
3.46	Puissance électrique de sortie en fonction de ΔT avec la température de la source chaude fixée à 56 °C et la température de la source froide qui varie.	92
3.47	La fréquence en fonction de ΔT . La température de la source chaude est fixée à 56 °C tandis que la température de la source froide est variée.	93
4.1	Équilibre stable du MMC entre les deux sources chaude et froide	97
4.2	Schéma de principe du deuxième prototype du générateur thermo-magnétique. Ce prototype se compose d'une source chaude, d'une source froide et d'une poutre à base de deux buzzers piézoélectriques collés l'un à l'autre.	98
4.3	Le buzzer piézoélectrique. La partie jaune : laiton, la partie blanche au milieu est la céramique piézoélectrique avec son électrode.	99
4.4	Schémas du principe de la Poutre à base des buzzers piézoélectriques. Les deux buzzers sont inversement collés l'un à l'autre à travers un anneau.	99
4.5	Différentes configurations de la poutre, (a) avec buzzers sans découpe, (b) avec buzzers découpés en '+', (c) avec buzzers découpés en '+' et collage décalé de 45° et (d) avec buzzers découpés sous forme de croix pattée.	100
4.6	Schéma du principe de la simulation sous Ansys qui vise à déterminer la force de rappel pour un déplacement imposé.	101
4.7	Résultats de simulations en grandes déformations. Force de rappel des quatre configurations ainsi que les forces magnétiques simulée à 16 °C et 52 °C en fonction de la position du MMC par rapport à la source chaude (0 mm).	101
4.8	Résultats de simulations. (a) Contraintes sur l'ensemble du buzzer, la limite élastique du laiton (90 MPa) n'est pas dépassée, (b) contraintes sur la céramique piézoélectrique, la limite élastique de la céramique (50 MPa) n'est pas dépassée sauf dans les zones de contact avec le MMC ce qui est normal.	102
4.9	Le dessin technique de la configuration (d) avec les différentes dimensions en mm. L'épaisseur du laiton est de 0,18 mm et celle de la céramique est de 0,2 mm.	103
4.10	Buzzer piézoélectrique découpé sous forme de croix pattée en utilisant la découpe à jet d'eau.	104
4.11	Collage de deux buzzers piézoélectriques à travers un anneau en CuBe2 de diamètres interne de 63 mm et externe de 65 mm.	104
4.12	Collage du MMC sur l'ouverture au niveau de la céramique présente sur la face supérieure de la poutre.	105

Table des figures

4.13	Collage d'un anneau en aluminium de rayon interne de 3 mm et externe de 4 mm, sur la face inférieure de la poutre, à travers lequel l'ensemble est fixé sur un support rigide.	105
4.14	La poutre réalisée est collée sur un support en aluminium qui permet de rigidifier l'ensemble et de manipuler la poutre sans risquer de la déformer. .	106
4.15	Côté inférieur du support de la poutre, l'ouverture permet de refroidir le MMC par contact direct. Les ouvertures aux extrémités du support vont nous permettre de placer la source chaude.	106
4.16	Banc de test pour la mesure de la raideur de la poutre. La force est appliquée via des masses alors que le déplacement du MMC est mesuré par un capteur.	107
4.17	Résultats de mesures de la raideur, mesure 1 (courbe bleu) : $k=8$ N/mm et mesure 2 (courbe rouge) : $k=8,5$ N/mm. A 0 mm la poutre est au repos.	107
4.18	Forces magnétiques simulées à 16 °C et à 52 °C et les courbes des forces de rappel, mesurée et simulée, en fonction de la position du MMC. 0 mm étant la position de la source chaude.	108
4.19	L'ensemble poutre+support collés sur la source froide composée d'une plaque en acier, d'un échangeur à eau collé à cette plaque et d'une vis qui se met en contact avec le MMC.	109
4.20	La source froide vue d'un autre angle. La vis qui refroidit le MMC est visible.	110
4.21	Schéma explicatif de la source froide. Trois cas sont représentés, a) pas de contact thermique entre la vis et le MMC, b) Contact présent, la poutre à sa position au repos, c) contact présent, la poutre est précontrainte.	110
4.22	La mesure de déplacement du MMC. Le pointeur du capteur de position (point rouge) est pointé sur la céramique piézoélectrique à proximité du MMC.	111
4.23	Déplacement du MMC en fonction du temps. La fréquence de fonctionnement est de 0,41 Hz. La source chaude est à 0 mm et la source froide à 0,48 mm.	112
4.24	Comparaison entre le déplacement mesuré dans le cas du prototype 2 (courbe rouge) avec celui du prototype 1 (courbe bleu). La source chaude à 0 mm.	112
4.25	La tension générée par la céramique piézoélectrique supérieure.	113
4.26	Les forces magnétiques aux températures des sources chaude et froide 52 et 16 °C et la force de rappel de la poutre en fonction de la position du MMC. A partir du point A F_{mag} à 18 °C $>$ F_r , à partir du point B $F_r >$ F_{mag} à 45 °C.	115
4.27	Déplacement mesuré et simulé. Les étapes 2 (contact avec la source chaude) et 4 (contact avec la source froide) se confondent pour des valeurs de l de 18 μ m et 21 μ m respectivement. La source froide à 0,48 mm et la source chaude à 0 mm.	115
4.28	Déplacement mesuré et celui issu du modèle pour $l= 8$ μ m. Les résultats montre qu'on pourrait avoir une fréquence de 1 Hz en diminuant l	116

4.29	Le cycle théorique, aire coloriée entre les courbes des forces simulées (Éléments finis 3D) à 18 et 45 °C (courbe rouge (1) et la courbe bleu (3)), la courbe verte est la force de rappel de la poutre. Les 4 étapes de fonctionnement sont représentées. la source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0,48 mm. A et B sont les points où le MMC s'éloigne des sources de chaleurs (points de commutation)	117
4.30	Déplacement mesuré. La source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0,48 mm. Les points A et B correspondent à la commutation (MMC s'éloigne des sources de chaleur.	118
4.31	La vitesse du MMC en fonction de son déplacement. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement. La source chaude est à 0 mm.	119
4.32	La force totale appliquée sur la partie mobile, extrapolée de sa masse et de la mesure de déplacement, en fonction de la position du MMC pour les étapes 1 (courbe bleu) et 3 (courbe rouge). La source chaude est à 0 mm.	119
4.33	La puissance électrique en fonction de ΔT . Le maximum de puissance est de 2 μW pour $\Delta T=34$ °C.	121
4.34	Le déplacement total du MMC en fonction de ΔT . La valeur de la précontrainte $x_0 = 0,15$ mm. Le déplacement total prend son origine à la source chaude, pour $\Delta x = 0$ mm le MMC reste collé à la source chaude. La source froide est à 0,4 mm.	122
4.35	La fréquence de fonctionnement du MMC en fonction de ΔT . La valeur de la précontrainte $x_0 = 0,15$ mm.	122
4.36	Schéma de principe de la précontrainte de la poutre. Sans précontrainte (au repos) la poutre n'applique aucune force sur la vis, avec une précontrainte x_0 la poutre applique une force kx_0 sur la poutre à la position initiale, assurant le contact.	124
4.37	Déplacement du MMC en fonction du temps pour différentes valeurs de précontraintes ' x_0 ' 0,07, 0,19, 0,33, 0,43 et 0,48 mm. Pour $x_0 > 0$ la source froide se rapproche de la source chaude. Les temps d'échange thermique avec les sources froide et chaude t_{ref} et t_{chauf} , respectivement, sont définis comme étant le temps durant lequel le MMC est en contact avec la source froide et chaude, respectivement. La position de la source froide à 0 mm.	124
4.38	Les temps de refroidissement et de chauffage : temps de contact du MMC avec la source froide et chaude, en fonction de x_0	125
4.39	Le temps que met le MMC pour aller et venir d'une source à une autre sans la prise en compte du temps en contact avec les sources de chaleur.	126
4.40	Déplacement mesuré du MMC en fonction du temps pour différentes valeurs de x_0 , à savoir, 0,07 mm, -0,13 mm, -0,93 mm et -1,53 mm. Quand x_0 est négatif il ne représente plus la précontrainte mais la distance entre le MMC au repos et la source froide. Comme le MMC ne se met pas en contact avec la source froide on ne peut pas définir t_{ref} . La source chaude est à 0 mm.	127
4.41	Diagramme vitesse/déplacement pour $x_0 = -1,53$ mm. Dans l'étape trois, les oscillations prennent une forme de spirale dans ce diagramme. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement.	128

Table des figures

4.42 La puissance et la fréquence du générateur en fonction de x_0 128

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques du générateur de Ujihara et al [8]	16
1.2	Caractéristiques du générateur de Carlioz et al [9]	17
1.3	Caractéristiques du générateur à base de 8 pvdf bimorphes [10]	18
1.4	Caractéristiques du générateur de Gueltig et al (1) [11]	18
1.5	Caractéristiques du générateur de Gueltig et al (2) [12]	20
1.6	Caractéristiques du générateur de Takahashi et al [23, 24]	21
1.7	Caractéristiques du générateur de T. Christiaanse et E. Brück [14]	22
1.8	Caractéristiques du générateur de Waske et al [15]	23
1.9	Comparaison entre les différents générateurs	24
2.1	Caractéristiques des différentes familles d'aimants [25, 26, 27].	34
2.2	La limite élastique des différents matériaux [28, 29]	36
2.3	L'énergie produite, durant les étapes 1 et 3, par les trois configurations	50
2.4	Caractéristiques des principaux matériaux piézoélectriques	52
3.1	Caractéristiques du PZT doux PIC 151 [30]	63
3.2	Différents capteurs de température disponibles dans le commerce [31]	71
3.3	Différents capteurs disponibles dans le commerce [32]	73
3.4	Comparaison avec différents travaux présents dans la littérature.	95
4.1	Prototype 2 vs travaux présents dans la littérature.	131

Introduction générale

Dans le monde actuel les sources d'énergies primaires, à savoir, le pétrole, le gaz, le charbon, le nucléaire, etc, sont exploitées de deux façons différentes. La première consiste à utiliser des raffineries pour produire du gasoil, de l'essence et d'autres carburants afin d'alimenter différents moyens de transport et machineries. La deuxième est la production de l'énergie électrique et sa transformation en d'autres types d'énergies à travers différents dispositifs. Ces deux processus présentent, malheureusement, beaucoup de pertes liées à la combustion et au transfert de chaleur. En effet, une étude [1] montre que seulement 28% de cette énergie primaire est vraiment utilisée, le reste est en majorité perdu sous forme de chaleur (échappement et ou convection). La chaleur perdue peut être i) de bas niveau lorsque sa température est inférieure à 100 °C, ces pertes représentent 32,8 % de l'énergie primaire mondiale [1] ii), de niveau moyen pour une température entre 100 °C et 299 °C (10 % de l'énergie primaire mondiale) iii) et de haut niveau pour une température supérieure à 300 °C (8 % de l'énergie primaire mondiale).

La chaleur perdue de bas niveau constitue une source d'énergie importante et gratuite ; récupérer cette énergie permettrait d'alimenter des systèmes autonomes de petites puissances. Les objets connectés représentent à eux seuls environ 200 milliards d'appareils en 2020. Ces dispositifs sont généralement alimentés par des batteries qu'il faudra remplacer à un certain moment ; c'est pour cela qu'il y'a un vrai besoin de sources d'énergie autonomes capables de récupérer une énergie externe, de la chaleur dans notre cas, et la convertir en électricité et alimenter ainsi ces dispositifs.

A une température inférieure à 100 °C, il est impossible d'utiliser les méthodes conventionnelles de conversion de chaleur (turbines), par conséquent on s'intéresse dans ces travaux de thèse à la conversion de cette chaleur en utilisant l'effet magnéto-calorique. L'effet magnéto-calorique est la variation des propriétés thermiques d'un matériaux magnétique suite à l'application/suppression d'un champ magnétique externe dans des conditions adiabatiques. Le but étant de réaliser un générateur capable de convertir une énergie thermique disponible dans une différence de température d'environ 30 °C en électricité. La conversion d'énergie se fait en plusieurs étapes, une conversion de l'énergie thermique à l'énergie magnétique puis de l'énergie magnétique à l'énergie mécanique et finalement l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique.

Ces travaux de thèse sont présentés par quatre chapitres. Le premier chapitre servira d'introduction au contexte de la thèse et traitera trois points principaux : la récupération d'énergie, l'effet magnéto-calorique et pyro-magnétique et pour finir nos motivations. Dans la première partie, récupération d'énergie, on fera la distinction entre la production et la récupération d'énergie, on verra aussi les différentes sources d'énergie présentes dans la nature (éolienne, vibration, etc) et les technologies qui permettent leur récupération. On finira ce point par la récupération de l'énergie thermique. Dans la deuxième partie de ce chapitre, on s'attardera, dans un premier moment, sur l'effet magnéto-calorique et le cycle de thermo-génération qui permet de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique en

passant par l'énergie magnétique puis on passera à l'état de l'art des générateurs thermo-magnétiques. Dans la troisième et dernière partie de ce premier chapitre on parlera de nos motivations tout au long de la thèse.

Le deuxième chapitre permettra au lecteur de comprendre l'architecture de notre générateur et son fonctionnement, à savoir, un matériau magnéto-calorique (MMC) sur une poutre qui se déplace entre une source chaude et une source froide, les deux cycles dynamique et thermo-dynamique effectués simultanément par le MMC seront abordés. Certaines des parties qui composent le générateur, à savoir, le matériau magnéto-calorique, la source de champ et la poutre, seront traitées avec un maximum de détails, le but est d'expliquer ce que nous voulons faire et pourquoi nous le faisons. Les simulations qui servent à déterminer les forces qui interviennent dans notre système, à savoir, la force magnétique appliquée sur le MMC par la source de champ d'un côté et la force de rappel de la poutre de l'autre. On s'attardera par la suite sur l'étude de l'auto-oscillation, on commencera par définir le terme 'auto-oscillation' lui même avant de passer à la détermination de la raideur de la poutre afin d'avoir un système mécanique avec deux points d'équilibre (bistable), le premier au niveau de la source froide et le deuxième au niveau de la source chaude. On introduira la température de transition qui sera distinguée de la température de la source de chaleur, l'effet attendu de la variation de cette température et de la distance entre les deux sources de chaleur sera discuté. Le modèle thermo-mécanique nous permettra de lier les deux cycles dynamique et thermo-dynamique et ainsi de développer les équations qui régissent le comportement thermo-mécanique d'un générateur thermo-magnétique parfait. Le dernier point concerne l'étude de la conversion de l'énergie mécanique à l'énergie électrique, elle consiste à comparer, via des simulations, les performances des bobines et des matériaux piézoélectriques dans des conditions similaires.

Dans le troisième chapitre, on entrera dans le vif du sujet avec la fabrication, l'instrumentation et l'étude d'un premier prototype. On présentera de façon détaillée l'étape de fabrication du premier prototype avec toutes ces parties. Ensuite, on s'attardera sur l'instrumentation ou la réalisation d'un banc de test pour mesurer la température du MMC, sa position et les tensions produites par le transducteur. Le générateur auto-oscille, les résultats de mesures seront présentés et discutés. Par la suite, les études mécanique et magnétique (M-H) d'un cycle de fonctionnement seront abordées. Pour finir, sera étudié l'effet des conditions aux limites de la poutre et la température de la source de chaleur sur le comportement mécanique du générateur. La comparaison entre ce premier prototype et ceux présents dans la littérature clôturera ce chapitre.

Le chapitre quatre abordera la réalisation et l'étude d'un deuxième prototype qui se veut plus performant que le premier. L'expérience acquise durant l'étude du premier prototype nous a permis de designer et de dimensionner ce prototype de façon plus efficace. Dans une première partie on présentera ce deuxième prototype, son dimensionnement ainsi que sa réalisation. Dans une deuxième partie, seront présentés les résultats de mesures (déplacement et tensions). Le déplacement mesuré sera comparé au déplacement issu du modèle thermo-mécanique. Dans la même partie une étude dans le plan F-x du comportement mécanique du générateur sera également présentée. Dans une troisième partie on s'attardera sur les effets de la température des sources de chaleur et de la précontrainte de la poutre sur les performances de ce prototype.

Récupération de l'énergie et état de l'art

Sommaire

1.1 La récupération d'énergie	3
1.1.1 Récupération de l'énergie thermique	6
1.2 Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique	7
1.2.1 Cycle de thermo-génération	11
1.2.2 Etat de l'art des générateurs thermo-magnétiques	13
1.3 Motivations	24
1.3.1 Energie thermique	24
1.3.2 Effet magnéto-calorique et matériau du premier ordre	24
1.3.3 Mode de conversion Thermique-Électrique	25

1.1 La récupération d'énergie

Contrairement à la production d'énergie, la récupération d'énergie vise à récolter le maximum d'énergie de différentes sources disponibles gratuitement. En effet, dans la production d'énergie, l'énergie primaire (pétrole, gaz, etc.) doit être extraite, ce qui présente un coût. Dans la récupération d'énergie on vise des énergies primaires disponibles et gratuites, à savoir les sources solaire, éolienne, thermique, vibratoire, cinétique, chimique, etc.

L'énergie récupérée est utilisée pour alimenter différents systèmes de petites ou grandes puissances. Dans le cas des systèmes autonomes qui sont généralement de petites puissances (1mW), on se pose la question de la meilleure source (solaire, vibratoire, thermique, etc.), cette source doit être disponible de façon continue. Quand il s'agit de produire l'énergie pour le réseau (grandes puissances), on s'intéresse à toutes les sources d'énergie disponibles. Le coût, dans le cas de la récupération d'énergie, est lié au système de récupération uniquement, du moment où l'énergie primaire est gratuite.

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie les plus disponibles sur terre. Depuis un certain nombre d'années, on arrive à récupérer cette énergie sur de grandes échelles en installant des parcs photo-voltaïques. De nos jours les panneaux photo-voltaïques qu'ils soient petits ou grands sont omniprésents, sur les toits des maisons, sur les toits des camping-cars et même sur des calculatrices ou des powerbanks qui permettent de charger son téléphone quand on aime bien se perdre dans la nature.

L'éolienne est l'autre source d'énergie qui, à l'état actuel, est utilisée à grandes échelles grâce à l'installation de fermes éoliennes. Cette source d'énergie, bien que performante à grandes échelles, est peu utilisée à petites échelles où on préfère généralement utiliser des panneaux solaires (sur le toit des maisons, etc.).

L'environnement dans lequel nous vivons actuellement est rempli de vibrations. En effet, à l'échelle humaine, un être humain, dans n'importe quel contexte produit des vibrations, que cela soit lié à ses déplacements ou à son métabolisme (coeur). A l'échelle d'une ville, les gens se déplacent à pied, en voiture, en transport en commun (Bus, Métro, Trains, etc.) ou en vélo, ajouter à cela les divers travaux et activités industrielles, tout cela constitue une source de vibrations plus ou moins disponible dans le temps.

Ces vibrations peuvent-être converties en énergie électrique en utilisant les bons dispositifs. Encore une fois, on ne peut pas garantir la disponibilité de l'énergie vibratoire, mais on peut la contrôler dans une certaine mesure selon l'application. Par exemple les vibrations d'un pont sont totalement aléatoires rapporté à une journée, par contre la fréquence des vibrations due à une activité physique (marche à pied, etc.) peut-être contrôlée [33]. Trois types de systèmes permettent de récupérer l'énergie vibratoire :

- Les dispositifs piézoélectriques [34], [35] : l'application d'une contrainte mécanique sur un matériau piézoélectrique fait apparaître des charges électriques aux bornes de ce dernier. Un dispositif contenant un matériau piézoélectrique peut directement convertir les vibrations en énergie électrique.
- Les dispositifs électromagnétiques [36] : le déplacement d'un composant magnétique (aimant) par rapport à un bobinage génère une tension aux bornes de ce dernier par la loi de Faraday. Un dispositif qui reproduit cet effet en utilisant une source de vibration externe, convertie directement cette énergie en énergie électrique.
- Les dispositifs électrostatiques [37] : une énergie électrique est produite lorsqu'on modifie la distance entre deux électrodes d'un condensateur chargé. Un dispositif qui exploite une source de vibration afin de reproduire le même effet produira l'énergie électrique.

A l'heure actuelle, cette technologie n'est pas arrivée à maturité comme les énergies solaire et éolienne et est plutôt dans la phase de la recherche.

L'énergie thermique est l'autre forme d'énergie disponible en grandes quantités dans notre environnement. Cette énergie se présente sous forme de chaleur et pas de travail. Presque tous les dispositifs industriels, machines ou appareils électriques produisent de la chaleur. La production de l'énergie électrique dans différentes centrales est basée sur une source de chaleur, ainsi, de la chaleur est inévitablement perdue.

La conversion de l'énergie thermique, à large échelle et pour de grands écarts de température entre la source chaude et la source froide (>100 °C), est un sujet bien connu. Cette technologie est utilisée dans tous les types de centrales électrique que ce soit des centrales à charbon, à vapeur, à gaz ou nucléaires.

Dans la conversion de l'énergie thermique (applications de génération) on contrôle la température afin d'être le plus efficace possible. En effet, il faut travailler sous un rapport $\frac{T_{froid}}{T_{chaud}}$ le plus petit possible, ce qui implique une température T_{chaud} la plus grande possible. Dans la récupération de l'énergie thermique on a moins la possibilité de contrôler les températures des sources de chaleurs.

1.1. La récupération d'énergie

Une étude a été faite par Forman et al. [1] sur l'énergie thermique perdue dans les différents secteurs d'activités (transport, industrie, résidentiel, commercial) dans le monde en 2012. La figure 1.1 résume les résultats de l'étude. La figure montre que uniquement 28 % de l'énergie primaire (pétrole, charbon, etc.) consommée est vraiment utilisée dans les différents secteurs d'activités. Le restant de l'énergie primaire est essentiellement perdue sous forme d'échappement (chaleur). La chaleur est perdue soit sous une haute température ($> 300\text{ °C}$), sous une température moyenne (entre 100 et 299 °C), ou enfin sous basse température ($< 100\text{ °C}$).

La chaleur perdue sous une basse température est de loin la plus présente avec 32,8% de l'énergie primaire mondiale. Il faut signaler qu'à cette température ($T < 100\text{ °C}$) les technologies conventionnelles de la conversion de l'énergie thermique (turbines et groupes d'alternateurs) ne fonctionnent pas. La question qui reste posée, est comment pourrions nous récupérer cette énergie qui est disponible en grandes quantités. Ce point va être l'objet des travaux proposés.

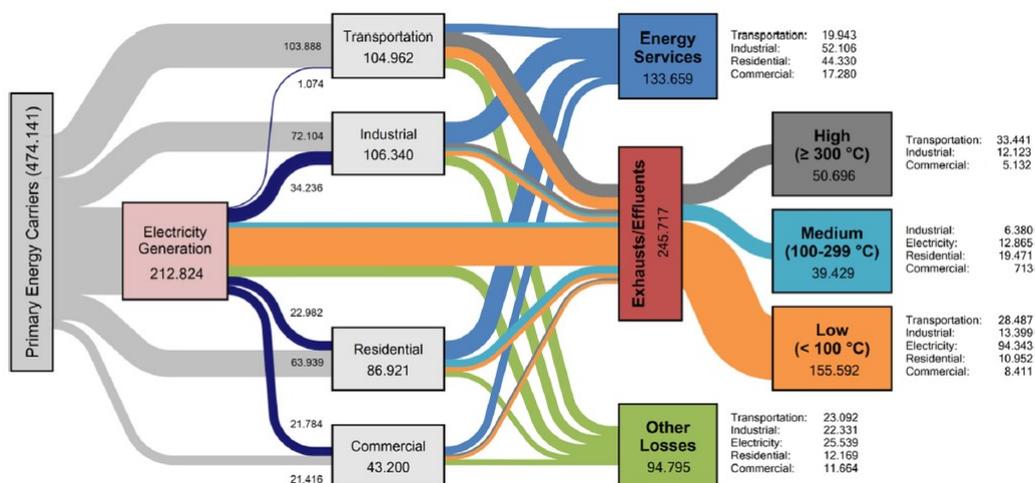


FIGURE 1.1 – Distribution mondiale de la chaleur perdue [1]

Une étude plus récente menée par L'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME) [38] révèle qu'en France, sur l'année 2013, le secteur industriel représentait un gisement de chaleur fatale : i) sous basse température (de bas niveau, $T < 100\text{ °C}$) de 51,6 TWh, soit plus de 17 % de la consommation de l'énergie primaire du secteur, ii) sous moyenne température (entre 100 et 299 °C) de 43,8 TWh, soit 14,4 % de la consommation de l'énergie primaire du secteur et iii) sous haute température ($> 300\text{ °C}$) de 14 TWh (4% de l'énergie primaire). Les enjeux de la récupération de la chaleur fatale sont de taille. Au niveau de l'entreprise cela permettrait de faire un gain économique et d'être plus compétitif, au niveau territorial l'énergie récupérée pourrait être utilisée pour alimenter un bassin de population et de contribuer ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique. Enfin, au niveau national, elle permet d'avoir une indépendance énergétique et de mieux respecter les objectifs environnementaux.

1.1.1 Récupération de l'énergie thermique

La récupération de l'énergie thermique est la récupération de l'énergie associée à une différence de température $\Delta T = T_{chaud} - T_{froid}$ comme le montre la figure 1.2. Le dispositif de récupération de l'énergie va absorber une certaine énergie (Q_{ch}) à la source chaude, une partie (Q_{froid}) est cédée à la source froide et l'autre qui reste est convertie en travail magnétique. Finalement un système de récupération d'énergie de bas niveau n'est qu'une machine thermique classique à bas rendement de Carnot dont l'efficacité est comme suit :

$$\eta_{Carnot} = \frac{\Delta T}{T_{chaud}} \quad (1.1)$$

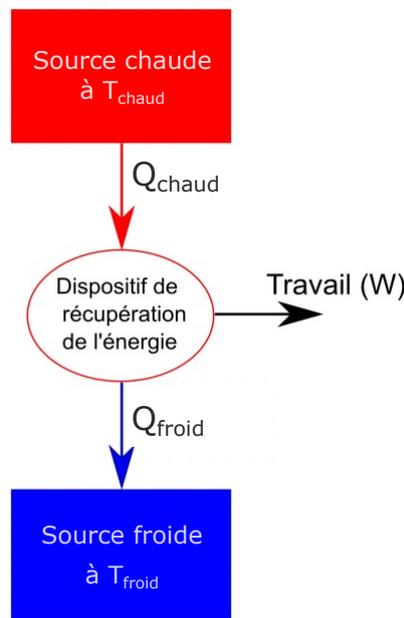


FIGURE 1.2 – Schéma du principe de la récupération de l'énergie thermique

Actuellement, il existe des systèmes qui peuvent convertir directement cette énergie thermique en électricité. Ils utilisent l'effet thermoélectrique qui est la capacité de certains matériaux à convertir directement un flux de chaleur en électricité. Les systèmes de conversion d'énergie thermoélectrique sont généralement composés de plusieurs thermocouples connectés en série, électriquement, et en parallèle, thermiquement (Fig. 1.3). Dans chaque thermocouple, il y a deux semi-conducteurs de différents types : p et n, connectés par un matériau conducteur dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul, par exemple le cuivre (Fig. 1.3). Dans le cas où c'est le flux de chaleur qui provoque un déplacement de charges, on parle de production d'électricité (Fig. 1.3.a). Dans le cas contraire, on parle de refroidissement (Fig. 1.3.b) [39].

Plusieurs grands constructeurs automobiles tels que Volkswagen, Volvo, Ford et BMW ont mis au point des systèmes de récupération thermoélectrique de la chaleur perdue pour améliorer l'économie de carburant de leurs voitures [40].

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

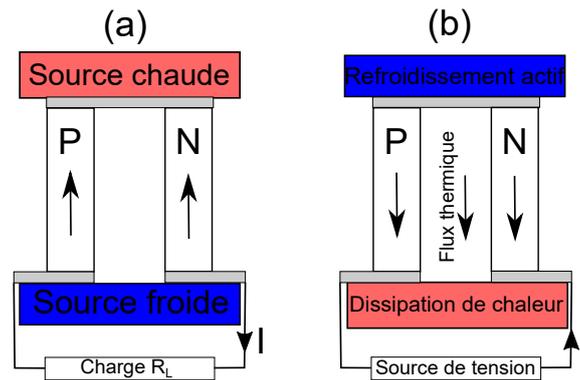


FIGURE 1.3 – Principe de conversion thermoélectrique. (a) Générateur électrique. (b) Dispositif de refroidissement.

Il existe aussi, sur le marché, différents capteurs autonomes destinés aux bâtiments, notamment ceux commercialisés par MicroPelt. La figure 1.4 montre un de leurs produits qui est une vanne de radiateur auto-alimentée qui sert à contrôler la température de la pièce.



FIGURE 1.4 – Vanne de radiateur auto-alimentée [2]

Il existe aussi l'effet pyroélectrique, qui peut être défini comme la manifestation de la dépendance à la température de la polarisation spontanée dans certains solides [41]. Cet effet est un grand volet de la conversion d'énergie en utilisant des matériaux caloriques et plusieurs études s'y intéressent [42].

L'effet magnéto-calorique qui relie les caractéristiques magnétiques d'un matériau à sa température est devenu une opportunité pour la récupération d'énergie depuis que de nouvelles générations de matériaux magnéto-caloriques ont été développés pour des applications de réfrigérations. Cet effet est l'effet que nous allons exploiter pour développer de nouveaux systèmes de récupération d'énergie thermique.

1.2 Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

L'effet magnétocalorique est une variation des propriétés thermiques d'un matériau magnétique à la suite de l'application/suppression d'un champ externe dans des condi-

tions adiabatiques (voir Fig. 1.5). En effet, l'application d'un champ magnétique diminue l'entropie magnétique du fait de l'alignement des moments magnétiques (voir Fig. 1.5). En conditions adiabatiques, la diminution de l'entropie magnétique est compensée par l'augmentation de l'entropie du réseau (augmentation de l'agitation thermique du système) y compris l'augmentation de la température. L'effet étant réversible, l'annulation du champ magnétique dans des conditions adiabatiques entraîne une baisse de la température du matériau [43, 44, 45].

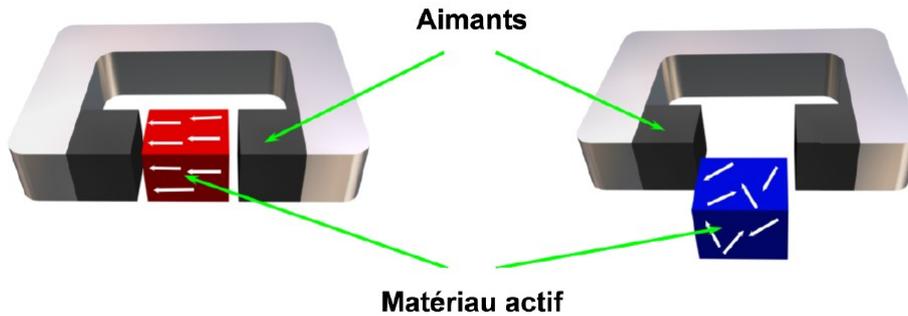


FIGURE 1.5 – Schéma du principe de l'effet magnéto-calorique [3]

L'effet pyro-magnétique est l'effet inverse de l'effet magnéto-calorique : l'augmentation de la température d'un matériau magnétique, cause la diminution réversible de l'aimantation du matériau même, une fois refroidi, il retrouve son aimantation initiale. Ces effets sont maximaux autour de la température de Curie (T_c) des matériaux.

L'effet magnéto-calorique peut être caractérisé par la variation de la température adiabatique $\Delta T_{Adiabatique}$ et la variation de l'entropie isotherme par unité de masse ΔS . La variation de la température adiabatique est définie comme étant la différence de température quand un matériau est initialement soumis à un champ magnétique externe H_i qui évolue ensuite dans des conditions adiabatiques, c'est à dire le matériau étant thermiquement isolé, à une valeur finale H_f . De la même façon on définit la variation de l'entropie isotherme comme la variation de l'entropie dans des conditions isothermes, c'est à dire le matériau étant à l'équilibre thermique avec un thermostat, lorsque le champ externe passe de H_i à H_f (voir Fig. 1.6) [4]. Il n'est pas possible de calculer l'un de ces paramètres à partir de l'autre. Cependant, les deux peuvent être déduits d'une mesure de la capacité calorifique spécifique à champ constant, $C_H(T, H)$ [46]. Dans le cas normal, $\Delta T_{Adiabatique}$ est positif et ΔS négatif lorsque le champ final est plus grand que le champ initial, pour des valeurs de champ de 1-2 T (aimants permanents) $\Delta T_{Adiabatique}$ est généralement de quelques degrés et ΔS est entre 10 et 20 J/kg.K [4].

Un matériau magnéto-calorique est dit du premier ordre ou du second ordre. Un matériau du premier ordre montre une transition abrupte de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique qui se manifeste par une variation discontinue de l'aimantation (et de l'entropie) durant la transition de phase, alors que cette transition est continue dans le cas d'un matériau du deuxième ordre (variation continue de l'aimantation) (voir Fig. 1.7) [5].

L'effet thermomagnétique peut être décrit en utilisant l'énergie libre de Gibbs (G).

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

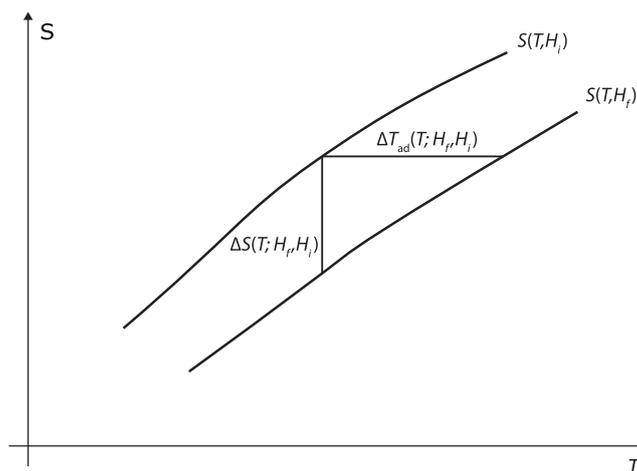


FIGURE 1.6 – Les grandeurs magnétocaloriques de base $\Delta T_{Adiabatique}$ et ΔS définies par les courbes d'entropie $S(T, H_i)$ et $S(T, H_f)$ [4]

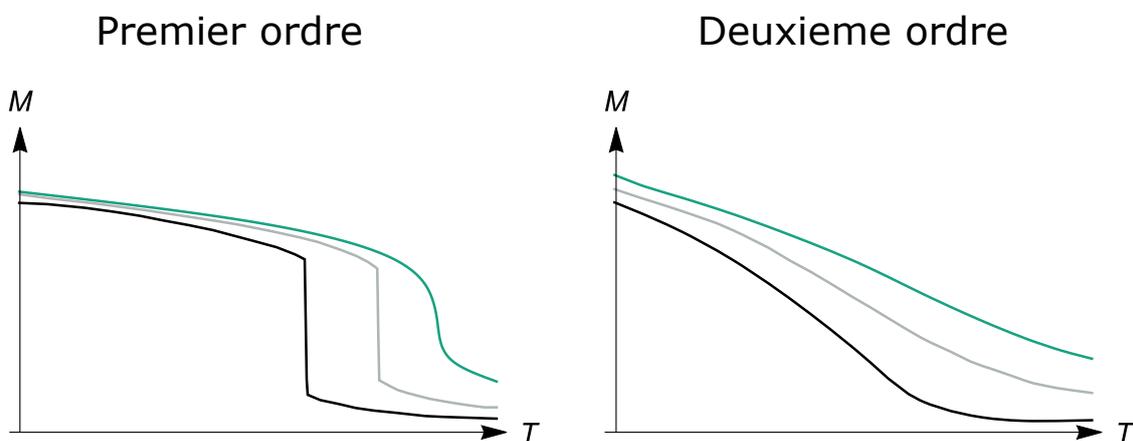


FIGURE 1.7 – Variation de l'aimantation dans un matériau du premier ordre et de second ordre durant la phase de transition [5]

Ce potentiel thermodynamique dépend uniquement des paramètres intensifs comme : la température (T), la pression (P) et le champ magnétique ($\mu_0 H$) [47]. Pour un matériau magnétique sous un champ appliqué, G peut être exprimé comme suit [48, 49, 3] :

$$G = U + PV - \mu_0 MH - TS \quad (1.2)$$

Où M est l'aimantation du matériau (A/m). Comme le matériau qui nous intéresse est un solide, nous négligeons l'effet du volume et la pression autour du matériau est $P < 10^{-6}$ mbar. La différentielle totale exacte de l'enthalpie libre peut s'écrire :

$$dG = \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_H dT + \left(\frac{\partial G}{\partial H} \right)_T dH = -SdT - \mu_0 M dH \quad (1.3)$$

En identifiant les deux cotés de l'Eq. 1.3 on trouve :

$$S = -\frac{\partial G}{\partial T} \quad (1.4)$$

$$\mu_0 M = -\frac{\partial G}{\partial H} \quad (1.5)$$

Les dérivées partielles croisées du second ordre d'une différentielle exacte sont égales [48] :

$$\frac{\partial}{\partial H} \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right) = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial G}{\partial H} \right) \quad (1.6)$$

En dérivant l'équation 1.4 par rapport à H et l'équation 1.5 par rapport à T et selon l'Eq. 1.6, on obtient l'équation de Maxwell-Weiss :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T = \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H \quad (1.7)$$

Le terme de gauche de l'Eq. 1.7 représente l'effet magnéto-calorique, alors que le terme à droite représente l'effet pyro-magnétique.

S étant en fonction de T et H on peut écrire :

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_H dT + \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right)_T dH \quad (1.8)$$

On définit la chaleur spécifique à champ constante C_H comme suit :

$$C_H = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_H \quad (1.9)$$

Pour un processus réversible et en utilisant l'Eq. 1.9 et Eq. 1.7, la différentielle de l'entropie peut être écrite comme :

$$dS = \frac{C_H}{T} dT + \mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (1.10)$$

Pour un processus adiabatique $dS = 0$, l'effet magnétocalorique peut s'écrire [50] :

$$EMC = \Delta T_{Adiabatique} = -\mu_0 \frac{T}{C_H} \int_{H_i}^{H_f} \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH \quad (1.11)$$

Avec $C_H = \text{constante}$.

L'effet magnéto-calorique est donc maximal lorsque la capacité calorifique est minimale mais aussi au voisinage d'une transition de phase magnétique où $\frac{\partial M}{\partial T}$ est maximal. Les matériaux magnéto-caloriques du premier ordre montrent une transition nette (variation discontinue de M en fonction de T) et donc un rapport $\frac{\partial M}{\partial T}$ élevé, ces matériaux devraient donc avoir un effet magnéto-calorique assez important [51].

L'utilisation de l'effet magnétocalorique pour des applications de génération nécessite un matériau avec une température de Curie T_C qui se situe entre la température de la source froide et de la source chaude ($T_{froid} < T_C < T_{chaud}$). Pour des applications où $T_{froid} = \text{ambient}$, T_C du matériau doit être supérieur à l'ambient, le Gadolinium (Gd) qui est le matériau magnéto-calorique de référence ne peut pas être utilisé pour ce genre d'application car sa température de Curie est proche de l'ambient ($T_C = 293\text{K}$) et comme

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

c'est un matériau pur, cette valeur ne peut pas être modifiée. Pour ce genre d'applications, on peut utiliser des matériaux dont la température de Curie T_C peut varier selon leurs compositions.

Le LaFeSi est un matériau du premier ordre dont la température de Curie T_C peut-être contrôlée selon la composition, la Fig. 1.8 représente $\Delta T_{Adiabatique}$ en fonction de la température pour différentes compositions de LaFeSi (Calorivac C de Vaccumschmelze). Si on prend l'exemple de la composition CV 261C (courbe bleu tout à gauche), $\Delta T_{Adiabatique}$ atteint son maximum pour $T_C=261K$. En suivant la même analyse pour le restant des compositions, on peut voir que suivant la composition du LaFeSi, la température de Curie T_C peut varier de 261K à 308K. Cette caractéristique offre la possibilité d'utiliser ce matériau pour des applications de génération pour une large gamme de T_{chaud} et T_{froid} . A noter que ce matériau est disponible dans le commerce et est relativement peu cher.

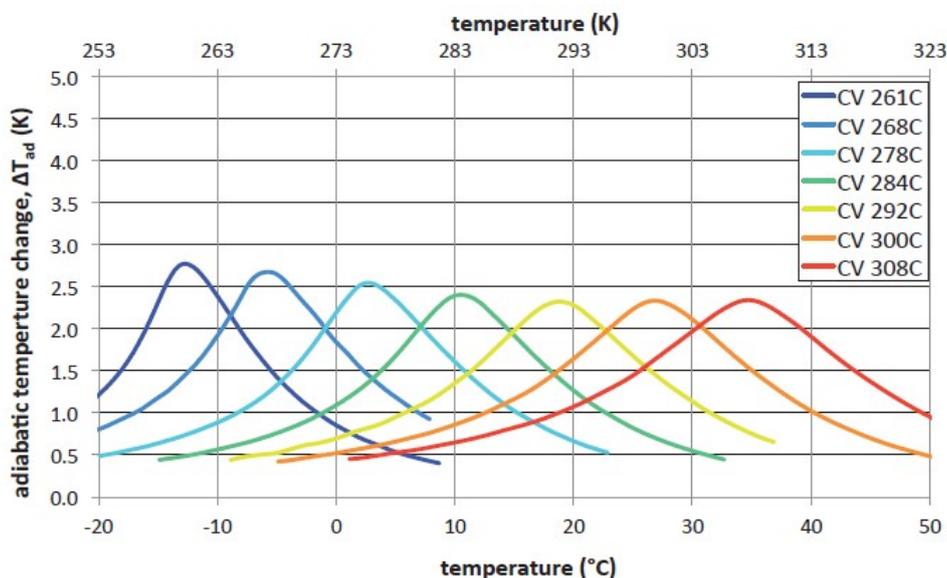


FIGURE 1.8 – $\Delta T_{Adiabatique}$ en fonction de la température pour différentes compositions de LaFeSi (Calorivac C de Vaccumschmelze) sous 1,5T [6]

1.2.1 Cycle de thermo-génération

Un générateur thermomagnétique est utilisé pour convertir, dans une première étape, l'énergie thermique en énergie magnétique, puis cette énergie est convertie en énergie électrique. Dans ce qui suit, nous prenons en compte uniquement la conversion de l'énergie thermique en énergie magnétique. Les performances d'un générateur thermomagnétique dépendent très fortement des caractéristiques thermomagnétiques du matériau magnétique réalisant le cycle thermomagnétique.

Un cycle thermomagnétique idéalisé est illustré dans Fig. 1.9 avec un tracé M-H, l'aimantation en fonction du champ magnétique. Les quatre illustrations de la Fig. 1.9 contiennent une source de champ «aimants», un dissipateur de chaleur où source froide 'Froid', une source chaude 'chaud' et un matériau magnétique qui est soit ferromagnétique

'Ferromag' (points A et B) ou non-ferromagnétique 'Non-ferro' (points D et C). Le cycle est décrit comme suit :

- Etape 1 (du point A au point B) : Le matériau est dans un état ferromagnétique. Le champ magnétique appliqué augmente, par conséquent, l'aimantation du matériau augmente ainsi que sa température (de $\Delta T_{adiabatique}$). Le matériau initialement en contact avec la source froide au point A, se met en contact avec la source chaude au point B. Cette étape est une aimantation adiabatique.
- Etape 2 (du point B au point C) : Le matériau est chauffé à champ magnétique constant, son aimantation diminue et devient non-ferromagnétique. Cette étape est un échange thermique iso-champ.
- Etape 3 (du point C au point D) : Le champ magnétique appliqué diminue, par conséquent, l'aimantation du matériau diminue. La température du matériau diminue de $\Delta T_{adiabatique}$ au cours de cette étape. Le matériau, initialement en contact avec la source chaude au point C, se met en contact avec la source froide au point D. C'est la dés-aimantation adiabatique.
- Etape 4 (du point D au point A) : Le matériau est refroidi à champ constant, son aimantation augmente. Le matériau devient ferromagnétique. C'est un échange thermique iso-champ.

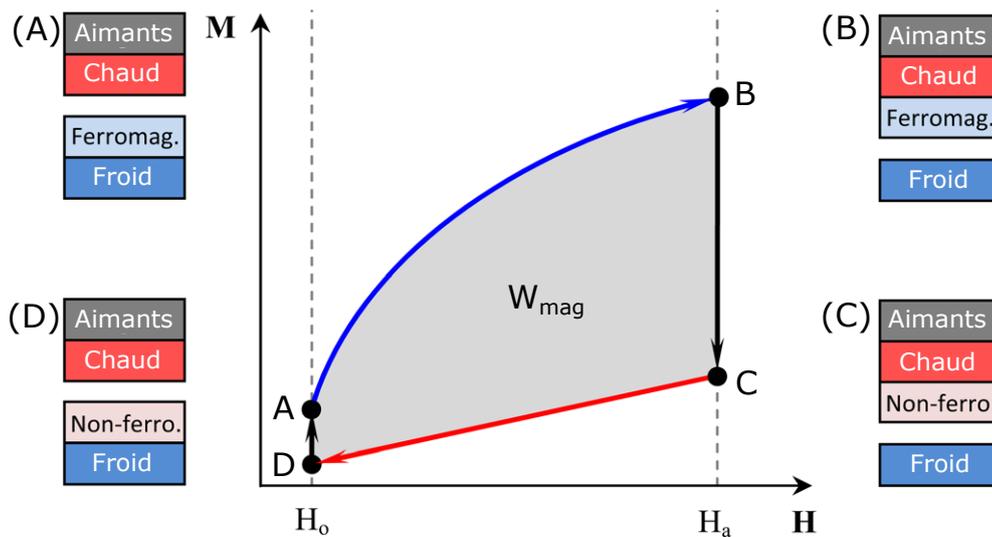


FIGURE 1.9 – Le cycle thermomagnétique dans le plan M-H, l'aimantation en fonction du champ appliqué. Les différentes étapes du cycle avec des illustrations y sont également présentées (figure adaptée de [7]).

L'énergie magnétique maximale W_{mag} qu'un générateur thermomagnétique peut produire sur un cycle est représentée par la zone colorée dans la Fig. 1.9. Cette énergie peut s'écrire comme suit [52] :

$$W_{mag} = - \oint_{cycle} H dB = -\mu_0 \oint_{cycle} (H dH + H dM) \quad (1.12)$$

Où, W_{mag} est l'énergie par unité de volume, H le champ magnétique, B l'induction et M l'aimantation du matériau.

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

Sur un cycle complet $\oint_{\text{cycle}} H dH = 0$, l'expression de l'énergie devient donc :

$$W_{\text{mag}} = -\mu_0 \oint_{\text{cycle}} H dM \quad (1.13)$$

Le premier principe de la thermodynamique stipule que la quantité de chaleur est égale à la somme de la variation de l'énergie interne et du travail effectué par un système [52, 13], nous avons donc :

$$Q_{\text{chaud}} = Q_{\text{froid}} + W_{\text{mag}} = \rho \int_{T_{\text{froid}}}^{T_{\text{chaud}}} C_p(T) dT + T \int dS_m + W_{\text{mag}} \quad (1.14)$$

Où C_p est la chaleur spécifique du matériau, S_m son entropie magnétique et ρ sa densité.

En se référant à [7], les termes $T \int dS_m$ et W_{mag} peuvent être négligés par rapport à $\int_{T_c}^{T_h} C_p(T) dT$ dans le cas d'un champ magnétique appliqué faible. On a donc :

$$Q_{\text{chaud}} = \rho \int_{T_{\text{Froid}}}^{T_{\text{Chaud}}} C_p(T) dT \quad (1.15)$$

L'efficacité d'un tel système en un cycle est défini comme étant le rapport entre la quantité d'énergie produite et la chaleur disponible initialement :

$$\eta_{\text{max}} = \frac{|W_{\text{mag}}|}{Q_{\text{chaud}}} \quad (1.16)$$

L'efficacité maximale est écrite comme suit :

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\mu_0 \oint H dM}{\rho \int_{T_{\text{Froid}}}^{T_{\text{Chaud}}} C_p(T) dT} \quad (1.17)$$

Cette efficacité peut être comparée à l'efficacité du cycle de Carnot opérant entre les deux températures T_{Froid} et T_{Chaud} . On définit alors l'efficacité relative :

$$\eta_r = \frac{\eta_{\text{max}}}{\eta_{\text{carnot}}} = \frac{\eta_{\text{max}}}{1 - \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}} \quad (1.18)$$

1.2.2 Etat de l'art des générateurs thermo-magnétiques

Dans cette partie nous nous intéressons à la chaîne de conversion complète de l'énergie thermique à l'énergie électrique.

L'effet magnéto-calorique, c'est à dire, le changement des propriétés thermiques des matériaux associé à l'application d'un champ magnétique, est utilisé dans les applications de réfrigération. Pour les applications de génération thermomagnétique, on utilise l'effet pyromagnétique : la variation de l'aimantation en fonction de la température.

La conversion de la chaleur en énergie électrique peut se faire de deux manières différentes. La première consiste à convertir directement l'énergie thermique en énergie électrique. Les dispositifs utilisant cette méthode sont appelés systèmes thermomagnétiques directs.

Le principe d'un générateur thermomagnétique direct est illustré dans la Fig. 1.10. Dans son architecture la plus simple, ce générateur serait composé d'un aimant permanent, un matériau ferromagnétique qui shunterait les deux pôles de l'aimant et un bobinage qui s'enroulerait autour de l'aimant ou du matériau ferromagnétique. Le shunt est successivement chauffé et refroidi autour de sa température de Curie (T_c) à l'aide d'une source chaude et d'une source froide. Le matériau magnétique chauffé, le flux magnétique qui le traverse diminue. Une fois ce dernier refroidi, le flux magnétique qui le traverse augmente. Cette variation continue du flux induit une tension aux bornes de l'enroulement, donc de l'énergie électrique est produite. Généralement, ce genre de générateur a besoin d'une pompe qui fait circuler du liquide chaud et froid afin de chauffer et refroidir le matériau.

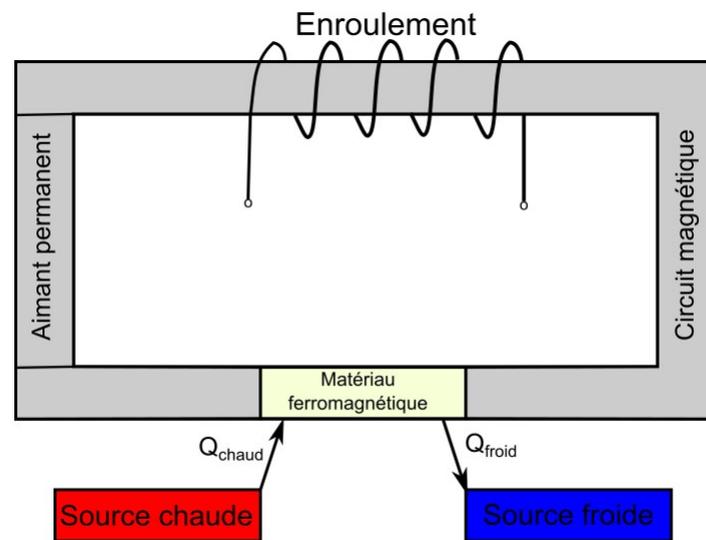


FIGURE 1.10 – Schéma du principe d'un générateur thermo-magnétique direct

Dans la deuxième possibilité de conversion, l'énergie thermique est d'abord convertie en énergie mécanique puis électrique. Les systèmes fonctionnant de cette manière sont appelés systèmes thermomagnétiques indirects.

Le principe du système est présenté dans la figure 1.11. Ce type de générateurs est, généralement, composé d'une partie fixe et d'une autre mobile. La partie fixe est généralement composée d'une source chaude, sur laquelle on colle une source de champ (aimants), et d'une source froide. La partie mobile est généralement composée d'un matériau ferromagnétique (matériau magnéto-calorique MMC) collé sur une poutre qui sert de ressort. Lorsque le MMC est froid, il est magnétique, il est donc attiré par les aimants. Il chauffe et devient paramagnétique, il revient à sa position d'origine grâce au ressort et on crée ainsi un mouvement. L'énergie électrique peut être récupérée à l'aide de matériaux piézoélectriques ou de bobines.

Les générateurs thermomagnétiques qu'ils soient directs ou indirects fonctionnent à un ΔT qui correspond à la différence entre la température de la source chaude et froide. La puissance de sortie d'un générateur peut-être présentée comme une puissance instantanée, une puissance moyenne, ou encore une densité de puissance moyenne. Cette puissance peut

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

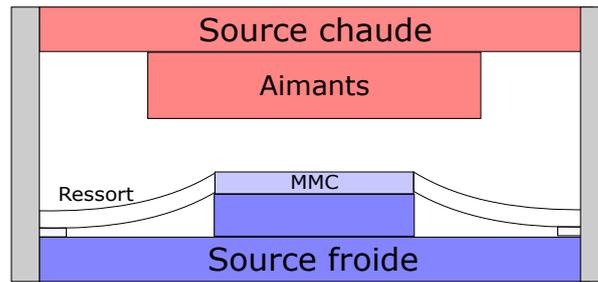


FIGURE 1.11 – Schéma du principe d'un générateur thermo-magnétique indirect [8]

être mesurée ou bien estimée comme montrent les différents travaux que nous allons traiter dans le point qui suit.

Générateurs thermomagnétiques indirects

Générateur de Ujihara et al

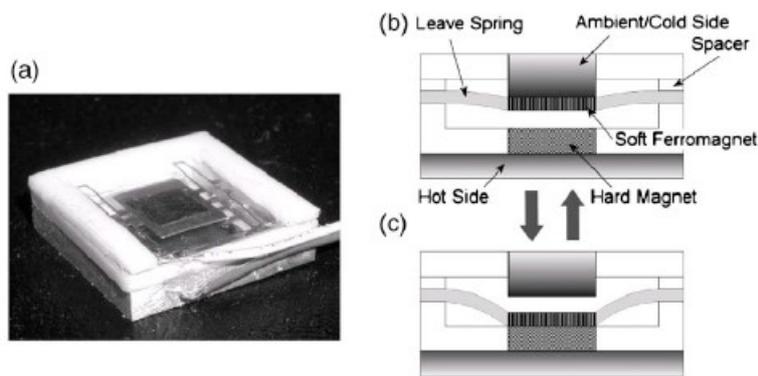


FIGURE 1.12 – Actuateur d'Ujihara, (b) MMC en contact avec la source froide, (c) MMC en contact avec la source chaude [8].

Ujihara et al. [8] ont présenté un actionneur linéaire (Fig. 1.12 (a)). Le principe du système est présenté dans la figure 1.12 (b) et (c). Cet actionneur est composé d'une source chaude (Hot Side), sur laquelle on colle une source de champ (Hard magnet), et une source froide (Ambient/Cold Side). Le matériau ferromagnétique doux est lié à une poutre (Leave spring) qui sert de ressort. La source de champ est en NdFeB et le matériau ferromagnétique doux est le gadolinium. Lorsque le Gd est froid, il est magnétique et est donc attiré par les aimants. Quand il se réchauffe, il devient paramagnétique et revient à sa position d'origine grâce au ressort, on obtient ainsi un mouvement linéaire. L'énergie électrique peut être récupérée à l'aide de matériaux piézoélectriques ou de bobines. Cet appareil ne convertit pas l'énergie mécanique en énergie électrique. Cependant, ils ont estimé théoriquement la puissance électrique entre $1,85$ et $3,61 \text{ mW/cm}^2$, aucune mesure directe de la puissance n'a été présentée dans l'article. L'estimation a été effectuée à l'aide d'un modèle simple de piézoélectrique résonnant.

TABLE 1.1 – Caractéristiques du générateur de Ujihara et al [8]

MMC	Gd (6mm x 6mm x 127 μm)
ΔT	50 K
Fréquence	5 Hz
Densité de puissance électrique moyenne estimée	entre 1,85 et 3,61 mW/cm^2
Transducteur	—
Mode de conversion	indirect
Dimensions totales	20mm x 20mm x 6mm

Le tableau 1.1 résume toutes les caractéristiques du générateur.

Générateur de Carlioz et al

Carlioz et al., [9] ont présenté un générateur thermomagnétique linéaire, le prototype final est représenté par la figure 1.13(a), le schéma du principe, quant à lui, est représenté dans la figure 1.13(b). Le générateur est composé d'un matériau doux (MMC) en FeNi au dos duquel une résistance chauffante est collée. L'ensemble FeNi/résistance est mécaniquement fixe. La partie mobile est composée d'un buzzer piézoélectrique (ref KPSG100) sur lequel un aimant en NdFeB (sous forme de disque) est collé. Le buzzer a été découpé sous forme de croix en usinage afin de réduire sa raideur. Quand le MMC est froid, il attire vers lui l'aimant tout en déformant le buzzer piézoélectrique. Le MMC chaud, il devient paramagnétique et l'aimant retourne à sa position initiale sous l'effet de la force de rappel du buzzer. Le générateur produit une puissance instantanée maximale mesurée de 4,5 mW.

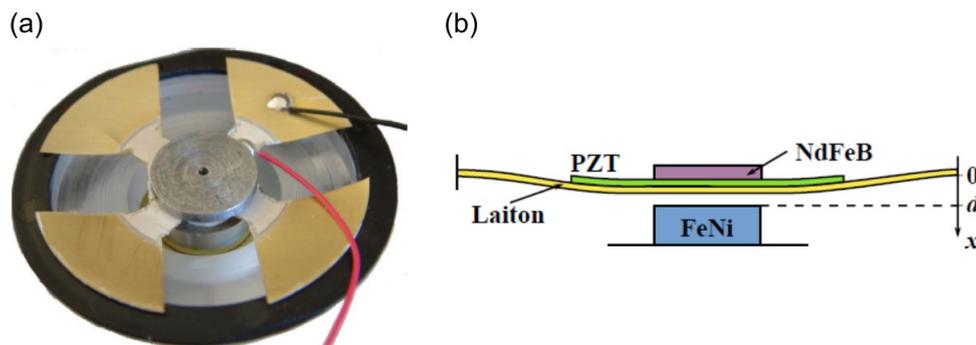


FIGURE 1.13 – Générateur de Carlioz et al, (a) Prototype final, (b) Schéma du principe [9].

Le tableau 1.2 résume toutes les caractéristiques du générateur.

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

TABLE 1.2 – Caractéristiques du générateur de Carlioz et al [9]

MMC	FeNi ($\phi_{externe} = 10\text{m}$, épaisseur=4mm)
ΔT	—
Fréquence	—
Puissance électrique maximale	4,25 mW
Transducteur	Matériau piézo-électrique
Mode de conversion	Indirect
Dimensions totales	$\phi_{externe} = 44\text{m}$

Générateur de Chun et al

Chun et al., [10] ont proposé un générateur dont le schéma et la vue éclatée sont présentés dans la figure 1.14. Le générateur est composé d'une partie chaude à 70 °C (Hot side) sur laquelle un aimant (Hard magnet) en NdFeB est collé, d'une partie froide à -10 °C (Cold side) et d'une partie mobile constituée d'une poutre (Cantilever) en PVDF collée dans son extrémité à un MMC (Soft magnet) à base de Gd. Le MMC froid, est attiré par les aimants. Il chauffe, la force de rappel de la poutre le remet en contact avec la source froide créant ainsi un mouvement linéaire. L'énergie électrique est créée durant le mouvement du MMC grâce au PVDF.

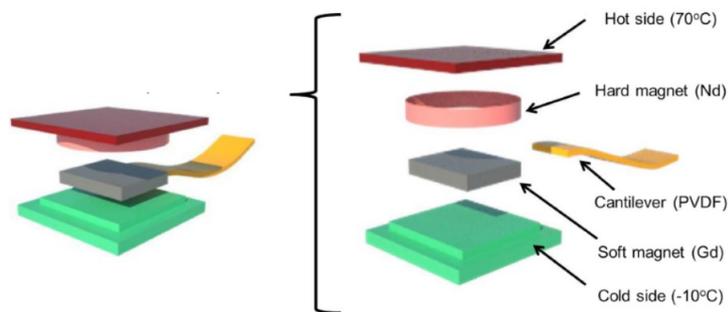


FIGURE 1.14 – Générateur de Chun et al, Schéma du principe et vue éclatée [10]

Dans un premier moment Chun et al., [10] ont réalisé un prototype à base d'un seul PVDF unimorphe (Fig. 1.15 (a)). Ce prototype génère une tension maximale de 2,6V avec une fréquence de 1,56 Hz et une distance parcourue par le MMC de 3mm. Afin de maximiser le rendement du générateur, un deuxième prototype a été réalisé à partir de huit poutres pvdf bimorphes. Chaque poutre pvdf bimorphe a été fabriquée en empilant deux pvdf avec des directions de polarisation opposées. Le générateur produit une tension maximale de 17V, 6 fois plus grande que celle du premier prototype. Le tableau 1.3 résume toutes les caractéristiques du générateur à base de huit pvdf bimorphes.

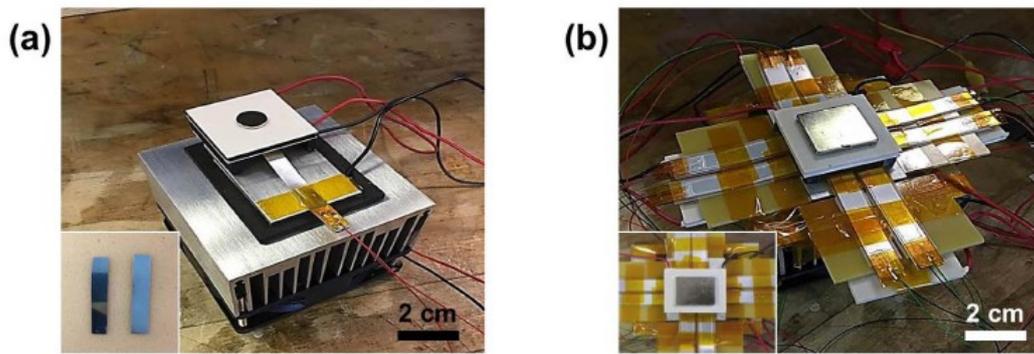


FIGURE 1.15 – Prototypes réalisés, (a) prototype à base de PVDF unimorphe, (b) prototype à base de 8 pvdf bimorphes [10]

TABLE 1.3 – Caractéristiques du générateur à base de 8 pvdf bimorphes [10]

MMC	Gd (4mm x 8mm x 127 μ m)
ΔT	80K
Fréquence	—
Puissance électrique instantanée maximale	158 μ W
Transducteur	PVDF
Mode de conversion	Indirect

Générateur de Gueltig et al (1)

Gueltig et al., [11] ont proposé un générateur dont le prototype et le schéma du principe sont présentés sur la figure 1.16. Ce générateur est composé d'une source chaude et d'un aimant comme source de champ entre lesquels on trouve une partie mobile constituée d'une poutre polyimide sur laquelle un MMC (NiCoMnIn) est collé. Un bobinage est collé sur la deuxième face de la poutre afin de produire de l'énergie électrique. Quand le MMC est en contact avec la source chaude, il devient ferromagnétique (effet magnéto-calorique inverse), il est donc attiré par les aimants. Une fois refroidi par l'air ambiant, il devient anti-ferromagnétique et se remet en contact avec la source chaude. Ce mouvement crée une variation de flux dans le bobinage, ce qui induit une tension électrique. Les différentes caractéristiques du générateur sont résumées dans le tableau 1.4

TABLE 1.4 – Caractéristiques du générateur de Gueltig et al (1) [11]

MMC	NiCoMnIn (2mm x 2mm x 5 μ m)
ΔT	25K
Fréquence	210 Hz
Densité de puissance moyenne	1.6 μ W/cm ⁻³
Transducteur	Bobinage
Mode de conversion	Indirect
Dimensions totales	4mm x 2mm

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

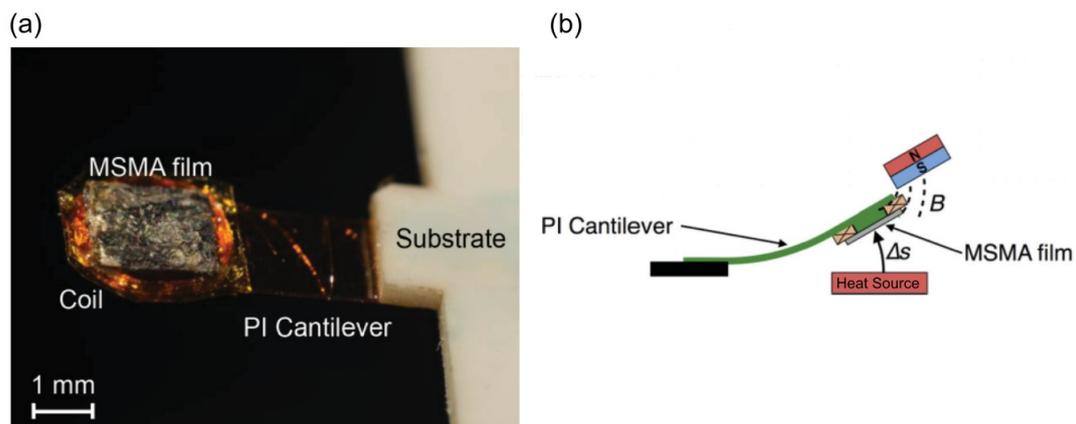


FIGURE 1.16 – Générateur de Gueltig et al (1), (a) le prototype réalisé, (b) Schéma du principe [11]

Générateur de Gueltig et al (2)

Gueltig et al., [12] ont proposé un deuxième générateur dont le prototype et le schéma du principe sont présentés sur la figure 1.17. Ce générateur est composé d'un aimant qui joue le rôle à la fois d'une source de champ et d'une source chaude. Une poutre en CuZn sur laquelle on colle d'un côté le MMC (NiMnGa) et de l'autre des mini-bobines. Quand le MMC est froid, il est ferromagnétique, il est donc attiré par l'aimant. Le MMC se chauffe et devient paramagnétique, il se remet à sa position initiale. De la même façon que dans le premier prototype [11] ce mouvement crée une variation de flux dans le bobinage, ce qui induit une tension électrique. Les différentes caractéristiques du générateur sont résumées dans le tableau 1.5

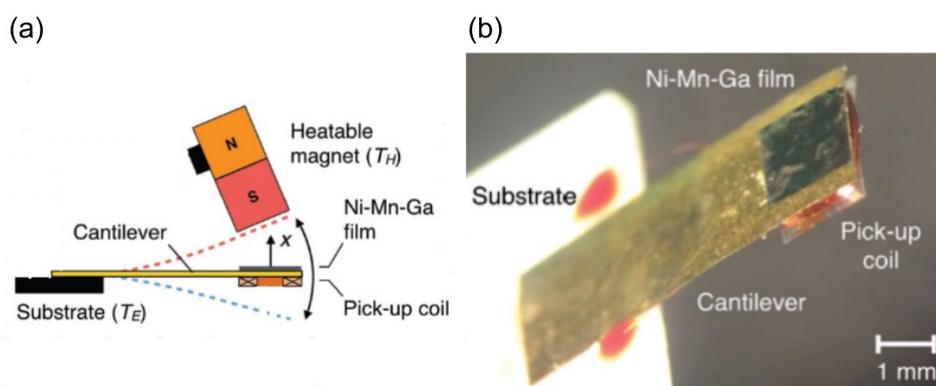


FIGURE 1.17 – Générateur de Gueltig et al (2), (a) le prototype réalisé, (b) Schéma du principe [12]

Moteur thermomagnétique Takahashi et al

Les générateurs thermomagnétiques Indirects également appelés moteurs thermomagnétiques ou moteurs de Curie, car la conversion thermo-électrique passe inévitablement

TABLE 1.5 – Caractéristiques du générateur de Gueltig et al (2) [12]

MMC	NiMnGa (2mm x 2mm x 5 μ m)
ΔT	140K
Fréquence	85 Hz
Densité de puissance moyenne	118 μ W/cm ⁻³
Transducteur	Bobinage
Mode de conversion	Indirect
Dimensions totales	5mm x 3mm

par l'énergie mécanique. Dans sa forme la plus simple, un moteur thermomagnétique est constitué d'un circuit magnétique avec une partie mobile. La partie mobile est réalisée avec un MMC. Lorsqu'une des extrémités de la partie mobile subit un échauffement au-delà de sa température de Curie, sa perméabilité n'est plus uniforme ce qui produit un déséquilibre de force sur cette pièce, provoquant un mouvement linéaire ou rotatif.

Takahashi et al. [23, 24] a présenté une machine rotative avec un triple circuit magnétique (Fig.1.18). Ils ont utilisé des aimants permanents NdFeB. Le rotor est fait de matériaux magnétiques doux tels que $Fe_{54}Ni_{36}Cr_{10}$. Le système de chauffage et de refroidissement se compose de buses hydrauliques, de sorte que le matériau soit refroidi et chauffé avec de l'eau à une température de 11 °C et 95 °C , respectivement. Il y a une source froide et chaude aux extrémités de chaque circuit magnétique.

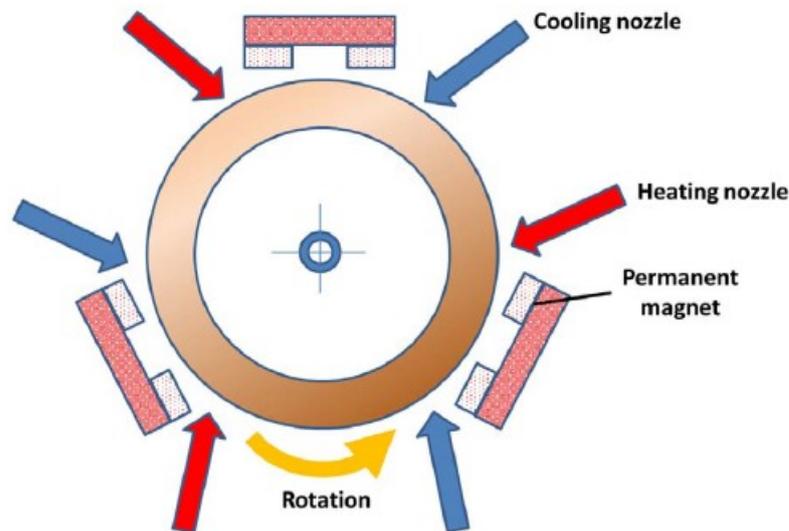


FIGURE 1.18 – Moteur thermomagnétique de Takahashi [13]

Il a été constaté qu'un rotor optimisé est un rotor avec 10 disques de 400 mm de diamètre extérieur, 40 mm de largeur et 0,5 mm d'épaisseur. Avec un entrefer de 1 mm, ce système est capable de générer une énergie mécanique de 14,8 W. La comparaison avec d'autres études réalisées sur la même architecture du système montre que l'utilisation de l'eau comme source de chaleur à la place de l'air améliore le transfert de chaleur et la puis-

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

TABLE 1.6 – Caractéristiques du générateur de Takahashi et al [23, 24]

MMC	$Fe_{54}Ni_{36}Cr_{10}$
ΔT	79 K
Vitesse de rotation	24 Tr/min
Puissance mécanique	3,7 W
Transducteur	—
Mode de conversion	Indirect

sance produite. L'énergie électrique peut être produite via un alternateur mécaniquement lié au moteur thermomagnétique.

Le tableau 1.6 résume toutes les caractéristiques du générateur :

Travaux de G. El Achkar et al

G. El Achkar et al., [53] ont présenté une étude où il est question de modéliser le comportement thermique d'une roue de Curie en vue d'optimiser sa conception. Un modèle analytique a été développé, il permet de déterminer la distribution locale au cours du temps de la température du MMC exposé à une source de chaleur périodique. Il a été démontré qu'utiliser de l'eau comme fluide de refroidissement permet d'intensifier les transferts thermiques et d'obtenir un gradient de température plus important, par conséquent, une force motrice résultante plus importante sur le MMC. Par ailleurs, il a été montré que les propriétés du MMC jouent un rôle important. Dans le cas où l'air est utilisé comme fluide, il est important d'avoir un écart important de température entre le fluide et le matériau. En effet, augmenter l'amplitude de la variation de la température du fluide contribue à l'intensification des transferts thermiques connectifs entre le fluide (air) et le matériau.

Générateurs thermomagnétiques directs

Générateur de T. Christiaanse et E. Brück

T. Christiaanse et E. Brück [14] ont présenté un générateur thermomagnétique direct. Ce générateur a été construit avec un aimant permanent, deux régénérateurs et un circuit magnétique responsable de diriger le champ magnétique vers les régénérateurs. La figure 1.19. (a) montre le MMC 'MnFe(P,As)', 48 disques d'un diamètre 18 mm et d'une épaisseur 1 mm et de différents T_C ont été utilisés. Chaque disque comporte des trous d'un diamètre de 300 μm qui ont été réalisés avec de la découpe laser. Un régénérateur est constitué de deux piles de disques liées entre elles à travers deux axes. Ce type de régénérateur donne un coefficient de transfert de chaleur et une densité de matériau élevés par rapport aux modèles d'échangeurs de chaleur à plaques. Pour construire les régénérateurs finalisés (voir Fig. 1.19 (b)), chaque régénérateur est placé dans une bobine à 240 tours. La figure 1.19. (a) montre le modèle 3D du générateur, on peut voir un circuit magnétique en fer de part et d'autre d'un aimant en NdFeB. Les deux régénérateurs ont été placés sur la partie supérieure du générateur. Un circuit d'alimentation en eau, permet de faire circuler l'eau

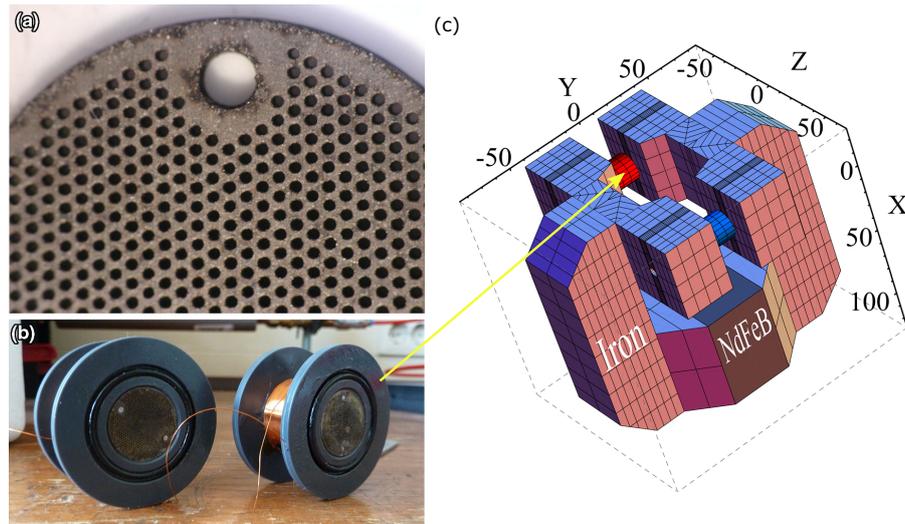


FIGURE 1.19 – (a) Le MMC, (b) Les régénérateurs, (c) Le modèle 3D du générateur [14].

à une certaine température à travers les régénérateurs, quand un régénérateur est refroidi le deuxième est chauffé. Le flux magnétique à travers les bobines varie, créant ainsi une tension à leurs bornes. Le générateur montre une puissance moyenne de 0,05 mW pour une fréquence de 0,17 Hz et $\Delta T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Le tableau 1.7 résume toutes les caractéristiques du générateur :

TABLE 1.7 – Caractéristiques du générateur de T. Christiaanse et E. Brück [14]

MMC	MnFe(P,As)
ΔT	16 K
Fréquence	0,17 Hz
Puissance électrique	0,05 mW
Transducteur	Bobinage
Mode de conversion	direct

Générateur de Waske et al

Waske et al., [15] ont réalisé un générateur thermomagnétique direct. Dans la figure 1.20 on montre en (a) le générateur réalisé et en (b) le schéma du principe. Sur ce schéma on peut voir que le générateur est un circuit magnétique composé de deux rangées d'aimants (en vert) qui servent comme source de champ et de deux rangées de matériau magnéto-calorique (MMC). Une rangée de MMC est froide (en bleu), tandis que la deuxième est chaude (en rouge). Le champ se refermera toujours par le MMC froid, le MMC chaud étant para-magnétique. En chauffant et en refroidissant alternativement les deux MMC, on change à chaque fois le sens du champ magnétique qui passe à travers le bobinage, on modifie donc le flux qui y passe ce qui crée une tension. Une pompe a été utilisée pour acheminer de l'eau froide et chaude à travers des canaux vers les rangées de MMC. Le MMC utilisé est le LaFeCoSi (10mm x 10mm x 0.5mm), 25 MMC ont été placés

1.2. Les effets Magnéto-calorique et Pyro-magnétique

dans chaque rangée.

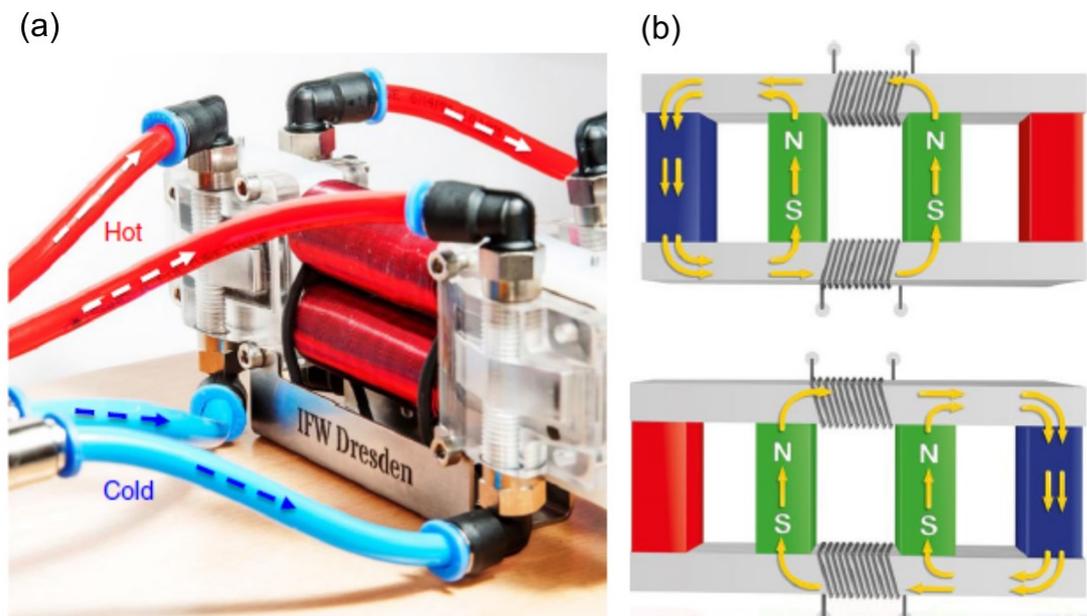


FIGURE 1.20 – (a) Le générateur, (b) schéma du principe [15]

Le tableau 1.8 résume toutes les caractéristiques du générateur :

TABLE 1.8 – Caractéristiques du générateur de Waske et al [15]

MMC	LaFeCoSi 50x(10mm x 10mm x 0,5mm)
ΔT	30 K
Fréquence	0,8 Hz
Puissance électrique	0,8 mW
Transducteur	Bobinage
Mode de conversion	direct
Dimensions totales	140mm x 40mm

Nous concluons ce point par un tableau comparatif (Tab.1.9) de l'ensemble des générateurs présentés. La première constatation que ce tableau nous permet de faire est que la définition de la puissance n'est pas la même dans tous les articles : certains donnent une puissance maximale d'autres une puissance ou une densité de puissance moyenne, en ce qui nous concerne, nous utiliserons une densité de puissance moyenne.

Les générateurs peuvent être départagés selon le mode de conversion (direct ou indirect) mais aussi selon une différence de températures des sources de chaleurs (ΔT) supérieure ou inférieure à 100 K.

L'état de l'art présente essentiellement deux types de transducteurs : les matériaux piézoélectriques et les bobines. Les matériaux piézoélectriques sont uniquement réservés au mode indirect. Les bobines, quant à elles, sont utilisées dans les deux modes de conversion.

TABLE 1.9 – Comparaison entre les différents générateurs

Générateurs	ΔT	Fréquence	Puissance	Commentaire
T. Christiaanse et E. Brück [14]	16K	0,17Hz	0,05 mW	—
Waske et al [15]	30K	0,8Hz	0,8 mW	—
Takahashi et al [23, 24]	79K	24 Tr/min	3,7 W	Puissance mécanique
Ujihara et al [8]	50K	5Hz	1,85 - 3,61 mW/cm ⁻²	Densité de puissance moyenne estimée
Carlioz et al [9]	—	—	4,25mW	Puissance maximale
Chun et al [10]	80K	—	158 μ W	Puissance maximale
Gueltig et al (1) [11]	25K	210Hz	1,6 μ W/cm ⁻³	Densité de puissance moyenne mesurée
Gueltig et al (2) [12]	140K	85Hz	118 μ W/cm ⁻³	Densité de puissance moyenne mesurée

1.3 Motivations

1.3.1 Energie thermique

Le premier principe stipule qu'il y a deux façons d'échanger de l'énergie : la chaleur et le travail. Cela rend toute formulation du 1er principe bipartite, avec un terme thermique (contenant S et T) et des termes de travail contenant les variables intensives et extensives conjuguées propre au système. Le 2ème principe impose, par l'efficacité de Carnot, une limite à la capacité de convertir de l'énergie thermique en travail tandis qu'aucun principe n'empêche une conversion efficace entre des formes différentes de travail. Cela rend l'énergie thermique la forme d'énergie la plus dégradée.

De nos jours, l'internet des objets crée des milliards d'appareils avec de grandes variétés connectés à Internet. On estime le nombre de ces appareils supérieur à 50 milliards (en 2015) et peu atteindre d'ici fin 2020, les 200 milliards. La plupart de ces systèmes sont autonomes et souvent petits (mm à cm), et nécessitent une source d'énergie [54, 55]. Des batteries sont généralement utilisées pour alimenter ces systèmes, ce qui engendre un grand coût de maintenance. Il y a un besoin pressant de sources d'énergie autonomes, fiables et modulables (des dimensions adaptable du cm au mm), capables de produire de petites énergies afin d'alimenter ces systèmes.

Cette source d'énergie doit être tout le temps disponible. C'est là que l'énergie thermique présente un grand avantage. Les fuites thermiques sont présentes partout et représentent environ 50% de l'énergie primaire consommée [1]. Le risque d'interruption est très grand pour les autres énergies (éolienne, solaire, etc.). Par exemple, quand il n'y a pas de vent les éoliennes ne produisent rien.

Les fuites thermiques sont une énergie disponible, gratuite, et la récupérer permet d'améliorer l'efficacité énergétique mondiale.

Afin d'assurer la disponibilité de l'énergie on s'intéressera aux fuites thermiques de bas niveau (à basse température, $T < 100$ °C). En effet, ces fuites représentent plus de 30 % de l'énergie primaire consommée à l'échelle mondiale [1]. Cette situation correspond à une différence de température d'une source chaude et froide $\Delta T < 100^\circ$.

1.3.2 Effet magnétocalorique et matériau du premier ordre

Bien que les générateurs thermoélectriques puissent produire suffisamment de puissance pour alimenter un microsystème (10mW) [39], leurs performances peuvent diffici-

1.3. Motivations

lement être améliorées sur des gradients de température réduits et de petites échelles de longueur, ce qui motive une augmentation de recherche de technologies alternatives [8].

La première apparition des générateurs thermomagnétiques est marquée par les brevets de Tesla [56, 57] et Edison [58]. La première étude analytique sur la génération thermomagnétique est proposée par Brillouin et Iskenderian en 1948 [59]. Le développement récent de nouvelles générations de matériaux magnéto-caloriques (MMC) pour les applications de réfrigération offre de nouvelles opportunités aux technologies de récupération d'énergie [60].

Un matériau magnéto-calorique (MMC) peut être du premier ordre : transition nette de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique. Comme il peut être de deuxième ordre : transition lente de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique. Une étude a montré qu'un matériau de premier ordre est plus performant dans la génération thermomagnétique [61].

Le Gd est un MMC de deuxième ordre très performant qu'on retrouve dans beaucoup de travaux : c'est un des MMC les plus utilisés. Dans nos travaux de recherche un MMC du premier ordre (LaFeSi) est utilisé dans la génération thermomagnétique.

1.3.3 Mode de conversion Thermique-Électrique

La perspective de convertir la chaleur directement en électricité via la loi de Faraday (conversion directe) est extrêmement attrayante comme le montre les résultats exceptionnels de [15], et permet d'éviter certaines des difficultés associées à une étape de conversion supplémentaire (Conversion indirecte : thermique-mécanique et mécanique-électrique). Néanmoins, une lacune majeure de cette approche provient du mécanisme d'échange thermique à base de fluides sur lequel elle s'appuie généralement. En effet, ce mécanisme d'échange nécessite l'utilisation d'une pompe, consommatrice d'énergie, afin de pomper le fluide dans les échangeurs de chaleurs. Ce processus réduit considérablement la puissance de sortie globale et, bien plus grave que ça, anéantit toute possibilité d'autonomie du générateur thermomagnétique lui-même, ce qui n'arrange pas les applications IoT (internet des objets), biomédicales [62] et embarquées [63].

A l'inverse, la conversion indirecte, à travers l'introduction de l'étape intermédiaire de l'énergie mécanique (le mouvement du MMC entre la source chaude et froide) permet d'avoir un système compact et autonome où la substance active (MMC) joue aussi le rôle de la pompe [64].

L'architecture du générateur thermomagnétique qui va être étudiée dans mes travaux de thèse est inspirée de celle proposée par [8] et présentée dans la Fig. 1.11. Cependant, plusieurs améliorations sont ajoutées à cette architecture, parmi lesquelles on peut citer :

- La source de champ a été optimisée en utilisant une structure d'Halbach linéaire qui permet d'augmenter le gradient du champ, de réduire le champ démagnétisant et réduire la quantité d'aimants utilisée (baisse de volume d'aimants).
- Le MMC utilisé est de premier ordre : le LaFeSi Calorivac HS de chez Vacuumschmelze [65, 66].
- Un transducteur a été incorporé dans l'architecture afin d'avoir en sortie une énergie électrique. En effet, le dispositif réalisé par [8] est un actionneur où l'énergie

électrique a été seulement estimée.

Dans la littérature on ne trouve pas d'études qui visent à comparer les performances des bobines et des matériaux piézoélectriques sous les mêmes conditions, généralement on se base sur des données expérimentales de différents travaux. Dans ces travaux, on présentera une étude théorique à base de modèles et de calculs en éléments finis qui traitera cette comparaison, ce qui nous permettra de choisir le transducteur.

Deux prototypes du générateur (l'un étant l'amélioration de l'autre) avec deux différentes poutres seront présentés. Une différence de température entre les sources de chaleur ΔT d'environ 30 °C est visée. Une étude approfondie des deux prototypes sera présentée, on s'intéressera au comportement thermique, magnétique, mécanique et électrique du générateur.

Fonctionnement et Modélisation du générateur

Sommaire

2.1	Présentation et principe de fonctionnement	27
2.2	Le matériau actif	29
2.2.1	Mesures au DRX	31
2.2.2	Mesures au VSM	31
2.2.3	Mesure de densité	33
2.3	La source magnétique	33
2.3.1	Choix d'aimants	33
2.3.2	La source de champ : Choix de la structure	34
2.4	La poutre	36
2.5	Simulations	36
2.5.1	Détermination des forces magnétiques	37
2.5.2	Détermination de la caractéristique Force-Déplacement d'une poutre	38
2.6	Étude de l'auto-oscillation	39
2.7	Modèle thermo-mécanique	43
2.8	La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur	47
2.8.1	Les bobines	48
2.8.2	Les matériaux piézoélectriques	50
2.9	Conclusions	54

2.1 Présentation et principe de fonctionnement

Un générateur thermomagnétique convertit l'énergie thermique en énergie électrique. La première conversion est la conversion de l'énergie thermique en énergie magnétique. L'énergie magnétique peut être directement convertie en énergie électrique (voir Fig.2.1) via la loi de Faraday (mode direct), ou indirectement (voir Fig.2.1) via l'énergie mécanique (mode indirect). Dans ce dernier des transducteurs sont nécessaires pour récolter l'énergie électrique. Nous avons opté pour un générateur avec un mode indirect pour les raisons que nous avons abordé dans le précédent chapitre, à savoir l'autonomie et la compacité du dispositif. Dans un premier temps nous nous intéresserons uniquement à la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique en passant par l'énergie magnétique.

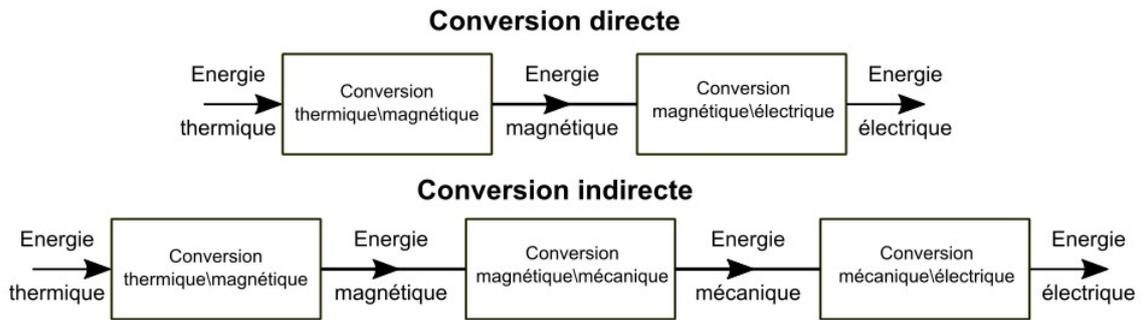


FIGURE 2.1 – Conversions directe et indirecte de l'énergie thermique en énergie électrique.

L'architecture du générateur est présentée par la figure 2.2, le générateur est composé, (1) d'une source chaude, sur laquelle des aimants en structure d'Halbach plane (environ 1 cm^2) sont collés, (2) d'une source froide et (3) d'un matériau magnéto-calorique (MMC) (environ 1 cm^2), suspendu sur une poutre qui fait office de ressort (quelques cm^2), qui se déplace entre les deux sources de chaleur.

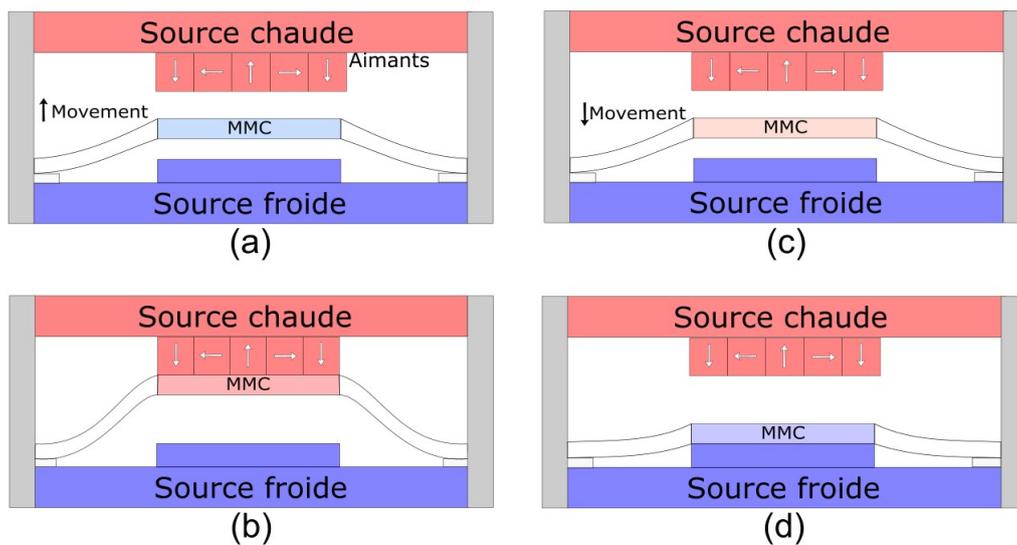


FIGURE 2.2 – Schéma du principe du générateur. a) Le MMC se déplace vers la source chaude. b) Le MMC est en contact avec la source chaude. c) Le MMC se déplace vers la source froide. d) Le MMC est en contact avec la source froide.

Le thermo-générateur convertit l'énergie thermique en énergie mécanique en réalisant, simultanément, deux cycles de différentes natures en quatre étapes chacun. Le premier est un cycle dynamique (au sens de la mécanique) et le dernier est un cycle thermo-dynamique. le cycle dynamique souhaité est un cycle bistable qui représente le déplacement du MMC entre deux sources de chaleur comme suit :

Etape 1- Le MMC se déplace rapidement de la source froide à la source chaude, Fig.2.2(a).

Etape 2- Le MMC s'immobilise en contact de la source chaude, Fig.2.2(b).

2.2. Le matériau actif

Etape 3- Le MMC se déplace rapidement de la source chaude à la source froide, Fig.2.2(c).

Etape 4- Le MMC s'immobilise en contact de la source froide, Fig.2.2(d).

Du côté thermodynamique, le cycle optimal serait un cycle de Brayton avec deux adiabatiques et deux isochamps comme suit :

Etape 1- Le champ magnétique appliqué augmente, par conséquent la température du MMC augmente de $\Delta T_{adiabatique}$ sous des conditions adiabatiques, Fig.2.2(a).

Etape 2- Le MMC échange de la chaleur avec la source chaude à champ magnétique constant, Fig.2.2(b).

Etape 3- Le champ magnétique appliqué diminue (le MMC s'éloigne des aimants), sa température diminue de $\Delta T_{adiabatique}$, cette étape est une étape de dés-aimantation adiabatique, Fig.2.2(c).

Etape 4- Le MMC échange de la chaleur avec la source source froide à champ constant, Fig.2.2(d).

Les approches de thermodynamique à temps finis ont montré [61, 67] que le cycle thermodynamique qui offre une puissance magnétique maximale est un cycle où la variation de la température adiabatique $\Delta T_{adiabatique} = \frac{1}{2} \Delta T$, où ΔT est la différence entre les températures des sources froide et chaude, T_{froid} et T_{chaud} respectivement, et où les étapes isochamps sont des étapes isotempératures : l'échange thermique s'effectue à une différence de température, entre le MMC et la source de chaleur, constante. La transition de phase étant de premier ordre, la chaleur latente stabilise la température et permet d'avoir un échange thermique isotempérature. Cependant, un tel cycle implique l'utilisation d'un matériau magnéto-calorique à haut $\Delta T_{adiabatique}$ ce qui n'est pas notre cas. En effet, $\Delta T_{adiabatique}$ est d'environ 3 °C pour le MMC commercial utilisé, Calorivac [6]. Mes travaux de thèses étant concentrés sur l'auto-oscillation, nous n'avons pas eu suffisamment de temps pour essayer différents matériaux dans le but d'optimiser, dans la limite du possible, les propriétés de la substance active.

Le fonctionnement du générateur est directement lié à un équilibre entre la force magnétique F_{mag} qu'applique la source de champ sur le MMC et la force de rappel de la poutre F_{rappel} . Notre but est d'avoir un système mécanique bistable, c'est à dire que le système doit avoir uniquement deux états : soit en contact avec la source chaude, soit en contact avec la source froide (voir Fig.2.4). Cependant, nous verrons par la suite, que ce n'est pas si facile. Afin de passer d'un point d'équilibre stable à un autre, dans ce cas précis passer de la source froide à la source chaude, ou inversement, certaines conditions doivent être respectées (voir Fig.2.4). Pour assurer le passage de l'étape 2 à l'étape 3 (déplacement du MMC de la source froide vers la source chaude) on doit avoir $F_{mag} > F_{rappel}$ (voir Fig.2.4). De la même façon pour assurer le passage de l'étape 4 à l'étape 1 (déplacement du MMC de la source chaude vers la source froide) on doit garantir que $F_{mag} < F_{rappel}$ (voir Fig.2.4).

2.2 Le matériau actif

Le matériau magnéto-calorique (MMC) que nous allons utiliser est le LaFeSi de chez Vacuumschmelze, le nom commercial est Calorivac. Il existe en plusieurs variantes, Ca-

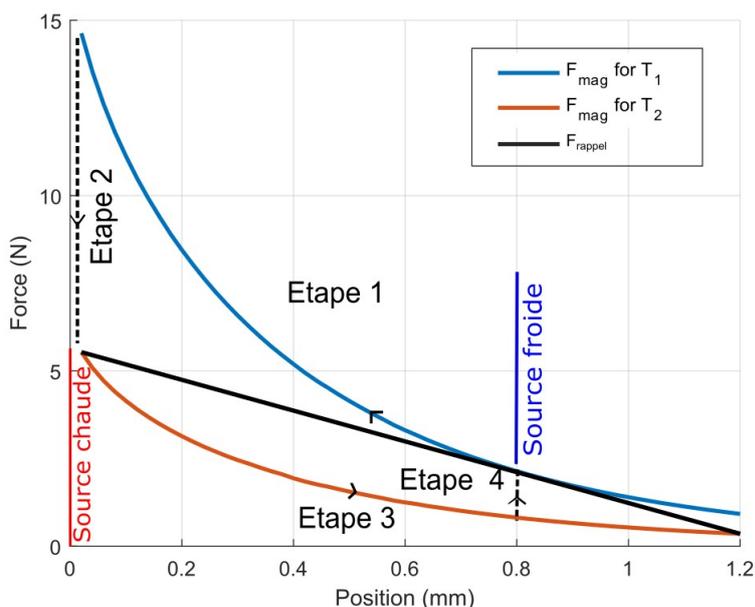


FIGURE 2.3 – Force magnétique pour deux températures $T_1 < T_2$ et force de rappel en fonction de la position du MMC. Le cycle de fonctionnement est représenté.

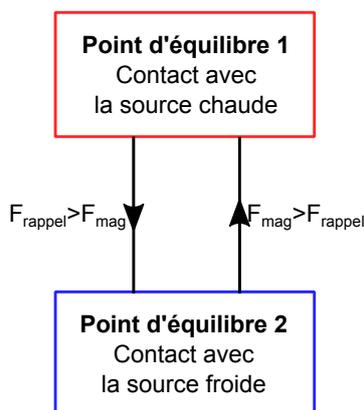


FIGURE 2.4 – Le générateur comme système bistable.

lorivac C et HS à l'état solide et Calorivac H en poudre. Ce MMC est un matériau où le changement d'ordre magnétique, passage de l'état ferromagnétique à l'état paramagnétique ou inversement, est une transition de phase du 1er ordre, soit une transition abrupte caractérisée par une discontinuité dans l'entropie (et l'aimantation) des deux phases à l'origine d'une chaleur latente. Dans la suite on utilisera souvent les dénominations *matériaux du premier ou deuxième ordre* faisant référence à l'ordre de la transition de phase magnétique à l'origine de l'effet calorique [61, 5].

Dans la suite, une caractérisation complète du LaFeSi HS avec une température de Curie de $T_C = 303K$ va être effectuée. On commencera par un passage au diffractomètre à rayons X (DRX) puis au Magnétomètre à échantillon vibrant (VSM) et enfin par une mesure de densité.

2.2. Le matériau actif

2.2.1 Mesures au DRX

Nous commençons par un passage au DRX (diffractomètre à rayons X), D2 PHASER de la marque Bruker, afin de déterminer les phases qui composent le matériau. L'échantillon utilisé fait 0,25 mm d'épaisseur, 10 mm de longueur et 7 mm de largeur. La figure 2.5 montre les résultats du raffinement de Rietveld des données du DRX. Nous pouvons conclure que la phase magnétocalorique (LaFeSi) ne représente que 14 % du volume total. La phase majoritaire est la phase FeSi qui aide à la tenue mécanique de l'échantillon grâce au fer.

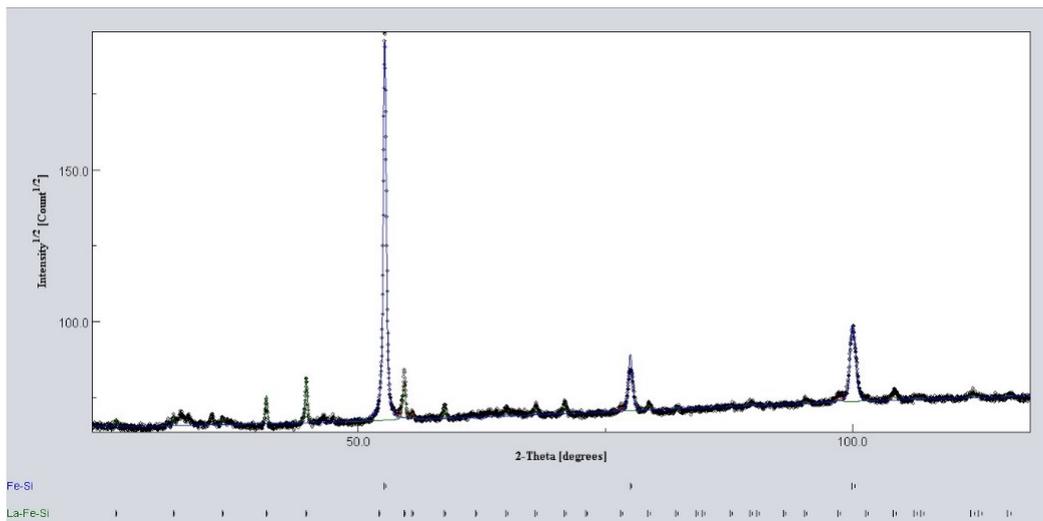


FIGURE 2.5 – Raffinement de Rietveld des résultats du DRX

2.2.2 Mesures au VSM

Afin d'obtenir les caractéristiques magnétiques du matériau, un VSM de la marque LakeShore est utilisé. Deux mesures différentes peuvent être effectuées à l'aide du VSM : i) la mesure magnétique à champ fixe et à température variable (courbe iso-champ). ii) mesure magnétique à champ variable et température constante (courbe isotherme).

La figure 2.6 montre les caractéristiques thermo-magnétiques $M(T)$ du MMC à un champ appliqué constant de 0,5 T et 1 T, et pour un pas de température de $\Delta T=0,5$ K. L'échantillon utilisé a 0,25 mm d'épaisseur et une surface carrée de 4 mm². L'échantillon est placé dans le VSM de façon à ce que le champ soit perpendiculaire à la surface 0,25 × 2 mm² du MMC. On trace la courbe $M(T)$ liée au chauffage du matériau et celle liée à son refroidissement pour chaque valeur de champ magnétique afin de mettre en évidence l'hystérésis thermique associée au matériau. Cette hystérésis représente les pertes liées à la transition de phase dans le MMC. A 0,5 T la température de Curie est d'environ $T_C = 303K$ ce qui correspond à la valeur annoncée par le constructeur. A 1T, $T_C = 305K$, le champ magnétique a décalé la température de la transition de phase.

La figure 2.7 montre les caractéristiques magnétiques $M(H)$ du MMC à différentes températures pour un pas de champ de $\Delta H=50$ mT, l'échantillon utilisé reste le même.

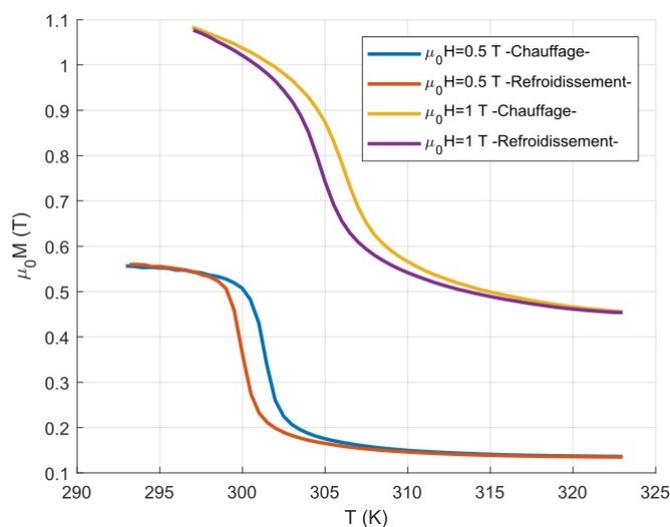


FIGURE 2.6 – Caractéristiques magnétiques $M(T)$ pour un champ de 0,5 T et 1 T et pour un pas de température de $\Delta T=0,5$ K.

La transition se fait autour de 303K, ce qui correspond à la température de Curie annoncée par le constructeur. Pour une température supérieure à celle de Curie, le MMC ne devient pas complètement paramagnétique. Cette constatation est expliquée par la forte présence du fer qui a une température de Curie bien plus élevée, autour de 1043K. On observe, par ailleurs, une transition méta-magnétique pour des champ entre 0.4 et 0.6 T à des températures intermédiaires (un peu supérieures à 303 K).

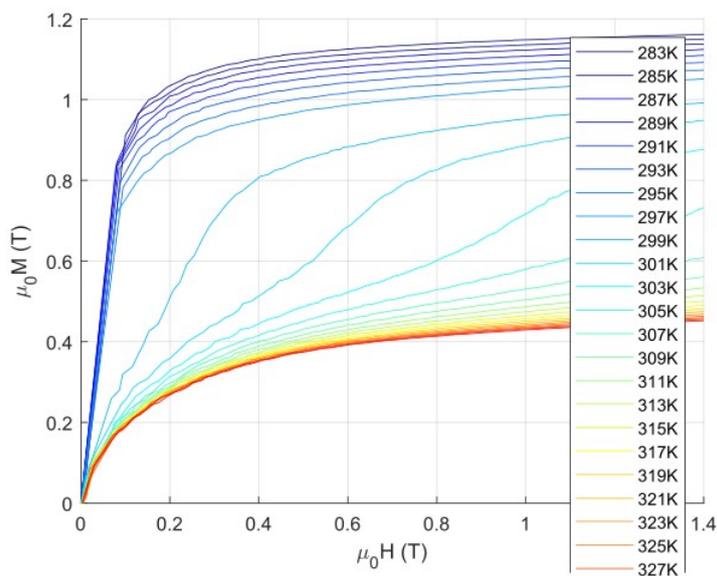


FIGURE 2.7 – Caractéristiques magnétiques $M(H)$ à différentes températures avec un pas de champ $\Delta H=50$ mT.

2.3. La source magnétique

2.2.3 Mesure de densité

La densité du MMC a été mesurée en utilisant une balance électronique (Sartorius, modèle : ME235P) appliquant le principe d'Archimède. Cette balance est équipée d'un kit permettant la mesure de la densité par la mesure de la masse de l'échantillon dans l'air (voir Fig. 2.8 (a)) et dans l'eau (voir Fig. 2.8 (b)) et donne ensuite la valeur de la densité. Pour plus de détails sur la mesure vous pouvez consulter la référence [68]. La densité mesurée du MMC s'élève à 7270 kg/m^3 .

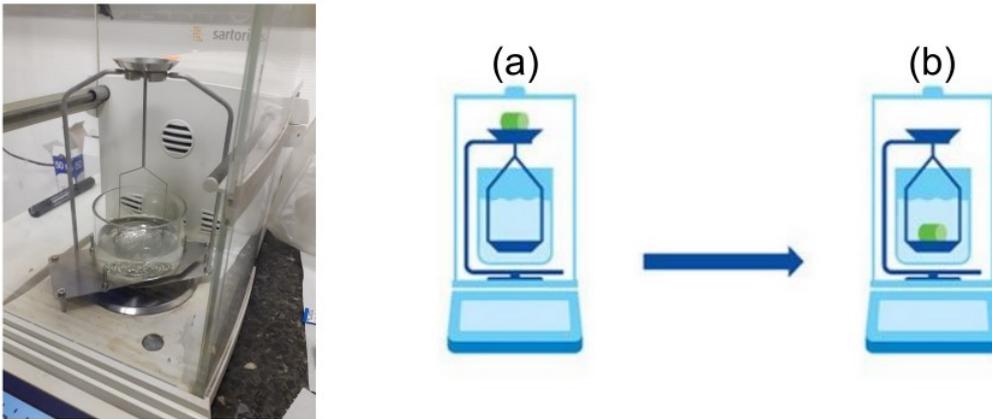


FIGURE 2.8 – Dispositif de mesure de densité. (a) mesure de la masse dans l'air, (b) mesure de la masse dans l'eau.

2.3 La source magnétique

2.3.1 Choix d'aimants

Dans notre dispositif, la source de champ magnétique "aimants permanents" a aussi la fonction de réservoir chaud. On a, donc, dû considérer ses propriétés magnétiques à la température de travail ($60 \text{ }^\circ\text{C}$) ainsi que sa conductivité thermique. Quatre familles d'aimants permanents sont intensivement utilisées en industrie, à savoir, les AlNiCo, les ferrites, les samarium-cobalt et les néodyme-fer-bore.

Le tableau 2.1 regroupe différentes propriétés des quatre familles, à savoir, l'induction rémanente (B_r), le champ coercitif (H_c), la température maximale de fonctionnement et la conductivité thermique. Les samarium-cobalt et les ferrites sont désavantagés par leur faible rémanence par rapport aux NdFeBr et aux AlNiCo. Les AlNiCo peuvent avoir des inductions rémanentes importantes allant de $0,6$ à $1,4 \text{ T}$, ce qui est intéressant pour notre application. Leur température maximale de fonctionnement est élevée et la conductivité thermique est bonne. Le champ coercitif, quant à lui, est faible ce qui rend les AlNiCo des éléments magnétiquement "fragiles" qui peuvent facilement se désaimanter. Les Nd-FeB présentent les meilleures caractéristiques magnétiques, une température maximale de

TABLE 2.1 – Caractéristiques des différentes familles d’aimants [25, 26, 27].

Aimants	B_r (T)	H_c (kA/m)	T_{max} (°C)	Conductivité thermique (W/m/K)
Les AlNiCo	0,6-1,4	275	550	46
Les samarium-cobalt ($SmCo_5, Sm_2Co_{17}$)	0,9-1,15	600-1200	350	12
Les Ferrites	0,2-0,75	100-300	250	5,5
Les néodyme-fer-bore (NdFeB)	1-1,4	750-2000	80	9

fonctionnement, certes peu élevée, mais elle reste supérieure à la température de fonctionnement prévue, autour de 60 °C. A cette température les NdFeB présentent une induction rémanente de $B_r=1,15$ T et un champ coercitif de 650 kA/m [69]. La conductivité thermique de ces aimants reste moyenne (9 W/m/K). Notre choix s’est porté sur les NdFeB, certes pour leurs performances, mais surtout car ces aimants possèdent un large catalogue de forme et de dimensions disponibles dans le commerce.

2.3.2 La source de champ : Choix de la structure

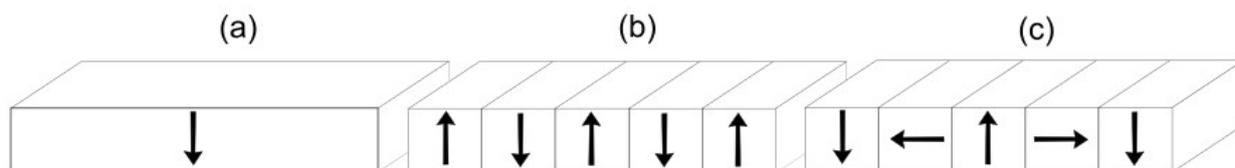


FIGURE 2.9 – Différentes configurations pour la source de champ magnétique : (a) Structure simple, (b) Structure d’Halbach planaire 1, (c) Structure d’Halbach planaire 2

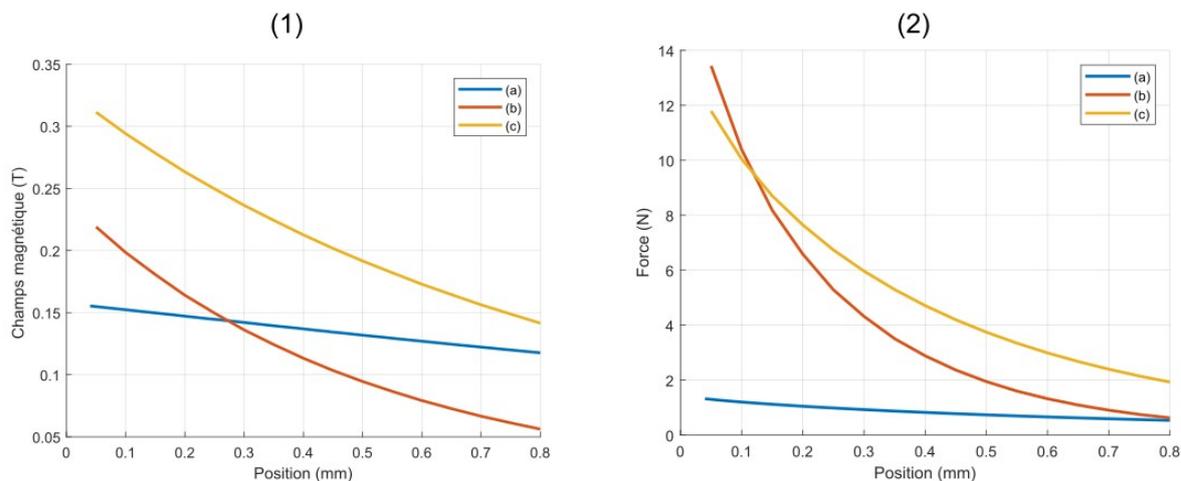


FIGURE 2.10 – Résultats de simulation 3D par éléments finis sous Ansys-Maxwell. (1) Le champ magnétique interne d’un matériau soumis aux trois sources magnétiques (2) Les forces magnétiques appliquées par les trois configurations de source magnétiques sur un même matériau

2.3. La source magnétique

Pour réaliser la source de champ magnétique, les aimants en NdFeBr peuvent être assemblés de différentes façons afin de mieux contrôler l'intensité et la répartition du champ magnétique. Nous nous intéressons plus particulièrement aux trois configurations représentées dans la figure 2.9. La première configuration, la plus simple des trois, (voir Fig. 2.9 (a)) consiste en un seul aimant. Les deux autres configurations font partie de la famille des structures d'Halbach. Ces structures ont été étudiées et utilisées dans divers applications et sous différentes formes (linéaires, circulaires ...), on peut citer [70, 71]. La configuration (b) (voir Fig. 2.9 (b)) est une structure d'Halbach linéaire où plusieurs aimants sont collés de façon à avoir des axes d'aimantations décalés de 180° à chaque fois. La troisième et dernière configuration (voir Fig. 2.9 (c)), est aussi ce qu'on appelle une structure d'Halbach linéaire, sauf que les axes d'aimantations sont décalés de 90° .

Afin de départager les trois configurations, on compare les forces magnétiques appliquées sur un MMC par les trois structures ainsi que le champ magnétique moyen interne dans le matériau. Le champ interne permet de prendre en compte l'effet du champ démagnétisant. La force magnétique dépend du gradient du champ de la structure mais aussi des caractéristiques magnétiques $B(H)$ du matériau lui même. Les deux paramètres (force magnétique et champ interne) sont calculés à l'aide d'une simulation 3D en éléments finis sous Ansys où on insère la courbe $B(H)$ du MMC (LaFeSi, $0,25 \times 7 \times 10 \text{ mm}^3$) issue des mesures au magnétomètre pour une température donnée. Cette simulation sera traitée plus en détail par la suite. Ici les forces magnétiques et le champ sont déterminés pour une température de 20°C . Les sources de champ, ont les mêmes dimensions, à savoir, $(1,5 \times 7,5 \times 10 \text{ mm}^3)$. Ces dimensions viennent du fait que les plus petits aimants disponibles dans le commerce en taille standard sont des aimants de $1,5 \times 1,5 \times 10 \text{ mm}^3$, sachant qu'il faut cinq aimants pour chaque structure ça nous donne $1,5 \times 7,5 \times 10 \text{ mm}^3$. Les forces magnétiques ainsi que le champ moyen interne sont calculés pour différentes positions du MMC. La position du MMC correspond à la distance qui le sépare de la source de champ. La figure 2.10 représente les résultats de simulations. La Figure 2.10(1) montre le champ magnétique moyen à l'intérieur du MMC en fonction de sa position par rapport à la source de champ pour les trois configurations (a), (b) et (c). Parmi ces configurations, la configuration (c) est celle qui donne le champ le plus élevé pour chaque position ainsi que le $\mu_0\Delta H=0,17 \text{ T}$ le plus élevé sur environ $0,75 \text{ mm}$ de déplacement. En Fig. 2.10(2), nous avons les forces magnétiques appliquées sur le même matériau (LaFeSi), en fonction de sa position par rapport à la source de champ, dans les trois cas (a), (b) et (c). Pour la structure simple (a) la force magnétique est la moins élevée des trois structures et ne varie presque pas en fonction de la position. Les structure (b) et (c) donnent des forces élevées avec des valeurs qui se rapprochent, cependant, la courbe de la force est plus raide dans (b) ce qui ne facilite pas le dimensionnement du ressort.

Dans notre cas nous cherchons à maximiser le champ à l'intérieur du matériau ainsi que $\mu_0\Delta H$ et ΔF_{mag} . Selon les résultats de la figure 2.10, la configuration (c) est la plus adaptée à notre cas.

2.4 La poutre

Dans cette section nous allons parler de la poutre. Cette dernière joue le rôle d'un ressort qui permet de ramener le MMC vers la source froide quand ce dernier est paramagnétique. La poutre ne doit pas perdre son élasticité lors de sa déformation, d'au moins pas avant un certain nombre de cycles, d'où la nécessité de choisir un matériau adapté. Le matériau doit être non-magnétique pour éviter toute interaction avec la source de champ et doit être facile à usiner et à découper. Enfin le matériau doit être disponible et peu cher.

Plusieurs candidats sont possibles, le tableau 2.2 présente une liste de matériaux avec pour chacun sa limite élastique. Ces matériaux sont tous non magnétiques, cependant du moment où ils sont conducteurs d'électricité, il peut avoir un risque lié aux courants de Foucault. Le cuivre et le laiton avec leurs faibles limites élastiques ne passent pas le test. Les alliages d'aluminium peuvent avoir des limites élastiques allant jusqu'à 570 MPa mais la limite élastique du CuBe2 dépasse largement cette valeur. De plus le CuBe2 est utilisé dans des applications variées, domaine pétrolier, aéronautique, trains d'atterrissage, etc. Toutes ces applications font que cet alliage cuivreux soit connu comme le cuivre ressort [72].

TABLE 2.2 – La limite élastique des différents matériaux [28, 29]

Matériaux	Limite élastique (MPa)
Cuivre (Cu)	40
Laiton	180
Alliage d'aluminium	570
CuBe2	1200

Dans les différents travaux mentionnés dans le précédent chapitre, on retrouve plusieurs formes de la poutre. La figure 2.11, en (a), présente la forme de la poutre utilisée dans les travaux de Ujihara et al.,[8], c'est une poutre en porte à faux avec deux branches de chaque côté. En (b), la poutre utilisée par Gueltig et al.,[11, 12], est fixée uniquement d'un seul côté. Dans les travaux de Chun et al.,[10] on retrouve les deux structures (b) et (c), la dernière est équivalente à la configuration (a) si ce n'est le nombre de branches qui change. Les trois formes de la poutre montrent un bon fonctionnement mécanique, cependant, du point de vue électrique, il faut prêter une attention particulière à la quantité et les dimensions de transducteur qu'on peut y mettre. Notre choix se porte sur la configuration (d) qui est semblable à celle en (a) et (c) (poutre fixée des deux côtés) mais avec une seule branche de chaque côté, ce qui peut nous permettre d'avoir une surface plus importante pour placer des transducteurs de formes standards disponibles dans le commerce.

2.5 Simulations

Cette section concerne la détermination des forces magnétiques appliquées sur le MMC à travers des simulations 3D effectuées sous Ansys Maxwell. Nous traiterons également la

2.5. Simulations

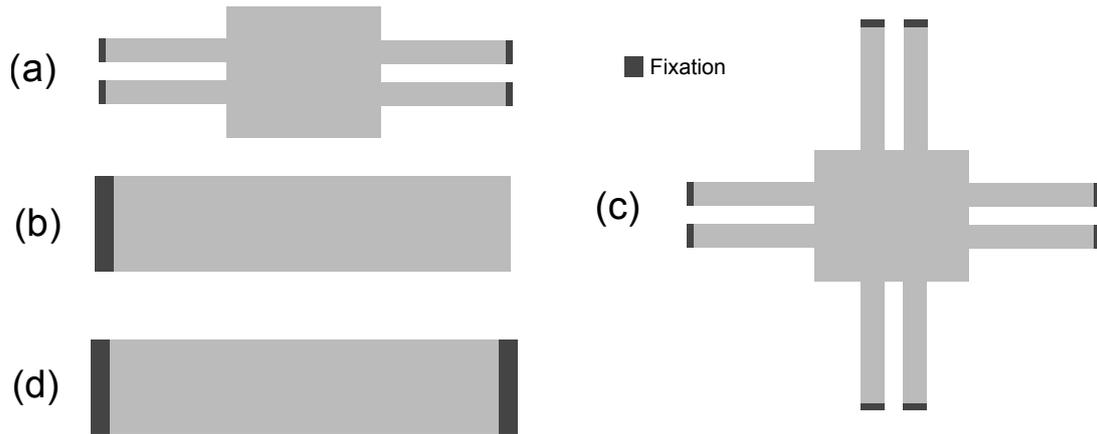


FIGURE 2.11 – Différentes poutres, (a) Poutre en porte-à-faux avec deux branches, (b) Poutre fixée d'un seul côté, (c) Poutre en porte-à-faux avec plusieurs branches, (d) Poutre en porte-à-faux avec une seule branche.

détermination de la caractéristique Force-Déplacement d'une poutre à travers des simulations 3D effectuées sous Ansys Mechanical.

2.5.1 Détermination des forces magnétiques

La détermination des forces magnétiques appliquées sur le MMC joue un rôle important dans le choix de la source de champ comme vu dans un point précédent. En plus de ça, elle permet de dimensionner correctement la poutre. C'est un élément clé sans lequel nous risquons de réaliser un dispositif qui ne fonctionnerait pas.

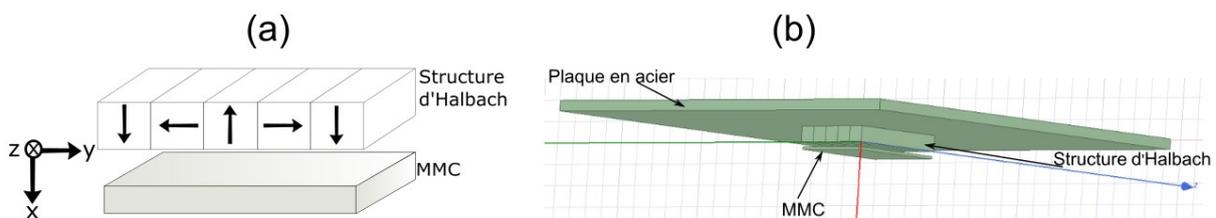


FIGURE 2.12 – (a) Schéma du principe de la simulation 3D, (b) Capture de la simulation. Les extrémités de la poutre sont fixées

Pendant son déplacement, le MMC chauffe quand il s'approche de la source de champ et se refroidit quand il s'éloigne de la source de champ, effet magnéto-calorique oblige. Les forces magnétiques appliquées sur le MMC doivent donc dépendre de sa position et de sa température $F_{mag}(x, T)$; en d'autres termes, du gradient de champ et de ses caractéristiques magnétiques pour une température donnée.

Ces forces sont calculées par une simulation en éléments finis sous Ansys Maxwell 'structure statique'. Une première étape consiste à créer un modèle 2D ou 3D du système global, le modèle 2D prend moins de temps (environ 50 min) mais on préfère un modèle en 3D, Fig. 2.12, (environ 2h) qui est plus réaliste [73, 74]. Dans une deuxième étape une

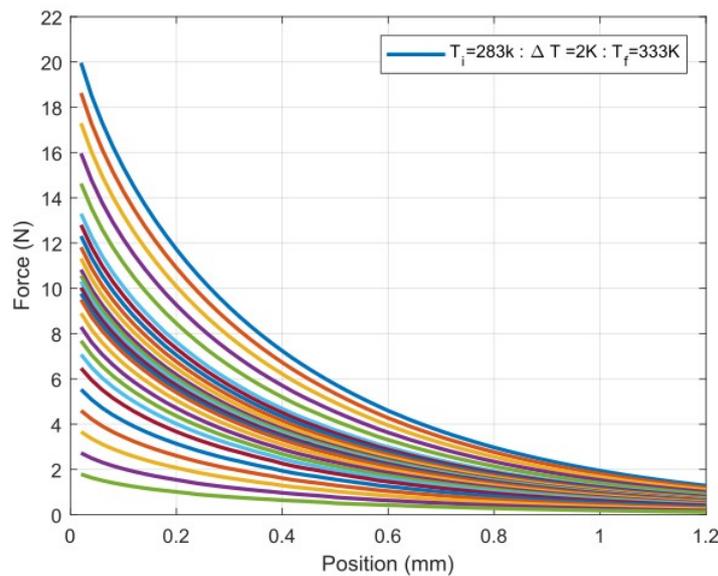


FIGURE 2.13 – La force magnétique en fonction de la position du MMC par rapport à la source de champ pour différentes température, de 283 K (10 °C) à 333 K (60 °C).

étude paramétrique est ajoutée afin de faire varier la position du MMC par rapport à son origine (source de champ). Le modèle magnétique du MMC (B(H)) à une température donnée T est inséré dans le modèle, ainsi on obtient une courbe de force magnétique pour différentes positions du MMC à la température T . La température est variée en insérant la courbe $M(H)$ mesurée qui correspond à la température voulue. Ainsi, nous déterminons la force magnétique en fonction de la position et pour différentes températures.

Les résultats de la simulation sont représentés dans la Fig. 2.13 où la force magnétique est tracée en fonction de la position du MMC pour des températures allant de 283 K à 333 K (de 10 °C à 60 °C).

2.5.2 Détermination de la caractéristique Force-Déplacement d'une poutre

La détermination de la caractéristique Force-Déplacement d'une poutre passe par une simulation 3D en éléments finis sous Ansys Mechanical. Le principe est montré par la figure 2.14 en (a) et la simulation 3D en (b). Pour un déplacement imposé de la poutre, on calcule la force de rappel correspondante. Afin d'avoir la caractéristique Force-Déplacement, la force de rappel est calculée pour plusieurs déplacements. Cependant, le matériau est défini par sa densité, son module de Young et son coefficient de Poisson.

A noter que i) la simulation est effectuée en larges déformations pour tenir en compte la non-linéarité de la caractéristique force/déplacement, ii) le déplacement dont on parle dans cette simulation n'est pas la position du MMC par rapport à la source de champ, mais le déplacement de la poutre par rapport à sa position au repos.

Cette caractéristique, quand elle est linéaire peut s'écrire sous la forme $F_{rappel} = kx$, où k est la raideur de la poutre et x son déplacement.

2.6. Étude de l'auto-oscillation

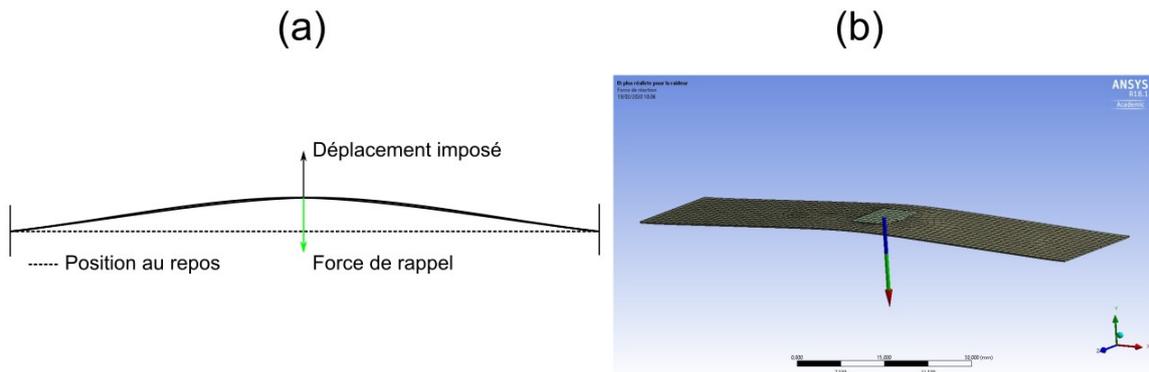


FIGURE 2.14 – (a) Schéma du principe de la simulation 3D, (b) Capture de la simulation

Cette simulation peut être utilisée de manière directe : pour une poutre donnée (dimensions), la raideur est déterminée, ou de manière indirecte : on a une valeur de raideur et on veut déterminer les dimensions de la poutre qui lui correspondent.

Le point qui va suivre 'étude de l'auto-oscillation' va nous permettre de déterminer la raideur de la poutre, ainsi cette simulation sera exploitée afin de déterminer les dimensions de la poutre.

2.6 Étude de l'auto-oscillation

L'auto-oscillation est la génération et le maintien d'un mouvement périodique par une source d'énergie sans que celle-ci ne soit périodique : générer et maintenir une périodicité mécanique régulière sans la nécessité d'une périodicité externe pour la conduire. Les auto-oscillateurs sont distincts des systèmes résonants, dans lesquels l'oscillation est entraînée par une source d'énergie qui est modulée de l'extérieur. De nombreux phénomènes naturels importants et familiers, tels que le rythme cardiaque ou les vagues des océans sont auto-oscillatoires. L'auto-oscillation est depuis longtemps un aspect essentiel de la technologie. Les turbines, les horloges et les moteurs thermiques sont des auto-oscillateurs [75].

Nous avons, précédemment, vu que pour assurer le passage de l'étape 2 (MMC en contact avec la source chaude) à l'étape 3 (déplacement du MMC de la source chaude vers la source froide) on doit avoir $F_{mag} < F_{rappel}$, Fig. 2.15. De la même façon, pour assurer le passage de l'étape 4 (MMC en contact avec la source froide) à l'étape 1 (déplacement du MMC de la source froide vers la source chaude) on doit garantir que $F_{mag} > F_{rappel}$, Fig. 2.15.

La configuration représentée dans la Fig. 2.16 respecte parfaitement les conditions annoncées avec deux points d'équilibre (système bistable), en (A) le MMC est en contact avec la source froide et en (B) le MMC est en contact avec la source chaude. Quand le MMC est en déplacement, notre système est mécaniquement instable. Un point d'équilibre (point d'équilibre stable) correspond à un point où la force de rappel et celle magnétique sont égales.

Du côté de la source chaude (B) la force de rappel coupe la force magnétique, il est

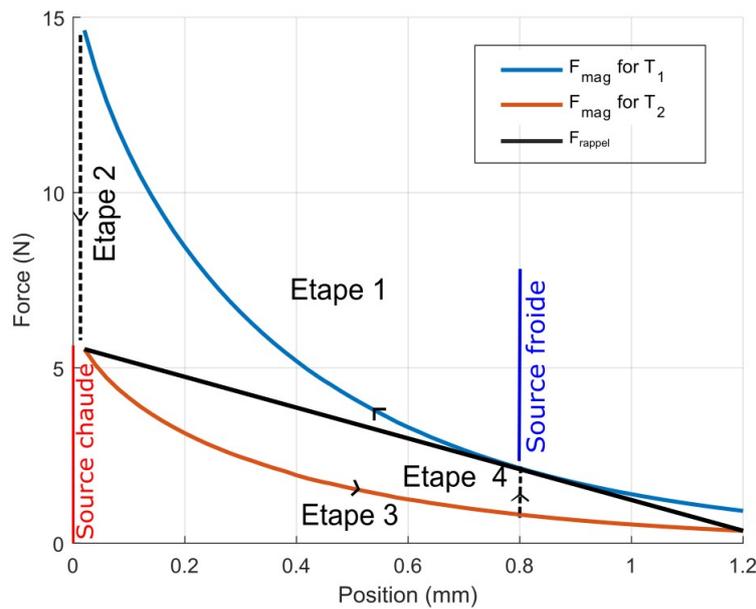


FIGURE 2.15 – Force magnétique pour deux températures ($T_1=18\text{ }^\circ\text{C}$ et $T_2=56\text{ }^\circ\text{C}$) et force de rappel en fonction de la position du MMC. Le cycle de fonctionnement est représenté.

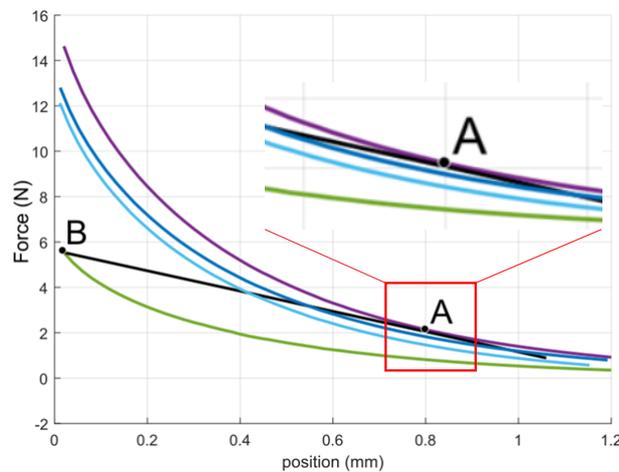


FIGURE 2.16 – Auto-oscillation. Système bistable, A et B représentent les deux points d'équilibre (force de rappel = force magnétique), comme la pente de la courbe magnétique est plus raide que celle de la force de rappel, il s'agit de point d'équilibre stable du point de vue mécanique.

donc facile d'avoir un seul point d'équilibre stable, contrairement au point A (coté source froide) où la force de rappel est tangente à la force magnétique. C'est pour cette raison qu'il est difficile d'avoir un seul point d'équilibre du côté de la source froide.

Une pareille situation est illustrée par la Fig. 2.17, la courbe noire représente la force de rappel de la poutre, les autres courbes représentent les forces magnétiques pour différentes températures. Au début, au point A (point d'équilibre stable 1) le MMC est en contact avec la source froide, la force magnétique représentée par la courbe bleu ciel est inférieure

2.6. Étude de l'auto-oscillation

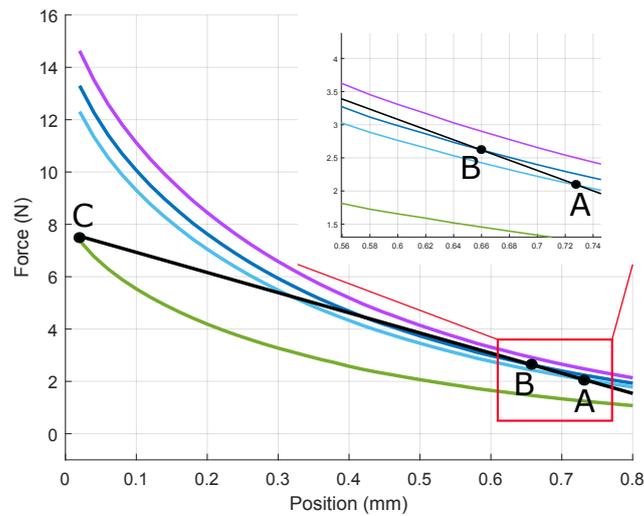


FIGURE 2.17 – Auto-oscillation. Configuration avec plusieurs points stables.

à la force de rappel, le MMC est donc immobile. Le MMC échange de la chaleur avec la source froide et la force magnétique augmente (courbe bleu foncé). Lorsque $F_{mag} > F_{rappel}$ le MMC se déplace jusqu'à s'arrêter au point B (point d'équilibre stable 2) où nous avons $F_{mag} = F_{rappel}$. Le MMC continue d'échanger de la chaleur avec la source froide à travers une mince couche d'air et la force magnétique augmente pour atteindre la force présentée par la courbe en violet. A partir de là, F_{mag} est supérieure à F_{rappel} . Le MMC se déplace jusqu'à ce qu'il atteigne la source chaude au point C (point d'équilibre stable 3). Le point B est un point d'équilibre stable que nous devons éviter.

Pour avoir un système mécaniquement instable mais borné, avec deux points d'équilibre stable, la poutre devra être parfaitement dimensionnée. La raideur souhaitée de la poutre serait de 3,4 kN/m pour les deux températures 18 °C et 56 °C des deux sources froide et chaude, respectivement, et pour une distance entre les sources de chaleur de 0,8 mm.

Le cycle de fonctionnement du générateur dépend des températures de commutations qui correspondent au moment où la force magnétique surmonte la force de rappel ($F_{mag} > F_{rappel}$) pour $T_{trans-froid}$ (température de transition mécanique du côté de la source froide) et au moment où la force de rappel surmonte celle magnétique ($F_{mag} < F_{rappel}$) pour $T_{trans-chaud}$.

Les deux températures de commutation $T_{trans-froid}$ et $T_{trans-chaud}$ peuvent être égales aux températures des sources froide et chaude (T_{froid} et T_{chaud}), respectivement (voir Fig. 2.18), mais afin d'accélérer le transfert thermique, il est préférable d'avoir les deux températures de commutation comprises entre les températures des sources. Pour un système auto-oscillant la température de la source froide est inférieure ou égale à la température de commutation côté froid ($T_{froid} \leq T_{trans-froid}$), pour la température de la source chaude : $T_{chaud} \geq T_{trans-chaud}$. La différence entre les températures des sources de chaleurs et les températures de commutations respectives devrait nous permettre de réduire les temps d'échange avec les deux sources de chaleur ce qui permet d'augmenter la puissance générée

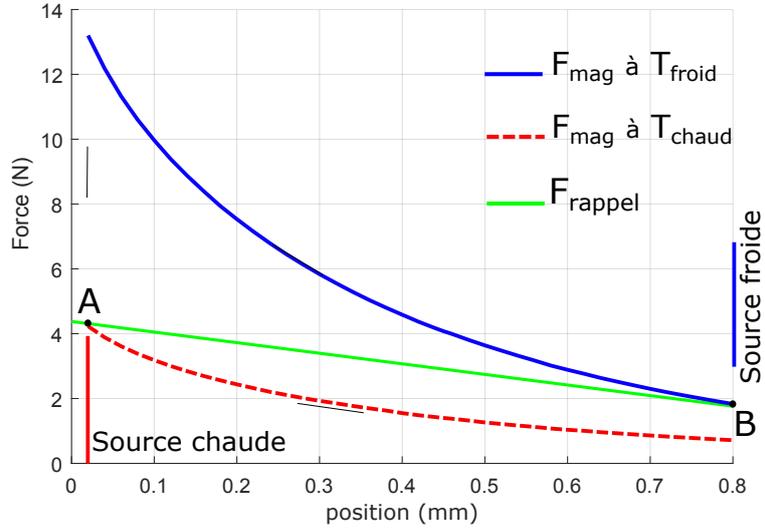


FIGURE 2.18 – Forces magnétiques aux températures des sources froide et chaude (T_{froid} et T_{chaud}) et force de rappel de la poutre. $T_{froid} = T_{trans-froid}$ (point B) et $T_{chaud} = T_{trans-chaud}$ (point A).

pour la même valeur d'énergie [61]. La figure 2.19 présente le cas où $T_{froid} \neq T_{trans-froid}$ et $T_{chaud} \neq T_{trans-chaud}$. En effet, au point A (Fig. 2.19) la force de rappel de la poutre surmonte la force magnétique pour une température différente de celle de la source chaude, pareil pour le point (B). Dans ce cas, le générateur va réaliser un cycle thermodynamique défini par les deux températures de commutation, entre autre, le MMC n'atteindra pas les températures des sources froide et chaude.

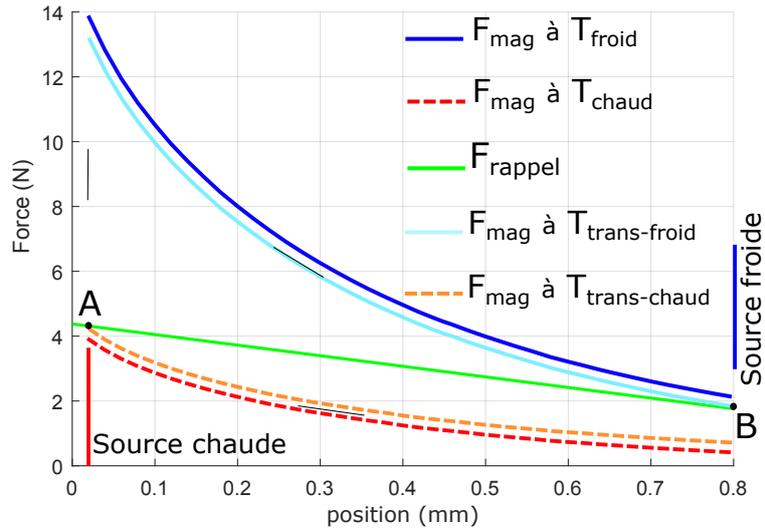


FIGURE 2.19 – Forces magnétiques aux températures T_{froid} , T_{chaud} , $T_{trans-froid}$ et $T_{trans-chaud}$ et force de rappel de la poutre. $T_{froid} \neq T_{trans-froid}$ et $T_{chaud} \neq T_{trans-chaud}$.

2.7. Modèle thermo-mécanique

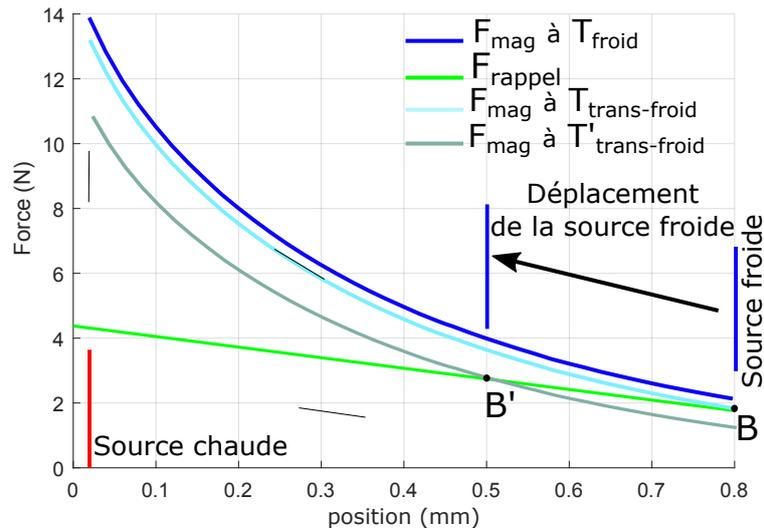


FIGURE 2.20 – Forces magnétiques aux températures T_{froid} , $T_{trans-froid}$ et $T'_{trans-froid}$ et force de rappel de la poutre. La source froide est rapprochée de la source chaude. $T_{froid} < T_{trans-froid} < T'_{trans-froid}$

La distance entre les deux sources froide et chaude est un paramètre important qui peut affecter le comportement mécanique du générateur. En effet, afin de respecter les conditions d'auto-oscillation, on détermine la raideur optimale de la poutre pour une distance entre les sources de chaleur bien précise, dans notre cas 0,8 mm. Pour une distance supérieure le système risque, simplement, de perdre son auto-oscillation car les forces magnétiques ne pourront plus renverser la force de rappel, le MMC restera donc collé à la source froide. A contrario, réduire cette distance peut dans certains cas améliorer le comportement mécanique du générateur. La figure 2.20 présente le cas d'un déplacement de la source froide vers la source chaude d'une distance de 0,3 mm. A l'état initial, la source froide est située à 0,8 mm de la source chaude, la commutation s'effectue à température $T_{trans-froid}$ (point B). Après déplacement de la source froide à 0,5 mm de la source chaude, la commutation s'effectue à température $T'_{trans-froid} > T_{trans-froid}$ (point B'). En augmentant la valeur de la température de commutation on réduit le temps d'échange avec la source froide. Même constat pour le temps de déplacement entre les deux sources qui se réduit pour une distance moins importante. Le système devient normalement plus rapide mais on verra plus ultérieurement que ce n'est pas toujours le cas.

2.7 Modèle thermo-mécanique

Dans ce point, nous abordons le modèle thermo-mécanique du système, l'objectif étant de modéliser les comportements mécanique et thermique du générateur durant les quatre étapes de fonctionnement de celui-ci.

Précédemment, dans ce chapitre, nous avons mentionné le cycle dynamique (déplacement du MMC entre deux sources de chaleur) et le cycle thermodynamique (Cycle de Brayton : deux adiabatiques et deux isochamps). Finalement ces deux cycles sont étroitement liés.

tement liés entre eux par plusieurs éléments. Lorsque le MMC se déplace, sa température varie et la force magnétique appliquée dépend de la température, ce qui influe sur le comportement dynamique du MMC. De plus le MMC doit se déplacer très rapidement pour pouvoir considérer un déplacement adiabatique. La durée d'arrêt du MMC en contact avec les sources froide et chaude est contrôlé par les besoin de l'échange thermique.

Durant les deux étapes adiabatiques 1 et 3, le MMC est en mouvement, nous pouvons représenter le système par le schéma de la figure 2.21 où une force magnétique et une force de rappel sont appliquées sur le MMC. Comme le déplacement du MMC s'effectue uniquement sur l'axe x , le modèle mécanique d'un tel système est décrit comme suit :

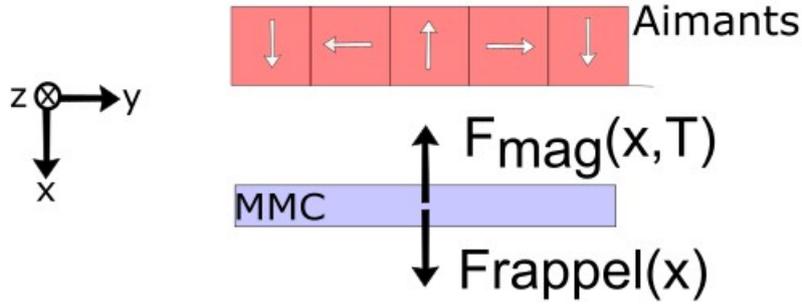


FIGURE 2.21 – Système étudié

$$F_{mag}(x, T) - F_r(x) = ma_x \quad (2.1)$$

Avec :

m : La masse du MMC,

F_{mag} : La force magnétique appliquée sur le MMC.

F_r : La force de rappel de la poutre.

a_x : L'accélération du MMC selon l'axe de déplacement x .

T : La température du MMC.

x : La position du MMC.

Durant son déplacement, la température du MMC change de $\Delta T_{adiabatique}$ selon l'effet magnéto-calorique. Le modèle thermique dans ce cas peut être écrit comme suit [76] :

$$dQ = TdS = C_H dT + T \left(\frac{\partial S}{\partial H} \right) dH \quad (2.2)$$

D'après la relation de Maxwell pour un volume donné [49] :

$$\left(\frac{\partial S}{\partial H} \right) = V\mu_0 \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right) \quad (2.3)$$

Pour une transformation adiabatique :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\mu_0}{C_H} VT \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right) \frac{dH}{dt} \quad (2.4)$$

On peut écrire :

2.7. Modèle thermo-mécanique

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dH}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dH}{dx} v(t) \quad (2.5)$$

Le modèle thermique peut s'écrire comme suit :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\mu_0}{C_H} VT \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right) \frac{dH}{dx} v(t) \quad (2.6)$$

Avec :

T : La température du MMC.

V : Le volume du MMC.

t : Le temps.

μ_0 : La perméabilité du vide.

C_H : La capacité thermique du MMC (J/K).

M : L'aimantation du MMC.

H : Le champ magnétique appliqué.

x : La position du MMC.

v : La vitesse du MMC.

Pour les deux étapes 1 et 3 le modèle thermo-mécanique est représenté par les deux équations 2.1 et 2.6.

Durant les deux étapes 2 et 4, le MMC est immobile car il est en contact avec les sources de chaleur (froide ou chaude). Dans le cas d'un cycle thermo-dynamique qui maximise la puissance, on aura $\frac{dT}{dt} = 0$, mais comme ce n'est, malheureusement, pas notre cas, le modèle thermique se présente comme suit :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{K}{C_H} (T - T_{finale}) \quad (2.7)$$

Où :

$K = k_{air} \frac{s}{l}$: K représente la conductance entre le matériau et le réservoir. Cette conductance étant principalement liée à la couche d'air entre ces éléments.

k_{air} : La conductivité thermique de l'air.

s : La surface du MMC.

l : La distance entre le MMC et la source de chaleur quand ces deux sont en contact (la valeur est estimée dans le chapitre 3).

T_{finale} : La valeur finale de la température, dans notre cas c'est la température de commutation.

A travers ce modèle on assume que le MMC se chauffe ou se refroidit jusqu'à changer de phase magnétique. Pour des températures de sources chaude et froide de 56 °C (329 K) et 18 °C (291 K), les températures de commutations respectives sont de 55 °C (328 K) et 20 °C (293 K). La distance de déplacement est de 0,8 mm. En utilisant toutes les données nécessaires nous avons écrit un code MATLAB afin de résoudre les différentes équations du modèle thermo-mécanique.

La figure 2.22 montre les résultats du modèle thermo-magnétique, à savoir, la position et la température du MMC en fonction du temps. Durant la première étape, le MMC se déplace de la source froide à 0,8 mm vers la source chaude à 0 mm en l'espace de 0,69 ms. Durant cette même étape la température du MMC augmente de $\Delta T_{adiabatique} = 0.7$ K

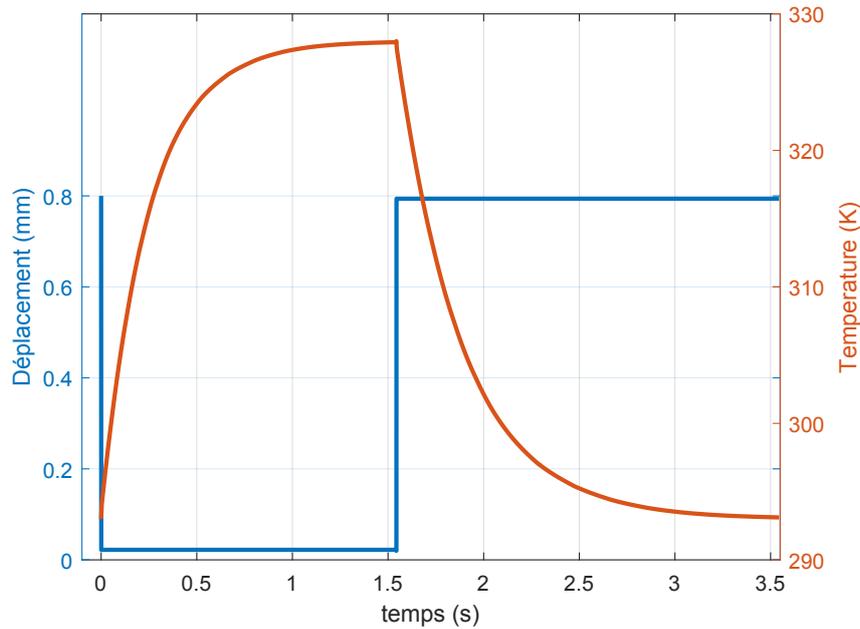


FIGURE 2.22 – Résultats du modèle thermo-mécanique : la position et la température du MMC en fonction du temps. 0 mm position de la source chaude, 0,8 mm position de la source froide.

dûe à l'effet magnéto-calorique. Durant l'étape 2, le MMC est en contact avec la source chaude à 0 mm où il reste immobile. Durant cette étape la température du MMC passe de 293.7 K à 328 K qui est la température de commutation pour laquelle $F_r > F_{mag}$, cette étape dure 1.54 s. La troisième étape, est l'étape où le MMC se déplace de la source chaude à 0 mm vers la source froide à 0,8 mm en l'espace de 0,5 ms. Durant cette étape la température du MMC diminue de 0,1 K. La quatrième et dernière étape du cycle, est l'étape où le MMC est en contact avec la source froide à $x=0,8$ mm. Durant cette étape la température du MMC passe de 327,9 K à 293 K en 2 s.

Le cycle dynamique peut être représenté dans le plan vitesse/position, Fig. 2.23. Dans ce plan, uniquement les deux étapes 1 et 3, où le MMC se déplace, sont représentées. Les deux autres étapes correspondent aux deux points (a) à 0,8 mm et (b) à 0 mm où la vitesse du MMC est nulle. Durant l'étape 1, le MMC se déplace de la source froide à la source chaude, pendant ce temps, sa vitesse augmente jusqu'au contact (point a') avec la source chaude où la vitesse s'annule instantanément. La même discussion peut être appliquée à l'étape 3.

Un système parfait, comme on vient d'étudier, a une période de 3.5 s (fréquence de 0,29 Hz). De plus, le temps de réponse thermique, 63 % de la valeur finale, est de 300 ms.

2.8. La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur

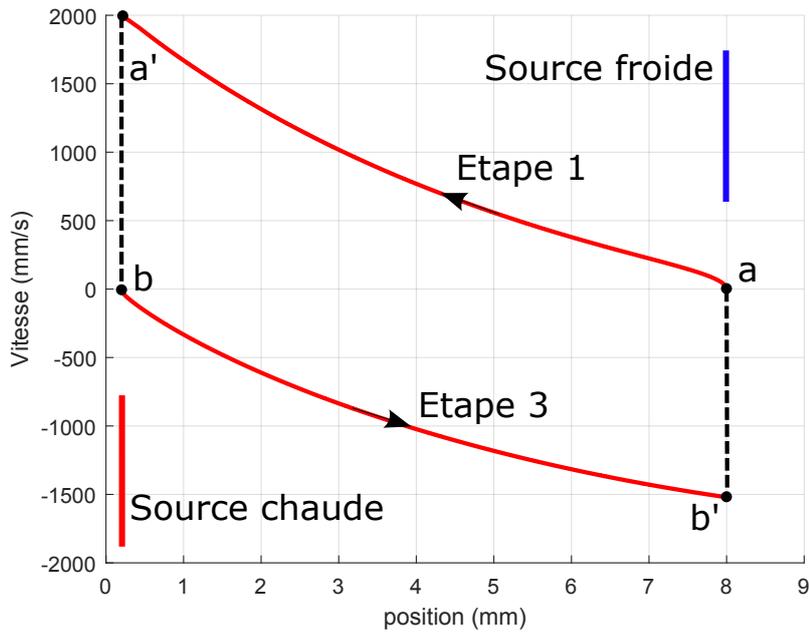


FIGURE 2.23 – Résultats du modèle. Le cycle dynamique dans le plan vitesse/position. Les points a' et b' correspondent au moment où le MMC se met en contact avec les sources chaude et froide respectivement. Uniquement les deux étapes 1 et 3 sont représentées, les deux étapes isochamps sont représentées par les points a et b où la vitesse du MMC est nulle. La source chaude est à 0 mm et la source froide à 0,8 mm.

2.8 La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur

Dans cette section, nous aborderons la conversion de l'énergie mécanique à l'énergie électrique à l'aide de bobines (effet d'induction) ou de transducteurs piézoélectriques. Au cours des étapes 1 et 3, le MMC acquiert une certaine quantité d'énergie mécanique en raison des forces qui agissent sur lui. Le but ici est de récupérer le plus possible de cette énergie (environ 5 mJ) évitant la dissipation lors du choc avec les sources de chaleurs.

Un transducteur doit être utilisé afin de réaliser la conversion mécanique / électrique. Dans le cas de notre architecture, les seuls transducteurs pouvant être utilisés sont les matériaux piézoélectriques et les bobines.

L'efficacité d'un transducteur est liée à la quantité d'énergie mécanique convertie en énergie électrique.

Le bilan énergétique entre le travail mécanique disponible associé à l'énergie magnétique, l'énergie cinétique et l'énergie récoltée est donné par l'expression suivante [77] :

$$(F_{mag} - F_r)dx = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) + dW_{rec} \quad (2.8)$$

Où m est la masse du MMC (LaFeSi, densité autour de 7.8 g/cm³), v est la vitesse et dW_{rec} est l'énergie récoltée et correspond au travail fait par le transducteur.

Idéalement, nous aimerions réduire la vitesse de la partie mobile à zéro lorsque le MMC entre en contact avec les sources de chaleur, évitant ainsi les pertes d'énergie liées au choc. Cependant, cette condition peut difficilement être atteinte en utilisant un mode purement passif, c'est-à-dire lorsque la tension aux bornes des transducteurs n'est pas contrôlée.

Dans un premier temps pour choisir la méthode de récupération, on considère que la récupération d'énergie n'influence pas l'auto-oscillation.

Le choix du transducteur sera fait à base de simulations et de calculs visant à estimer l'énergie récupérée par les transducteurs durant les deux étapes 1 et 3 où le MMC est en déplacement. Les deux étapes iso-champs où le MMC est immobile, ne sont pas prises en compte, car la récupération d'énergie se fait principalement durant les deux étapes adiabatiques 1 et 3.

2.8.1 Les bobines

Les bobines permettent de capter le changement de flux magnétique induit par, i) le déplacement du MMC (c'est-à-dire l'énergie cinétique), ii) le changement de magnétisation pendant la transition de phase due à l'échange thermique. Cependant, la variation du flux, dans le deuxième cas, est négligeable par rapport au premier, car la variation de température est lente par rapport au déplacement.

Le circuit électrique équivalent d'une bobine est simplement une source de tension en série avec la résistance interne de la bobine et une résistance de charge, l'auto-induction de la bobine étant négligée. La tension induite $u(t)$ à la bobine peut-être donnée comme :

$$u(t) = \frac{d\phi}{dt} \tag{2.9}$$

Où $\frac{d\phi}{dt}$ est la variation temporelle du flux magnétique à travers la bobine.

Calcul de la variation temporelle du flux

Dans ce qui suit, nous considérons que la bobine est de surface rectangulaire $S = p * L$, où p est la profondeur de la bobine selon l'axe z et L la longueur de la bobine selon l'axe y (voir Fig.2.24). Nous considérons aussi que la bobine se déplace, sur l'axe x , par rapport à la source de champ à une vitesse $v(t)$.

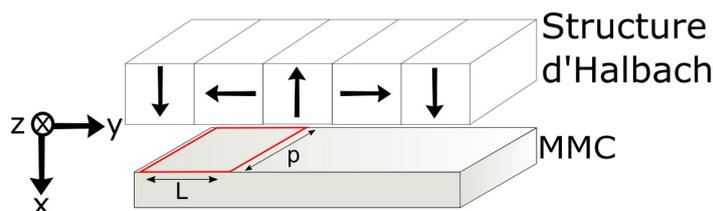


FIGURE 2.24 – Bobine : cas d'étude

2.8. La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur

L'induction de la source de champ est constante selon l'axe y . Le problème est donc bi-dimensionnel ($B(x, y)$).

Pour ce cas d'étude nous démontrons que

$$\frac{d\phi}{dt} = pv(t) \int_0^L \frac{dB}{dx} dy \quad (2.10)$$

Où $\frac{dB}{dx}$ est la variation spatiale de l'induction selon x .

Pour calculer la variation temporelle du flux, nous avons besoin de la vitesse $v(t)$ et de $B(x, y)$, où x est la distance de la bobine par rapport à la source de champ et y varie entre 0 et L . La vitesse est déterminée à partir du modèle Thermo-mécanique précédent. L'induction $B(x, y)$ est issue de simulation 2D en éléments finis sous Ansys Maxwell. Pour chaque position x , nous calculons B sur la longueur de la bobine $[0, L]$ avec un pas bien précis. Nous répétons la même procédure pour différentes valeurs de positions x , ainsi, nous aurons $B(x, y)$.

Calcul de l'énergie

Une fois la tension induite par la bobine est connue, la puissance reçue par une charge externe est :

$$P_{charge}(t) = \frac{R_{charge}}{(R_{charge} + R_{interne})^2} u^2(t) \quad (2.11)$$

Où R_{charge} est la résistance de charge et $R_{interne}$ est la résistance interne de la bobine. La puissance maximale est atteinte pour $R_{charge} = R_{interne}$. A puissance maximale, la puissance reçue par la charge est la moitié de la puissance produite par la source de tension.

$$P_{charge}^{max}(t) = \frac{u^2(t)}{4R_{interne}} \quad (2.12)$$

A travers l'expression de $R_{interne}$, nous pouvons voir que la puissance récupérée dépend du volume de la bobine V_{cuivre} , avec

$$P_{charge}^{max}(t) = \left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 \frac{S}{4\rho L} = \left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 \frac{V_{cuivre}}{4\rho L^2} \quad (2.13)$$

Où S est la section d'une seule bobine, L est la longueur d'une bobine (voir 2.24) et ρ est la résistivité du cuivre.

Cette puissance ne dépend pas du nombre de tour de la bobine. Sur une période T l'énergie électrique produite est :

$$E = \int_0^T P_{charge}^{max}(t) dt \quad (2.14)$$

Dans cette étude, on s'intéresse à plusieurs configurations de bobines. La figure 2.25 montre trois configurations : L1, bobinage placé autour du MMC, L2, bobinage placé sur le MMC, L3, bobinage placé sous les aimants.

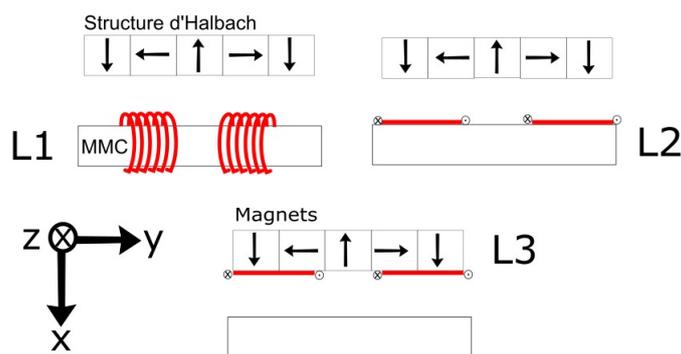


FIGURE 2.25 – Configurations de bobines. L1, bobinage placé autour du MMC. L2, bobinage placé sur le MMC. L3, bobinage placé sous les aimants.

Bobinage	Énergie (μJoules)
L1	0.0056
L2	8
L3	2

TABLE 2.3 – L'énergie produite, durant les étapes 1 et 3, par les trois configurations

Selon les processus de fabrication, l'épaisseur des bobinages est de $70 \mu\text{m}$ avec une section carrée. Une bobine trop épaisse freine le flux thermique. La longueur varie en fonction de la position de la bobine.

Le tableau 2.3 montre l'énergie électrique, fournie par le générateur, sur une période pour les trois configurations de bobines. on voit bien que L1 fournit le moins d'énergie et que L2 produit le plus d'énergie. Cela signifie que mettre une bobine sur un MMC est plus rentable.

L'aptitude des bobines à récupérer l'énergie mécanique est liée à la vitesse de déplacement du MMC, plus le déplacement est rapide plus la récupération est efficace. Notre modèle de déplacement ne prenant pas en compte de potentiels frottements visqueux, en particulier avec l'air, nous avons une estimation haute de la vitesse. En conséquent une réduction de la vitesse de déplacement, très probable dans le système, va détériorer la récupération d'énergie de bobines. Nous avons donc dans cette étude une estimation haute de l'énergie récupérable via ce principe de conversion.

2.8.2 Les matériaux piézoélectriques

Etat de l'art

Les matériaux piézoélectriques convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique. Quand ils sont mécaniquement déformés, ils produisent une charge électrique. Cet effet est dû à la séparation spontanée de charges au sein de certaines structures cristallines, produisant ainsi un dipôle électrique [78]. Ici nous nous intéressons au mode passif de récupération (les piézoélectriques sont connectés sur une résistance), le mode actif corres-

2.8. La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur

pond à un mode où une tension est appliquée au piézoélectrique de façon à augmenter l'énergie récupérée.

Les équations caractéristiques de la piézo-électricité donnent la relation entre les variables électriques et mécaniques, comme suit :

$$D_i = \varepsilon_{ij}^T E_j + d_{ikl} T_{kl} \quad (2.15)$$

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{ijk} E_k \quad (2.16)$$

Où, T est le tenseur de contrainte (N/m^2), S est le tenseur des déformations (m/m), E est le champ électrique (V/m), D est le déplacement électrique (C/m^2), s est le tenseur des souplesses (m^2/N), ε est la permittivité (F/m) et d est le tenseur du couplage piézoélectrique (C/N or m/V).

La relation, directe, entre la contrainte T et le déplacement électrique est donnée par l'équation 2.15 comme suit :

$$d = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E \quad (2.17)$$

A travers l'équation 2.17 on peut voir que l'application d'une contrainte sur un matériau piézoélectrique conduit à sa polarisation, ou inversement : la polarisation d'un matériau piézoélectrique conduit à la création d'une contrainte dans ce matériau.

La relation directe entre la déformation S et le champ électrique E est donnée par l'équation 2.16 comme suit :

$$d = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T \quad (2.18)$$

L'équation 2.18 montre clairement que l'application d'une déformation sur un matériau piézoélectrique conduit à l'apparition d'un champ électrique, ceci étant l'effet direct. L'effet inverse concerne l'apparition d'une déformation liée à l'application d'un champ électrique à un matériau piézoélectrique.

La capacité d'un matériau piézoélectrique à convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement est caractérisée par un coefficient de couplage électromécanique. Pour des évolutions quasi-statiques (loin de la résonance) on définit le coefficient intrinsèque de couplage électromécanique, cette valeur qui dépend des constantes du matériau piézoélectrique est la valeur maximale de ce coefficient [16]. La figure 2.26 présente les différents modes de vibrations ainsi que les coefficients de couplage associés.

Dans le mode longitudinal, la déformation mécanique et le champ appliqué ont la même direction. Le comportement piézoélectrique est alors décrit par le coefficient d_{33} et le couplage électromécanique par le coefficient k_{33} . Pour le mode transverse, la direction de la déformation est perpendiculaire à celle du champ appliqué. Les coefficients à prendre en compte sont d_{31} et k_{31} . Il existe encore les deux modes radial et de cisaillement mais nous avons choisi de ne pas les détailler.

Le cas des céramiques piézoélectriques montre un comportement diélectrique et électromécanique non-linéaire. La figure 2.27 présente la polarisation d'une céramique piézoélectrique en fonction du champ électrique appliqué en (a) et sa déformation en fonction

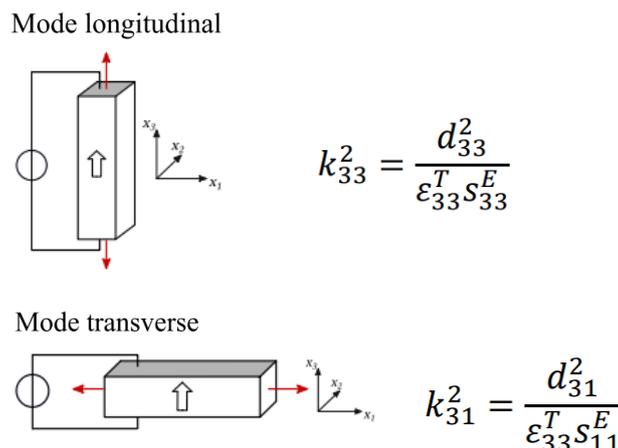


FIGURE 2.26 – Modes de vibrations piézoélectriques et coefficients de couplages associés [16, 17]

du champ en (b). La polarisation et la déformation évoluent de façon non-linéaire avec l'apparition d'un hystérésis et d'un changement de direction dans le cas de la polarisation. A champ électrique nul, il subsiste une polarisation rémanente P_{rem} et une déformation S_{rem} . Il existe une valeur de champ (E_C) pour laquelle la polarisation et la déformation sont nulles. Cette non-linéarité est liée au caractère ferroélectrique de la céramique piézoélectrique [79, 80].

Plusieurs matériaux piézoélectriques existent, cependant nous nous intéressons aux principaux matériaux qui sont le PZT, le PVDF et le MFC. Le tableau 2.4 présente les différentes caractéristiques de ces quatre matériaux piézoélectriques. Sachant que l'application visée est la récupération de l'énergie et pas l'actionnement, les paramètres qui nous intéressent sont les coefficients piézoélectriques (d_{33} et d_{31}), les facteurs de couplages (k_{33} et k_{31}), la limite élastique et la densité d'énergie. Suivant ce raisonnement le PZT doux est le bon choix. D'autres paramètres permettant de mieux choisir le matériau doivent exister. Cependant, le critère, imbattable, du PZT doux, est qu'il est disponible sous plusieurs formes, plusieurs dimensions et peu cher.

TABLE 2.4 – Caractéristiques des principaux matériaux piézoélectriques

	PZT dur [81]	PZT doux [82]	PVDF [83]	MFC [84]
Type	Céramique	Céramique	Polymère	Composite
Densité (kg/m^3)	7600	7500	1800	—
d_{33} ($10^{-12}C/N$)	290	575	-24	400
d_{31} ($10^{-12}C/N$)	-130	-260	16	-170
k_{33}	0,68	0,76	0,2	0,5-0,7
k_{31}	0,33	0,4	0,1	—
Limite élastique (MPa)	50	50	50	—
Densité d'énergie (mJ/cm^3) [85]	56	56	0,06	30

2.8. La conversion mécanique-électrique : choix du transducteur

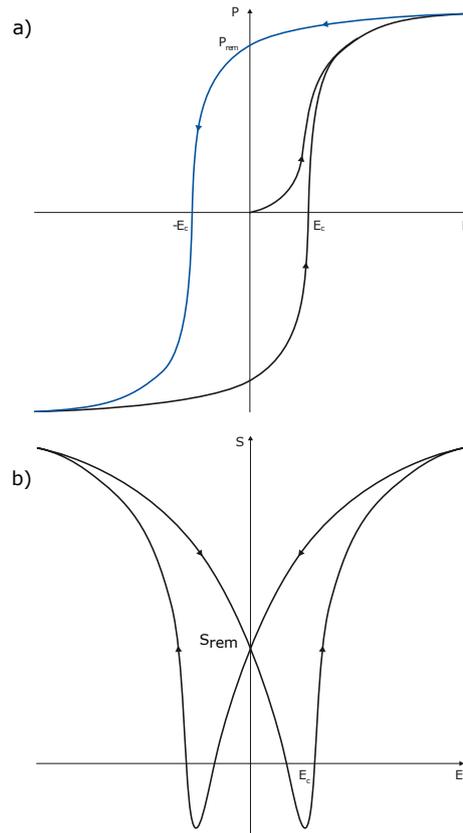


FIGURE 2.27 – Courbes en large signal en fonction de l'intensité du champ électrique E
a) comportement diélectrique de la polarisation P , b) comportement électromécanique de la déformation longitudinale S [18]

Estimation de l'énergie

L'architecture étudiée consiste en quatre plaques piézoélectriques 'C151 de PI, PZT doux' de dimensions $10 \times 10 \times 0,3 \text{ mm}^3$ [30], placées sur la poutre en CuBe2 de dimensions $68 \times 20 \times 0,3 \text{ mm}^3$. Les caractéristiques des plaques piézoélectriques sont résumées dans le Tableau 2.4. Les dimensions de la poutre ont été retrouvées à partir de la valeur de raideur $k=3,4 \text{ kN/m}$ comme expliqué dans le point 'Détermination de la caractéristique Force-Déplacement d'une poutre'.

Une simulation 3D sous Ansys nous permet dans un premier temps de déterminer la position optimale des quatre piézoélectriques, le but étant de maximiser les contraintes appliquées sur ces matériaux sans dépasser la limite élastique '50 MPa'. Le cas optimal s'avère être celui où on place un piézoélectrique à chaque extrémité de la poutre (modèle 3D, Fig. 2.28). Dans un deuxième temps, on détermine via cette simulation les tensions piézoélectriques pour plusieurs positions, ces tensions vont nous servir pour le calcul de l'énergie. A noter que la simulation a été effectuée en large déformations, les conditions aux limites concernent la fixation des deux extrémités de la poutre.

L'énergie produite par un matériau piézoélectrique peut-être calculée comme suit :

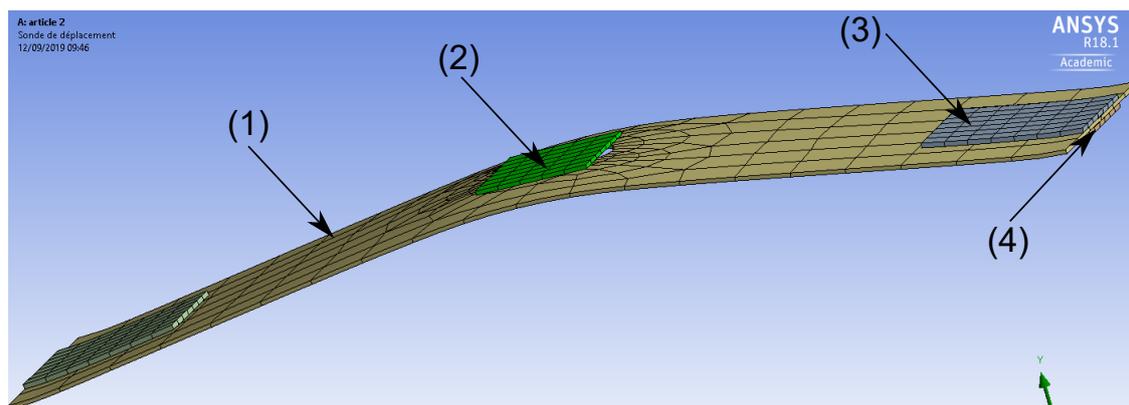


FIGURE 2.28 – Modèle 3D sous Ansys du système étudié. 1, Une poutre en porte-à-faux. 2, le MMC. 3 et 4, des plaques piézoélectriques. Les extrémités de la poutre sont fixées.

$$E(t) = \frac{1}{2}CV^2(t) \quad (2.19)$$

Où C est la capacité d'un matériau piézoélectrique (F), V la tension produite (V) et t le temps (s).

La tension V est calculée pour plusieurs positions via la simulation. En utilisant le modèle mécanique on retrouve le temps t pour chaque position, ainsi nous aurons la tension en fonction du temps. La puissance instantanée est donc calculée comme suit :

$$P(t) = \frac{E(t)}{t} \quad (2.20)$$

L'énergie totale durant une étape est :

$$E = \int_0^{t_{\text{etape}}} P(t)dt \quad (2.21)$$

L'énergie générée dans ce cas est de $16,87 \mu\text{J}$.

2.9 Conclusions

Le générateur thermomagnétique étudié est composé d'une source froide, d'une source chaude et d'une poutre sur laquelle un MMC est posé. Pendant son fonctionnement, ce générateur réalise simultanément un cycle dynamique et un autre thermodynamique. Le premier cycle concerne un système bistable où un matériau se déplace entre deux sources de chaleur alors que le deuxième concerne un cycle de Brayton avec deux adiabatiques et deux isochamps. Le cycle dynamique a été représenté graphiquement avec toutes ses étapes, les conditions de passage d'une étape à une autre ont été discutées.

Le matériau magnéto-calorique 'LaFeSi' a été caractérisé sous DRX, il en résulte que la phase magnéto-calorique ne représente que 14% du volume total, le reste étant la phase FeSi avec une majorité de fer qui aide à la tenue mécanique du matériau. Les mesures magnétiques sous VSM permettent d'avoir les caractéristiques magnétiques du

2.9. Conclusions

MMC à différentes températures et de confirmer la température de Curie déclarée par le constructeur. Les caractéristiques magnétiques ont servi à la détermination des forces magnétiques et ainsi à choisir la source de champ et à dimensionner la poutre. La source de champ choisie est une structure de champ qui permet de concentrer le champ près des aimants et d'avoir un gradient de champ et des forces magnétiques importantes. Nous avons, par ailleurs, exposé les simulations qui nous servent à déterminer les forces magnétiques appliquées sur le MMC ainsi que la raideur d'une poutre.

La raideur nécessaire pour avoir un système auto-oscillant est de 3,4 kN/m, cette valeur a été retrouvée à l'aide de l'étude de l'auto-oscillation. Un système auto-oscillant n'est pas forcément bistable et on verra dans le chapitre prochain qu'il est difficile d'avoir un système bistable.

Le modèle thermo-mécanique du générateur permet de lier les deux cycles dynamique et thermo-dynamique. De ce modèle, il ressort que dans le cas d'un générateur optimal (générateur bistable avec un cycle de Brayton) on s'attend à une fréquence de 0,29 Hz. Cette fréquence résulte principalement d'un échange limité par le contact thermique, ici modélisé par une couche d'air de 32 μm . L'amélioration de cette interface thermique doit donc conduire à une augmentation de la fréquence. L'assemblage du prototype devra donc assurer un bon état de surface entre le matériau MMC et les réservoirs.

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être réalisée de différentes manières. Deux méthodes différentes ont été étudiées : les bobines et les matériaux piézoélectriques. Différentes configurations de bobines ont été traitées. Pour le matériau piézoélectrique, nous avons étudié un système où quatre plaques piézoélectriques sont placées sur une poutre fixée des deux extrémités. L'énergie électrique récupérable pour une solution avec les bobines est de 8 μJ (2,32 μW) alors qu'elle est de 16,87 μJ (4,90 μW) avec des matériaux piézoélectriques. De plus, dans le cas des bobines la récupération est directement liée à la vitesse de déplacement ce qui n'est pas le cas pour les piézoélectriques. En plus de produire plus d'énergie que les bobines, les principaux avantages des piézoélectriques sont la simplicité et la bonne efficacité de transduction même à basses fréquences de travail.

Cette étape de modélisation, nous a permis de cerner les points importants assurant un bon (le meilleur) fonctionnement du thermogénérateur. Fort de cette expérience le prochain chapitre abordera la réalisation du générateur. Il proposera aussi des méthodes afin de pouvoir étudier son fonctionnement et ainsi confronter le modèle avec les mesures.

Premier prototype : Fabrication, Instrumentation et Études

Sommaire

3.1	Fabrication du premier prototype	58
3.1.1	Elaboration de la source de champ et de la source chaude	58
3.1.2	Fabrication de la poutre	61
3.1.3	Caractérisation de la poutre	65
3.1.4	Fabrication de la source froide	65
3.1.5	Système de fixation	68
3.2	Instrumentation : réalisation d'un banc de test	71
3.2.1	Mesure de la température	71
3.2.2	Mesure du déplacement du MMC	72
3.2.3	Mesure des tensions des piézoélectriques	73
3.2.4	Le banc de test	77
3.3	Étude du fonctionnement	78
3.3.1	Étude du cycle mécanique	81
3.3.2	Étude du cycle magnétique M-H	85
3.4	Paramètres affectant le fonctionnement du générateur	87
3.4.1	Effets des conditions aux limites	87
3.4.2	Effet de la température de la source de chaleur	90
3.5	Conclusions	93

Ce chapitre présente la fabrication et l'instrumentation de la première version du prototype. Ce prototype, illustré dans la figure 3.1, est constitué de trois blocs assemblés contenant une source chaude, une poutre et une source froide. La source chaude est constituée d'une résistance chauffante et d'une source de champ de type "Halbach array", le tout étant collé, de part et d'autre d'une barre en fer. La source froide est un bloc d'aluminium refroidi par eau (échangeur à eau). Le matériau magéto-calorique (MMC) et les quatre plaques piézoélectriques sont collés sur la poutre qui va se déformer entre la source froide et la source chaude.

Dans le cas parfait, les sources de chaleur seraient des thermostats idéaux dont les températures ne changeraient pas ; les sources de chaleur qui seront présentées dans ce chapitre, sont utilisées pour simuler l'environnement naturel dans lequel le générateur devra fonctionner, elles ont été réalisées de façon à pouvoir contrôler et stabiliser leurs températures. Par ailleurs, la poutre visée nous permettrait, via le réglage de sa raideur

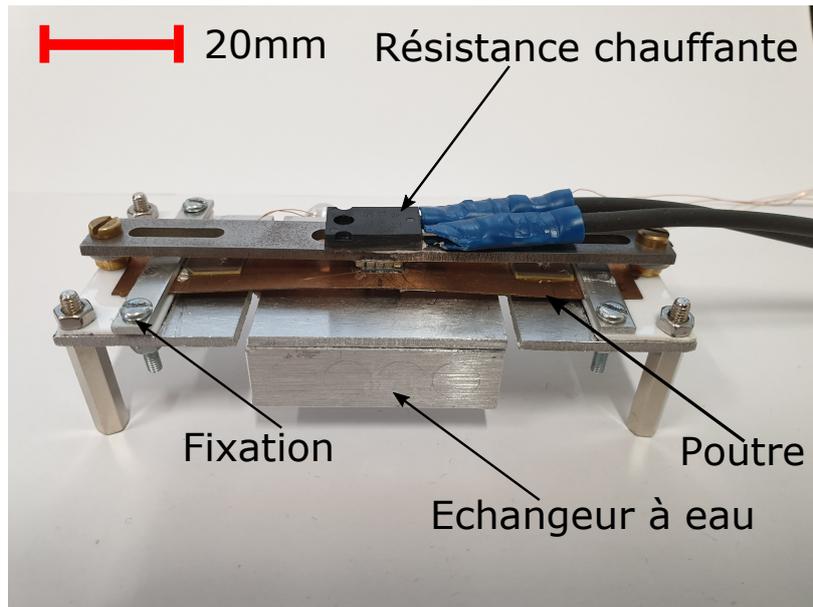


FIGURE 3.1 – Le premier prototype du générateur thermomagnétique, composé d'une poutre en (CuBe_2) sur laquelle sont collés le MMC et quatre plaques piézoélectriques. Le MMC fait des va et vient entre une source chaude, chauffée par une résistance chauffante, et une source froide, refroidi par un échangeur à eau.

'force de rappel', d'avoir un système auto-oscillant bistable avec deux étapes où le MMC se déplacerait rapidement et deux autres étapes où le MMC serait en contact avec les deux sources de chaleur. Enfin, on voudrait un excellent couplage entre les deux cycles dynamique et thermo-dynamique et cela se fait par le contact thermique d'un côté et par l'effet magnéto-calorique induit par le champ de l'autre. La réalisation de chaque partie du prototype est motivée par ces objectifs.

Afin d'étudier le comportement du générateur, un banc de test a été élaboré pour mesurer les différentes températures (MMC, source chaude et source froide), la position du MMC ainsi que les tensions générées par les plaques piézoélectriques. Les résultats de mesures seront exploités afin de comprendre en détails ce qui se passe réellement dans le générateur. Enfin, sera présentée l'étude de l'effet de la température de la source de chaleur ainsi que l'effet des conditions aux limites (serrage de la poutre) sur le comportement mécanique du prototype.

3.1 Fabrication du premier prototype

3.1.1 Elaboration de la source de champ et de la source chaude

La structure d'Halbach planaire (Halback array) est réalisée avec cinq aimants NdFeB (voir Fig. 3.2) orientés comme indiqué sur la Fig. 3.3. Les aimants sont collés sur une barre en fer afin de renforcer le champ du côté du matériau calorifique.

Les aimants sont orientés comme indiqué sur la Fig. 3.3. Les aimants et la barre assurent donc aussi le transfert de chaleur de la résistance chauffante au MMC.

3.1. Fabrication du premier prototype



FIGURE 3.2 – Aimant NdFeB ($1,5 \times 1,5 \times 10 \text{ mm}^3$). Les aimants NdFeB choisis présentent un revêtement de protection en Nickel (Ni-Cu-Ni) d’une épaisseur d’environ $12 \mu\text{m}$. [19]

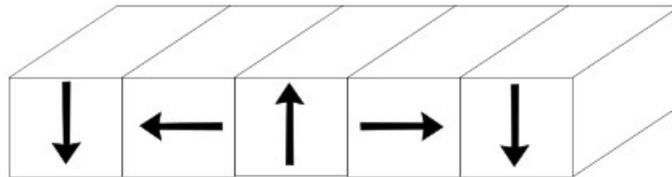


FIGURE 3.3 – Structure d’Halbach

De par la nature des matériaux et des forces magnétiques importantes, le collage est un point délicat de la fabrication. La colle époxy (UHU [86]) s’est avérée tenir les efforts mécaniques tout en offrant une viscosité (35 Pa s), et une malléabilité (pendant 90 min à $20 \text{ }^\circ\text{C}$) facilitant l’assemblage. Néanmoins la structure d’Halbach et la taille des aimants ($1,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) rendent l’opération délicate. Pour aborder sereinement cette opération, une procédure, décrite par la Fig. 3.4, a été développée. Elle se décompose en plusieurs étapes :

Etape 1 - On prépare les surfaces d’aimants au papier de verre puis on les nettoie correctement à l’aide d’un alcool.

Etape 2 - On dépose les aimants sur une plaque en fer comme le montre la Fig. 3.4(a) en laissant un espace suffisant pour que les aimants ne s’attirent pas. Cette plaque en fer a été préalablement recouverte d’une feuille de Téflon pour éviter que les aimants se collent à elle, une fois que la colle aura séché.

Etape 3 - Après avoir préparé la colle en respectant les consignes du constructeur [86], celle-ci est déposée sur les surfaces représentées en jaune sur la Fig. 3.4(b). Puis à l’aide d’un objet non-magnétique, en aluminium par exemple, les aimants sont poussés de chaque côté jusqu’à ce qu’ils entrent tous en contact (Fig. 3.4(b)).

Etape 4 - La plaque en fer, qui va supporter les aimants et canaliser les lignes de champs, est ensuite déposée sur le dessus (voir Fig. 3.4(c)). Pour assurer une bonne

rigidité de la structure.

Etape 5 - Les résidus de colle sont nettoyés. L'état de surface de la structure d'Halbach est aussi important, c'est pour cela que nous avons poncé puis lissé la surface à l'aide de papier verre de différents grains.

La Fig. 3.5 montre une photo de la structure d'Halbach collée sur la plaque en fer ($100 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$), pour un séchage complet de la colle il faut attendre 12h à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

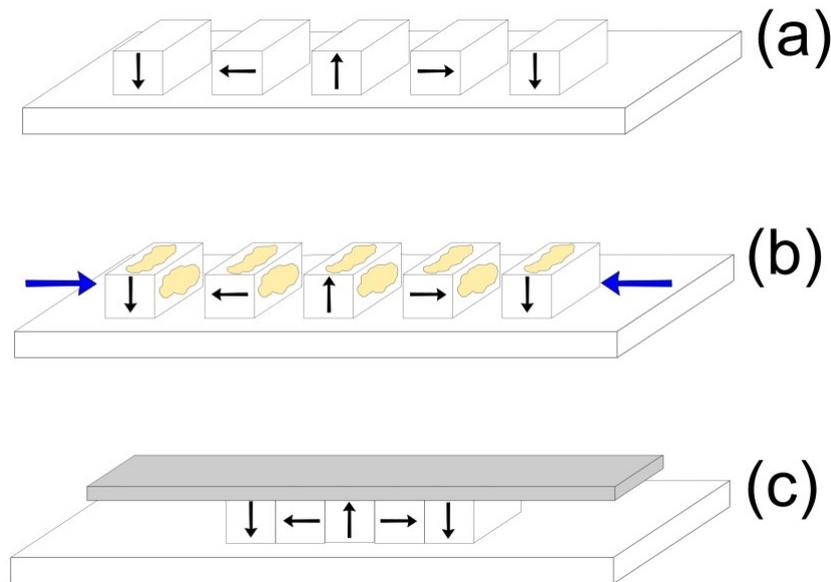


FIGURE 3.4 – Collage des aimants, (a) les aimants sont déposés sur une plaque en fer, (b) la colle est appliquée, les aimants sont poussés des deux cotés, (c) la plaque en fer qui transfère la chaleur de la résistance vers les aimants est posée.



FIGURE 3.5 – La structure finale de la structure d'Halbach collée sur une plaque en fer ($100 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$). Le temps de séchage complet est de 12h à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dans la structure finale, Fig. 3.6, une résistance ($47 \Omega \pm 5 \%$, 50 W de dimensions $15 \times 10 \text{ mm}^2$) [87], collée sur la plaque de fer sur le coté inverse des aimants, joue le rôle de la source chaude. Le flux de chaleur est transféré aux aimants à travers la plaque en fer. Des ouvertures en bordure de la source de champ doivent limiter les fuites thermiques (voir Fig. 3.5). Une colle thermique est utilisée pour réaliser le collage entre la résistance et la plaque de fer afin d'améliorer le contact thermique.

3.1. Fabrication du premier prototype

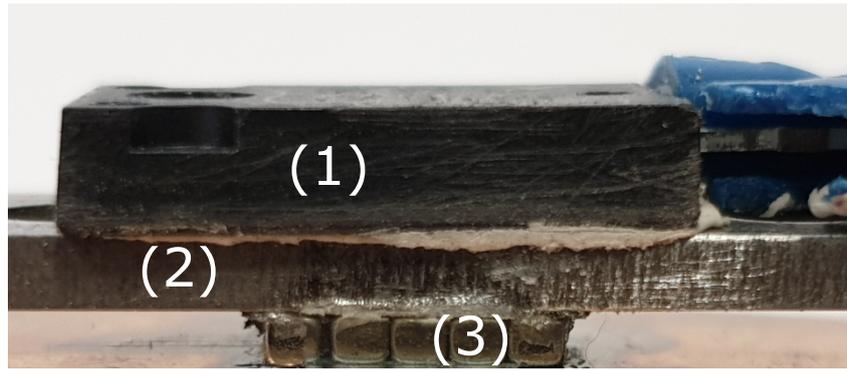


FIGURE 3.6 – La structure finale de la source chaude avec la résistance chauffante. (1) résistance chauffante, (2) plaque en fer, (3) structure d’Halbach

La Fig. 3.7 montre le relief de la surface de la structure d’Halbach, la surface présente des irrégularités de l’ordre de $32,2 \mu\text{m}$.

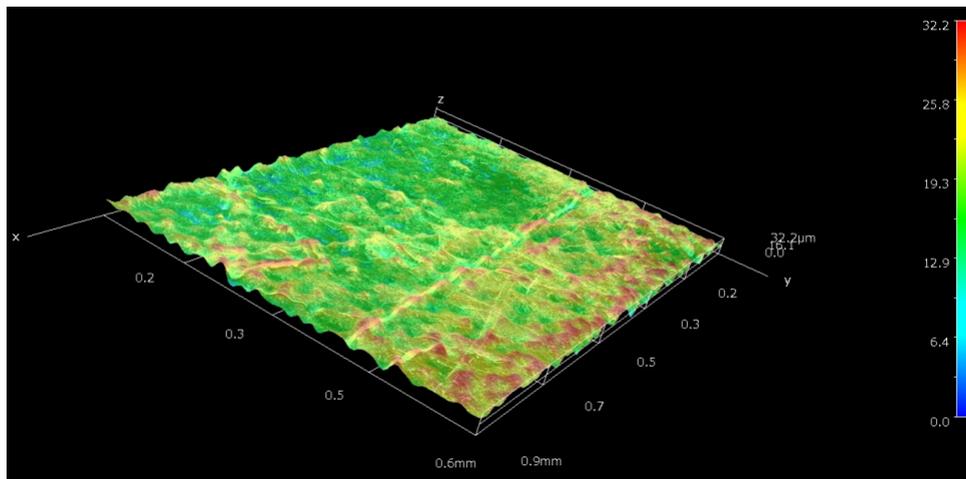


FIGURE 3.7 – Etude de la surface de la structure d’Halbach mesuré à l’aide du mode 3D high resolution d’un microscope numérique

3.1.2 Fabrication de la poutre

La poutre permet de remettre le MMC en contact avec la source froide quand celui-ci est paramagnétique, mais c’est aussi l’élément qui transfère l’énergie liée au déplacement du matériau magnéto-calorique aux matériaux piézo-électriques.

La poutre en CuBe_2 doit avoir une raideur de $3,4 \text{ kN/m}$ pour assurer un système auto-oscillant et bistable, cette valeur de raideur est le résultat d’une étude effectuée dans le chapitre précédent. En utilisant un logiciel de simulation par éléments finis (Ansys), on détermine les dimensions de la poutre ($0,3 \times 20 \times 68 \text{ mm}^3$) qui correspondent à la raideur souhaitée, la même simulation qui permet de déterminer la raideur de la poutre, présentée dans le chapitre précédent, a été utilisée de façon indirecte : pour une valeur de raideur on cherche à retrouver les dimensions de la poutre. Cette épaisseur ($0,3 \text{ mm}$)

nous permet d'avoir une plaque et pas un feuillard ce qui facilite le collage du MMC et des piézoélectriques.

La figure 3.8 représente la poutre réalisée avec la découpe au jet d'eau en (a). Une ouverture circulaire de diamètre de 6 mm a été découpée au milieu de la poutre, afin de permettre au MMC de se mettre en contact direct avec la source froide. En (b) le MMC et les quatre plaques piézoélectriques sont collés sur la poutre. Afin de bien positionner la poutre, des ouvertures sur les cotés sont prévues pour des goupilles de positionnement.

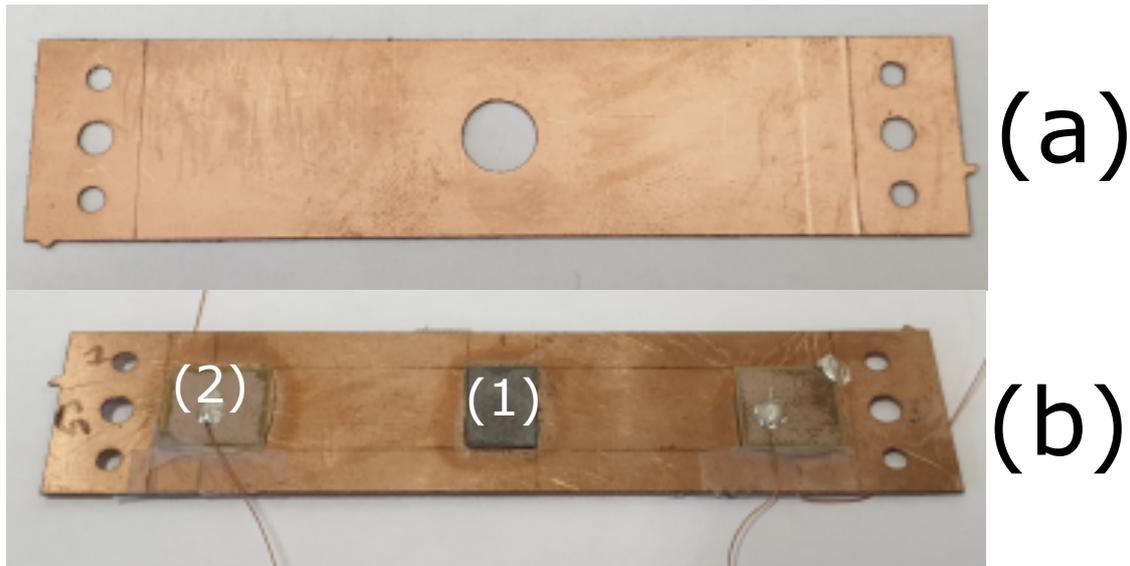


FIGURE 3.8 – Poutre, (a) après la découpe à jet d'eau ($68 \times 20 \times 0.3 \text{ mm}^3$), (b) après collage du MMC (1) et des plaques piézoélectriques (2).

Le matériau magnéto-calorique (MMC) utilisé est le LaFeSi (CALORIVAC HS de chez VACUUMSCHMELZE) de dimensions ($0,25 \times 7 \times 10 \text{ mm}^3$) représenté dans la Fig. 3.9. Le MMC est collé avec une colle époxy bi-composantes UHU Plus [86]. Le collage s'effectue en plusieurs étapes :

Etape 1 - Le MMC et la poutre sont nettoyés à l'aide d'un alcool.

Etape 2 - On découpe dans une feuille en Téflon de 0,25 mm d'épaisseur un cercle de 6 mm de diamètre qu'on mettra ensuite dans l'ouverture de la poutre afin d'éviter que la colle puisse couler sous le MMC.

Etape 3 - Après avoir préparé la colle en respectant les consignes du constructeur [86], on la dépose en petites quantités autour du cercle, au niveau de la poutre, après quoi on pose le MMC en faisant attention à mettre un poids sur ce dernier afin d'assurer un bon collage. Le temps d'attente pour un séchage complet à 20 °C est de 12h.

Les matériaux piézoélectriques utilisés sont des plaques à électrodes retournées (PIC 151 'SoftPZT') [30] de $0,3 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. Les électrodes retournées nous permettent d'avoir accès à l'électrode inférieure de la plaque une fois que cette dernière est collée. Une plaque piézoélectrique est représentée dans la Fig. 3.10, les différentes caractéristiques de ce matériau sont représentées dans le tableau 3.1.

Les quatre plaques piézoélectriques sont collées en suivant les mêmes étapes que pour le collage du MMC. Des fils électriques sont soudés à la colle argentée sur les piézoélectriques

3.1. Fabrication du premier prototype

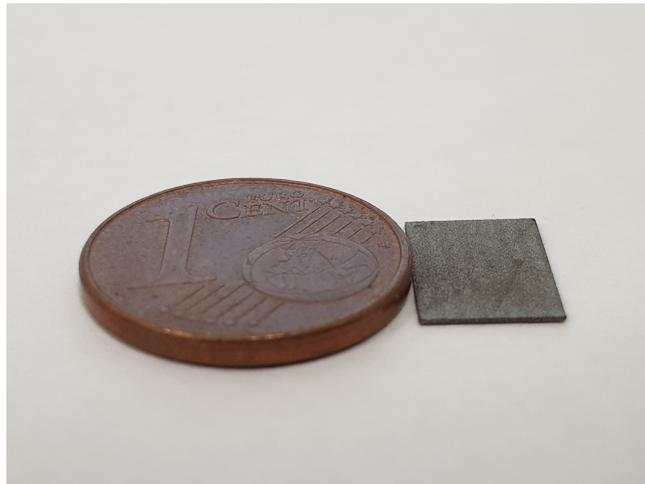


FIGURE 3.9 – MMC, LaFeSi ($7 \times 10 \times 0.25 \text{ mm}^3$)

TABLE 3.1 – Caractéristiques du PZT doux PIC 151 [30]

	PZT doux
Type	Céramique
Densité (kg/m^3)	7800
d_{33} ($10^{-12} \text{C}/\text{N}$)	500
d_{31} ($10^{-12} \text{C}/\text{N}$)	-210
k_{33}	0,69
k_{31}	0,38
Limite élastique (MPa)	50

(voir Fig. 3.8 (b)) : une soudure chaude risquerait de dépolariser le piézoélectrique. Les électrodes retournées ne sont finalement pas utilisées car elles sont trop petites pour une soudure froide. Finalement, les électrodes inférieures des plaques sont connectées électriquement à la poutre avec une faible résistance (1Ω) : la poutre est donc utilisée comme le plan de masse des quatre plaques. Les plaques piézoélectriques sont collées aux extrémités de la poutre car c'est là où il y a le maximum de contraintes sans dépasser la limite élastique de 50 MPa.

Différentes évolutions de la poutre

Avant d'arriver à la version finale de la poutre représentée dans la Fig. 3.11 (c), deux versions antérieures, de mêmes dimensions, ont été réalisées. Dans la poutre initiale (Fig. 3.11 (a)), le MMC est collé sur la poutre avec une colle thermique et il n'y avait pas de trou sous le matériau. Quelques essais nous ont permis de voir qu'ajouter une ouverture (8 mm de diamètre au milieu de la poutre) (Fig. 3.11 (b)) qui permet au MMC de se mettre en contact direct avec la source froide améliore la fréquence de fonctionnement (échange thermique plus rapide).

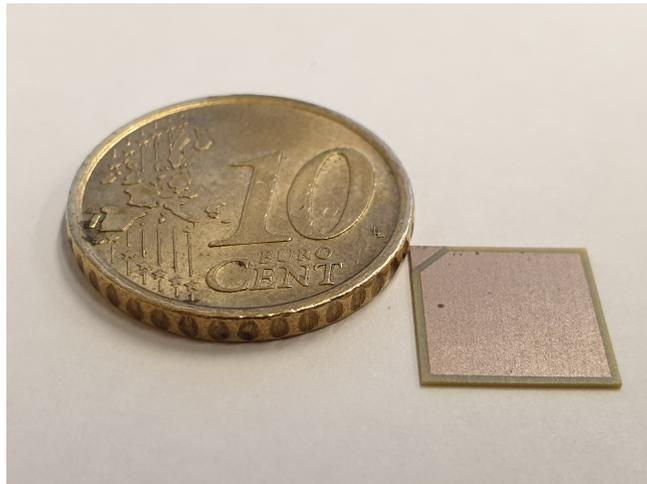


FIGURE 3.10 – Plaque piézoélectrique à électrodes retournées ($10 \times 10 \times 0.3 \text{ mm}^3$).

Les premiers essais ont montré que l'obtention de l'auto-oscillation était très dépendante du serrage de l'ensemble. Nous avons donc ajouté des goupilles de centrage, dans la version finale, pour découpler l'effort de maintien en position de celui de mise en position. Dans cette version finale, le diamètre de l'ouverture a été réduit à 6 mm pour éviter les cassures du MMC. En effet avec un diamètre (8 mm) supérieur la largeur du MMC (7 mm) ce dernier était cassant.

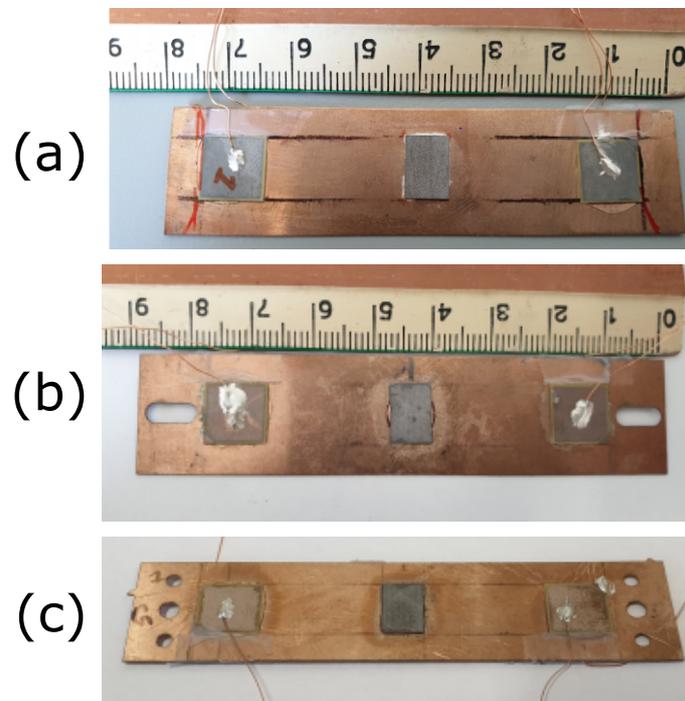


FIGURE 3.11 – Les différentes évolutions de la poutre. (a) poutre initiale sans ouverture, (b) poutre intermédiaire avec ouverture, (c) poutre finale avec ouverture et emplacements pour les goupilles de positionnement.

3.1. Fabrication du premier prototype

3.1.3 Caractérisation de la poutre

Afin de vérifier que la raideur de la poutre est proche de celle souhaitée, nous procédons à la mesure de celle-ci. La raideur est calculée à travers la caractéristique Force/Déplacement de la poutre. Pour ce faire, nous avons réalisé le banc de mesure que montre la Fig. 3.12, où on applique une force sur le MMC et on mesure son déplacement. La force est appliquée à travers un système de poulies, au bout duquel une masse m est placée. La force appliquée serait alors $F = mg$. Le déplacement, quant à lui, est mesuré à l'aide d'un capteur de position (laser) MICRO-EPSILON ILD1320.

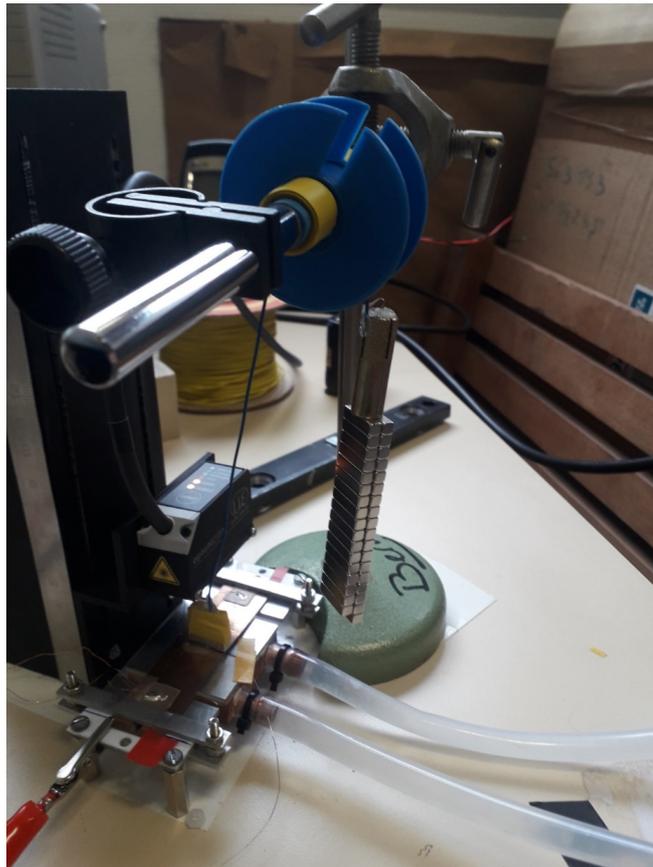


FIGURE 3.12 – Banc de mesure de raideur

La caractéristique Force/Déplacement de la poutre est représentée dans la Fig. 3.13. Cette dernière est presque linéaire, elle peut donc être décrite par la relation $F = kx$ où k est la raideur et dont la valeur moyenne est de $k=3,26$ kN/m. Cette valeur de raideur est proche de la valeur souhaitée, à savoir, 3,4 kN/m, "ce qui est une bonne nouvelle".

3.1.4 Fabrication de la source froide

La source froide, présente sur la Fig. 3.14 est la partie du générateur qui permet d'extraire de la chaleur du matériau magnéto-calorique (MMC). Le support en aluminium a été découpé au jet d'eau. L'ouverture centrale permet d'y mettre le plot central (6 mm de diamètre) qui assure un contact direct avec le MMC. L'épaisseur du plot central (2

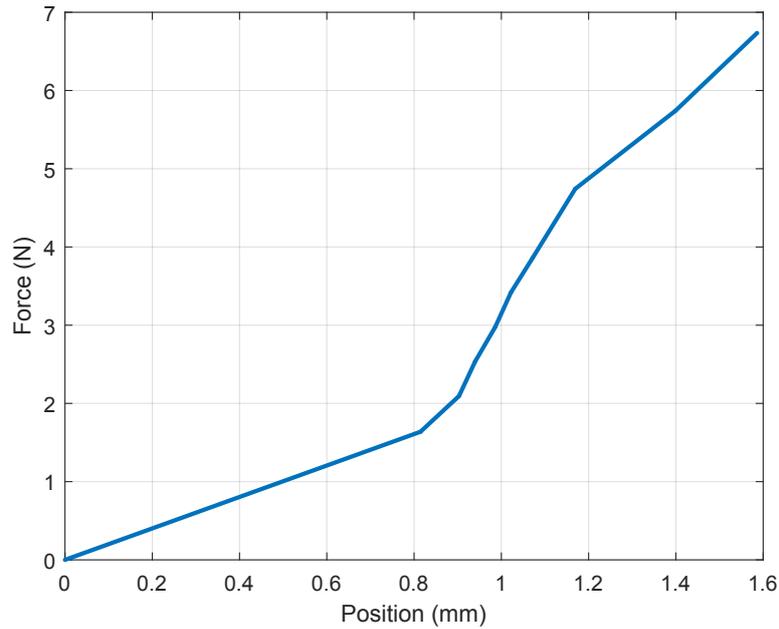


FIGURE 3.13 – Caractéristique Force/Déplacement de la poutre. $k=3,26$ kN/m

mm) a été étudiée afin d'avoir la précontrainte (x_0) sur la poutre, nécessaire pour assurer l'auto-oscillation et la bistabilité du générateur.

Les goupilles permettent de positionner la poutre et de l'empêcher de bouger durant le serrage afin d'éviter d'induire des contraintes résiduelles dans la poutre ; ces dernières sont enlevées après le serrage des fixations de la poutre. Des cales en plastique (PS) servent à ajuster la hauteur de la poutre 'réglage de x_0 ' et de l'isoler thermiquement de la source froide.

Le support de la source froide est refroidi à l'aide d'un échangeur à eau (Fig. 3.15). Les goupilles s'insèrent assez bien dans la poutre et empêchent la poutre de bouger.

Afin de refroidir cette partie du prototype, un cryothermostat (ministat 230 de chez Huber) (voir Fig. 3.16) a été utilisé. Cet appareil permet de réguler la température d'un fluide, de l'eau dans notre cas, et de l'acheminer grâce à une pompe intégrée vers l'échangeur à eau. L'eau circule, dans un circuit fermé, entre le cryostat et l'échangeur à eau.

3.1. Fabrication du premier prototype

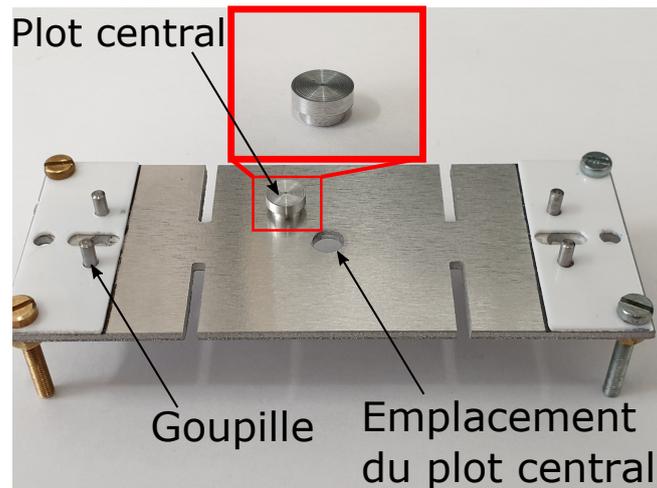


FIGURE 3.14 – La source froide ($100 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$) est constituée d'un plot central qui va permettre d'extraire la chaleur du MMC lorsque celui-ci est en contact. Ce plot est lui même maintenu par une plaque en aluminium, qui porte les goupilles de positionnement de la poutre et des cales en PS pour ajuster la hauteur de la poutre

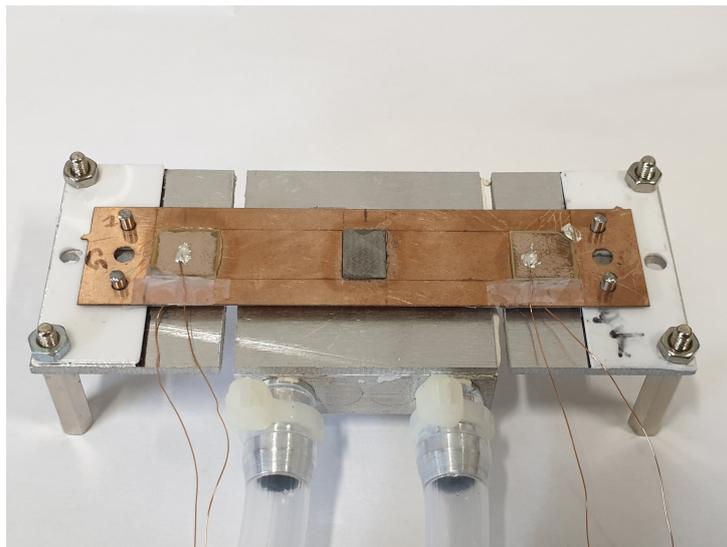


FIGURE 3.15 – Assemblage de la poutre, de la source froide et de l'échangeur à eau (aluminium de dimensions $40 \times 40 \text{ mm}^2$ [20]). L'échangeur est fixé au support à l'aide d'une colle thermique.

Différentes évolutions de la source froide

La figure 3.17 présente les trois versions de la source froide qui ont été réalisées.

En (a) la version initiale réalisée afin de refroidir la première version de la poutre qui n'avait pas d'ouverture permettant un contact direct entre le MMC et la source froide. Dans cette première version on a collé une plaque en cuivre de $0,5 \times 20 \text{ mm}^2$ sur un support, lui aussi en cuivre, afin de refroidir le MMC à travers la poutre en CuBe_2 .

Après la réalisation de la deuxième version de la poutre durant laquelle on a ajouté



FIGURE 3.16 – Cryothermostat

une ouverture pour permettre au MMC de se mettre en contact avec la source froide, on a été obligé de réaliser une deuxième version de la source froide (voir Fig. 3.17 (b)). Dans cette version, nous collons un cylindre en cuivre de 8 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur (réalisé avec de la découpe à jet d'eau) sur le support en aluminium afin de se mettre en contact avec le MMC, une colle thermique est utilisée pour réaliser ce collage. Des plaques en plastique sont mises aux extrémités du support afin d'isoler la poutre de la source froide. La dernière version de la source froide est représentée dans la Fig. 3.17 (c).

3.1.5 Système de fixation

Dans cette section nous allons présenter les deux méthodes de fixation que nous avons testées. La première méthode est représentée dans la Fig. 3.18 où deux plaques de PCB découpées à la bonne dimension ($20 \times 10 \text{ mm}^2$) sont utilisées. Sur chaque plaque on réalise deux trous pour les goupilles et un troisième pour une vis de serrage. Cette méthode n'est pas fameuse car la vis qui traverse la poutre finit par la pré-contraindre. Ceci a été constaté par l'expérimentation. Dans la méthode 2, les vis de serrage pénètrent à travers le support de la source froide et non pas à travers la poutre comme le montre la Fig. 3.19. Après le serrage des vis, les goupilles sont enlevées pour ne pas gêner le support de la source chaude. Cette deuxième méthode est assez bien réussie.

3.1. Fabrication du premier prototype

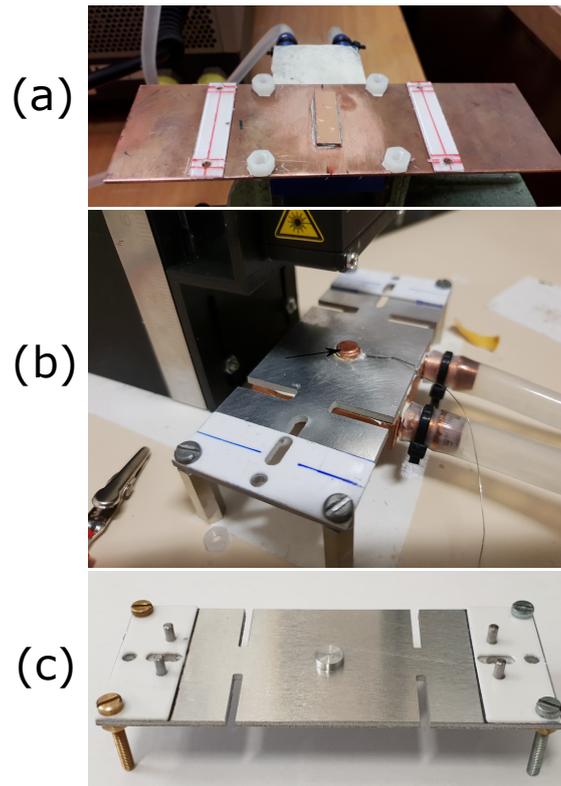


FIGURE 3.17 – Les différentes évolutions de la source froide, (a) la source froide initiale, (b) la source froide avec un plot central collé sur le support, (c) la source froide avec un plot central usiné et inséré dans le support et des goupilles de positionnement.

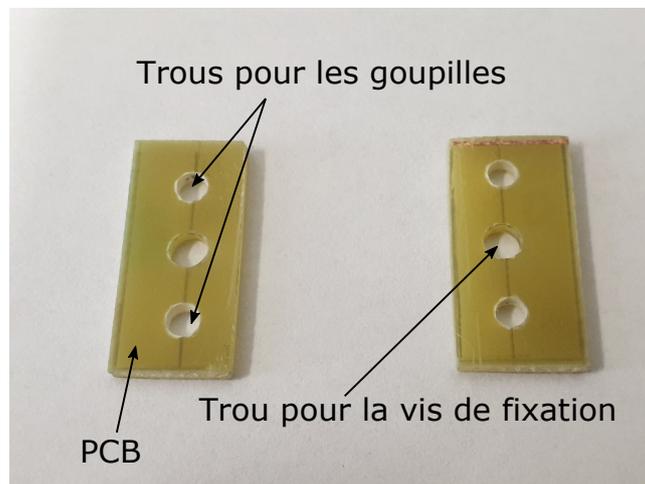


FIGURE 3.18 – Méthode 1 de fixation. Utilisation de plaques en PCB.

Le premier prototype du générateur thermomagnétique est rappelé dans la Fig. 3.20. Les dimensions et matériaux des différentes parties qui composent ce premier prototype sont résumés :

- MMC (LaFeSi) : $7 \times 10 \times 0.25 \text{ mm}^3$
- La poutre (CuBe₂) : $68 \times 20 \times 0.3 \text{ mm}^3$

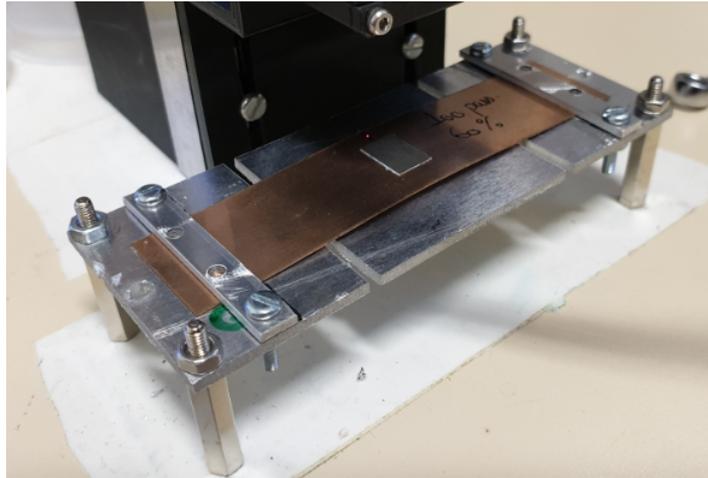


FIGURE 3.19 – Méthode 2 de fixation. Utilisation de plaques en aluminium.

- Le support de la source froide (Aluminium) : $100 \times 40 \times 2 \text{ mm}^3$
- Échangeur à eau (Aluminium) : $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$
- Le support de la source chaude (Acier faiblement allié) : $100 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$
- Résistance chauffante (47Ω , $\pm 5 \%$, 50 W) : $15 \times 10 \text{ mm}^2$
- Les plaques piézoélectriques (c151, soft PZT) : $10 \times 10 \times 0.3 \text{ mm}^3$
- Fixation de la poutre (Aluminium) : $20 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$

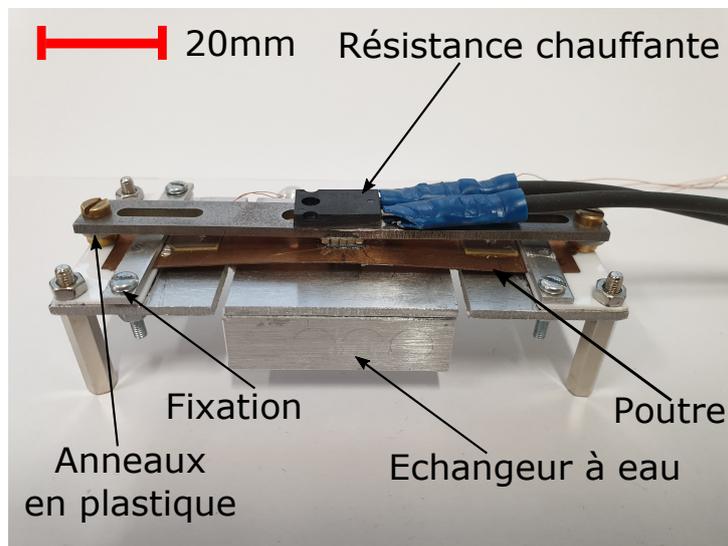


FIGURE 3.20 – Le premier prototype du générateur thermomagnétique.

Les deux sources de chaleur sont espacées avec des anneaux en plastique afin d'éviter d'éventuelles fuites thermiques d'une source à l'autre. La poutre est isolée thermiquement de la source froide à travers des cales en plastique. Le système de fixation a été conçu de façon à induire le moins de contraintes possible dans la poutre et réduire ainsi le risque de modifier la raideur de la poutre.

3.2 Instrumentation : réalisation d'un banc de test

Afin d'étudier et comprendre le comportement du générateur, un banc de test a été réalisé afin de mesurer les paramètres les plus importants. Ces paramètres sont : la température du MMC, celle de la source chaude et celle de la source froide, le déplacement du MMC et les tensions générées par les quatre piézoélectriques.

Dans cette partie, nous présenterons dans un premier temps, les différents capteurs qui composent le banc de test, puis sera présenté le banc de test lui même.

3.2.1 Mesure de la température

La mesure de température se fait par l'utilisation de thermocouples de type K, au niveau du MMC, des aimants et du plot central qui se met en contact avec le MMC. La température des sources ne pose aucune difficulté car les éléments sont massifs et les températures varient très lentement. A contrario, la mesure de la température du MMC est très difficile car elle doit se faire au niveau de son épaisseur qui ne fait que 250 μm . De plus elle varie rapidement durant son déplacement (quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes). Il faut de plus éviter toute sur-épaisseur sur les deux faces d'échanges.

La tableau 3.2 résume les dimensions et les plages de température pour des capteurs standards de température. A noter que les PT100, PT1000 et thermistances sont peu précis dans la cas d'une mesure de température sur une surface, elles sont plus adaptées pour une mesure de température dans un volume.

TABLE 3.2 – Différents capteurs de température disponibles dans le commerce [31]

Capteur	Diamètre (mm)	Intervalle de mesure ($^{\circ}\text{C}$)
Thermocouple chemisé	à partir de 0,25	jusqu'à 800
Thermocouple simple	$> 0,2$	de -75 à 200
PT100 et PT1000	3 et 6	-50 à 250
Thermistance	6	-50 à 120

La mesure de la température du MMC avec une approche standard sera donc difficile. Néanmoins nous avons placé un thermocouple simple de 0.2 mm de diamètre (de type K) sur l'arête du matériau. Le thermocouple est collé sur le bord, dans l'épaisseur du MMC (voir Fig. 3.21 (c)) en utilisant une colle de type cyanoacrylate [88]. La cyanoacrylate est utilisée pour son temps de séchage très réduit (quelques secondes) comparé à une colle thermique (12h).

La température de la source froide est mesurée par un thermocouple chemisé (thermocouples à gaine métallique semi-rigide) de 0,25 mm de diamètre (voir Fig. 3.21 (b)), ce dernier a été collé sur le plot central en utilisant de la colle thermique. Enfin la température des aimants (source chaude) est mesurée à l'aide d'un thermocouple simple de 0,5 mm de diamètre (voir Fig. 3.21 (a)) collé sur les aimants en utilisant de la colle Cyanoacrylate [88].

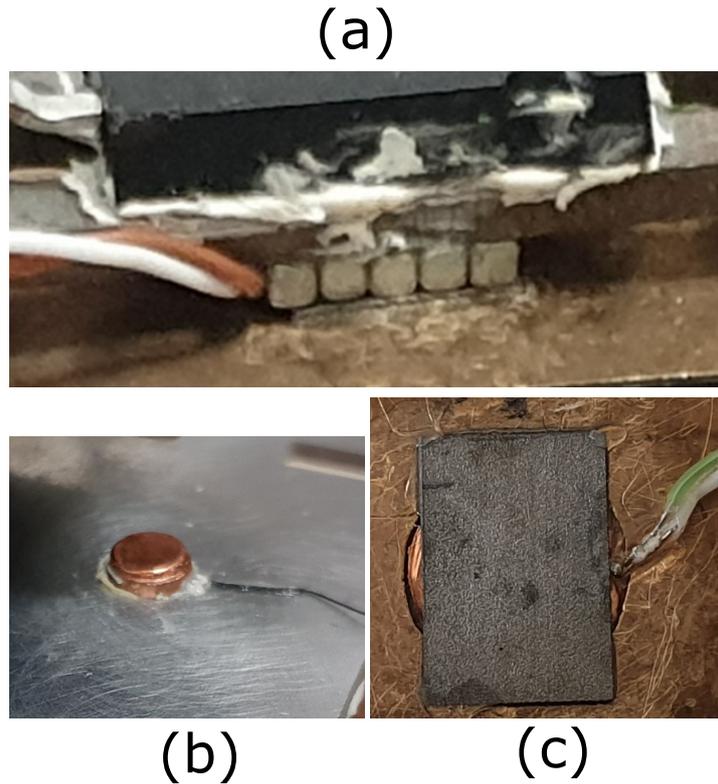


FIGURE 3.21 – Mesure des températures, (a) de la source chaude, (b) de la source froide, (c) du MMC.

Les trois thermocouples sont connectés à la carte d'acquisition à travers un circuit d'amplification $5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ et de compensation de la soudure froide qui permet d'avoir à sa sortie $5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. La justesse à la température absolue est d'environ $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.2.2 Mesure du déplacement du MMC

La mesure du déplacement du MMC doit se faire sans contact avec le MMC ou la poutre pour ne pas perturber le fonctionnement du système. Trois types de capteurs ont été envisagés : capteurs inductif à courant de Foucault, capteurs capacitif et capteurs à triangulation laser.

Les capteurs inductifs à courant de Foucault (voir Fig. 3.22(a)) sont équipés de bobines, qui une fois alimentées créent un champ magnétique. Pour effectuer la mesure, il suffit de placer l'objet métallique, dont on veut mesurer le déplacement, dans ce champ. Conformément à la loi d'induction de Faraday, des courants de Foucault sont formés créant un champ qui s'oppose au précédent, modifiant ainsi l'impédance de la bobine. Cette impédance est l'image de la position de l'objet métallique. La présence de la structure d'Halbach rend l'utilisation de ce genre de capteur impossible, car les mesures peuvent être faussées par le champ généré par les aimants.

Les capteurs capacitifs (voir Fig. 3.22(b)) se basent sur le fonctionnement d'un condensateur à plaques idéal. Les deux électrodes à plaques sont formées par le capteur et l'objet à mesurer, situé face à celui-ci. La tension au niveau du capteur est proportionnelle à

3.2. Instrumentation : réalisation d'un banc de test

TABLE 3.3 – Différents capteurs disponibles dans le commerce [32]

Capteur	Résolution (μm)	Plage de mesure (mm)
Capteurs inductifs à courant de Foucault	à partir de 0,02	de 1 à 6
Capteurs capacitifs	à partir de $0,0375 \cdot 10^{-3}$	à partir de 0,025
Capteurs Laser	à partir de 0,03	de 10 à 750

l'écart entre les deux électrodes. Ces capteurs offrent une très grande précision avec une résolution démarrant à 0,0375 nm. Ils sont adaptés pour des environnements où le champ magnétique est présent, il peut donc être utilisé dans notre cas.

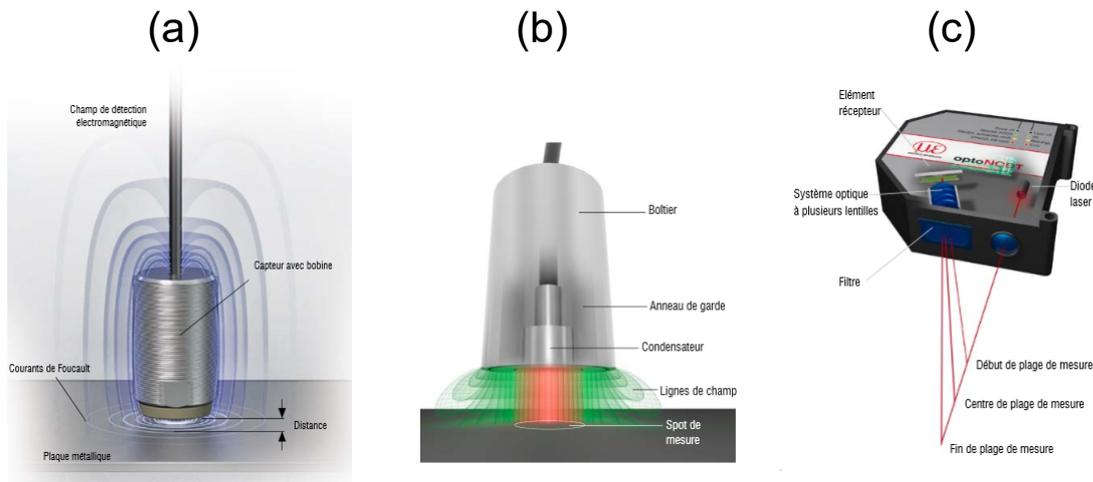


FIGURE 3.22 – Capteurs de position, (a) capteur inductif à courant de Foucault, (b) capteur capacitif, (c) capteur laser

Les capteurs laser, et plus particulièrement à triangulation laser (voir Fig. 3.22(c)), possèdent une diode laser projetant un spot lumineux visible sur la surface de l'objet à mesurer. La variation de la distance de l'objet par rapport au capteur fait varier l'angle selon lequel le capteur recevra la lumière. Ces capteurs peuvent avoir des résolutions allant jusqu'à $0,03 \mu\text{m}$. Ils sont faciles à utiliser et le laser nous permet de bien régler le point de mesure sur la cible. On fait donc le choix d'utiliser un capteur laser et précisément le capteur ILD1320 de Micro-Epsilon avec une résolution de $1 \mu\text{m}$ et une plage de mesure de 10 mm. La dynamique de ce capteur est de 1 kHz.

La mesure du déplacement ne peut pas se faire directement sur le MMC, le laser est donc pointé vers la poutre à proximité immédiate du MMC, comme le montre la Fig. 3.25.

Le capteur laser ILD1320 est connecté à une carte d'acquisition à travers une résistance d'adaptation de 500Ω qui permet de transformer la sortie en courant d'une gamme de 4-20 mA à une sortie en tension de la gamme 0-10 V, qui correspond à l'entrée de la carte d'acquisition.

3.2.3 Mesure des tensions des piézoélectriques

La tension générée par un piézoélectrique est mesurée avec un dispositif à très grande impédance d'entrée ($10^{13} \Omega$, AOP LT1793 [89]).

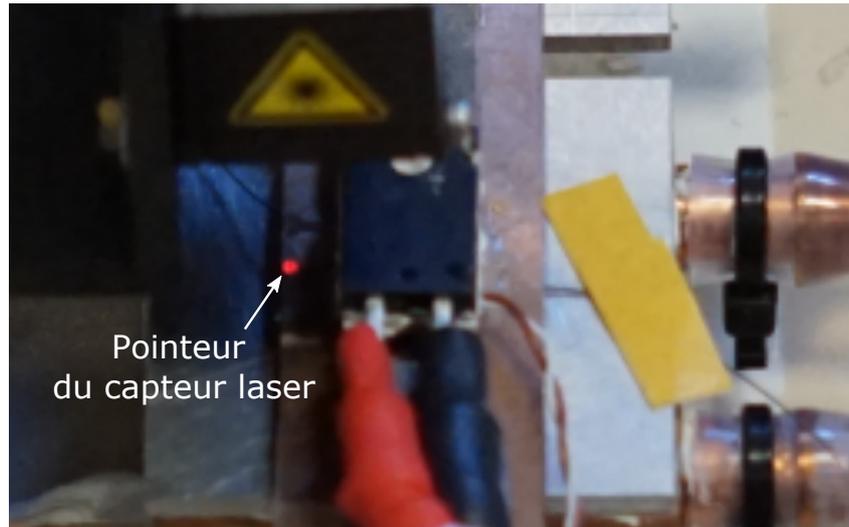


FIGURE 3.23 – Vue d’en haut de la mesure de déplacement du MMC. Le pointeur du capteur (point rouge) de position est pointé sur la poutre, à coté du MMC

Lorsque le piézoélectrique est à vide (sans résistance de charge), il n’y a pas d’énergie transférée. A partir du condensateur équivalent C du piézoélectrique, nous pouvons estimer l’énergie électrostatique stockée par :

$$E(t) = \frac{1}{2}CV_0(t)^2 \quad (3.1)$$

où $E(t)$ est l’énergie, C la capacité du piézoélectrique et V_0 est la tension à vide.

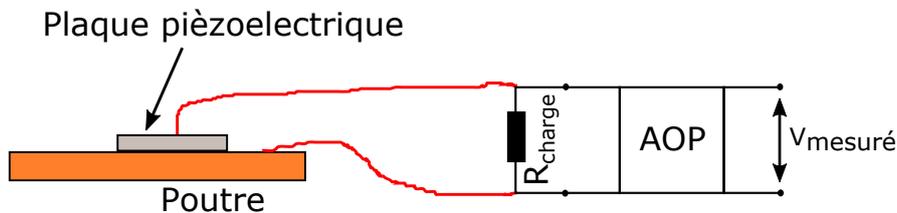


FIGURE 3.24 – Schéma du principe de la mesure de la tension générée par un piézoélectrique à travers une résistance de charge et un AOP (LT1793).

Pour transférer de l’énergie, nous plaçons une résistance de charge (Fig. 3.24). La puissance électrique transférée se déduit de la puissance dissipée dans la résistance comme suit :

$$P(t) = \frac{V_{mesure}^2}{R_{charge}} \quad (3.2)$$

L’impédance d’entrée de l’AOP est négligée car elle est toujours bien plus grande que la résistance de charge. Avec une résistance de charge entre ces bornes, un piézoélectrique peut être représenté par une source de courant en parallèle avec un condensateur et une résistance interne $R_{interne}$ [90] (voir Fig. 3.25). La résistance interne des matériaux

3.2. Instrumentation : réalisation d'un banc de test

piézoélectriques étant généralement de l'ordre du $G\Omega$, on la néglige généralement devant la résistance de charge. Finalement, le système se comporte comme un circuit RC.

Afin de maximiser la puissance extraite, la valeur optimale de la résistance de charge doit être déterminée. En effet, la résistance de charge modifie la durée de décharge et la tension aux bornes du matériau piézoélectrique, comme on le montre dans [91]. La détermination de cette valeur optimale se fait expérimentalement et sera présentée ultérieurement.

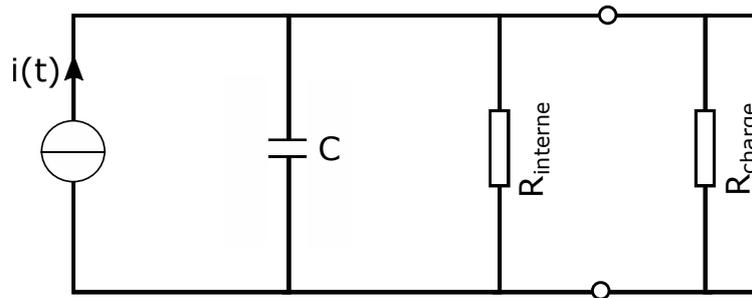


FIGURE 3.25 – Modèle électrique d'un piézoélectrique connecté à une résistance de charge.

Les quatre piézoélectriques sont connectés à la carte d'acquisition aux travers d'une résistance de charge, d'un AOP et d'un pont diviseur pour protéger la carte d'acquisition.

Il existe des techniques qui utilisent des circuits électriques plus adaptés afin d'optimiser l'énergie extraite des piézoélectriques.

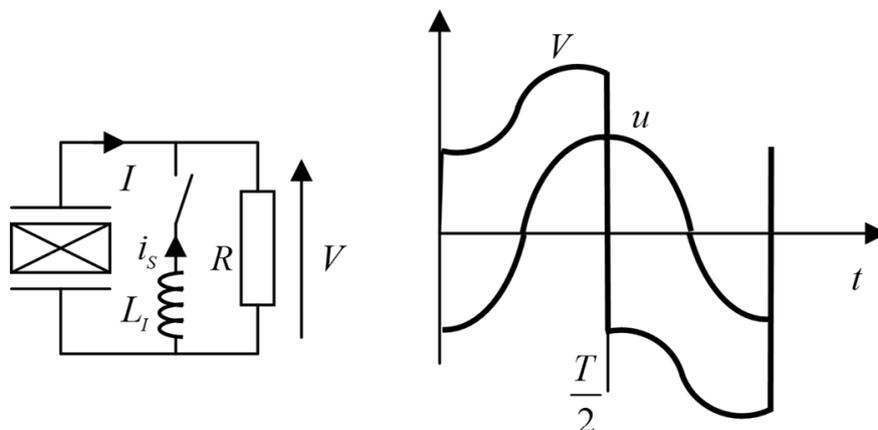


FIGURE 3.26 – Schéma du principe de la technique SSHI et courbes de tension (V) et de déplacement piézoélectrique (u) [21]

La technique appelée 'synchronized switch harvesting on inductor' (SSHI) [21], consiste à ajouter, en parallèle avec le piézoélectrique, une bobine L_i en série avec un interrupteur (voir Fig. 3.26). Cet interrupteur est souvent ouvert, sauf quand un déplacement maximal est atteint. A cet instant, l'interrupteur est fermé; la capacité du piézoélectrique C_0 et la bobine L_1 constituent à eux deux, un résonateur. L'interrupteur reste fermé jusqu'à ce que la tension du piézoélectrique ait été inversée (voir Fig. 3.26).

Les résultats de cette technique sont représentés dans la Fig. 3.27. Cette technique permet d'extraire l'énergie du piézoélectrique aussi bien en alternatif qu'en continu. Cette

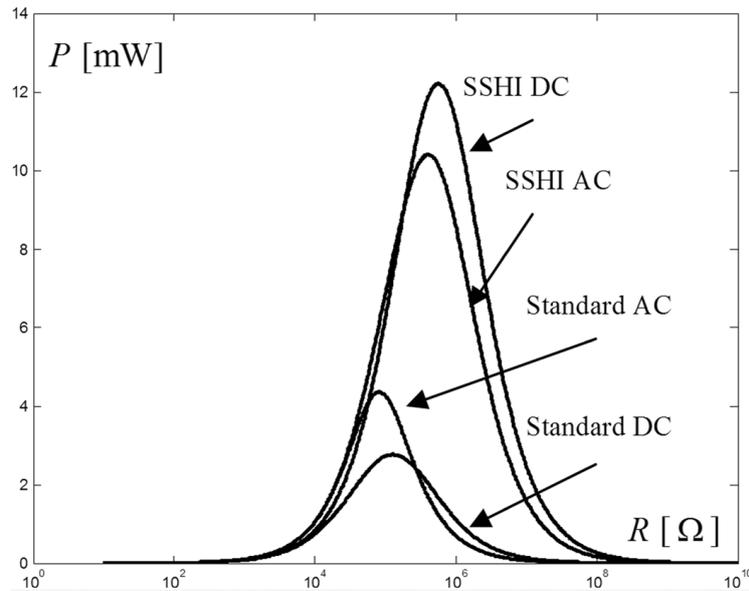


FIGURE 3.27 – La puissance extraite en fonction de la valeur de la résistance de charge pour les méthodes standard et SSHI en alternatif (AC) et en continue (DC) [21]

technique permet d'extraire 2,5 fois plus que la méthode standard (résistance uniquement) dans le cas alternatif et plus de 6 fois plus que la méthode standard (résistance et pont redresseur).

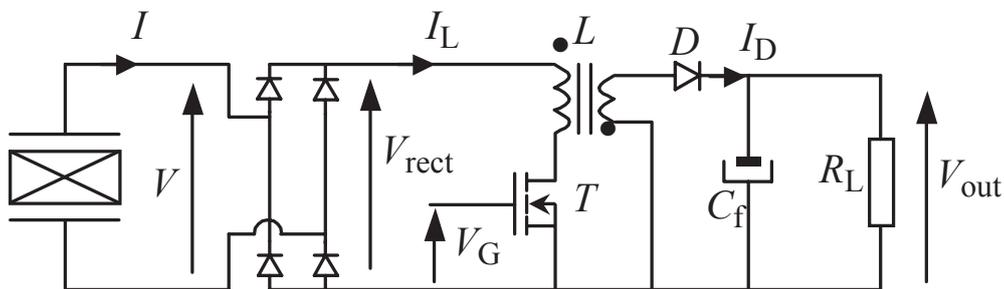


FIGURE 3.28 – Le circuit expérimental qui permet de réaliser la technique Synchronous Electric Charge Extraction [22]

Une deuxième technique est appelée 'Synchronous Electric Charge Extraction' [22]. Elle permet d'optimiser l'extraction de l'énergie des piézoélectriques en continue (DC), elle utilise le circuit électrique représenté par la Fig. 3.28, il est composé d'un convertisseur DC-DC qui consiste en un redresseur suivi d'un flyback (Mosfet (T), d'une bobine couplée (L)), d'une diode Schottky (D) et un condensateur de stockage (C_f), la charge étant simulée par une résistance (R_L).

Quand la tension du redresseur (V_{rect}) atteint son maximum, une tension de 15V est appliquée sur le transistor (mosfet). Le transistor fermé, il transfère toutes les charges électriques du piézoélectrique à la bobine couplée. Une fois que toutes les charges sont extraites, une tension nulle est appliquée sur le mosfet ce qui enclenche son ouverture. Le piézoélectrique se remet en circuit ouvert et l'énergie stockée dans la bobine est transférée

3.2. Instrumentation : réalisation d'un banc de test

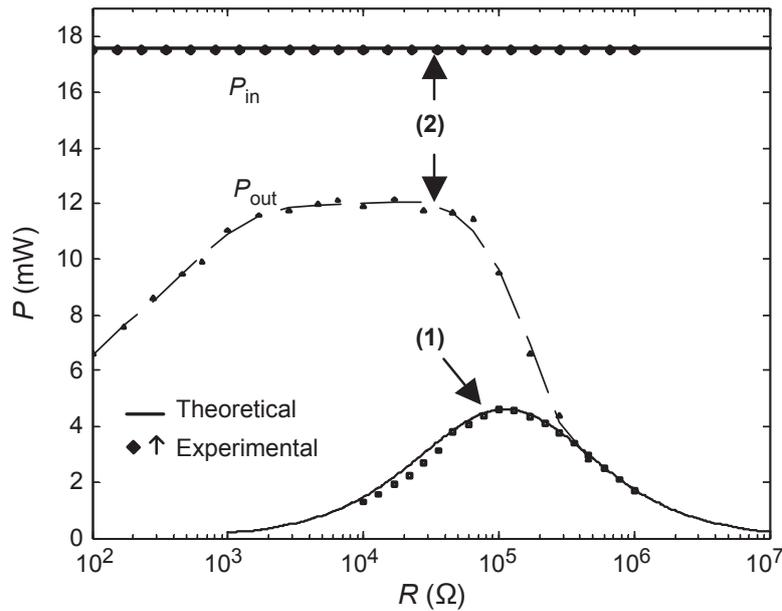


FIGURE 3.29 – La puissance extraite en fonction de la résistance de charge (1) Méthode d'adaptation d'impédance (méthode standard) et (2) La technique Synchronous Electric Charge Extraction.[22]

vers la capacité C_f . La prochaine séquence d'extraction de charge électrique se produit lorsque la tension redressée atteint son prochain maximum, de manière synchrone avec le déplacement mécanique.

Les résultats de cette technique sont comparés avec ceux de la méthode d'adaptation d'impédance (méthode standard) dans la Fig. 3.29. On peut voir que cette technique permet d'extraire jusqu'à trois fois plus de puissance que la méthode standard.

Bien que ces techniques soient performantes, leur mise en oeuvre est souvent complexe, de plus, l'électronique que cela engage risque de consommer toute l'énergie issue des piézoélectriques, donc on préfère s'en tenir à la méthode standard (adaptation d'impédance avec une résistance de charge).

3.2.4 Le banc de test

Le banc de test, dont le principe est représenté dans la Fig. 3.30, regroupe les différentes mesures, à savoir, la mesure de déplacement du MMC, la mesure de la température du MMC et celles des sources de chaleur et enfin la mesure des tensions des quatre plaques piézoélectriques. La carte d'acquisition NI est pilotée sous Matlab afin de recueillir les données.

Le banc de test est représenté sur la Fig. 3.31. On peut voir les parties les plus importantes dont, le prototype en (1), le capteur laser en (2), en (3) le circuit d'adaptation pour thermocouple, en (4) le AOP et la résistance de charge pour la mesure de la tension, en (5) la carte d'acquisition et l'IHM en (6).

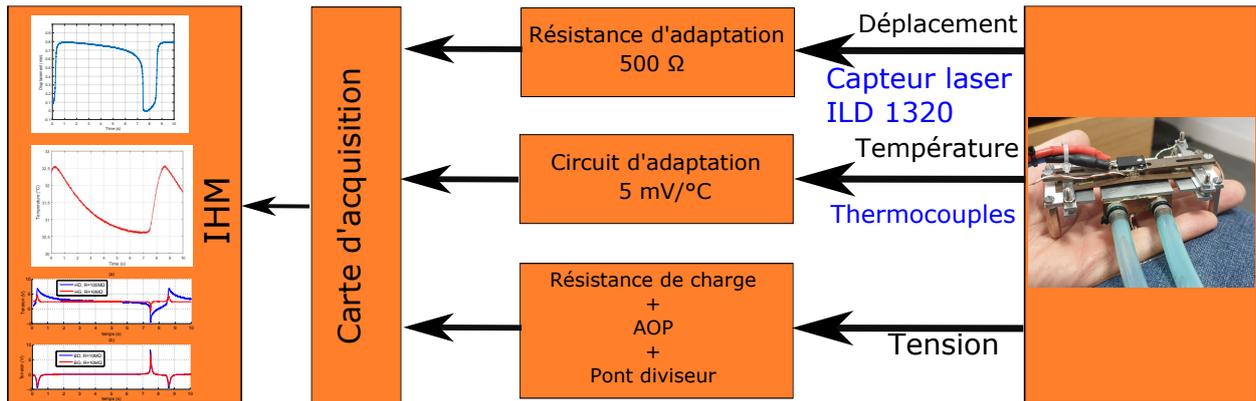


FIGURE 3.30 – Schéma de principe du banc de test

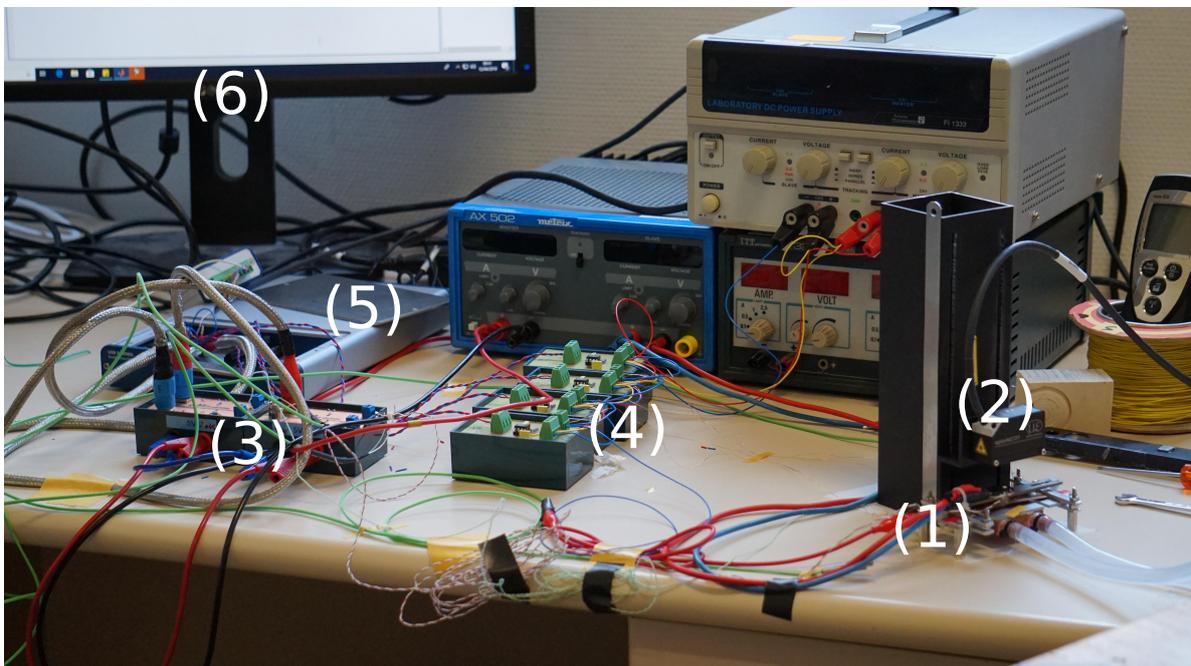


FIGURE 3.31 – Banc de test, (1) Le prototype, (2) Capteur de position, (3) Circuit d'adaptation pour thermocouple, (4) Résistance de charge et AOP pour la mesure de tension, (5) La carte d'acquisition, (6) IHM.

3.3 Étude du fonctionnement

Nous allons voir que sous certaines conditions, le prototype proposé oscille, ce qui est déjà un résultat important. L'analyse du déplacement va se révéler particulièrement riche car le comportement observé ne correspond pas à celui attendu. Ces mesures font apparaître de nouveaux éléments. Nos premières mesures montrent aussi la difficulté de mesurer la dynamique de température imposée par le thermo-générateur.

Le cycle étudié en détail correspond au fonctionnement avec une source froide à 18 °C et une source chaude à 56 °C, soit un écart de $\Delta T=38$ °C.

La figure 3.32 montre le déplacement et la température mesurés du MMC ; le déplace-

3.3. Étude du fonctionnement

ment total du MMC est d'environ 0,8 mm, tandis que sa température varie entre 30,5 et 32,6 °C. Les quatre étapes du cycle de fonctionnement y sont représentées, à savoir, étape 1 : le MMC se déplace vers la source chaude, étape 2 : le MMC se met en contact avec la source chaude, étape 3 : le MMC se déplace vers la source froide et l'étape 4 le MMC se met en contact avec la source froide.

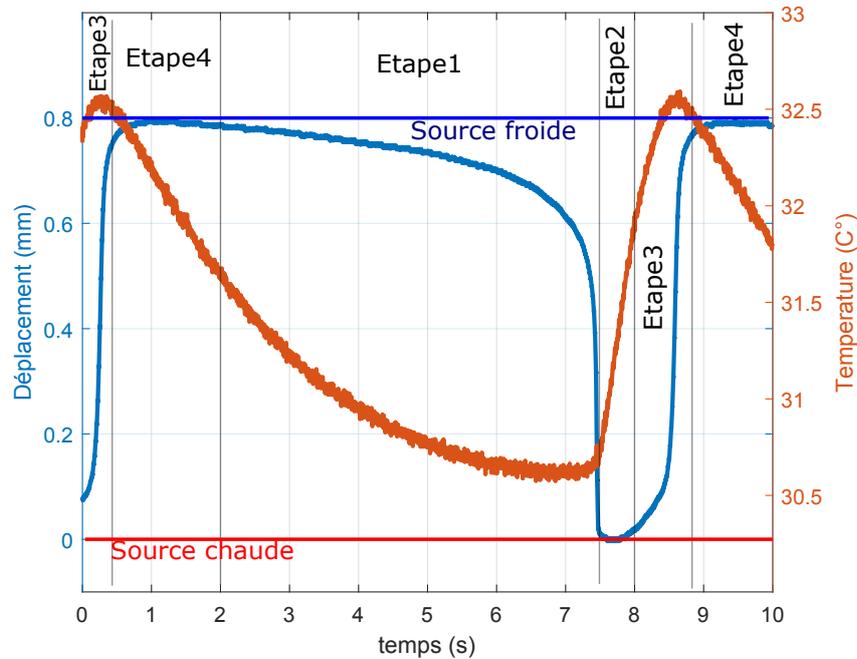


FIGURE 3.32 – Déplacement et température du MMC en fonction du temps. Les températures des sources chaude et froide sont de 56 et 18 °C respectivement

Les deux étapes 1 et 3 ne se déroulent pas à la même vitesse, à savoir que l'une des deux est plus lente que l'autre. En effet, l'étape 1 prend plus de 5 s alors que l'étape 3 prend moins d'une seconde. Vu la lenteur du déplacement du MMC, ces deux étapes ne peuvent pas être considérées comme étant adiabatiques, contrairement au comportement souhaité.

Les deux étapes 2 et 4 durent respectivement 0,5 s et 1,5 s montrant que l'échange de chaleur est mieux contrôlé du côté de la source chaude où le champ magnétique donne une force suffisante pour avoir un contact assurant un bon transfert thermique entre le matériau et le réservoir.

Dans le fonctionnement attendu (cycle de Brayton) les deux étapes adiabatiques 1 et 3 sont considérées comme très rapide par rapport aux étapes d'échange thermique (2 et 4) à l'inverse du fonctionnement réel.

La plage de températures de fonctionnement se situe autour de la température de transition qui correspond à la température moyenne du réservoir. Cela signifie que le MMC n'a pas besoin d'être entièrement paramagnétique mais juste assez pour que la force de rappel de la poutre l'emporte sur la force magnétique.

La figure 3.33 montre les tensions mesurées de chaque piézoélectriques : haut à droite

(HD), haut à gauche (HG), bas à droite (BD) et bas à gauche (BG). Les courbes sont différentes en (a) car la résistance de charge n'est pas la même. La puissance électrique moyenne est de $0,12 \mu\text{W}$ ($6.78 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ par volume de MMC) avec une fréquence d'environ $0,12 \text{ Hz}$. Cette puissance, sur un cycle, correspond à une énergie électrique de $1 \mu\text{J}$.

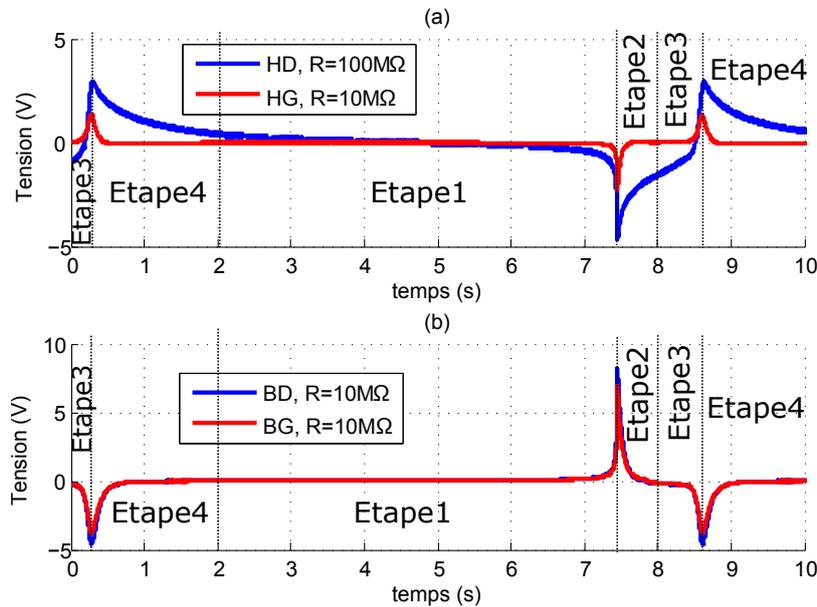


FIGURE 3.33 – Tensions générées par les piézoélectriques en haut droite (HD), haut gauche (HG), bas à droite (BD) et bas à gauche (BG)

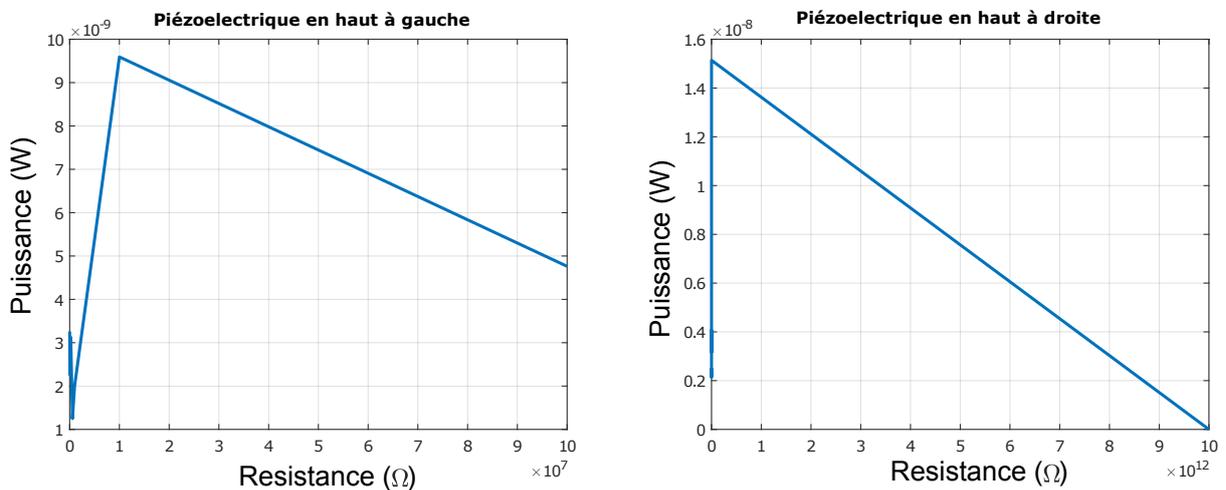


FIGURE 3.34 – Variation de la puissance en fonction de la valeur de la résistance de charge pour les deux plaques piézoélectriques collées sur le haut de la poutre. les valeurs de la résistance de charge utilisées sont : $5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$, $220 \text{ k}\Omega$, $560 \text{ k}\Omega$, $1 \text{ M}\Omega$, $10 \text{ M}\Omega$ et $100 \text{ M}\Omega$. La puissance est maximale pour $R=10 \text{ M}\Omega$ pour tous les piézoélectriques sauf celui en haut à droite où $R=100 \text{ M}\Omega$.

La valeur de la résistance de charge optimale de chaque piézoélectrique a été déterminée expérimentalement. Pour plusieurs valeurs de résistance ($5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$, $220 \text{ k}\Omega$, 560

3.3. Étude du fonctionnement

k Ω , 1 M Ω , 10 M Ω et 100 M Ω) la puissance électrique en sortie est mesurée. Les résultats, pour les deux plaques piézoélectriques collées sur le haut de la poutre, sont représentés dans la Fig. 3.34. La valeur optimale est de 10 M Ω pour le piézoélectrique en haut à gauche (collé sur la face supérieure de la poutre et du côté gauche du MMC) ainsi que pour les deux piézoélectriques collés sur la face inférieure de la poutre. En l'occurrence, la valeur de cette résistance est de 100 M Ω pour la plaque piézoélectrique en haut à droite. Cette différence est liée, probablement, à l'étape de fabrication de la poutre. L'évolution de la puissance en fonction de la résistance de charge est précédemment expliquée (voir partie mesure des tensions piézoélectriques) par le fait que cette résistance modifie la durée de décharge et la tension aux bornes du piézoélectrique et influe donc sur la valeur de la puissance.

3.3.1 Étude du cycle mécanique

Le système n'atteint pas un fonctionnement mécanique bistable comme celui attendu, de plus la phase de commutation (déplacement du MMC) est relativement longue par rapport à la période d'oscillation. Le comportement mécanique résulte normalement de la compétition des forces magnétiques et de la force du ressort, figure 3.35. Dans cette figure, on représente les forces magnétiques à 20 °C (courbe rouge) et 55 °C (courbe bleu) qui correspondent aux étapes 1 et 3, respectivement. On représente aussi la courbe expérimentale de la force de rappel de la poutre (ligne verte). Le point A (T=55 °C) est le point à partir duquel la force de rappel dépasse la force magnétique et où la commutation du MMC de la source chaude à la source froide est déclenchée. Le point B (T=20 °C) est le point où la force magnétique dépasse la force de rappel, en ce point le déplacement du MMC de la source froide à la source chaude est amorcé.

Le cycle théorique, est défini par l'aire coloriée entre la courbe bleu (pointillés) de la force magnétique à 55 °C et la courbe rouge de la force magnétique à 20 °C; le cycle théorique a une énergie de 3.5 mJ. Comme l'énergie électrique totale du générateur par cycle est de 1 μ J, l'énergie électrique récupérée est trois ordres de grandeurs inférieure à l'énergie magnétique du cycle théorique.

Cependant, afin de comprendre la raison derrière cette différence entre l'énergie disponible et celle récupérée on détermine le cycle réel de fonctionnement du générateur en retrouvant les forces appliquées sur la partie mobile durant les deux étapes 1 et 3. En utilisant le principe fondamental de la dynamique, il est possible de remonter à la force totale appliquée sur le matériau. Cette analyse est possible lorsque le matériau n'est pas en contact avec un réservoir de chaleur.

La masse de la poutre ne peut être négligée par rapport à celle du MMC ($m_{MMC} = 0,1$ mg, $m_{Poutre} = 2,1$ mg), c'est pour cela qu'on doit la prendre en compte dans l'équation de la dynamique. Or, il n'y a aucune information sur l'accélération de la poutre ou de ses différentes parties, une masse équivalente du système doit donc être déterminée. l'équation de la dynamique peut être écrite comme suite :

$$\sum F = m_e a_{MMC} \quad (3.3)$$

Où m_e serait la masse équivalente du système. Cette masse est calculée grâce à des

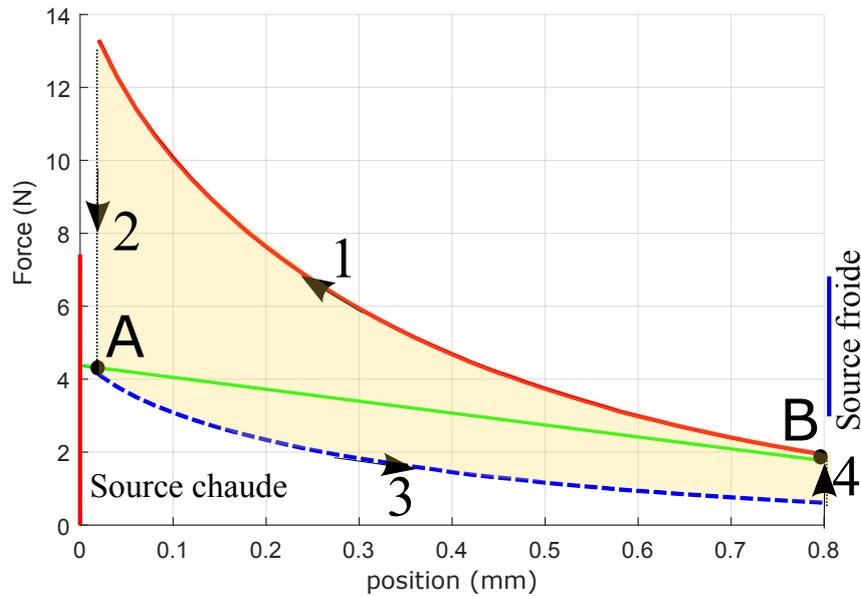


FIGURE 3.35 – Le cycle théorique, aire coloriée entre les courbes des forces simulées (Éléments finis 3D) à 20 et 55 °C (courbe rouge (1) et la courbe bleu en pointillés (3)), la courbe verte est la force de rappel de la poutre. Les 4 étapes de fonctionnement sont représentées. la source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0.8 mm. A et B sont les points où le MMC s'éloigne des sources de chaleur

simulations (éléments finis) en exploitant l'énergie cinétique du système. Pour une position donnée du MMC, la simulation nous permet de déterminer la position et la vitesse de chaque tronçon de la poutre ; la masse de chaque tronçon étant connue, on peut estimer l'énergie cinétique de la poutre, on a ainsi :

$$E_C(Poutre) + E_C(MMC) = \frac{1}{2}m_e V_{MMC}^2 \quad (3.4)$$

La masse équivalente se trouve être $m_e = m_{MMC} + \frac{1}{2,5}m_{Poutre}$.

La figure 3.37 montre la vitesse du MMC en fonction de sa position pour les deux étapes 1 et 3. Pour les vitesses maximales, le point b_1 : 29 mm/s durant l'étape 1 et le point a_1 : 6 mm/s durant l'étape 3, on a les énergies cinétiques respectives de 0.4 μ J et 0.015 μ J. Comme on peut le constater, ces énergies cinétiques sont très faibles.

La figure 3.38 représente la force totale appliquée sur la partie mobile du générateur (poutre et MMC). Cette force est extrapolée de la mesure de déplacement. Durant l'étape 1 (courbe rouge), la force totale est de l'ordre de 10^{-3} N alors que dans la Fig. 3.35 la force totale est de l'ordre de 10 N. Durant l'étape 3 (courbe bleu en pointillés), la force totale est de l'ordre de 10^{-5} N alors que dans la Fig. 3.35 la force totale attendue est de l'ordre de 1 N. Les forces réelles sont plus faibles que les forces attendues.

Afin de bien comprendre ce qui se passe en détail, analysons les quatre sections de l'étape 1 en utilisant les Fig. 3.36, 3.37 et 3.38.

- (I) de 0,8 mm à 0,5 mm : Le MMC perd immédiatement le contact thermique avec la source froide (voir Fig. 3.36) ce qui provoque une réduction conséquente

3.3. Étude du fonctionnement

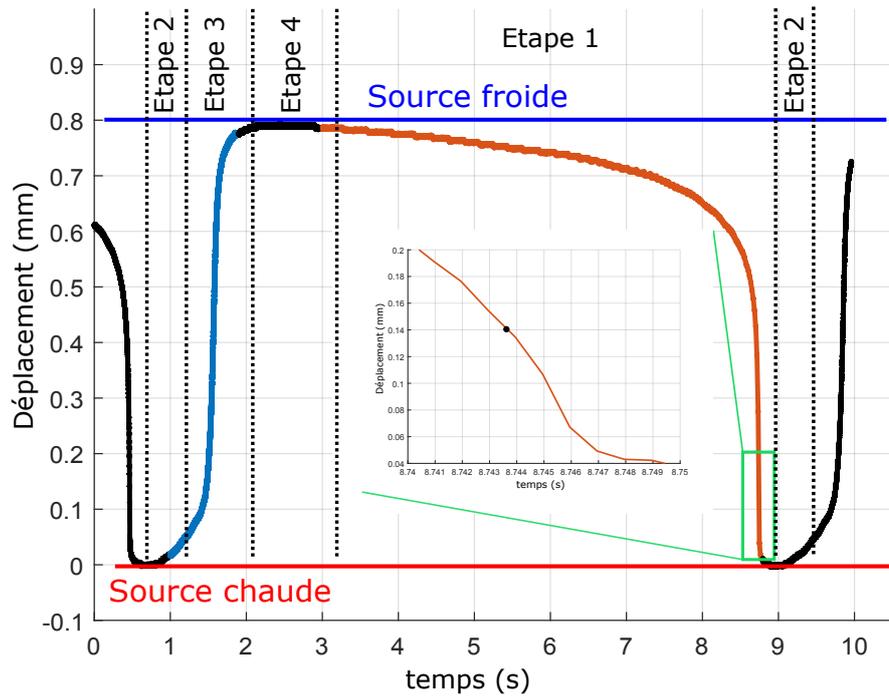


FIGURE 3.36 – Déplacement mesuré. La source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0,8 mm. Un point d’inflexion à 0,14 mm est montré dans la sous figure.

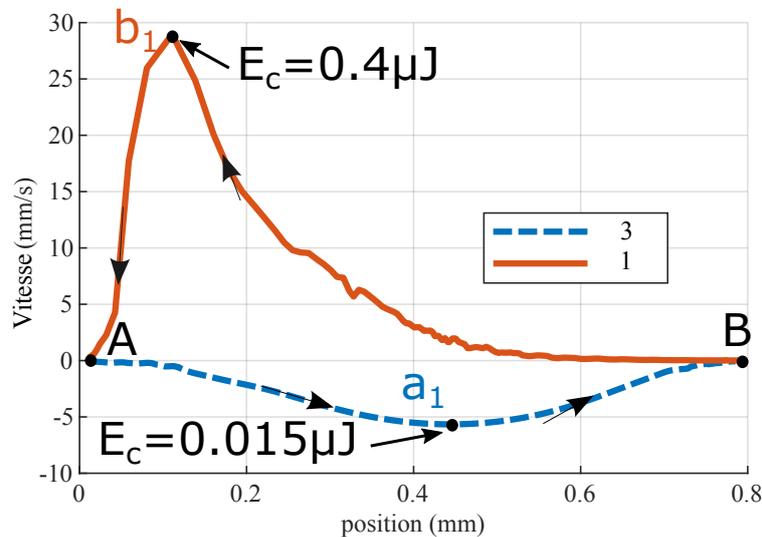


FIGURE 3.37 – Vitesse du MMC au cours de son déplacement. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement. E_c est l’énergie cinétique associée à la vitesse maximale.

de la fréquence de fonctionnement du dispositif; le MMC continue d’échanger de la chaleur avec l’air ce qui rend le processus d’échange de chaleur et la transition de phase plus lent que prévu. Cela est du à la compétition de la force magnétique et celle de rappel : il est difficile d’assurer, par un réglage de ces forces, un seul point d’équilibre stable (B), à savoir la tangente de la force magnétique en B

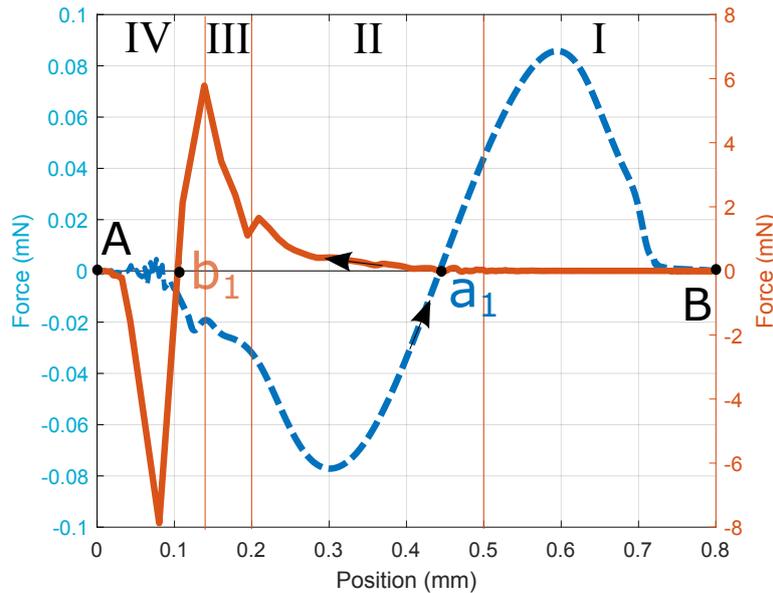


FIGURE 3.38 – La force totale appliquée sur la partie mobile, extrapolée de sa masse et de la mesure de déplacement, en fonction de la position du MMC pour les étapes 1 (courbe rouge) et 3 (courbe bleu en pointillés). Les sections I, II, III, IV concernent la courbe rouge (étape 1) et sont décrites dans le texte.

Fig. 3.35 plus raide que la pente de la force de rappel. Le point B a été conçu pour se rapprocher d'un point de bifurcation. Malheureusement, l'incertitude de fabrication a conduit la trajectoire du système dynamique à travers une famille de points stables. Heureusement, ces points sont assez proches de la source de chaleur pour maintenir un transfert de chaleur. Même si le transfert de chaleur est réduit ralentissant ainsi le cycle, il entraîne finalement le système vers une instabilité indispensable pour déclencher la deuxième partie de l'étape 1 qui est l'étape mécaniquement instable où le MMC se déplace rapidement vers la source chaude.

- (II) de 0,5 mm à 0,2 mm : de la Fig. 3.38 on peut voir une augmentation de la force totale qui peut être liée à la progression de la transition et à la croissance conséquente de la fraction volumique ferromagnétique, ainsi qu'au gradient de champ croissant associé à un léger changement de position. L'ensemble MMC-poutre accélère fortement, le MMC se déplaçant plus rapidement vers la source de champ (source chaude aussi), nous pouvons supposer que la compression d'air entre le MMC en mouvement et le réservoir chaud entraîne une augmentation du transfert de chaleur par convection. Cet air dans cet espace étant chaud, augmente prématurément la température du MMC provoquant une aimantation et une force magnétique considérablement plus basses que prévues.
- (III) de 0,2 mm à 0,14 mm : la force totale augmente considérablement pour atteindre un maximum d'environ 6×10^{-3} N (voir Fig. 3.38) correspondant au point d'inflexion présenté par la Fig. 3.36. Cette force est de quatre ordres de grandeurs inférieure à celle indiquée par les simulations (10 N).

3.3. Étude du fonctionnement

- (IV) de 0,14 mm jusqu'au contact avec la source chaude : La force totale diminue et devient négative (point b1, Fig. 3.38), cette situation ne peut guère être expliquée sans introduire une force supplémentaire à celles des forces magnétiques et de rappel.

Lorsque l'espace entre le MMC et la source chaude se réduit, la réaction visqueuse de l'air et / ou des courants de Foucault dans le MMC provoque une force dissipative supplémentaire à l'origine du renversement de la force totale dans la dernière section du déplacement (point b1 sur les Fig. 3.37 et 3.38).

Une analyse assez similaire peut être effectuée sur le déplacement le long de l'étape 3 (lignes bleues en pointillés sur la Fig. 3.37 et 3.38).

3.3.2 Étude du cycle magnétique M-H

D'un point de vue thermodynamique le cycle de Brayton a été présenté comme étant le cycle de fonctionnement du générateur. Pour rappel, ce cycle possède deux étapes adiabatiques (étapes 1 et 3) et deux étapes iso-champs (étapes 2 et 4). Nous nous attendons à ce que le cycle réel du dispositif soit différent du cycle de Brayton. Dans le cas d'un déplacement rapide du MMC (conditions adiabatiques), la différence serait dans les iso-champs, car lorsque le MMC échange de la chaleur avec la source de chaleur, le champ interne va varier en raison du champ de démagnétisation (pas d'iso-champ).

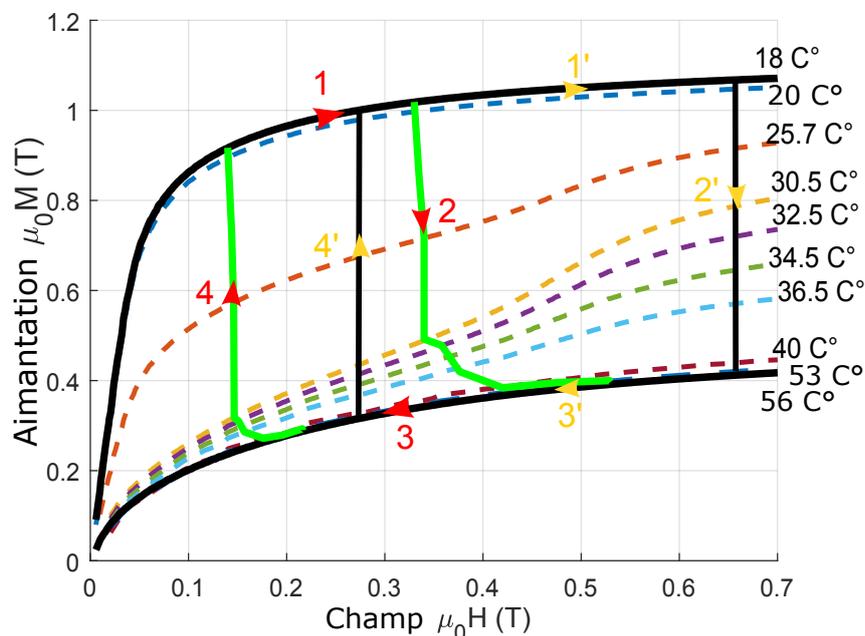


FIGURE 3.39 – Cycle thermodynamique dans le plan M-H. Les lignes discontinues : Courbes d'aimantations isothermes (température dans la légende), mesurées à l'aide d'un VSM. Cycle simulé (flèches rouges) prenant en compte le champ interne durant les étapes 2 et 4. $\Delta T_{adiabatique} = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ et $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ durant les deux étapes 1 et 3. Cycle de Brayton (flèches jaunes) : le champ appliqué durant les deux étapes 4' et 2' sont 0,27 T et 0,65 T.

La figure 3.39 montre les courbes d'aimantations isothermes du MMC mesurées à l'aide d'un VSM. Sur cette figure, nous représentons le cycle de Brayton (cycle entièrement noir, avec des flèches jaunes), les quatre étapes y sont représentées (l'étape 1 correspond à 1'). Les valeurs du champ pendant les iso-champs 2'et 4', 0,65 T et 0,27 T respectivement, ont été calculées en utilisant FEM sous Ansys MAXWELL.

Dans la même figure, nous représentons le cycle simulé (cycle noir et vert, avec des flèches rouges) utilisant des calculs en éléments finis sous Ansys Maxwell, où l'étape 1 correspond à 1. Dans ce cycle, le champ démagnétisant est pris en compte, c'est pourquoi les étapes 2 et 4 ne sont pas des iso-champs. $\Delta T_{adiabatique}$ durant les deux étapes 1 et 3 est de 0,1 et 0,2 °C respectivement, ces étapes sont presque isothermes.

Les courbes d'aimantations aux températures des sources chaude et froide 56 et 18 °C et aux températures de commutation 55 et 20 °C sont très proches, voir identiques, c'est pour cette raison que nous représentons uniquement les températures des sources chaude et froide.

L'aire comprise dans le cycle théorique (cycle de Brayton) représente l'énergie magnétique disponible et elle est de 3,5 mJ.

La mesure de la température du MMC, est de moins, pas fiable car nous avons utilisé un thermocouple pour la mesurer. Cependant, cette mesure est utilisée dans ce qui suit à but d'illustration.

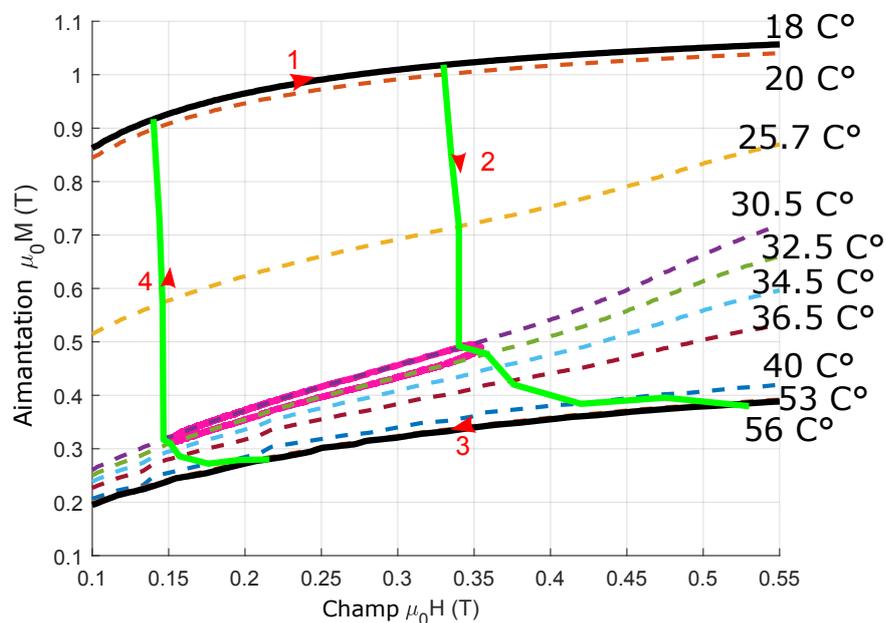


FIGURE 3.40 – Isothermes mesurées entre 18 °C et 56 °C (lignes pointillées colorées) ; le cycle rose est le cycle de fonctionnement du TMG, extrapolé des mesures sur le prototype. Le cycle noir et vert entre 18 °C et 56 °C est le cycle de fonctionnement simulé du TMG.

En utilisant les mesures de déplacement et de température, on calcule le cycle du générateur thermomagnétique. Pour une position du MMC, on a la température mesurée et le champ magnétique appliqué (simulé). En utilisant les isothermes (voir Fig. 3.39) on

3.4. Paramètres affectant le fonctionnement du générateur

arrive à trouver l'aimantation qui correspond à la température et au champ en question. En répétant la procédure sur un cycle, on peut tracer le cycle $M(H)$ du générateur.

Ce cycle est représenté sur la Fig. 3.40, en rose. Le cycle simulé (cycle noir et vert) est aussi représenté sur la même figure. Ce dernier cycle est plus large que le cycle mesuré. Ces résultats montrent que le générateur thermomagnétique fonctionne pour une différence de température de 2.5 °C au lieu de 38 °C.

Le champ démagnétisant ne nous permet pas d'atteindre la saturation : l'aimantation du MMC n'atteint pas la valeur maximale, et empêche la transition de phase magnétique d'avoir lieu, tous ces problèmes sont longuement discutés dans [7].

3.4 Paramètres affectant le fonctionnement du générateur

La partie précédente nous a permis de mieux comprendre ce qui se passe au niveau de la force magnétique durant les deux étapes 1 et 3 et spécialement durant l'étape 1. De cette étude, l'existence de forces supplémentaires telle que la réaction visqueuse de l'air et les courants de Foucault a été mise en avant afin d'expliquer l'inversion de la force totale avant que le MMC ne soit en contact avec la source chaude.

Cette partie vient ajouter deux hypothèses pouvant expliquer le comportement mécanique du générateur durant cette étape (étape1).

Ces hypothèses sont :

- Le comportement mécanique est sensible aux conditions aux limites. Les conditions aux limites (fixations de la poutre) causent la perte de contact avec la source froide et le ralentissement du MMC durant l'étape 1. Ces conditions peuvent induire des points stables qui ralentissent le MMC dans son déplacement ou simplement en serrant la poutre des contraintes mécaniques sont induites.
- Le comportement mécanique est peut-être sensible à la température de la source de chaleur.

Cependant, pour valider, ou pas, ces hypothèses, une étude est réalisée où on s'intéresse aux effets des conditions aux limites de la poutre ainsi que la variation de la température de la source de chaleur sur le comportement du générateur.

3.4.1 Effets des conditions aux limites

Afin de déterminer l'effet des conditions aux limites (fixation de la poutre) sur le comportement mécanique de la poutre, des mesures ont été faites dans différentes conditions. Dans un premier temps on libère une des deux fixations qui maintiennent la poutre et dans un deuxième temps on applique une pression variable sur cette même fixation.

Les mesures de cette partie ont été réalisées pour les mêmes températures de la source froide et de la source chaude (18 °C et 56 °C).

La fixation gauche libérée

On libère, délibérément, la fixation gauche de la poutre. La fixation gauche correspond à la fixation du côté des plaques piézoélectriques Haut à Gauche (HG) et Bas à Gauche (BG).

La figure 3.41 montre le déplacement du MMC en fonction du temps dans le cas d'un fonctionnement normal (les fixations fixées, courbe noir) et dans le cas d'une fixation libre (fixation gauche libre, courbe bleu). La position de la source chaude est à 0 mm. Le déplacement total dans les deux cas est différent malgré le même écart entre les deux sources de chaleur. Cette différence est due au fait que dans le cas d'une fixation libérée, les contraintes résiduelles dans la poutre sont éliminées permettant ainsi au MMC d'aller plus loin avec la possibilité de se mettre en contact avec la source froide. A l'inverse, dans le cas du fonctionnement normal, la présence des contraintes liées aux fixations empêche le MMC d'aller plus loin que 0,8 mm et de se mettre en contact avec la source froide.

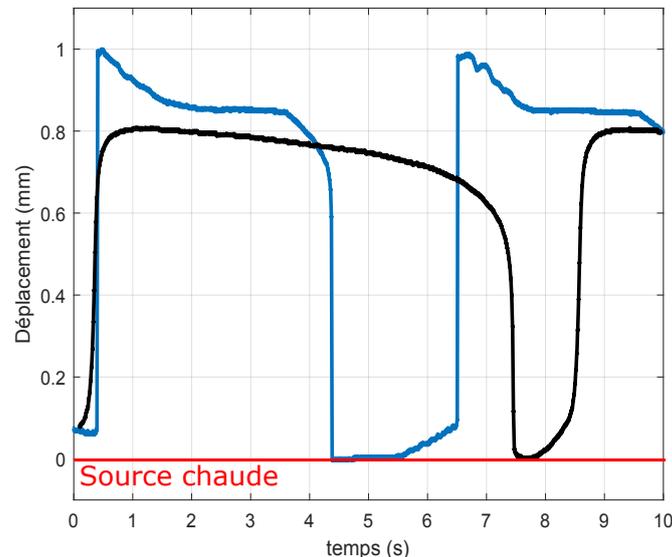


FIGURE 3.41 – Déplacement du MMC en fonction du temps : en bleu, avec fixation libre, en noir fonctionnement normal. Le déplacement total est plus important dans le cas d'une fixation libérée. La position de la source chaude est 0 mm. Les températures des sources chaude et froide sont de 56 °C et 18 °C respectivement.

Le comportement mécanique du MMC, précédemment rencontré durant l'étape 1 a été considérablement réduit. En effet, la fréquence passe de 0,12 Hz pour un déplacement total de 0,8 mm (la courbe noire) à une fréquence de 0,16 Hz pour un déplacement total de 1 mm (la courbe bleu). De plus, le déplacement du MMC est plus franc dans la courbe bleue. Ce comportement mécanique est certes réduit mais persiste (courbe bleue entre 0,5 et 3,7 s Fig. 3.41).

Cependant, l'étape 2 où le MMC échange de la chaleur avec la source chaude prend plus de temps. Les deux étapes 1 et 2 sont plus symétriques que dans le fonctionnement normal.

3.4. Paramètres affectant le fonctionnement du générateur

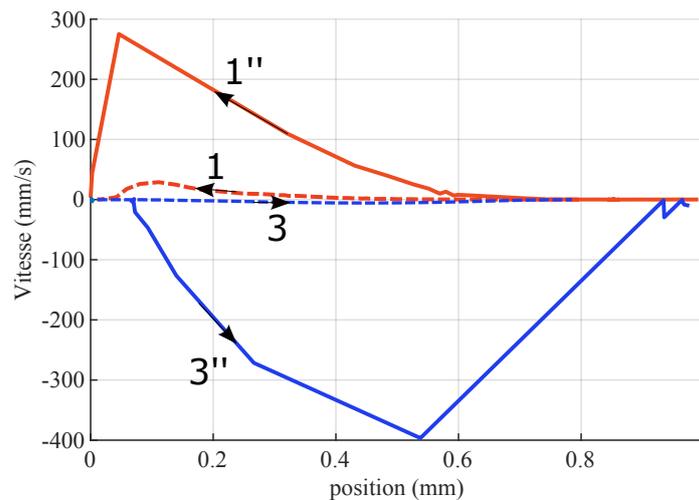


FIGURE 3.42 – Vitesse du MMC au cours de son déplacement. Traits en pointillés : fonctionnement normal, traits pleins : Fixation libérée. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement.

Le cycle dynamique dans le cas du fonctionnement normal est montré dans le plan vitesse/position, courbes en pointillés Fig. 3.42. Dans la même figure, les courbes en traits plein, représentent le cycle dynamique dans le cas du fonctionnement avec une fixation libre. Le cycle dynamique dans le plan vitesse/position ne fait apparaître que les deux étapes où le MMC se déplace, à savoir, les étapes 1 et 3. La courbe de vitesse est issue de la dérivée de la courbe de déplacement. Le MMC montre un comportement dynamique nettement plus rapide dans le cas d'une fixation libre. En effet, la vitesse maximale passe de 29 mm/s à 280 mm/s pour l'étape 1 et de 6 mm/s à 400 mm/s pour l'étape 3. Cependant, le ralentissement constaté durant l'étape 1 reste important, la vitesse reste presque nulle de 1 mm jusqu'à 0,6 mm.

A retenir : libérer une des deux fixations nous permet d'avoir une dynamique plus rapide du fait qu'on induit moins de contraintes mécaniques dans la poutre, mais sans pour autant résoudre complètement le problème de ralentissement qui serait dû à la présence de points stables. Cependant, ce qui est important à souligner c'est que le MMC n'arrête pas d'osciller lorsqu'on libère la fixation, la preuve que le générateur a une certaine robustesse même si son comportement mécanique est loin d'être parfait.

Application d'une pression variable sur la fixation gauche

Dans cette partie on va étudier l'effet de l'application d'une pression variable sur le comportement mécanique du prototype. L'application d'une pression variable permet de simuler différents niveaux de fixation de la poutre selon comment on serre les vis de fixations.

La figure 3.43 présente le déplacement de la poutre en fonction du temps suite à l'application d'une pression variable sur la fixation gauche. On peut voir que varier la pression engendre une réponse mécanique tout à fait différente pour chaque pression appliquée. Cela veut dire que selon la façon de visser les vis de fixation, le générateur aura

un comportement mécanique différent. Le générateur est, donc, sensible aux conditions aux limites de la poutre.

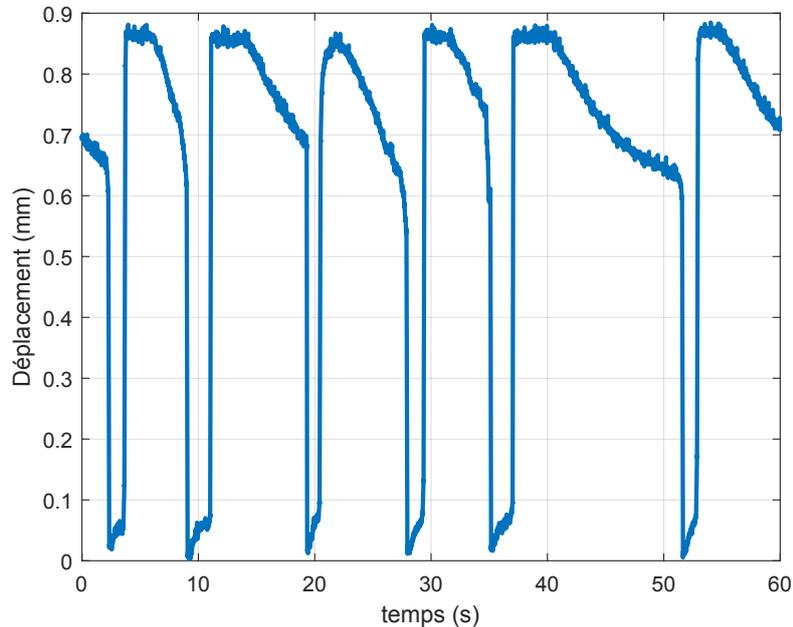


FIGURE 3.43 – Déplacement du MMC en fonction du temps après application d'une pression variable sur la fixation de gauche. La position de la source chaude est 0 mm. Les températures des sources chaude et froide sont de 56 et 18 °C respectivement.

L'ensemble de ces résultats permettent de valider la première hypothèse qui lie le comportement mécanique aux conditions aux limites. En effet, le comportement du générateur est sensible aux conditions aux limites de la poutre, il faut donc prévoir une structure de maintien particulière qui nous assure le contrôle de ces conditions aux limites et qui nous évite d'induire des contraintes mécaniques lors de la fixation de la poutre.

3.4.2 Effet de la température de la source de chaleur

Les températures des sources affectent le comportement mécanique du générateur. Les résultats de mesures présentés sont effectués dans une même série de mesures (sans arrêt du générateur) afin de garantir les mêmes conditions aux limites.

La température de la source chaude étant fixée à 56 °C, on fait varier la température de la source froide et on mesure la distance parcourue par le MMC à partir de la source chaude (0 mm).

Les résultats de mesures sont représentés dans la Fig. 3.44, où on présente la distance parcourue par le MMC en fonction de ΔT . On rappelle que $\Delta T = T_{chaud} - T_{froid}$, où T_{chaud} est la température de la source chaude et T_{froid} la température de la source froide. La distance parcourue par le MMC diminue avec l'augmentation de ΔT . Au total, cette distance diminue de 0,18 mm pour une augmentation de $\Delta T = 1,6$ °C ce qui est énorme pour un système qui se déplace sur une distance de 0,8 mm. En effet, une variation de

3.4. Paramètres affectant le fonctionnement du générateur

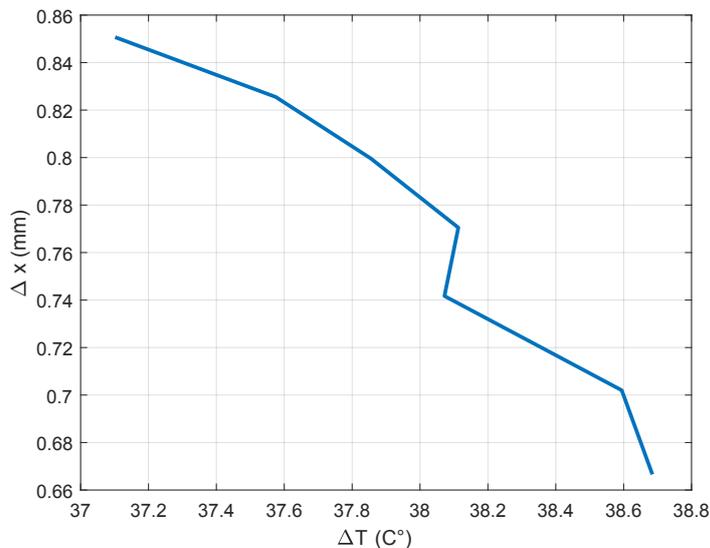


FIGURE 3.44 – La distance parcourue par le MMC, à partir de la source chaude, en fonction de ΔT . La température de la source chaude est fixée à 56 °C et la température de la source froide varie. Pour une variation de température de 1,6 °C on enregistre une variation de la distance parcourue de 0,18 mm.

ΔT de 4 % engendre une variation de distance parcourue de 22 %. ce résultat montre déjà que le générateur est fortement sensible à la température des sources de chaleur. L'explication serait que la distance parcourue diminue car le MMC devient partiellement ferromagnétique avant d'atteindre la source froide, mais c'est suffisant pour que la force magnétique renverse, légèrement, la force de rappel de la poutre, cependant, le MMC continue à échanger de la chaleur à travers l'air ce qui ralentit extrêmement sa dynamique.

Ce qui est intéressant de savoir c'est que le MMC garde son auto-oscillation pour une variation de température de $\Delta T = 1,6$ °C ; au delà de cette valeur, le MMC se voit immobilisé. En effet pour une température de la source froide avoisinant les 16 °C ($\Delta T = 3$ °C) le MMC s'immobilise entre les deux sources de chaleur. Cette perte d'auto-oscillation du MMC est due à la présence d'un équilibre thermique qui engendre un point mécaniquement stable. Le cycle dynamique dans le plan vitesse/position qui illustre cette situation est montré dans la Fig. 3.45 où le MMC se déplace de la source froide vers la source chaude sans jamais l'atteindre, il s'arrête au point y.

En plus d'être sensible aux températures des sources de chaleur, le prototype est aussi sensible à la température ambiante. En effet, on est arrivé à faire des expérimentations en hiver et en printemps mais pas en été à cause de la température dans la salle de manipulations qui avoisinait les 28 °C.

La température de la source froide affecte aussi la puissance générée par les piézoélectriques. La Fig. 3.46 montre que la puissance électrique est maximale pour un $\Delta T = 37,9$ °C (le cas précédemment étudié).

Afin de comprendre l'évolution de la puissance on trace la fréquence du MMC en fonction de ΔT (Fig. 3.47). La fréquence de fonctionnement augmente avec la différence

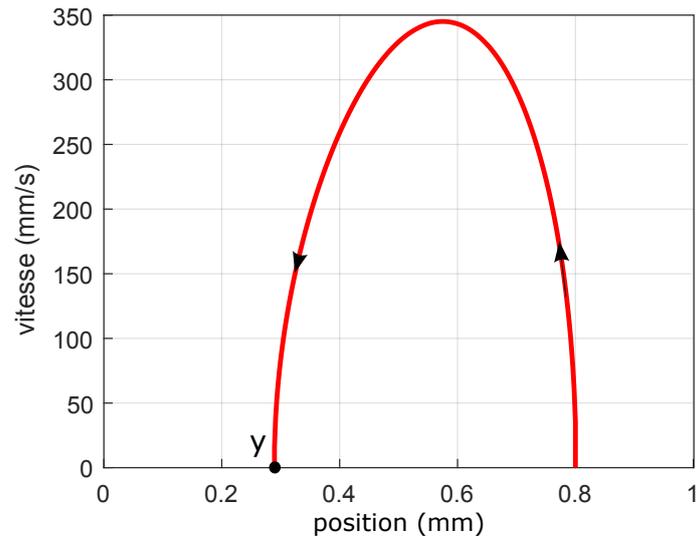


FIGURE 3.45 – Résultats de simulations 'résolution de l'équation de la dynamique sous Matlab'. La vitesse du MMC en fonction de la position dans le cas d'un équilibre thermique. y est le point d'équilibre stable où le MMC s'arrête. La source chaude à 0 mm et la source froide à 0,8 mm.

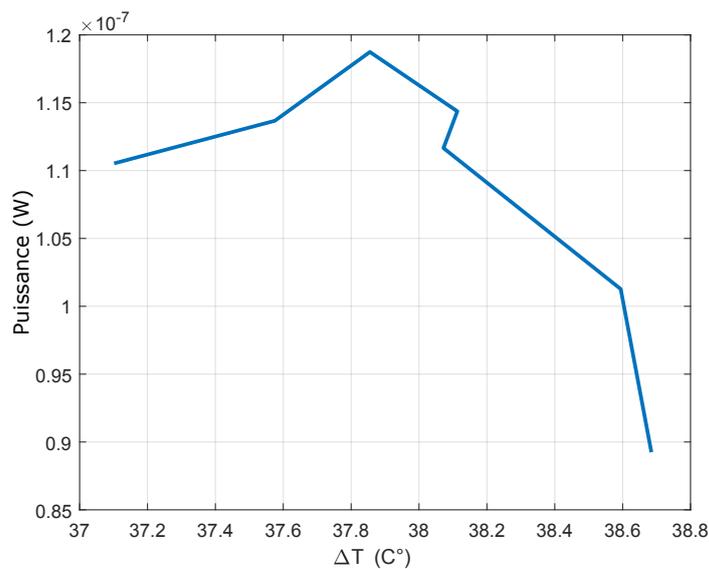


FIGURE 3.46 – Puissance électrique de sortie en fonction de ΔT avec la température de la source chaude fixée à 56 °C et la température de la source froide qui varie.

de température. La puissance électrique est égale à $P = E \times f$, f la fréquence et E l'énergie, l'énergie électrique produite par les piézoélectriques est proportionnelle à la distance parcourue par le MMC. Avec la fréquence qui augmente et l'énergie qui diminue (ΔX diminue), il est normal qu'il existe un point pour lequel la puissance électrique est maximale.

La température n'est pas une variable du cycle dynamique mais à cause de l'effet magnéto-calorique qui modifie la force magnétique, ce dernier se voit affecté par cette

3.5. Conclusions

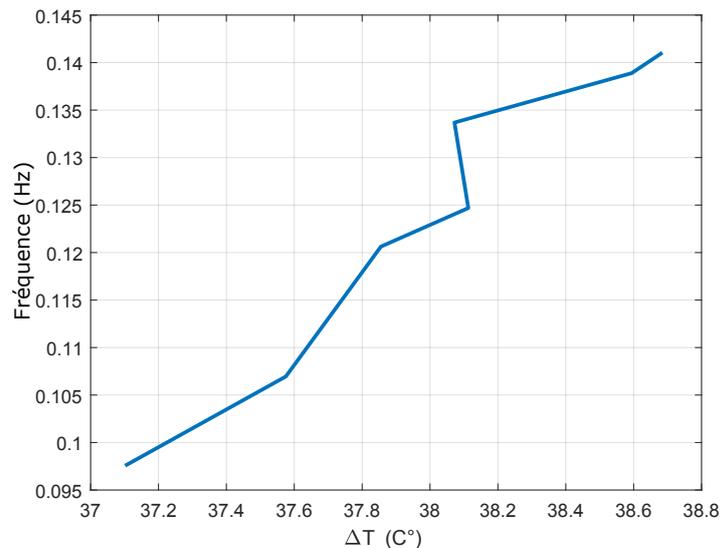


FIGURE 3.47 – La fréquence en fonction de ΔT . La température de la source chaude est fixée à 56 °C tandis que la température de la source froide est variée.

variable. Dans cette partie, nous n'avons pas traité les questions relatives à l'effet du changement de la température de la source de chaleur sur la transition de phase et le rôle que joue C_H et T_C du matériau car : d'un coté on a concentré notre attention sur l'auto-oscillation et de l'autre pour étudier en détail ce point il nous faudra une mesure fiable de la température du MMC.

A retenir :

- Le comportement du générateur est sensible aux températures des sources de chaleurs et la température de l'environnement qui l'entoure.

- Le générateur conserve son auto-oscillation pour une variation de température d'environ 3 °C ; au-delà de cette valeur ce dernier cesse de fonctionner. En d'autres termes, pour une température de la source chaude de 56 °C, la température de la source froide doit être comprises entre 19 °C et 16 °C.

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre a été présenté la première version du prototype. Les trois différentes parties (source chaude, source froide et poutre) ont été réalisées essentiellement avec de la découpe à jet d'eau. Une structure d'Halbach, collée sur la source chaude, a été réalisée en utilisant des aimants en NdFeB. Cette structure joue le double rôle d'interface thermique et de source de champ. Quatre plaques piézoélectriques ainsi qu'un MMC (LaFeSi) ont été collés sur une poutre en CuBe₂. La source froide est équipée de goupilles afin de préfixer la poutre avant le serrage des fixations. Cette source froide est refroidie avec un échangeur à eau.

Un banc de test a été mis au point et réalisé afin de mesurer de façon synchrone le déplacement et la température du MMC ainsi que les tensions générées par les plaques

piézoélectriques. Le générateur produit une puissance de $0,12 \mu\text{W}$ ($6,8 \mu\text{W}/\text{cm}^3$) pour une fréquence de $0,12\text{Hz}$. Cette puissance correspond à $1 \mu\text{J}$ par cycle.

La mesure de la température est peu fiable car nous avons utilisé un thermocouple de $0,2 \text{ mm}$ de diamètre pour mesurer une température sur une épaisseur de $0,25 \text{ mm}$. Il serait plus précis de déposer un thermocouple, le plus fin possible, sur le MMC (micro fabrication).

Les études du cycle de fonctionnement et de l'auto-oscillation ont été faites dans le plan F-x 'mécanique' et dans le plan M-H 'magnétique'. L'étude du cycle mécanique a révélé la présence de forces supplémentaires, liées à l'air et aux courants de Foucault, qui inversent la force totale appliquée sur le MMC avant d'atteindre la source chaude.

L'étude du cycle magnétique révèle que les deux étapes iso-champs 2 et 4 sont iso-champs en champ appliqué mais pas en champ interne à cause du champ démagnétisant. Le cycle magnétique est toujours un Brayton car ce dernier est défini en champ appliqué mais l'efficacité d'utilisation du matériau actif est réduite. En effet le champ démagnétisant nous empêche d'atteindre, d'un côté la saturation et de l'autre la transition de phase.

La mesure de déplacement montre un ralentissement conséquent du MMC durant l'étape 1 (déplacement vers la source froide). Deux hypothèses ont été émises afin d'expliquer cette situation. La première hypothèse qui lie ce ralentissement aux conditions aux limites a été validée par une série de mesures étudiant l'effet du serrage de la poutre sur le comportement mécanique du générateur. Dans cette étude a été montré que fixer la poutre des deux côtés empêche le MMC de se mettre en contact avec la source froide, libérer une extrémité permet à la fois au MMC de se mettre en contact avec la source froide et d'avoir une dynamique plus rapide avec un ralentissement réduit. Le comportement mécanique du générateur est sensible aux changements des conditions aux limites (pression de serrage).

La deuxième hypothèse lie les températures des sources de chaleur à ce ralentissement. Comme pour la première hypothèse, celle ci a été validée par des mesures qui consistent à varier la température de la source froide et étudier son effet sur le comportement mécanique du générateur. Le MMC devient partiellement ferromagnétique avant d'atteindre la source froide, l'échange de chaleur s'effectue principalement à travers l'air ce qui ralentit le MMC et impacte la distance parcourue à partir de la source chaude. Le générateur est sensible à la température des sources de chaleur et ne tolère que très peu leurs variations, de plus, l'air ambiant peut aussi affecter le fonctionnement de ce dernier.

Dans la partie modélisation thermo-mécanique du chapitre 2, on a vu que le MMC effectue simultanément deux cycles, le premier est un cycle dynamique et le deuxième est thermo-dynamique. Les deux cycles sont liés par deux choses : l'effet magnéto-calorique (conditions adiabatiques) et le contact thermique. Or dans ce chapitre, il a été montré que le déplacement du MMC est loin d'être adiabatique, de plus le MMC ne se met pas en contact avec la source froide. C'est pour cela, que le modèle ne peut pas décrire exactement le comportement de ce premier prototype, mais il décrit le comportement d'un générateur idéal. Dans ce cas, dit idéal, le modèle montre qu'on peut atteindre une fréquence de $0,29 \text{ Hz}$ avec un $\Delta T = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ (18 et $56 \text{ }^\circ\text{C}$) et une énergie électrique de $16,87 \mu\text{J}$ (une puissance de $4,9 \mu\text{W}$), contre $0,12 \text{ Hz}$, $1 \mu\text{J}$ et $0,12 \mu\text{W}$ (résultats de mesures).

3.5. Conclusions

Pour finir, les performances du générateur sont comparables à celles présentes dans la littérature et fonctionnant à faible différence de température (voir table. 3.4).

TABLE 3.4 – Comparaison avec différents travaux présents dans la littérature.

	Puissance électrique	ΔT	Transducteurs	Commentaires
Ce travail	$6.8 \mu\text{W}/\text{cm}^3$	38 °C	Matériaux piézoélectriques	Résultats de mesures
[11]	$1.6 \mu\text{W}/\text{cm}^3$	25 °C	Bobines	Résultats de mesures
[8]	$28.34 \text{ mW}/\text{cm}^3$	50 °C		Puissance estimée
[15]	$0.32 \text{ mW}/\text{cm}^3$	30 °C	Bobines	Puissance maximale, pas d'informations sur la puissance d'entrée
[12]	$118 \text{ mW}/\text{cm}^3$	140 °C	Bobines	Résultats de mesures
[10]	$38 \text{ mW}/\text{cm}^3$	80 °C	PVDF	Résultats de mesures

L'ensemble des résultats montrent que pour avoir un générateur avec un bon comportement mécanique, il faut réfléchir à une version où la poutre ne soit pas fixée des deux côtés. Ceci est l'objet du chapitre qui vient.

Deuxième prototype

Sommaire

4.1	Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation . . .	98
4.1.1	Présentation du prototype	98
4.1.2	Dimensionnement	99
4.1.3	Réalisation	103
4.2	Étude d'un cycle de fonctionnement	110
4.2.1	Auto-oscillation : déplacement et tensions générées	111
4.2.2	Modèle thermo-mécanique d'un cycle de fonctionnement	113
4.2.3	Étude du comportement mécanique sur un cycle dans la plan F-x	116
4.3	Effets de ΔT et x_0 sur le comportement du générateur	121
4.3.1	Variation de ΔT	121
4.3.2	Variation de x_0	123
4.4	Conclusions	129

L'expérience acquise durant la réalisation et l'étude du premier prototype a permis de réaliser un deuxième prototype plus performant. La première version du prototype n'assure pas une bonne maîtrise de la raideur du ressort. Il en résulte que l'obtention d'un régime auto-oscillant est très dépendante des conditions aux limites, en d'autres termes à la façon de serrer les extrémités de la poutre et aux températures des sources chaude et froide. Nous avons aussi noté que, le démarrage après plusieurs heures ou jours d'arrêt, est souvent difficile à effectuer. Il faut à chaque fois trouver le bon serrage de la poutre. Enfin, le matériau magnéto-calorique (MMC) peut se trouver en équilibre stable entre les deux sources comme le montre la Fig. 4.1.



FIGURE 4.1 – Équilibre stable du MMC entre les deux sources chaude et froide

Le développement d'un nouveau prototype doit permettre de mieux contrôler la raideur de la structure. Ce prototype devra aussi améliorer le couplage piézoélectrique/poutre afin de maximiser l'énergie récupérée.

Dans une première partie, nous présenterons les améliorations apportées au nouveau prototype afin de répondre aux problématiques soulevées. Nous présenterons, ensuite, les différents résultats de mesures. Enfin, nous parlerons en détails des différents modèles du prototype et des paramètres affectant son fonctionnement.

4.1 Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

Cette nouvelle version, bien que plus complexe à réaliser, améliore le comportement mécanique ainsi que la puissance électrique récupérée. Dans ce qui suit nous présenterons la réalisation et le dimensionnement de cette version.

4.1.1 Présentation du prototype

Le schéma du principe de ce prototype est représenté dans la Fig. 4.2. Comme pour le prototype précédent, celui-ci est composé d'une source froide et d'une source chaude. Sur la source chaude une structure d'Halbach, composée de cinq aimants en NdFeB, est collée. On va utiliser la même source chaude que dans le précédent prototype.

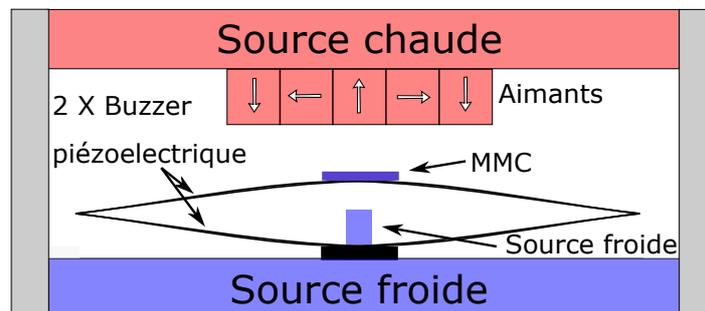


FIGURE 4.2 – Schéma de principe du deuxième prototype du générateur thermomagnétique. Ce prototype se compose d'une source chaude, d'une source froide et d'une poutre à base de deux buzzers piézoélectriques collés l'un à l'autre.

Dans le premier prototype, une poutre fixée aux deux extrémités, était utilisée pour suspendre le MMC. Dans le deuxième prototype, le ressort est constitué à partir de deux buzzers piézoélectriques. Le buzzer piézoélectrique est représenté dans la Fig. 4.3, il est composé d'une partie en laiton (partie jaune) et d'une partie centrale en matériau piézoélectrique. Les buzzers utilisés [92] ont un diamètre de 65 mm, les deux parties, laiton et matériau piézoélectrique ont des épaisseurs de 0,18 mm et 0,2 mm respectivement.

Les deux buzzers piézoélectriques sont collés inversement l'un à l'autre à travers un anneau de 65 mm de diamètre extérieur et 63 mm de diamètre intérieur, comme le montre la Fig. 4.4. Une ouverture au milieu des buzzers piézoélectriques permet au MMC de se mettre directement en contact avec la source froide assurant ainsi un refroidissement plus efficace.

4.1. Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

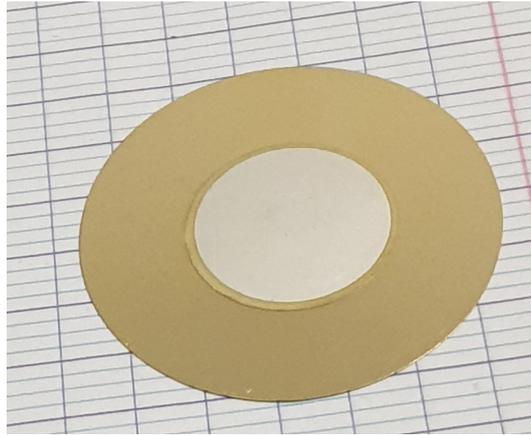


FIGURE 4.3 – Le buzzer piézoélectrique. La partie jaune : laiton, la partie blanche au milieu est la céramique piézoélectrique avec son électrode.

Le MMC reste le même que celui utilisé dans les versions précédentes : $(La(Fe, Si)_{13}H)$ ($0.25 \times 7 \times 10 \text{ mm}^3$), il est collé sur la partie supérieure de la nouvelle poutre, tandis que la partie inférieure sert à fixer la poutre sur un support, ce qui permet d'avoir des conditions aux limites et une raideur mieux maîtrisées.

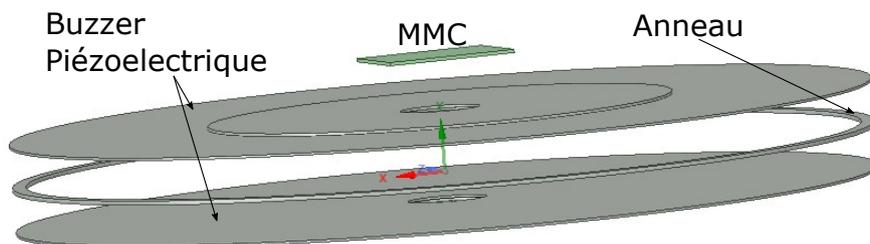


FIGURE 4.4 – Schémas du principe de la Poutre à base des buzzers piézoélectriques. Les deux buzzers sont inversement collés l'un à l'autre à travers un anneau.

Le cycle de fonctionnement souhaité reste le même que la version précédente, à savoir, un cycle dynamique en quatre étapes, deux étapes durant lesquelles le MMC est en mouvement : étape 1, où le MMC se déplace vers la source chaude, étape 3, où le MMC se déplace vers la source froide, et deux étapes où le MMC est immobile : étape 2, le MMC en contact avec la source chaude, étape 4 le MMC en contact avec la source froide. On vise aussi le même cycle thermo-dynamique avec deux adiabatiques (étapes 1 et 3) et deux iso-champs (étapes 2 et 4).

4.1.2 Dimensionnement

Le dimensionnement concerne la détermination de la forme et des dimensions de la nouvelle poutre qui est composée de deux buzzers piézoélectriques. La poutre doit avoir la bonne raideur et ne doit pas subir une contrainte supérieure à sa limite élastique (90 MPa pour le laiton et 50 MPa pour la céramique piézoélectrique).

La figure 4.5 présente les quatre configurations de poutres étudiées. Dans la configuration (a) on colle, simplement, deux buzzers inversement l'un à l'autre à travers un anneau, sans pré-découper les buzzers. Dans la configuration (b) les buzzers sont découpés sous forme de '+' avant d'être collés. Dans la configuration (c) les buzzers sont découpés comme dans la configuration (b) mais lors du collage les branches des buzzers sont décalés de 45° . Dans la dernière configuration (d) les buzzers sont découpés sous la forme d'une croix pattée avant d'être collés.

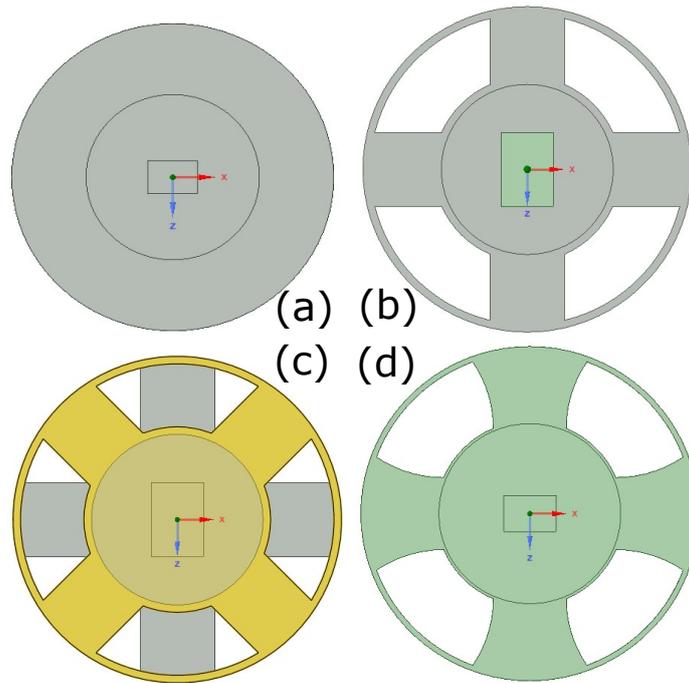


FIGURE 4.5 – Différentes configurations de la poutre, (a) avec buzzers sans découpe, (b) avec buzzers découpés en '+', (c) avec buzzers découpés en '+' et collage décalé de 45° et (d) avec buzzers découpés sous forme de croix pattée.

Pour faire un choix parmi les quatre configurations, il faut déterminer à l'aide de simulations par éléments finis sous Ansys, la raideur de chaque configuration. Le schéma de principe de la simulation est représenté dans la Fig. 4.6. Lors de cet essai, le côté inférieur de la poutre (deux piezo buzzers) est fixé sur un support alors que l'on impose un déplacement de 1 mm sur le MMC de l'autre côté de la poutre et on évalue la force de rappel.

Les résultats des simulations en grandes déformations sont représentés dans la Fig. 4.7, où on présente les forces de rappel des quatre configurations en fonction de la position du MMC ainsi que les forces magnétiques à températures 16°C et 52°C soit les températures de la source chaude et de la source froide.

La configuration (a) est trop raide pour fonctionner : la force de rappel de la poutre est toujours supérieure à la courbe de la force magnétique à 16°C , donc le MMC va rester collé sur la source froide.

Afin de réduire la raideur de la poutre, les deux configurations (b) et (c) ont été prises en compte, mais là aussi les deux configurations sont trop raides même si de la matière a

4.1. Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

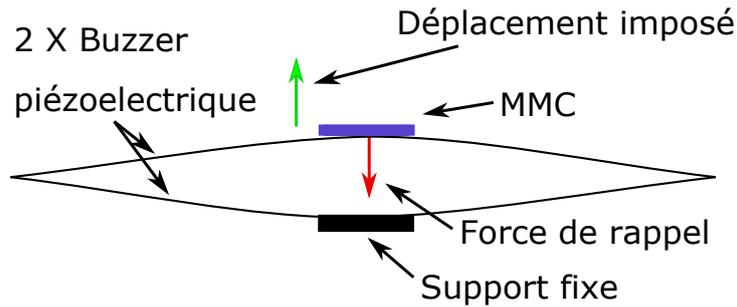


FIGURE 4.6 – Schéma du principe de la simulation sous Ansys qui vise à déterminer la force de rappel pour un déplacement imposé.

été enlevée. En utilisant ces deux configurations le MMC risque, comme dans le cas de la configuration (a), d'être tout le temps collé sur la source froide.

Finalement la configuration (d), où les buzzers piézoélectriques sont découpés sous forme d'une croix pattée, présente une courbe de la force de rappel qui se situe entre les deux courbes des forces magnétiques aux températures de 16 °C et de 52 °C. Cette configuration respecte les conditions d'auto-oscillation du générateur (voir le Chapitre 2). La configuration (d) est, a priori, la bonne configuration mais il reste à vérifier les contraintes sur les différentes parties (laiton et céramiques piézoélectriques)

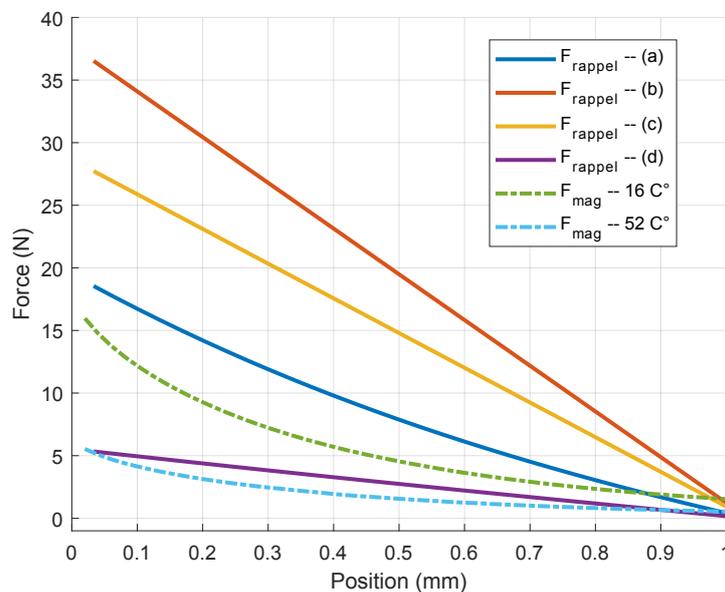


FIGURE 4.7 – Résultats de simulations en grandes déformations. Force de rappel des quatre configurations ainsi que les forces magnétiques simulées à 16 °C et 52 °C en fonction de la position du MMC par rapport à la source chaude (0 mm).

Afin de voir si les limites élastiques des différents matériaux qui composent les buzzers piézoélectriques (laiton et céramique) sont dépassées, les contraintes simulées pour un déplacement de 1 mm sont analysées. Dans la Fig. 4.8 (a) les contraintes sur l'ensemble du buzzer sont présentées. Sur le laiton, la valeur de la contrainte ne dépasse pas 90 MPa

sauf sur les bords des branches où on dépasse légèrement cette limite, sachant que le déplacement lors des expérimentations sera moins de 1 mm (environ 0,5 mm) ; la valeur de la limite élastique ne sera pas atteinte. En (b) on peut voir que les contraintes que subit la céramique piézoélectrique ne dépassent pas la limite élastique de 50 MPa, sauf aux endroits où le MMC est collé. Une concentration de contrainte sur la zone où est collé le MMC pourra conduire à des fissures qui dégraderont localement la céramique. Néanmoins nous espérons que la colle donnera une souplesse suffisante à l'assemblage afin d'éviter cette dégradation.

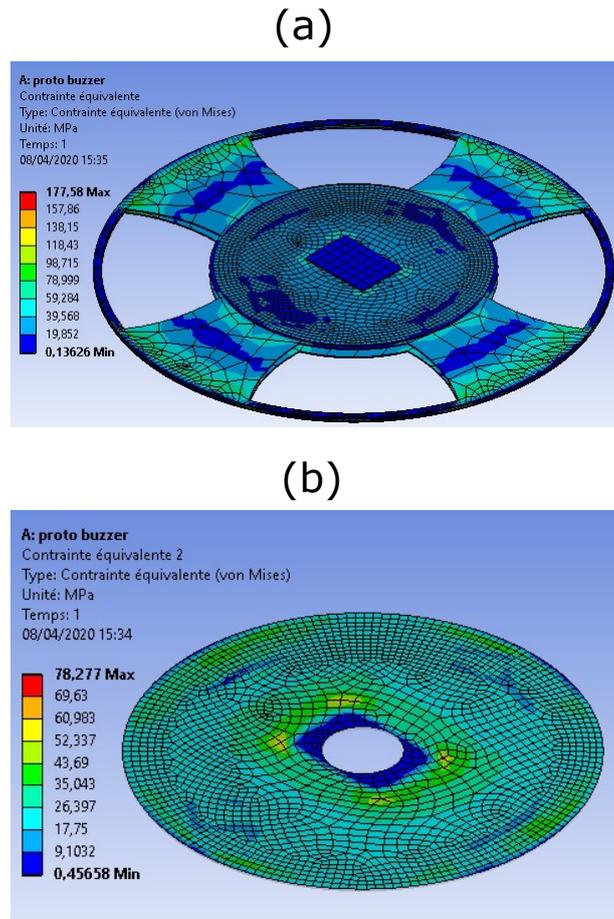


FIGURE 4.8 – Résultats de simulations. (a) Contraintes sur l'ensemble du buzzer, la limite élastique du laiton (90 MPa) n'est pas dépassée, (b) contraintes sur la céramique piézoélectrique, la limite élastique de la céramique (50 MPa) n'est pas dépassée sauf dans les zones de contact avec le MMC ce qui est normal.

La configuration (d) présente une raideur qui respecte les conditions d'auto-oscillation et permet un déplacement de 1 mm (les limites élastiques du laiton et de la céramique piézoélectrique ne sont pas atteintes). Le déplacement total visé étant inférieur à 1 mm, nous avons donc, une marge de sécurité avant d'atteindre la plasticité ou la fissuration des matériaux.

Le dessin technique ainsi que les données techniques de la configuration (d) sont représentés dans la Fig. 4.9.

4.1. Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

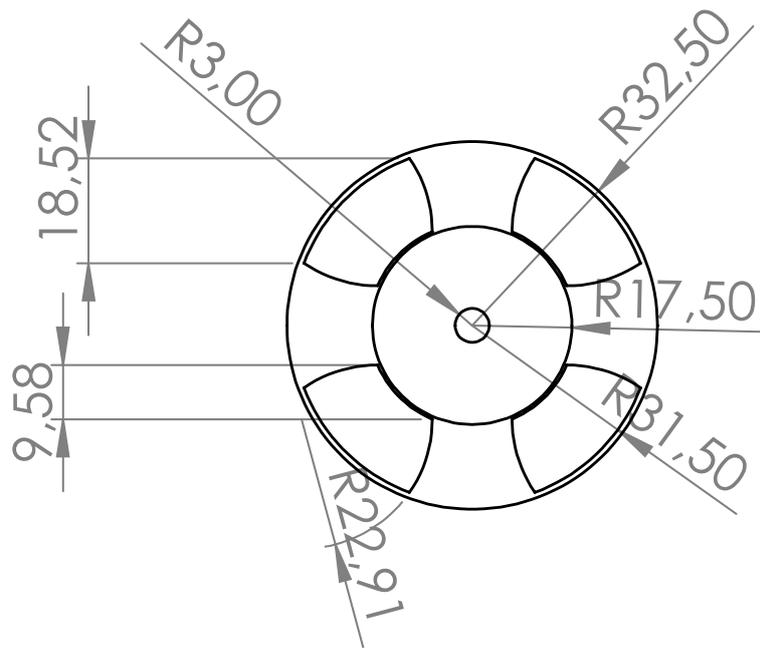


FIGURE 4.9 – Le dessin technique de la configuration (d) avec les différentes dimensions en mm. L'épaisseur du laiton est de 0,18 mm et celle de la céramique est de 0,2 mm.

4.1.3 Réalisation

Dans cette section nous présenterons la réalisation de la poutre à base des buzzers piézoélectriques et de la source froide.

Réalisation de la poutre

La figure 4.10 montre un buzzer piézoélectrique découpé sous forme de croix pattée en utilisant la découpe à jet d'eau. Cette technique de découpe est assez performante mais elle peut casser la céramique piézoélectrique lors de la découpe de l'ouverture (trou au centre). Afin d'éviter cela, la céramique est mise du côté opposé à la buse de découpage. Expérimentalement nous observons une différence dans la découpe, il est néanmoins difficile de pouvoir l'expliquer, peut être que le laiton amortit le jet d'eau.

La céramique n'est pas centrée par rapport à la partie en laiton, probablement afin d'éviter certaines résonances mécaniques, il ne faut pas oublier que c'est un buzzer que nous avons ré-adapté à d'autres fins. Un cadre externe de diamètre externe 65 mm et interne de 63 mm a été laissé, il servira à coller les buzzers entre eux à travers un anneau de mêmes dimensions que ce cadre.

La figure 4.11 montre le résultat du collage de deux buzzers piézoélectriques. Le collage a été fait en utilisant une colle epoxy UHU [86] selon deux étapes :

- L'anneau en CuBe_2 est collé, en premier, sur l'un des buzzers.
- Une fois que la colle est sèche (12h d'attente), on colle le deuxième buzzer sur l'ensemble.

La colle est étalée sur l'anneau avec un pinceau afin d'éviter de la faire couler sur les branches en laiton et risquer de coller deux branches parallèles l'une à l'autre.



FIGURE 4.10 – Buzzer piézoélectrique découpé sous forme de croix pattée en utilisant la découpe à jet d'eau.



FIGURE 4.11 – Collage de deux buzzers piézoélectriques à travers un anneau en CuBe2 de diamètres interne de 63 mm et externe de 65 mm.

Une fois les deux buzzers collés, on colle le matériau magnéto-calorique (LaFeSi, $10 \times 7 \times 0.25 \text{ mm}^3$) sur l'ouverture au niveau de la céramique (voir Fig. 4.12). On utilise la même colle epoxy qui a servi à coller les buzzers. C'est important de bien centrer le MMC sur l'ouverture car c'est ce qui nous garantit le contact de la totalité de la surface du MMC sur la source chaude. Le diamètre de l'ouverture est de 6 mm ce qui nous permet de coller le MMC sur ses quatre côtés. Une précaution à prendre avant de coller le matériau est de gratter la partie de l'électrode sur laquelle il va être collé pour éviter d'éventuels court-circuits.

Un anneau, en aluminium, de diamètres externe de 8 mm et interne de 6 mm est collé sur la céramique piézoélectrique inférieure (voir Fig. 4.13). Cet anneau va nous permettre de coller l'ensemble de la poutre sur un support. Dans ce nouvel assemblage, les contraintes mécaniques entre le support et la poutre sont plus simples (traction pure). Le comportement mécanique est aussi moins sensible à la fixation car elle se fait sur

4.1. Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

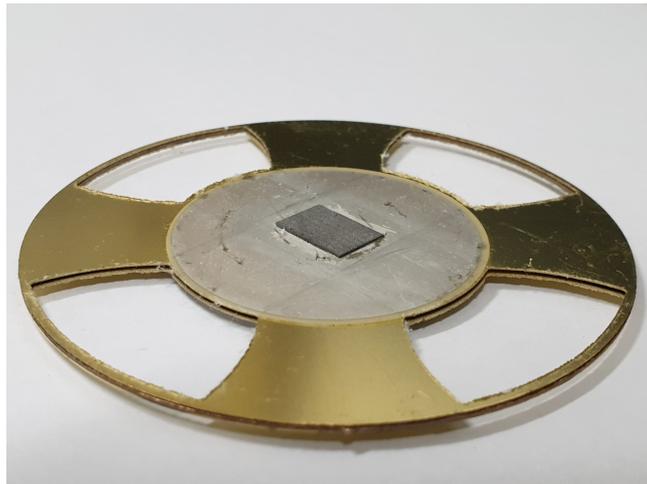


FIGURE 4.12 – Collage du MMC sur l’ouverture au niveau de la céramique présente sur la face supérieure de la poutre.



FIGURE 4.13 – Collage d’un anneau en aluminium de rayon interne de 3 mm et externe de 4 mm, sur la face inférieure de la poutre, à travers lequel l’ensemble est fixé sur un support rigide.

une zone très localisée, contrairement à la configuration précédente où elle se faisait en deux points opposés de la poutre. Il est important de bien centrer l’anneau autour de l’ouverture pour ne pas gêner la vis qui viendra refroidir le MMC. Comme dans le collage du matériau il est recommandé d’enlever, en grattant, la portion d’électrode sur laquelle on colle l’anneau.

La figure 4.14 montre le résultat du collage de l’ensemble sur une plaque en aluminium ($100 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$). Cette plaque servira de support fixe pour la poutre et permettra aussi de réaliser l’assemblage des sources froide et chaude. Cette plaque est dotée d’une ouverture en son centre (voir Fig. 4.15) qui permettra de mettre le MMC en contact avec la source froide.

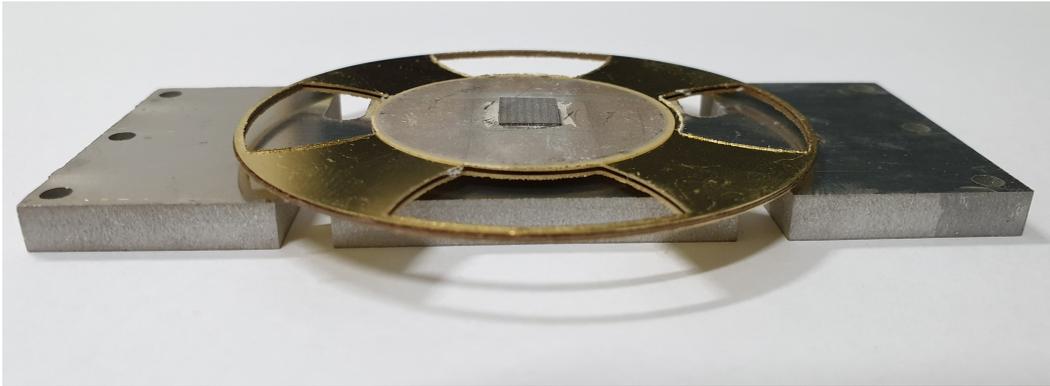


FIGURE 4.14 – La poutre réalisée est collée sur un support en aluminium qui permet de rigidifier l'ensemble et de manipuler la poutre sans risquer de la déformer.

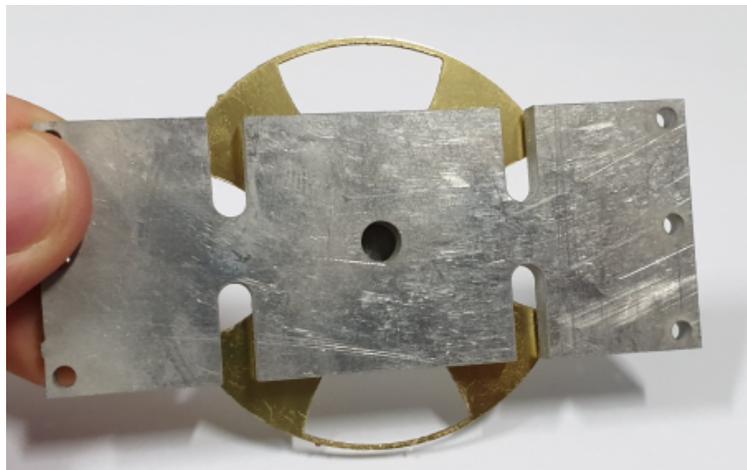


FIGURE 4.15 – Coté inférieur du support de la poutre, l'ouverture permet de refroidir le MMC par contact direct. Les ouvertures aux extrémités du support vont nous permettre de placer la source chaude.

Caractérisation de la poutre

Il est important de vérifier, avant d'aller plus loin, si la raideur de la poutre est proche de la valeur obtenue par la simulation et si elle respecte les conditions d'auto-oscillation. Pour cette raison, un banc de test a été élaboré afin d'effectuer la mesure de la raideur.

La figure 4.16 présente le banc de test avec lequel la raideur de la poutre a été mesurée. Un capteur de position (capteur laser [32]) permet de mesurer le déplacement du MMC : on peut voir sur la figure la projection du laser (point rouge). L'application d'une masse (voir Fig. 4.16) provoque le déplacement du MMC. Pour une masse donnée, une force $F = mg$ est appliquée sur le MMC. En conséquence, l'application de plusieurs masses nous permet d'obtenir la caractéristique force/déplacement de la poutre.

Les résultats de mesures sont présentés dans la Fig. 4.17, deux mesures de raideurs ont été réalisées. On constate que les deux mesures sont assez proches, mesure 1 : $k=8,0$ N/mm et mesure 2 : $k=8,5$ N/mm. La valeur moyenne de la raideur est $k_{moy}=8,25$ N/mm.

La figure 4.18 représente les forces magnétiques simulées à 16 °C et 52 °C ainsi que les

4.1. Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

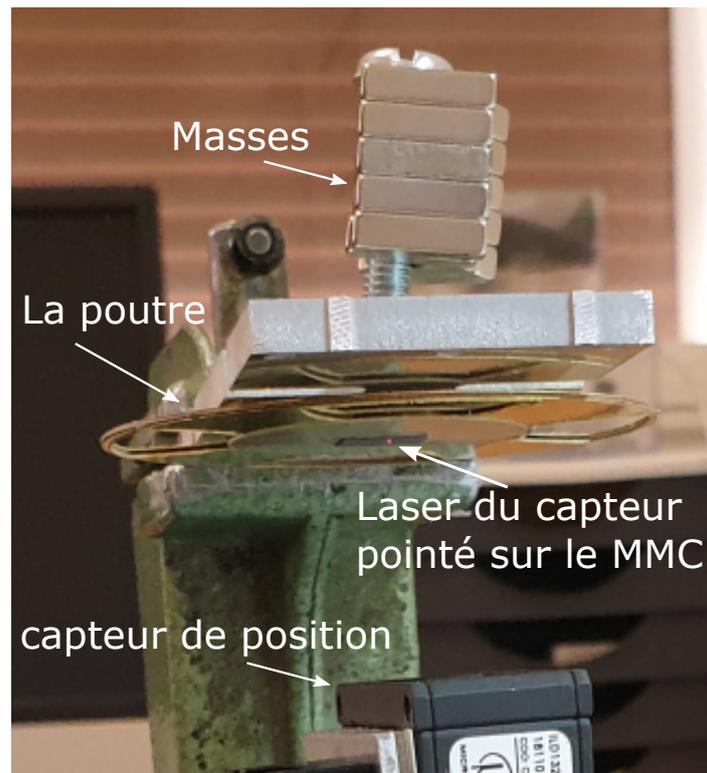


FIGURE 4.16 – Banc de test pour la mesure de la raideur de la poutre. La force est appliquée via des masses alors que le déplacement du MMC est mesuré par un capteur.

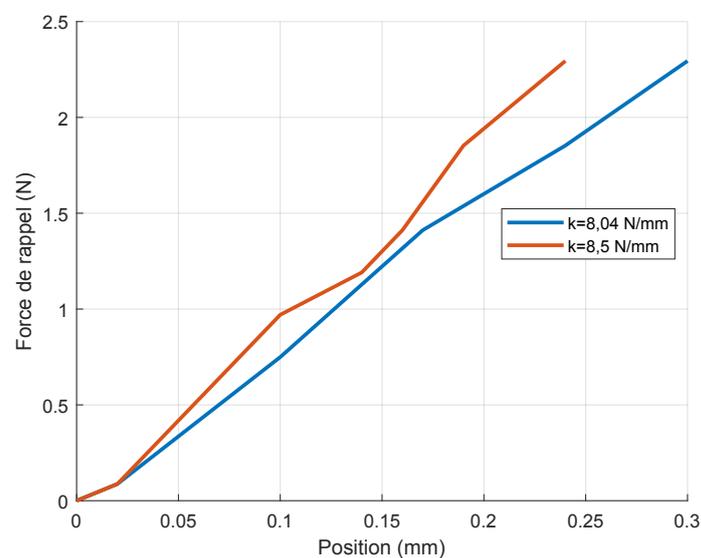


FIGURE 4.17 – Résultats de mesures de la raideur, mesure 1 (courbe bleu) : $k=8$ N/mm et mesure 2 (courbe rouge) : $k=8,5$ N/mm. A 0 mm la poutre est au repos.

caractéristiques force/déplacement mesurée et simulée. Les deux caractéristiques force / déplacement, mesurée et simulée, ne sont pas confondues mais restent proches. En effet, il est difficile, en pratique, d'avoir une raideur mesurée égale à celle simulée car le processus

de fabrication, à savoir la découpe et l'assemblage des différents éléments, induit des incertitudes :

- les dimensions peuvent varier par rapport à la simulation.
- le collage des éléments n'est pas parfait comme dans la simulation.
- les caractéristiques des matériaux piézoélectriques (module de Young, etc.) utilisées dans la simulation peuvent ne pas correspondre aux valeurs réelles : les fabricants des buzzers ne donnent aucune information sur les propriétés de la céramique piézoélectrique, c'est pour cette raison qu'on prend des valeurs d'un PZT standard.

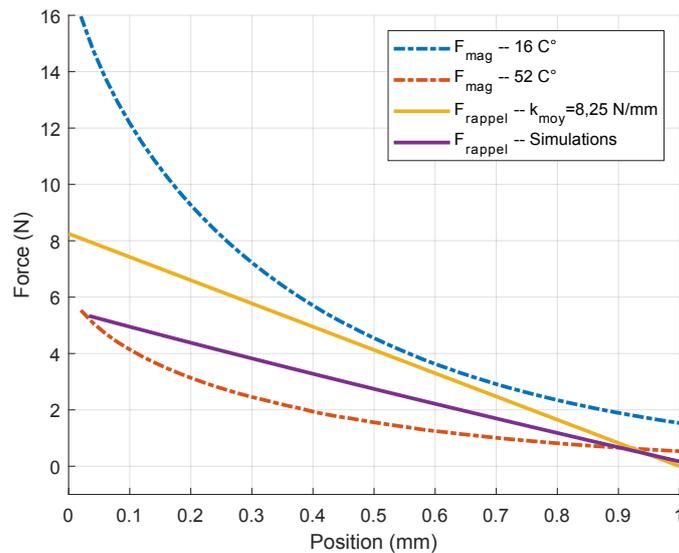


FIGURE 4.18 – Forces magnétiques simulées à 16 °C et à 52 °C et les courbes des forces de rappel, mesurée et simulée, en fonction de la position du MMC. 0 mm étant la position de la source chaude.

La courbe de la force de rappel F_{rappel} (caractéristique force/déplacement) de la poutre réalisée (courbe jaune) est située entre les courbes des forces magnétiques à 16 et 52 °C, cette poutre respecte donc les conditions d'auto-oscillation. En effet, pour les positions allant de 0 mm à 0,9 mm la force de rappel est inférieure à la force magnétique à 16 °C et supérieure à la force magnétique à 52 °C. On verra plus-tard que le fonctionnement du générateur reste sensible à la position de la source froide.

La force de rappel mesurée n'est pas tangente à la courbe de la force magnétique représentée par la courbe bleue (16 °C) mais elle s'y approche pour la position 0.55 mm. C'est pour cette raison qu'on placera la source froide à cette position pour éviter au maximum l'existence de points stables (les forces de rappel et magnétiques sont égales et la pente liée à la force de rappel est plus raide que la tangente à la force magnétique) qui peuvent ralentir le MMC dans sa progression vers la source chaude, comme cela a été vu dans les diagrammes vitesse/position du chapitre 3. Fort de l'expérience acquise lors de l'étude des problèmes de stabilité sur le premier prototype, nous avons dimensionné le système, soit la raideur et la position de la source froide afin d'éviter ce problème.

4.1. Présentation du prototype, dimensionnement et réalisation

Réalisation de la source froide

La source froide a pour but d'extraire une partie de la chaleur accumulée par le MMC durant l'étape où il est en contact avec la source chaude.

On peut voir dans la figure 4.19, la poutre avec son support collés sur une plaque d'acier de 20 mm d'épaisseur. Un échangeur à eau est collé sur cette plaque d'acier afin de la refroidir et surtout refroidir la vis, insérée dans un trou fileté au milieu de cette plaque. Cette vis assure le contact thermique avec le MMC.

L'échangeur à eau est collé à la plaque d'acier en utilisant une colle thermique 'Loctite 384' [93] pour améliorer le transfert thermique entre l'échangeur à eau et la plaque d'acier. L'eau qui circule dans cet échangeur est refroidie à l'aide d'un thermocryostat présenté dans le chapitre précédent.

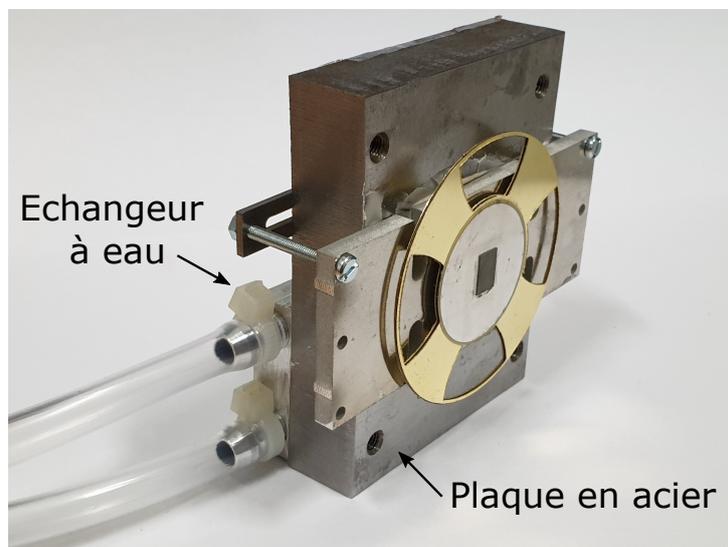


FIGURE 4.19 – L'ensemble poutre+support collés sur la source froide composée d'une plaque en acier, d'un échangeur à eau collé à cette plaque et d'une vis qui se met en contact avec le MMC.

Dans la figure 4.20 on voit la vis en question. Cette dernière a été poncée et polie à l'extrémité qui se met en contact avec le MMC, afin d'améliorer le contact thermique. La vis permet aussi de contrôler la précontrainte de la poutre par rapport à sa position au repos ($x_0 = 0$ mm), en la vissant ou en la dévissant. Un schéma explicatif est montré dans la Fig. 4.21 où on voit la disposition des différents éléments : la poutre, l'échangeur à eau, la vis et la plaque en fer. On représente dans la même figure le cas où la vis ne se met pas en contact avec le MMC en (a) (cas à éviter), le cas où la vis est en contact avec le MMC mais où la poutre est à sa position de repos (on ne peut pas garantir un bon contact thermique) et enfin, le cas qui nous intéresse, où une précontrainte est appliquée afin de garantir un bon contact thermique.

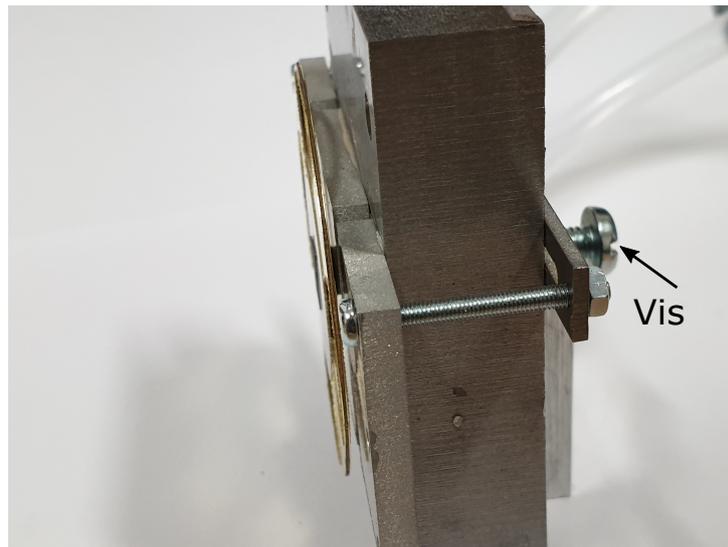


FIGURE 4.20 – La source froide vue d'un autre angle. La vis qui refroidit le MMC est visible.

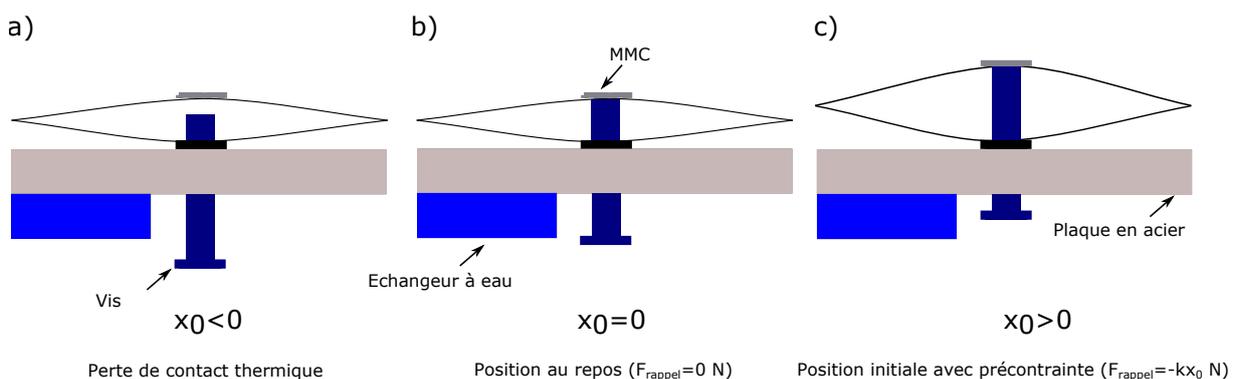


FIGURE 4.21 – Schéma explicatif de la source froide. Trois cas sont représentés, a) pas de contact thermique entre la vis et le MMC, b) Contact présent, la poutre à sa position au repos, c) contact présent, la poutre est précontrainte.

4.2 Étude d'un cycle de fonctionnement

Le deuxième prototype auto-oscille et montre un meilleur comportement mécanique et une puissance électrique plus importante que le premier, ceci est un résultat important en soit. De plus, il fonctionne à un ΔT inférieur à celui du premier prototype.

L'étude du déplacement donne de riches informations sur le fonctionnement de ce prototype, tandis que la mesure de tension nous donne accès à la puissance électrique produite. Cependant, la température du MMC n'a pas été mesurée car l'utilisation d'un thermocouple n'est pas fiable et le développement d'une bonne technique de mesure prendrait beaucoup de temps et ce n'est pas l'objectif principal de la thèse.

Ces deux mesures (tension et déplacement) ont été effectuées avec le même banc de test que celui présenté dans le précédent chapitre (chapitre 3). Elles permettront, d'une part, de faire une comparaison avec les résultats du modèle thermo-mécanique appliqué

4.2. Étude d'un cycle de fonctionnement

au prototype 2 et d'autre part de réaliser l'étude du comportement mécanique dans le plan force/déplacement comme celui qui a été fait dans le chapitre 3 pour voir ce qui rend ce nouveau prototype plus performant que son prédécesseur.

4.2.1 Auto-oscillation : déplacement et tensions générées

La mesure du déplacement du MMC et des tensions générées par les piézoélectriques a été effectuée pour les températures des sources froide et chaude de 16,4 °C et 51,5 °C respectivement. Ces températures correspondent à un $\Delta T = 35,1$ °C. La précontrainte de la poutre par rapport à sa position de repos est réglée à 0,07 mm.

Le capteur laser mesure un déplacement à proximité immédiate du MMC. En effet, le pointeur du laser est projeté sur la céramique piézoélectrique, Fig. 4.22.

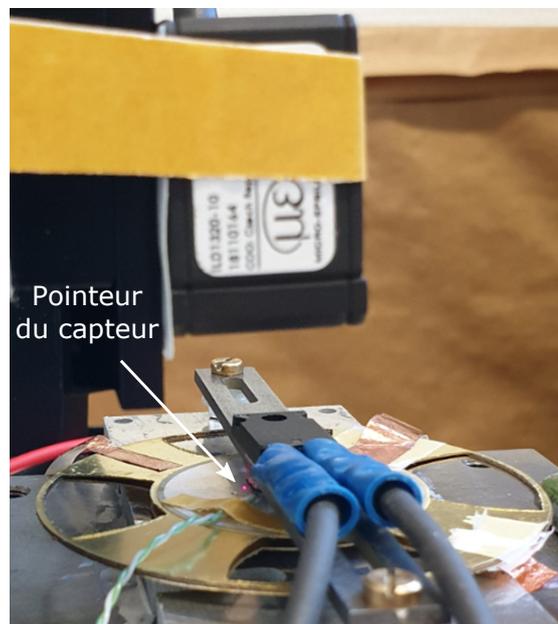


FIGURE 4.22 – La mesure de déplacement du MMC. Le pointeur du capteur de position (point rouge) est pointé sur la céramique piézoélectrique à proximité du MMC.

La mesure est présentée sur la Fig. 4.23, le MMC effectue un déplacement de 0,48 mm avec une fréquence de 0,41 Hz. Ce prototype montre une dynamique mécanique trois fois plus rapide que celle du premier prototype.

Durant l'étape 1 du cycle de fonctionnement le MMC se déplace de la source froide à la source chaude en 0,14 s, le MMC n'est pas ralenti comme dans le cas du premier prototype.

Durant les deux étapes 2 et 4, le MMC accuse un temps d'arrêt en contact avec les deux sources chaude et froide de 0,9 s et 1,37 s. Le transfert thermique avec les deux sources de chaleur s'est nettement amélioré par rapport au premier prototype.

Durant l'étape 3, le MMC se déplace de la source chaude à la source froide en 0,009 s.

Il est impressionnant de voir la progression du comportement mécanique du générateur quand on compare graphiquement le déplacement du MMC dans les deux versions de prototypes, Fig. 4.24.

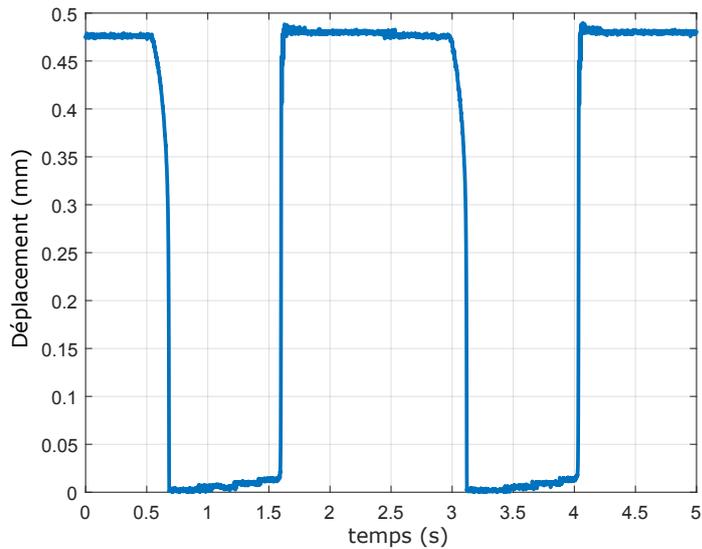


FIGURE 4.23 – Déplacement du MMC en fonction du temps. La fréquence de fonctionnement est de 0,41 Hz. La source chaude est à 0 mm et la source froide à 0,48 mm.

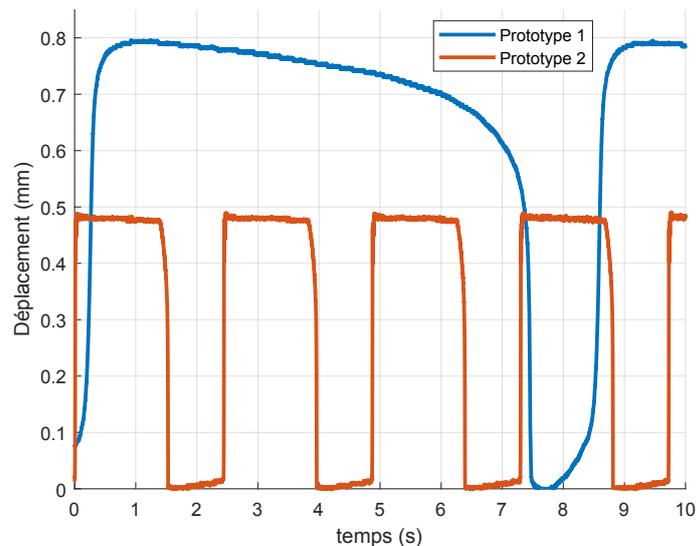


FIGURE 4.24 – Comparaison entre le déplacement mesuré dans le cas du prototype 2 (courbe rouge) avec celui du prototype 1 (courbe bleu). La source chaude à 0 mm.

La tension produite par les piézoélectriques a été mesurée de la même façon que pour le premier prototype. La plaque piézoélectrique inférieure ne produit presque pas de tension, des simulations montrent que les contraintes se concentrent plus particulièrement sur la céramique piézoélectrique supérieure. Donc uniquement la tension produite par le piézoélectrique supérieur sera présentée.

La valeur de la résistance de charge optimale a été déterminée expérimentalement (comme présenté dans le chapitre 3) à $10\text{ M}\Omega$. La figure 4.25 montre la tension générée

4.2. Étude d'un cycle de fonctionnement

par le piézoélectrique supérieur. La puissance électrique est de $4,2 \mu\text{W}$ ($240 \mu\text{W}/\text{cm}^3$) et correspond à une énergie par cycle de $10,6 \mu\text{J}$. Cette valeur de puissance est 35 fois plus grande que celle du premier prototype, l'amélioration est remarquable.

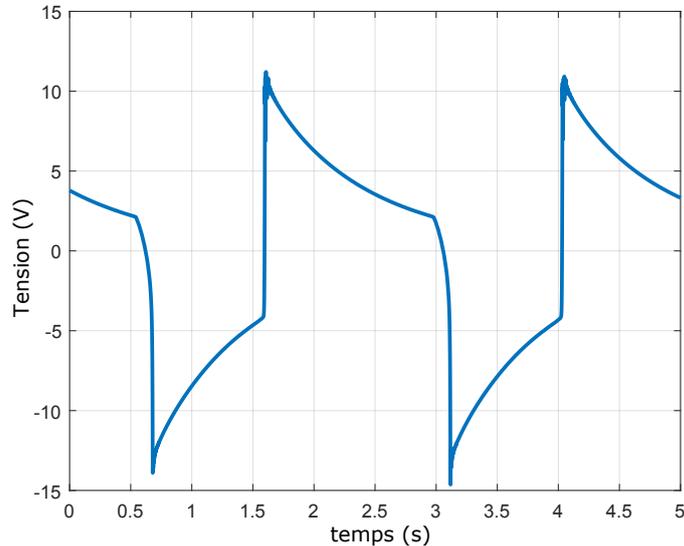


FIGURE 4.25 – La tension générée par la céramique piézoélectrique supérieure.

4.2.2 Modèle thermo-mécanique d'un cycle de fonctionnement

On a vu au chapitre 2 les équations qui décrivent les différentes étapes de fonctionnement du générateur et plus particulièrement du prototype 1 (les mêmes températures des sources de chaleur et déplacement total). Par ailleurs, on a vu dans le chapitre 3 que le déplacement du MMC est très lent et ne peut être considéré comme adiabatique, or l'adiabaticité durant les deux étapes 1 et 3 est une des conditions du modèle (voir chapitre 2). Donc le modèle du chapitre 2 ne décrit pas exactement le comportement du prototype 1 et ne peut être exploité correctement dans ce cas. Dans ce deuxième prototype le déplacement du MMC est très rapide et peut être considéré comme étant un déplacement adiabatique, une occasion pour nous de re-formuler le modèle de façon appropriée aux conditions de travail du prototype 2 (températures des sources de chaleur, déplacement total, etc.) et de comparer les résultats du modèle et ceux des mesures afin d'en tirer des conclusions. A travers ce modèle, le prototype 2 est comparé à un générateur parfait où on considère qu'il n'existe pas de forces supplémentaires, dues aux courants de Foucault ou autres. Les résultats sont représentés sous formes de courbes de déplacement en fonction du temps car c'est une représentation qui nous permet de visualiser les quatre étapes.

Les différentes équations ont déjà été présentées dans le chapitre 2 mais il est préférable de les rappeler ici. Pour les deux étapes 1 et 3 où le MMC est en déplacement, son comportement thermo-mécanique peut être modélisé par les deux équations, Eq. 4.1 et Eq. 4.2, qui suivent :

$$F_{mag}(x, T) - F_r(x) = ma_x(x) \quad (4.1)$$

Où :

m : La masse du MMC,

F_{mag} : La force magnétique appliquée sur le MMC.

F_r : La force de rappel de la poutre.

a_x : L'accélération du MMC selon l'axe de déplacement x .

T : La température du MMC.

x : La position du MMC.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\mu_0}{C_H} VT \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right) \frac{dH}{dx} v(t) \quad (4.2)$$

Où :

T : La température du MMC.

V : Le volume du MMC.

t : Le temps.

μ_0 : La perméabilité du vide.

C_H : La capacité thermique du MMC (J/K).

M : L'aimantation du MMC.

H : Le champ magnétique appliqué.

x : La position du MMC.

v : La vitesse du MMC.

Pour les deux étapes 2 et 4, où le MMC est en contact avec l'une des sources de chaleur, le comportement thermique du MMC est :

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{K}{C_H} (T - T_{finale}) \quad (4.3)$$

Où :

$K = k_{air} \frac{s}{l}$: La conductance thermique.

k_{air} : La conductance thermique de l'air.

s : La surface du MMC.

l : La distance entre le MMC et la source de chaleur quand ces deux sont en contact.

T_{finale} : La valeur finale de la température, dans notre cas est la température de commutation.

Le paramètre l , qui est la distance entre le MMC et la source de chaleur quand il y a contact, est un paramètre important car il nous donne une bonne idée sur la qualité du transfert thermique durant les deux étapes 2 et 4. Dans le chapitre précédent ce paramètre a été estimé par une étude du relief de la structure d'Halbach à $32,2 \mu\text{m}$, dans ce qui suit on va le retrouver en utilisant le modèle thermo-mécanique.

Afin de résoudre le système d'équations, les températures de commutation (températures pour lesquelles la force totale change de signe) doivent être déterminées. La figure 4.26 montre qu'en contact avec la source froide, la force magnétique devient supérieure à la force de rappel de la poutre à la température de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ (A). En contact avec la source chaude, la force de rappel dépasse la force magnétique pour une température de $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Ces deux températures correspondent aux températures de commutation ou de transition mécanique.

4.2. Étude d'un cycle de fonctionnement

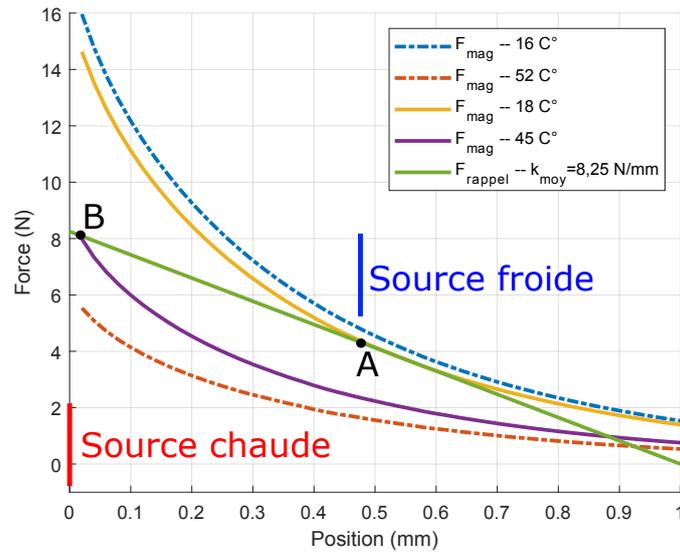


FIGURE 4.26 – Les forces magnétiques aux températures des sources chaude et froide 52 et 16 °C et la force de rappel de la poutre en fonction de la position du MMC. A partir du point A F_{mag} à 18 °C $>$ F_r , à partir du point B $F_r > F_{mag}$ à 45 °C.

Avec les températures de commutation et après résolution du système d'équations sous Matlab, on trace le déplacement du MMC sur un cycle (voir courbe bleu Fig. 4.27). Dans la même figure on trace aussi le déplacement mesuré du MMC (courbe rouge).

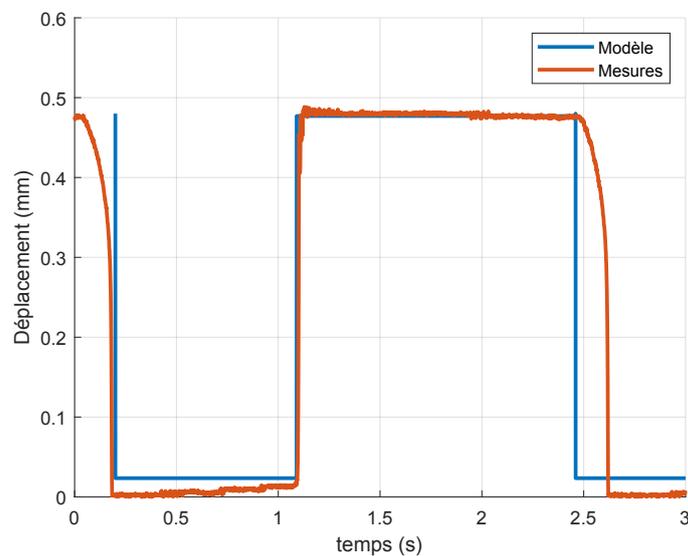


FIGURE 4.27 – Déplacement mesuré et simulé. Les étapes 2 (contact avec la source chaude) et 4 (contact avec la source froide) se confondent pour des valeurs de l de 18 μm et 21 μm respectivement. La source froide à 0,48 mm et la source chaude à 0 mm.

Pour déterminer la valeur de l pour les deux sources, on fait varier sa valeur jusqu'à ce que les temps d'échange thermique soient les mêmes que dans la mesure (courbe de

déplacement). Pour l'étape 2 les résultats du modèle se confondent avec ceux des mesures pour $l = 18 \mu\text{m}$, pour l'étape 4, $l = 21 \mu\text{m}$. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs annoncées dans le précédent chapitre, le contact thermique a donc été amélioré.

Les résultats du modèle pour l'étape 3 (MMC se déplace vers la source froide) collent parfaitement avec les résultats de mesures, ce qui veut dire qu'aucune force supplémentaire n'intervient durant cette étape de fonctionnement du prototype. Cependant, durant l'étape 1 les mesures montrent un léger ralentissement par rapport au modèle, ce qui ne peut être expliqué que par la prise en compte de forces supplémentaires. Ce ralentissement est semblable à celui constaté dans le chapitre 3, mais il est moins important. On traitera les forces impliquées durant cette étape en détail dans le prochain point.

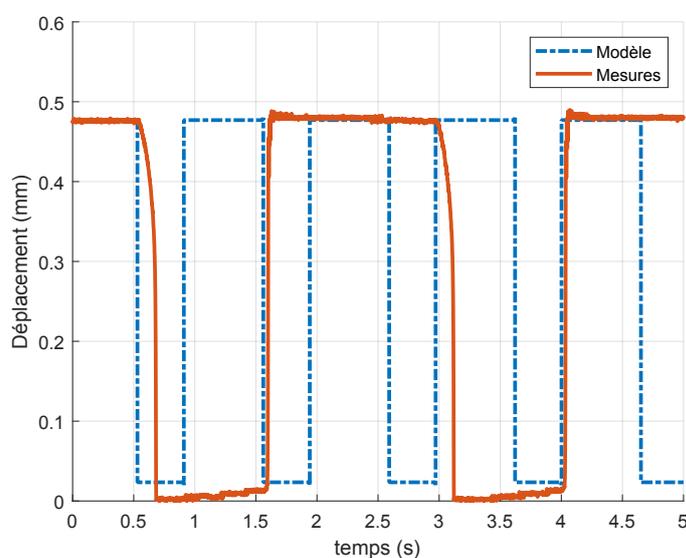


FIGURE 4.28 – Déplacement mesuré et celui issu du modèle pour $l = 8 \mu\text{m}$. Les résultats montre qu'on pourrait avoir une fréquence de 1 Hz en diminuant l .

La fréquence de fonctionnement est largement dominée par les temps d'échange thermique avec les deux sources de chaleur et améliorer cet échange peut nous permettre d'augmenter la fréquence de fonctionnement et donc la puissance électrique à la sortie. Une des façons d'améliorer cet échange thermique est de diminuer la valeur de l . En effet, pour $l = 8 \mu\text{m}$ on estime une fréquence de fonctionnement de 1 Hz, plus de deux fois celle mesurée (0,41 Hz) (voir Fig. 4.28).

Le résultat à retenir ici est qu'avec le prototype 2 on est arrivé à obtenir un générateur avec le fonctionnement souhaité, à savoir, deux étapes statiques où le MMC échange de la chaleur et deux étapes adiabatiques où le MMC se déplace rapidement.

4.2.3 Étude du comportement mécanique sur un cycle dans la plan F-x

L'étude du cycle mécanique du prototype 1 (dans le plan force/déplacement) a été particulièrement utile pour identifier les forces en jeu dans le système. En reproduisant

4.2. Étude d'un cycle de fonctionnement

cette approche sur le deuxième prototype nous allons voir que les forces appliquées sont plus importantes, ce qui permet en partie d'avoir de meilleures performances aussi bien du côté mécanique qu'électrique.

La figure 4.29 montre le cycle de fonctionnement théorique dans le plan force/déplacement ($F-x$). On y retrouve les forces magnétiques simulées (Ansys) à 18 °C (courbe bleu, étape1) et à 45 °C (courbe rouge, étape 3) et la force de rappel mesurée de la poutre (courbe verte). Le point A (0,48 mm, 18 °C) est le point de commutation (point à partir duquel la force magnétique surmonte la force de rappel). Le point B (0 mm, 45 °C), quant à lui, est le deuxième point de commutation (point à partir duquel la force magnétique est dépassée par la force de rappel de la poutre). Les deux sources chaude et froide sont positionnées à 0 mm et 0,48 mm respectivement. L'énergie du cycle magnétique théorique est représentée par l'aire coloriée entre les deux courbes rouge et bleu et elle est estimée à 1,7 mJ.

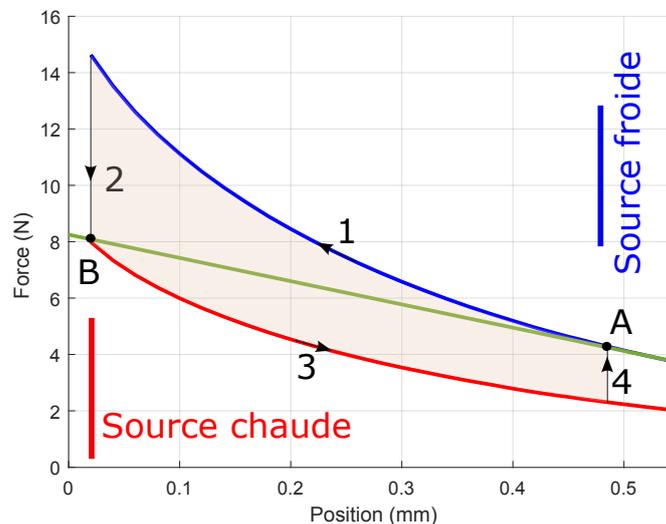


FIGURE 4.29 – Le cycle théorique, aire coloriée entre les courbes des forces simulées (Éléments finis 3D) à 18 et 45 °C (courbe rouge (1) et la courbe bleu (3)), la courbe verte est la force de rappel de la poutre. Les 4 étapes de fonctionnement sont représentées. la source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0.48 mm. A et B sont les points où le MMC s'éloigne des sources de chaleurs (points de commutation)

Le cycle avec ses différentes étapes peut-être également représenté avec la courbe de déplacement en fonction du temps dans la Fig. 4.30. L'étape 1 est représentée en bleu tandis que l'étape 3 est tracée en rouge. La vitesse du MMC (Fig. 4.31) pour les deux étapes 1 et 3 est issue de la dérivée du déplacement, étape1 (partie bleu) et étape 3 (partie rouge) de la Fig. 4.30. Ces résultats montrent que c'est surtout durant l'étape 3 qu'on enregistre une augmentation remarquable de la vitesse par rapport au premier prototype. En effet, la vitesse maximale ici est de 108 mm/s (point b1), plus de 20 fois la vitesse maximale durant la même étape dans le cas du premier prototype (5 mm/s). Dans l'étape 1 la vitesse maximale pour ce nouveau prototype (48 mm/s, point a1) reste supérieure à celle enregistrée pour le premier prototype (28 mm/s), presque un rapport de deux, mais

l'amélioration n'est pas aussi "délirante" que dans l'étape 3.

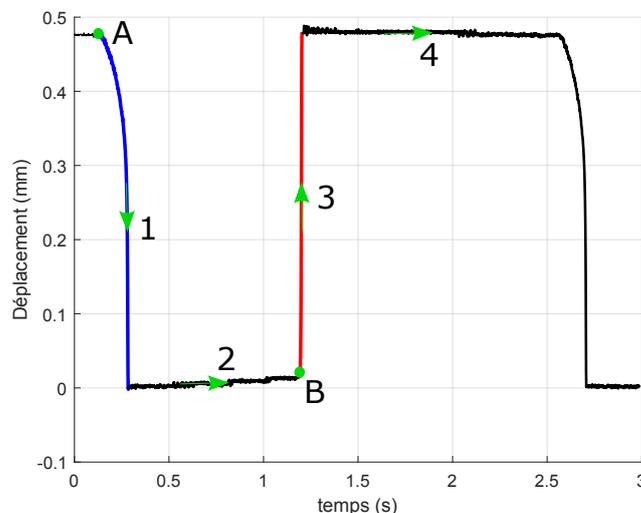


FIGURE 4.30 – Déplacement mesuré. La source chaude est à 0 mm et la source froide est à 0,48 mm. Les points A et B correspondent à la commutation (MMC s'éloigne des sources de chaleur).

L'analyse de la vitesse nous donne déjà de précieuses informations, mais il reste important de déterminer le cycle réel de fonctionnement dans le plan F-x et de bien l'analyser. Ce cycle (F-x) est retrouvé à partir de la deuxième loi de Newton où l'accélération du MMC durant les deux étapes 1 et 3 est déterminée en dérivant la vitesse de ce dernier. Cependant, comme on ne connaît pas l'accélération à chaque point de la poutre, on doit calculer la masse équivalente de l'ensemble (poutre+MMC) qui peut être utilisée avec l'accélération du MMC. La détermination de cette masse équivalente se fait à travers des calculs en éléments finis sous Ansys de la même manière que dans le chapitre 3. La déformation au niveau de divers points de la poutre est déterminé en fonction du déplacement du MMC, ceci nous permet de calculer l'énergie cinétique de chaque élément de la poutre, on en déduit ainsi la masse équivalente du système. Cette masse est $m_{e2} = m_{MMC} + \frac{1}{1,85}m_{poutre}$ (où m_{MMC} et m_{poutre} sont respectivement les masses du matériau et de la poutre).

La Fig. 4.32 montre la force totale $F_{mag} - F_{rappel}$ appliquée sur la partie mobile du générateur (poutre et MMC) en fonction du déplacement du MMC durant les deux étapes 1 et 3. Durant l'étape 1, la force totale est de l'ordre de 10^{-1} N alors que dans la Fig. 4.29 la force magnétique est de l'ordre de 10 N. Durant l'étape 3, on enregistre aussi une force totale de l'ordre de 10^{-1} N alors que dans la Fig. 4.29 la force magnétique est de l'ordre de 1 N. Les forces extrapolées des mesures restent faibles par rapport à celles théoriques, néanmoins, nous avons gagné deux ordres de grandeur durant l'étape 1 et quatre ordres de grandeur durant l'étape 3 par rapport au premier générateur. La force totale appliquée sur la partie mobile est nettement améliorée dans ce deuxième prototype.

Comme dans le chapitre 3, on va discuter en détail les quatre sections des deux étapes 1 et 3 (courbes bleu et rouge) en utilisant les Fig. 4.30, 4.31 et 4.32. Pour l'étape 1 :

- (I) de 0,48 mm à 0,3 mm : le MMC commence à s'éloigner de la source froide lentement, sa vitesse augmente doucement pour atteindre une vitesse de 6 mm/s

4.2. Étude d'un cycle de fonctionnement

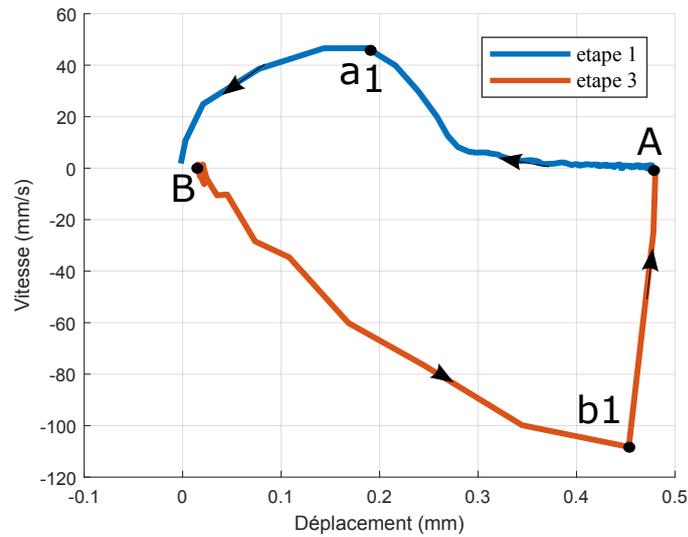


FIGURE 4.31 – La vitesse du MMC en fonction de son déplacement. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement. La source chaude est à 0 mm.

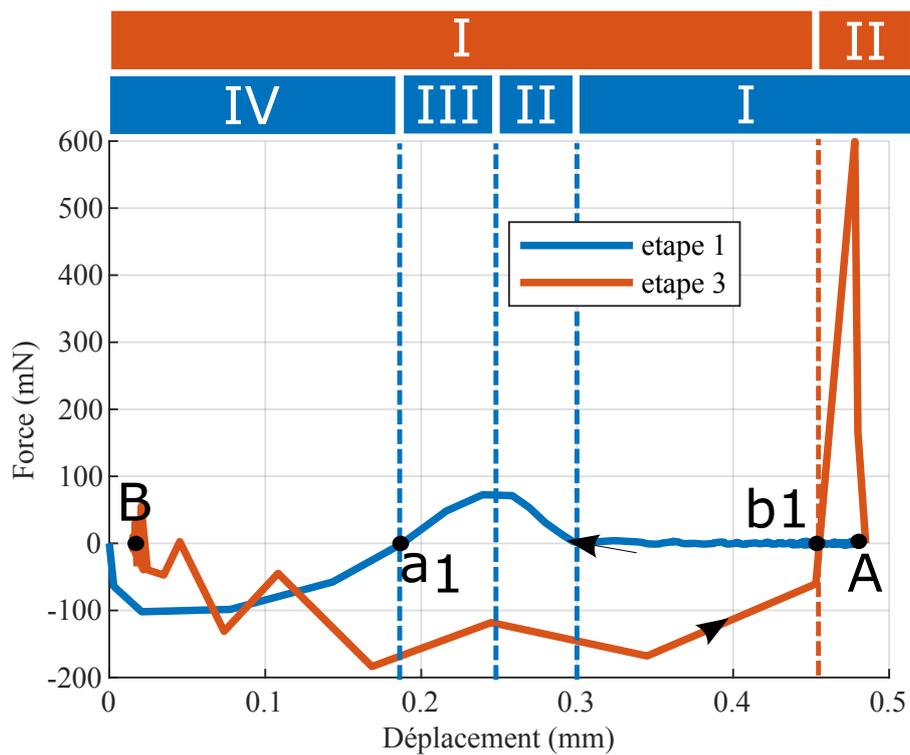


FIGURE 4.32 – La force totale appliquée sur la partie mobile, extrapolée de sa masse et de la mesure de déplacement, en fonction de la position du MMC pour les étapes 1 (courbe bleu) et 3 (courbe rouge). La source chaude est à 0 mm.

avec des forces totales appliquées autour de 5 mN. Ce léger ralentissement est dû au réglage des forces magnétique et celle de rappel à partir du point A : la force de rappel étant tangente à la force magnétique dans cette région, on peut

facilement basculer d'un point instable à un point d'équilibre stable ralentissant la progression du MMC sans totalement l'arrêter. Le MMC passe par une famille de points stables, ceci peut-être expliqué soit par une modification de la raideur de la poutre à force de la manipuler, soit par le fait que les forces magnétiques réelles au point A ne sont pas égales à celles simulées. Cette étape dure environ 0.1 s contre un peu plus de 5 s pour le premier prototype.

- (II) de 0,3 mm à 0,25 mm : de la Fig. 4.32 on peut voir que la force totale augmente fortement pour atteindre un maximum d'environ 80 mN. Ce maximum correspond à un point d'inflexion dans la courbe de déplacement à 0,25 mm (voir Fig. 4.30). Cette phase est la phase d'instabilité mécanique où le MMC avance rapidement vers la source chaude.
- (III) de 0,25 mm à 0,19 mm : dans cette zone la vitesse du MMC augmente toujours mais la force totale qui est directement liée à son accélération se réduit. La force totale s'annule en a_1 (voir Fig. 4.32) lorsque la vitesse atteint son maximum de 46,6 mm/s (voir Fig. 4.31). Comme expliqué dans le chapitre 3, lorsque la distance entre le MMC et la source de champ se réduit, la force visqueuse de l'air et / ou des courants de Foucault dans le MMC provoque l'inversion de la force totale (point a_1 sur la Fig. 4.31 et 4.32).
- (IV) de 0,19 mm jusqu'au contact avec la source chaude : la force totale devient négative à partir du point a_1 , Fig. 4.32. Comme dans le chapitre 3, cette inversion de la force est probablement due à une réaction visqueuse de l'air et/ou des courants de Foucault.

Contrairement à l'étape 1, l'étape 3 ne montre pas le même comportement que celui constaté dans le chapitre précédent, on ne peut donc pas faire une analyse similaire. En effet, cette étape peut être divisée en deux parties :

- (I) de 0 mm à 0,46 mm : Le MMC avance rapidement vers la source froide, sans passer par des point d'équilibre stables et sans l'inversion de la force totale. On enregistre une vitesse maximale de 108 mm/s au point b_1 (voir Fig. 4.31)
- (II) de 0,46 mm : la vitesse se réduit très rapidement et la force totale s'inverse avec la présence d'un pic et s'annule juste après. Ce comportement correspond au contact du MMC avec la source froide.

Cette étape s'effectue parfaitement, d'ailleurs on a vu dans le point précédent que les courbe de déplacement mesurée et issue du modèle se confondent. C'est le comportement mécanique recherché.

En comparaison avec le prototype 1, ici les forces totales et les vitesses enregistrées sont plus importantes, ceci a largement contribué à améliorer la puissance électrique en sortie. Les deux étapes 1 et 3 présentaient le même comportement dans le précédent prototype, contrairement à ce nouveau générateur où on a vu que l'étape 3 se déroulait comme souhaité alors que l'étape 1 présente toujours des effets liés à la présence de points stables et de forces qui inversent la force totale et ralentit le MMC avant d'atteindre la source chaude.

4.3 Effets de ΔT et x_0 sur le comportement du générateur

Le deuxième prototype est plus performant du point de vue mécanique et électrique. En effet, il montre une fréquence et une puissance plus importantes que le premier prototype. Cependant, on a vu sur le premier prototype que certains paramètres pouvaient altérer les performances du générateur. Les paramètres étudiés sont la température du réservoir et les conditions aux limites. Ce nouveau prototype est réalisé de façon à éviter les problèmes liés aux conditions aux limites, donc leurs effets ne seront pas pris en compte dans cette étude. En plus de la température du réservoir, on s'intéresse ici à l'effet de la précontrainte de la poutre x_0 par rapport à sa position au repos.

4.3.1 Variation de ΔT

Dans cette section nous présenterons l'effet de la température des sources de chaleur (ΔT) sur le comportement du générateur. Dans le chapitre précédent, on a vu que le premier prototype s'arrête d'auto-osciller au-bout d'une variation de température $\Delta T = 3$ °C, Cette étude va nous permettre de savoir si ce nouveau prototype peut tolérer une variation de température plus importante.

Dans ce qui suit la température de la source chaude est à 51,5 °C tandis que la température de la source froide varie de 19,5 à 11,1 °C. Ces mesures ont été effectuées pour une précontrainte $x_0=0,15$ mm.

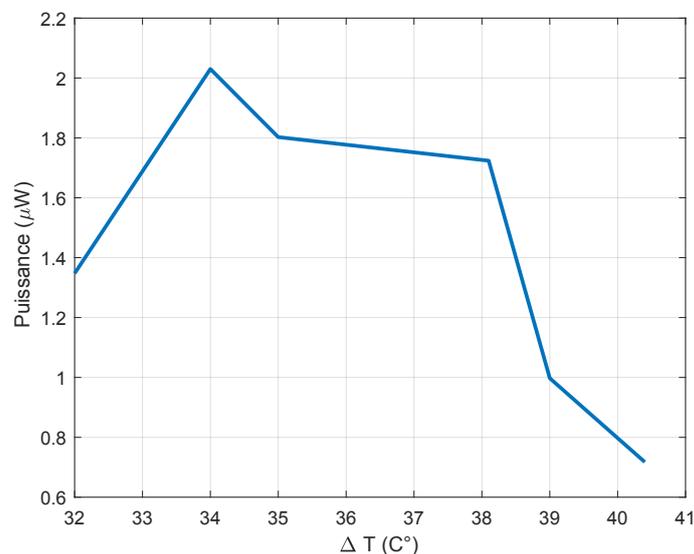


FIGURE 4.33 – La puissance électrique en fonction de ΔT . Le maximum de puissance est de 2 μW pour $\Delta T=34$ °C.

Pour chaque ΔT la puissance du générateur est mesurée. Les résultats de mesures sont présentés dans la Fig. 4.33. On constate que ce prototype maintient son auto-oscillation pour une variation de ΔT de 8 °C contre environ 3 °C pour le premier prototype. C'est

déjà un résultat important. La courbe de la puissance a presque la même allure que celle du premier prototype avec un maximum de puissance de $2 \mu\text{W}$ pour $\Delta T = 34 \text{ }^\circ\text{C}$. La différence est qu'ici la variation de température est de $8 \text{ }^\circ\text{C}$ et pas de $3 \text{ }^\circ\text{C}$ comme dans le cas du premier prototype.

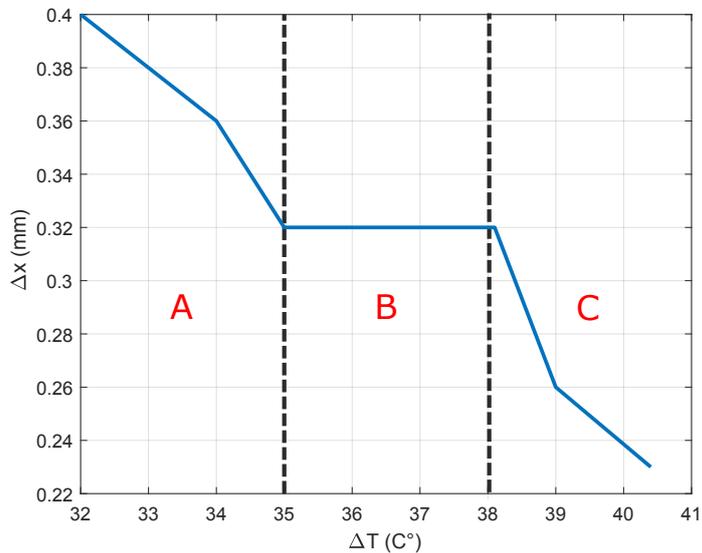


FIGURE 4.34 – Le déplacement total du MMC en fonction de ΔT . La valeur de la précontrainte $x_0 = 0,15 \text{ mm}$. Le déplacement total prend son origine à la source chaude, pour $\Delta x = 0 \text{ mm}$ le MMC reste collé à la source chaude. La source froide est à $0,4 \text{ mm}$.

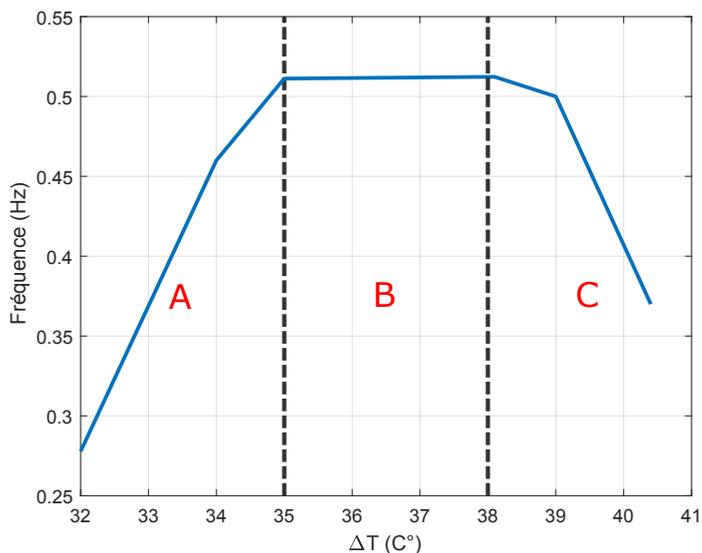


FIGURE 4.35 – La fréquence de fonctionnement du MMC en fonction de ΔT . La valeur de la précontrainte $x_0 = 0,15 \text{ mm}$.

Les figures 4.34 et 4.35 montrent, respectivement, le déplacement total du MMC et la fréquence de fonctionnement. Selon ΔT ces résultats peuvent être analysés comme suit :

4.3. Effets de ΔT et x_0 sur le comportement du générateur

- (A) de 32 °C à 35 °C : dans cette zone le comportement de ce nouveau générateur est semblable à celui du premier prototype : quand ΔT augmente, le déplacement total (Δx) diminue à l'inverse de la fréquence qui, elle, augmente. La puissance atteint son maximum dans cette zone et entame sa diminution.
- (B) de 35 °C à 38 °C : les valeurs de la fréquence et de Δx restent fixes tandis que la puissance poursuit diminution.
- (C) de 38 °C à 40,4 °C : pour cette plage, on constate une diminution simultanée de la fréquence et de Δx . Pour une température de source froide inférieure à 11,1 °C ($\Delta T > 40,4$ °C le MMC arrête d'osciller.

Ce comportement peut être expliqué comme suit : En (A) on a le déplacement total (Δx) qui est affecté par la variation de ΔT : le MMC se refroidit à travers l'air avant même d'atteindre la source froide, en conséquence la fréquence augmente en réponse à la variation de (Δx). En (B) la température n'a pas l'air d'affecter le système, on peut, aussi, voir que la puissance ne varie que légèrement, ici le MMC se refroidit toujours à la même distance de la source chaude et acquiert une fréquence maximale de 0,52 Hz. Cette phase est la phase qui présente le meilleur comportement mécanique. En (C) (Δx) continue sa diminution ce qui induit un équilibre thermique, ça veut dire que le MMC est de moins en moins affecté par la différence de température, même si le ΔT mesuré au niveau des sources augmente, ce qui fait chuter sa fréquence. L'équilibre thermique est causé par l'air qui devient plus chaud du côté de la source chaude. Le MMC s'arrête d'osciller pour un ΔT mesuré de 41 °C.

A retenir : ce nouveau générateur est sensible à la variation de la température mais il est difficile de dire s'il est plus performant sur ce point que le premier prototype. Toutefois, il tolère une variation de température de 8 °C pour une distance entre les deux sources de chaleur de 0,4 mm et sur ce point il est bien mieux que le premier prototype. Comme dans le précédent chapitre, dans ce point on ne s'est pas penché sur le rôle que joue le MMC (T_C , C_H , etc.) lors de la variation de la température de la source de chaleur. Pour bien comprendre le fonctionnement de ce générateur il est indispensable dans un prochaine prototype d'aller mesurer d'autres grandeurs, en particulier, la température du matériau sur les deux faces.

Nous restons assez surpris de la manière dont la variation de température affecte le comportement du système. On est loin du cas simple, où lorsque l'on augmente l'écart de température la flux thermique augmente et donc la fréquence d'oscillation augmente aussi. A ce jour nous ne comprenons pas ces différentes phases de fonctionnement, nous essayons néanmoins de donner des pistes sur ce qui pourrait se passer au sein du générateur.

4.3.2 Variation de x_0

On a vu dans le chapitre précédent l'importance du contact entre la source froide et le MMC et les conséquences liés à la perte de ce contact. La précontrainte de la poutre permet d'assurer ce bon contact, elle se contrôle en modifiant la position initiale du MMC en vissant ou en dévissant la vis de refroidissement. Au repos, la poutre n'applique aucune force de rappel sur la source froide (voir Fig. 4.36), par contre avec une précontrainte de x_0 la poutre applique une force kx_0 sur la source froide 'la vis' à sa position initiale (voir

Fig. 4.36) assurant ainsi le contact.

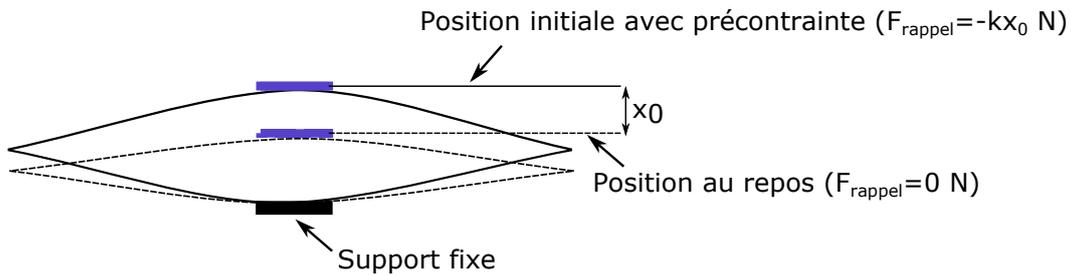


FIGURE 4.36 – Schéma de principe de la précontrainte de la poutre. Sans précontrainte (au repos) la poutre n’applique aucune force sur la vis, avec une précontrainte x_0 la poutre applique une force kx_0 sur la poutre à la position initiale, assurant le contact.

La précontrainte nous permet d’améliorer le contact thermique entre le MMC et la source froide mais modifie par la même occasion le gap entre les deux sources de chaleur car elle modifie la position de la source froide. On veut dans cette partie étudier l’effet de la précontrainte sur le comportement du générateur, on s’intéressera aussi à ce comportement dans le cas de la perte de contact.

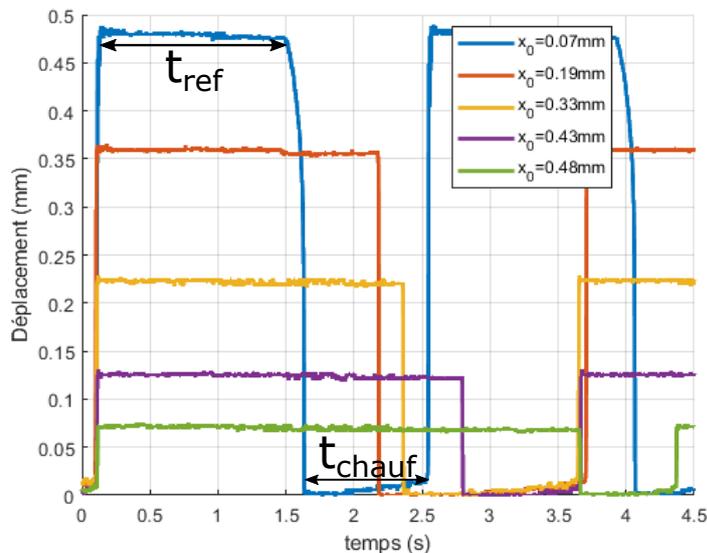


FIGURE 4.37 – Déplacement du MMC en fonction du temps pour différentes valeurs de précontraintes ' x_0 ' 0,07, 0,19, 0,33, 0,43 et 0,48 mm. Pour $x_0 > 0$ la source froide se rapproche de la source chaude. Les temps d’échange thermique avec les sources froide et chaude t_{ref} et t_{chauf} , respectivement, sont définis comme étant le temps durant lequel le MMC est en contact avec la source froide et chaude, respectivement. La position de la source froide à 0 mm.

On mesure le déplacement du MMC pour différentes valeurs de x_0 (0,07, 0,19, 0,33, 0,43 et 0,48 mm). Ces mesures ont été faites pour une température de la source froide de 16,4 °C et une température de la source chaude de 51,5 °C. La valeur de la précontrainte

4.3. Effets de ΔT et x_0 sur le comportement du générateur

(x_0) est modifiée sans mettre à l'arrêt le générateur ce qui garantit les mêmes conditions de fonctionnement pour toutes les mesures. Les résultats sont présentés dans la Fig. 4.37, le déplacement total pour les différents x_0 n'est pas le même du moment où le gap entre les deux sources de chaleur change, c'est tout à fait normal. Les temps d'échange thermique avec la source froide (t_{ref}) et la source chaude (t_{chauf}) varient (le temps que met le MMC en contact avec la source froide et chaude respectivement). Ces temps sont tracés en fonction de x_0 dans la Fig. 4.38. Le temps d'échange thermique avec la source froide augmente en fonction de x_0 , initialement on s'attendait à ce qu'une augmentation de la force de contact (augmentation de x_0) réduise le temps d'échange, cette augmentation est probablement due à une mauvaise isolation thermique entre les deux sources de chaleurs. Une fois de plus, nous sommes dans l'obligation d'introduire l'air pour justifier ce fonctionnement. En effet, plus les deux sources se rapprochent plus l'air entre elles se réchauffe, et à ce moment là le MMC a besoin de plus de temps en contact de la source froide pour évacuer la chaleur.

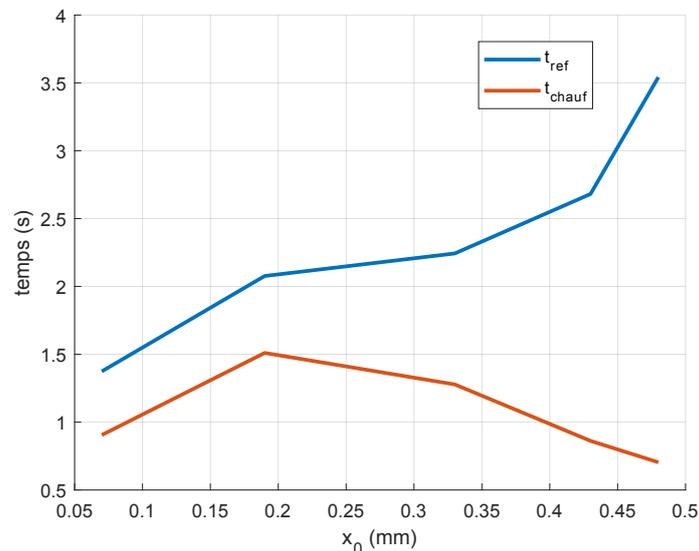


FIGURE 4.38 – Les temps de refroidissement et de chauffage : temps de contact du MMC avec la source froide et chaude, en fonction de x_0 .

Le temps d'échange thermique avec la source chaude présente un comportement différent, il augmente dans un premier temps puis diminue. L'explication de l'augmentation de ce temps se trouve dans la Fig. 4.37. En effet, la courbe de déplacement pour $x_0=0,07$ mm (voir courbe bleu Fig. 4.37) présente un léger ralentissement durant l'étape 1 (déplacement du MMC de la source froide à la source chaude), durant ce ralentissement, due à une famille de points stables, le MMC échange de la chaleur avec l'air et prend donc moins de temps en contact avec la source chaude. Cependant, pour $x_0=0,19$ mm le ralentissement disparaît, le MMC échange toujours avec l'air durant son déplacement mais de façon moins efficace que s'il y avait le ralentissement, c'est pour cela qu'il prend plus de temps en contact de la source chaude que dans le cas de $x_0=0,07$ mm. A partir de $x_0=0,19$ mm ce ralentissement disparaît (voir Fig. 4.37) mais comme le gap entre

les deux sources de chaleur se rétrécit, l'air environnant devient plus chaud et le MMC à tendance à échanger plus de chaleur avec l'air avant d'atteindre la source chaude, en conséquence le temps en contact avec la source chaude se voit diminuer.

Le temps que met le MMC pour aller et venir d'une source à une autre sans tenir en compte l'échange thermique est tracé dans la Fig. 4.39 pour tous les x_0 (0,07, 0,19, 0,33, 0,43 et 0,48 mm). Le comportement constaté est tout à fait celui attendu : le temps de déplacement se réduit en augmentant x_0 .

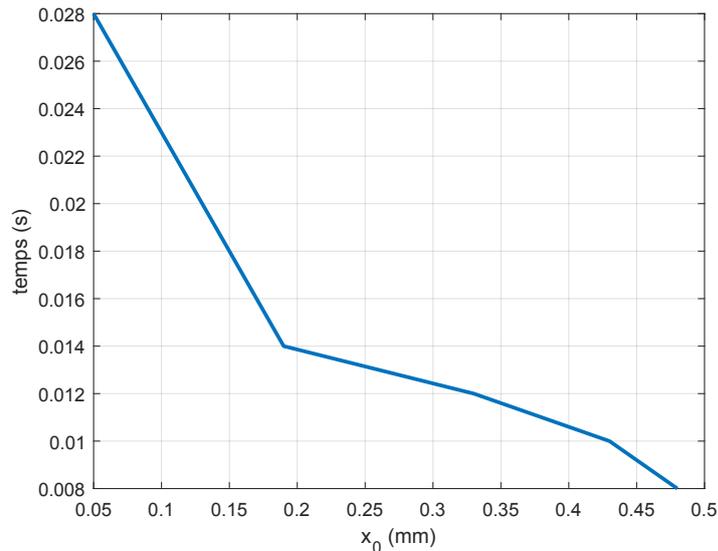


FIGURE 4.39 – Le temps que met le MMC pour aller et venir d'une source à une autre sans la prise en compte du temps en contact avec les sources de chaleur.

A retenir :

- La précontrainte de la poutre est un paramètre à utiliser avec précaution, même s'il permet d'améliorer le contact thermique avec la source froide, il réduit la distance entre les deux sources de chaleurs et rend ainsi l'air plus chaud et l'échange thermique avec la source froide plus lent.

- Pour maximiser la puissance, il y a un compromis entre augmenter le déplacement (cycle plus grand) et obtenir un générateur sans ralentissement (fréquence de fonctionnement). En effet, la puissance maximale ($4,2 \mu\text{W}$) a été enregistrée pour $x_0=0,07$ mm où le déplacement montre un léger ralentissement. Pour les autres valeurs de x_0 le ralentissement a bien disparu mais la puissance chute dramatiquement.

On s'intéresse maintenant au comportement du générateur lors de la perte de contact entre la source froide et le MMC. Lorsque cela arrive, x_0 prend des valeurs négatives et représente la distance qui sépare la source froide et le MMC au repos. Pour différentes valeurs de ce paramètre (-0,13 mm, -0,93 mm, -1,53 mm) on trace le déplacement mesuré du MMC en fonction du temps. Les résultats sont présentés sur la Fig. 4.40 où ils sont comparés au cas où le MMC se met en contact avec la source froide ($x_0=0,07$ mm). On constate la présence d'un ralentissement durant l'étape 1 du cycle de fonctionnement (source froide vers source chaude) pour tous les cas où le MMC perd contact avec la

4.3. Effets de ΔT et x_0 sur le comportement du générateur

source froide. Ce ralentissement est semblable à celui rencontré dans le prototype 1 et il est d'autant plus important quand la source froide s'éloigne d'avantage du MMC. En effet, en perdant le contact avec la source froide, le MMC échange de la chaleur avec l'air, cet échange prend plus de temps quand cette source est d'autant plus éloignée.

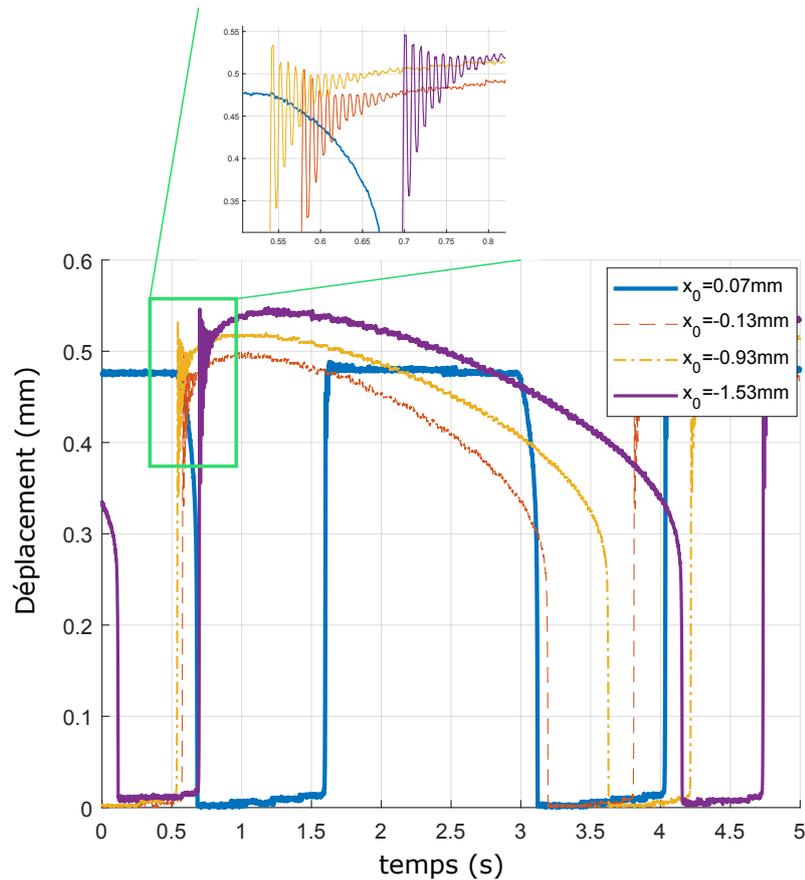


FIGURE 4.40 – Déplacement mesuré du MMC en fonction du temps pour différentes valeurs de x_0 , à savoir, 0,07 mm, -0,13 mm, -0,93 mm et -1,53 mm. Quand x_0 est négatif il ne représente plus la précontrainte mais la distance entre le MMC au repos et la source froide. Comme le MMC ne se met pas en contact avec la source froide on ne peut pas définir t_{ref} . La source chaude est à 0 mm.

Le déplacement du MMC, dans le cas où il ne se met pas en contact avec la source froide, montre l'existence de deux régimes différents, le premier ressemble à un régime transitoire et le dernier à un régime permanent. C'est assez impressionnant et il est difficile de trouver une explication. On représente dans le plan vitesse/déplacement le comportement du générateur pour $x_0 = -1,53$ mm, Fig. 4.41. On peut voir, durant la première étape un comportement identique à celui vu dans le premier prototype. Durant la troisième étape, les oscillations prennent une forme de spirale dans le diagramme vitesse/déplacement.

Lors de la perte de contact avec la source froide, le comportement du générateur est affecté mais continue d'auto-osciller, la Fig. 4.42 montre des valeurs de puissance et de fréquences acceptables même pour x_0 de -1,53 mm et continue d'auto-osciller même après avoir enlevé la vis de refroidissement. Le générateur est assez robuste ce qui est un résultat

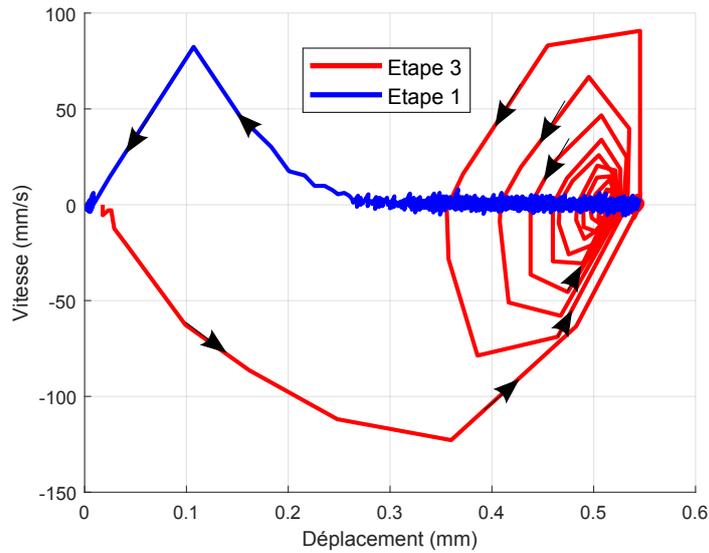


FIGURE 4.41 – Diagramme vitesse/déplacement pour $x_0 = -1,53$ mm. Dans l'étape trois, les oscillations prennent une forme de spirale dans ce diagramme. La vitesse est calculée en dérivant le déplacement.

important.

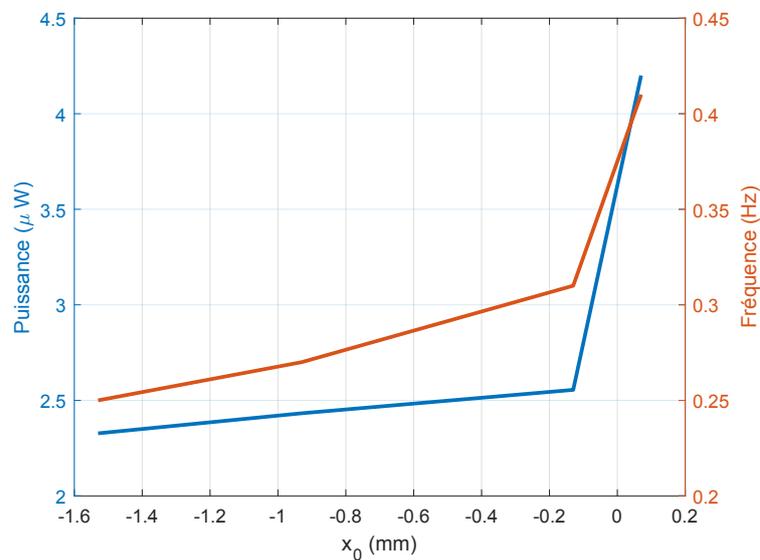


FIGURE 4.42 – La puissance et la fréquence du générateur en fonction de x_0 .

De l'analyse de l'effet de x_0 sur le comportement du système, nous retiendrons :

- La perte de contact avec la source froide ralentit considérablement la dynamique du générateur.
- La perte de contact provoque l'apparition d'un régime transitoire dont les raisons sont difficiles à expliquer.

4.4. Conclusions

- Le générateur préserve son auto-oscillation lorsqu'on éloigne la source froide du MMC et même lorsqu'on enlève la vis de refroidissement (il n'y a plus de source froide).

4.4 Conclusions

Dans ce chapitre on présente la deuxième version du prototype. Le choix de l'architecture et son dimensionnement ont été discutés. Plusieurs formes de la poutre ont été étudiées et celle qui a donné les meilleurs résultats est une poutre sous la forme d'une croix pattée. La poutre, composée de deux buzzers piézoélectriques, a été réalisée puis caractérisée afin de déterminer sa caractéristique Force-Déplacement. Cette caractéristique nous permet de vérifier si la poutre respecte les conditions d'auto-oscillation avant d'aller plus loin. Lors de la découpe des buzzers, on a préféré ne pas centrer les céramiques piézoélectriques par rapport à la partie en laiton pour éviter les problèmes qui peuvent être liés à ça. Le MMC est refroidie via un contact direct avec une vis qui, à son tour, est refroidit par le biais d'un échangeur à eau. Ce système de refroidissement nous permet de changer la précontrainte de la poutre ainsi que le gap entre les deux sources froide et chaude. Pour la source chaude, on a utilisé la même source chaude présentée dans le chapitre 3, elle est composée d'une source de champ sous forme d'une structure d'Halbach, d'une barre métallique, et d'une résistance chauffante.

Le nouveau prototype auto-oscille comme souhaité, le MMC se met à bouger dès la présence d'une certaine différence de température. Les mesures de déplacement du MMC ainsi que des tensions produites par les piézoélectriques ont été effectuées en utilisant le banc de test précédemment présenté dans le chapitre 3. La mesure de déplacement montre que la fréquence de fonctionnement est de 0,41 Hz et que le ralentissement constaté dans le premier prototype a presque disparu, on passe d'un ralentissement de 5 s à un ralentissement de 0,1 s pour ce nouveau générateur. La mesure de la tension montre que la puissance électrique en sortie est de $4,2 \mu\text{W}$ ($240 \mu\text{W}/\text{cm}^3$), cette puissance correspond à une énergie de $10,6 \mu\text{J}$. Bien que la puissance délivrée soit plus importante, elle reste encore loin de l'énergie que nous pensons disponible. Comme dans le premier prototype, nous pensons que la quantité de piézoélectriques disponible reste insuffisantes. Par ailleurs, Grâce à cette nouvelle structure de ressort, le nouveau prototype est moins sensible à l'assemblage, et le système est en mesure d'éviter un point de fonctionnement stable entre les deux réservoirs (deux problématiques soulevées dans le chapitre 3). Finalement, les buzzers piézoélectriques nous ont permis à moindre coût d'obtenir une structure fonctionnelle, néanmoins dans ces structures nous n'avons pas le choix du positionnement des céramiques, il faudrait peut être placer plus judicieusement la céramique.

Le cycle de fonctionnement est modélisé à l'aide du modèle thermo-mécanique présenté dans le chapitre 2. Ce modèle montre que la courbe du déplacement mesurée se confond avec celle du modèle pour toutes les étapes sauf l'étape 1 où le ralentissement n'a pas pu être modélisé correctement. Le paramètre l , qui correspond au vide entre le MMC et une source de chaleur quand il sont en contact, a été déterminé pour les deux sources froides, il est de $18 \mu\text{m}$ pour la source chaude et de $21 \mu\text{m}$ pour la source froide. En réduisant la valeur de ce paramètre on arrive à améliorer le contact thermique et ainsi avoir un système qui peut atteindre une fréquence de 1 Hz pour $l=8 \mu\text{m}$.

L'étude du cycle de fonctionnement a été faite dans le plan F-x. Cette étude montre que la vitesse du MMC ainsi que les forces qui lui sont appliquées sont plus importantes que dans le premier prototype. L'amélioration des performances du générateurs (fréquence et puissance électrique) est directement liée à l'amélioration de ces deux paramètres (vitesse et force). Pour l'étape 1, on constate le même comportement de la force totale que dans le premier prototype. Ce comportement suggère l'existence de forces supplémentaire qui inversent la force totale, ces forces peuvent être dues à la réaction visqueuse de l'air ou aux courants de Foucault. Dans l'étape 3, le comportement du MMC est celui attendu, en effet, la seule force qui le ralentit est celle liée au choque avec la source froide.

On a vu que ce nouveau prototype est amélioré sur plusieurs plan, restait à vérifier son comportement envers la variation de la température de la source de chaleur et à la variation de x_0 . La variation de la température de la source froide affecte les performances du générateur, néanmoins, il reste en auto-oscillation pour une plage de température plus importante que son prédécesseur (8 °C au-lieu de 2 °C). La réponse du système à des variations de ΔT sont encore mal comprises et ne sont pas modélisées, pourtant on s'attend à ce qu'un dispositif comme le notre démarre au-delà d'une certaine température et qu'il puisse fonctionner sur une plage de température relativement large (20 °C).

L'effet de la variation de x_0 sur le générateur a été étudié, en rapprochant la source froide vers la source chaude ($x_0 > 0$), on modifie la précontrainte de la poutre ce qui impacte le temps que met le MMC en contact avec les sources de chaleur. Une certaine variation fait chuter la puissance électrique en sortie de façon drastique, c'est pour cela qu'il faut utiliser ce paramètre avec précautions. Lorsque, au contraire, on éloigne la source froide de la source chaude, le MMC perd le contact avec la source froide ce qui perturbe énormément le fonctionnement du MMC. En effet, on voit l'apparition d'un ralentissement proche de celui constaté dans le cas du premier prototype. Dans ce cas la courbe de déplacement du MMC montre deux régimes de fonctionnement du MMC lorsqu'il se déplace vers la source froide, le premier est proche d'un régime oscillatoire (transitoire) et le deuxième d'un régime permanent, il est difficile d'expliquer exactement ce qui se passe au niveau du générateur. L'effet de x_0 avec des comportements assez inattendus montre qu'il est impératif de bien comprendre les mécanismes en jeu afin de définir le x_0 optimal.

A ce jour, l'air est probablement le principal acteur menant à des écarts importants entre le fonctionnement idéal (modèle) et visé, et ceux obtenus. Des mesures sous vide et/ou des mesures de température en surface du matériau permettraient de valider cette hypothèse

Ce générateur a été amélioré sous plusieurs aspect par rapport au premier prototype, ceci étant le résultat le plus important à souligner. Comme pour le prototype 1 ce prototype est comparable avec les générateurs présents dans la littérature (voir Tableau. 4.1)

4.4. Conclusions

TABLE 4.1 – Prototype 2 vs travaux présents dans la littérature.

	Puissance électrique	ΔT	Transducteurs	Commentaires
Prototype 2	240 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	35 °C	Matériaux piézoélectriques	Résultats de mesures
Prototype 1	6.8 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	38 °C	Matériaux piézoélectriques	Résultats de mesures
[11]	1.6 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	25 °C	Bobines	Résultats de mesures
[8]	28.34 mW/cm^3	50 °C		Puissance estimée
[15]	0.32 mW/cm^3	30 °C	Bobines	Puissance maximale, pas d'informations sur la puissance d'entrée
[12]	118 mW/cm^3	140 °C	Bobines	Résultats de mesures
[10]	38 mW/cm^3	80 °C	PVDF	Résultats de mesures

Conclusion générale et perspectives

L'énergie thermique de bas niveau ($T < 100$ °C) est disponible dans de nombreux environnements. Aujourd'hui les systèmes thermoélectriques sont simple à mettre en œuvre, mais leurs performances restent encore trop faible. L'émergence de matériaux magnéto-caloriques performants suscite un regain d'intérêt envers des thermogénérateurs magnétiques. Mes travaux de thèse ont pour objectif la réalisation et l'étude d'un générateur thermomagnétique, capable de convertir l'énergie thermique en énergie électrique. Au vu de ses débouchés, ce générateur se veut autonome. Pour ce faire, le système doit être auto-oscillant et capable de fonctionner pour des écarts de température entre la source chaude et la source froide de l'ordre de 30 °C. L'émergence de ces générateurs a donné naissance à de multiple structures de conversion (avec des modes de conversion direct/indirect), des échangeurs (à contact mécanique, à eau,), etc. L'état de l'art montre qu'il y a de nombreux chemin de conversion possible. Nos travaux montrent qu'une structure où l'énergie thermique déclenche une auto-oscillation mécanique contrôlant à la fois l'échange thermique et l'aimantation/dés-aimantation est à ce jour la meilleure structure dans notre contexte. Les différents choix ont été motivés :

- Notre choix de récupérer l'énergie thermique, bien qu'elle soit la forme d'énergie la plus dégradée, présente l'avantage de son ubiquité.

- la génération thermo-magnétique peut-être plus performante que sa concurrente directe (génération thermo-électrique) dans le cas de faibles températures et de petites dimensions.

- la conversion indirecte nous permet d'avoir un système autonome contrairement à la conversion directe où une pompe doit constamment être utilisée.

Dans un deuxième chapitre nous avons présenté l'architecture générale du générateur et de son principe de fonctionnement, uniquement la conversion de l'énergie thermique à l'énergie mécanique est prise en compte. Le générateur est composé d'une source froide, une source chaude et une poutre sur laquelle un MMC est posé. Ce dernier effectue un cycle dynamique où le MMC se déplace entre deux sources de chaleur (système bistable), en parallèle, il effectue un cycle thermodynamique (cycle de Brayton) avec deux adiabatiques et deux isochamps. Le matériau magnéto-calorique utilisé 'LaFeSi' est un matériau du premier ordre qui offre de meilleures performances qu'un matériau de deuxième ordre. Ce dernier est la clé de l'auto-oscillation, c'est pour cela qu'il a été caractérisé sous DRX et VSM. Les caractéristiques magnétiques du MMC ont été mesurées afin de déterminer les forces magnétiques subies par le MMC et ainsi de dimensionner la poutre. Nos travaux utilisent en particulier une source de champ en structure d'Halbach, cette structure permet d'avoir un gradient de champ et des valeurs de force importantes tout en utilisant des aimants de petites tailles. Nous avons, dans ce chapitre, présenté les simulations qui nous ont permis de déterminer les forces magnétiques appliquées sur le MMC ainsi que la raideur et ou dimensions de la poutre. Il en sort de l'étude de l'auto-oscillation que la raideur nécessaire afin d'avoir un système auto-oscillant est de 3,4 kN/m, dans cette

même étude on met en avant le fait qu'un système auto-oscillant n'est pas obligatoirement bistable. Les deux cycles dynamique et thermodynamique sont liés dans le modèle thermo-mécanique. Ce modèle montre qu'un générateur idéal peut fonctionner à une fréquence de 0,29 Hz.

Jusqu'à là, dans ce deuxième chapitre, on a pas traité la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, dans l'état de l'art on retrouve plusieurs transducteurs possibles (bobines, piézoélectriques..etc) mais on ne trouve pas d'étude visant à comparer, dans les mêmes conditions de fonctionnement, deux transducteurs et ainsi motiver le choix du transducteur. Le dernier point du chapitre 2 présente une pareille étude (simulations) visant à comparer les bobines et les matériaux piézoélectriques. Dans le cas des bobines, différentes configurations ont été prises en compte, la plus performante montre une énergie de $8 \mu\text{J}$ ($2,32 \mu\text{W}$). Dans le cas des matériaux piézo-électriques, une configuration où quatre plaques piézoélectriques sont collées sur la poutre a été prise en compte, l'énergie calculée est de $16,87 \mu\text{J}$ ($4,90 \mu\text{W}$). On peut voir que les piézoélectriques produisent plus d'énergie, de plus ils sont plus simple à intégrer et ils présentent une bonne efficacité de transduction à basses fréquences.

Toutes ces études préliminaires (conditions d'auto-oscillation, choix du mode de transduction, etc.) nous ont permis d'aborder la réalisation d'un premier prototype (Chapitre 3). La réalisation du prototype est née de nombreuses réflexions, sur le choix des matériaux, les techniques d'assemblage, etc. L'assemblage de la structure d'Halbach de petite taille a, en particulier, demandé le développement d'une méthodologie bien spécifique. Un banc de test a été réalisé et les premiers résultats de mesures montrent que le générateur produit une énergie de $1 \mu\text{J}$ par cycle ce qui correspond à une puissance de $0,12 \mu\text{W}$ ($6,8 \mu\text{W}/\text{cm}^3$) pour une fréquence de $0,12\text{Hz}$. L'étude du cycle mécanique dans le plan Force/Déplacement a révélé la présence de forces supplémentaires engendrées par l'air et les courants de Foucault, réduisant jusqu'à inverser la force totale appliquée sur le MMC avant qu'il arrive à la source chaude. L'étude du cycle magnétique, quant à elle, montre que les deux étapes iso-champs ne sont pas iso-champs en champ interne mais uniquement en champ appliqué, et même si on a toujours un cycle de Brayton, l'efficacité du matériau se voit réduire, car le champ démagnétisant nous empêche d'atteindre, d'un côté la saturation et de l'autre la transition de phase. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, deux hypothèses ont été émises afin d'expliquer le ralentissement du MMC durant l'étape 1. La première hypothèse stipule que le ralentissement est causé par les conditions au limites de la poutres (fixations de la poutre). Afin de valider cette dernière, une série de mesures visant à déterminer l'effet du serrage de la poutre sur le comportement mécanique du générateur a été réalisé. Il en sort que son comportement est très sensible à la façon de serrer la poutre. De plus, il est difficile de remettre en marche le prototype après plusieurs jours d'arrêt. La deuxième hypothèse lie les températures des sources de chaleur à ce ralentissement. Elle a été validée par des mesures dont le but est de voir le changement apporté au comportement mécanique du générateur par la variation de la température de la source froide. Cette étude montre que le générateur ne tolère, que très peu, la variation de température des sources (environs $3 \text{ }^\circ\text{C}$), de plus, l'air ambiant affecte son fonctionnement. A cause de ce ralentissement, le modèle thermo-mécanique présenté dans le chapitre 2 ne correspond pas au fonctionnement du générateur réalisé car

le déplacement ne peut être considéré comme étant adiabatique.

Le deuxième prototype vise à mieux contrôler les conditions aux limites de la poutre afin d'avoir un comportement plus fiable du système (Chapitre 4). L'architecture de ce dernier a évolué et présente de meilleures performances. La poutre est réalisée à la base de deux buzzers piézoélectriques découpés sous forme de croix pattée et la source froide permet dorénavant de modifier la précontrainte de la poutre au repos, la source chaude est inchangée. La poutre a été caractérisée afin de vérifier si elle respecte les conditions d'auto-oscillation, ce qui est le cas. Ce prototype oscille comme voulu, les différentes mesures ont été effectuées par le biais du même banc de test présenté dans le chapitre 3 à la seule différence que la température du MMC n'a pas été mesurée. Les premiers résultats de mesures montrent que la fréquence de déplacement est de 0,41 Hz, le ralentissement constaté pour le premier prototype a presque totalement disparu. La mesure de la tension quant à elle, montre que le générateur produit une énergie de 10,6 μJ , ce qui correspond à une puissance de 4,2 μW (240 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$), ce qui est une évolution importante. Les déplacements du MMC peuvent être considérés adiabatiques, le cycle de fonctionnement est donc modélisé à l'aide du modèle thermo-mécanique présenté dans le chapitre 2. La comparaison entre le déplacement mesuré est celui issu du modèle montre un léger ralentissement durant l'étape 1. Ce modèle montre aussi que si on améliore le contact thermique avec les sources de chaleurs notre système peut atteindre une fréquence de fonctionnement de 1 Hz. L'étude d'un cycle de fonctionnement dans le plan Force/Déplacement montre que les forces impliquées dans ce nouveau prototype sont plus importantes que dans le premier générateur, L'amélioration des performances du générateurs (fréquence et puissance électrique) est directement liée à l'amélioration de ces deux paramètres (vitesse et force). Dans l'étape 1, on constate la présence de forces supplémentaires inversant la force totale. L'étape 3 quant à elle se déroule sans encombre, la seule force supplémentaire est celle liée au choc avec la source de chaleur. Ce générateur, bien qu'il soit plus performant que son prédécesseur, reste sensible à la variation de la température des sources de chaleur. Comme précisé plutôt, la précontrainte de la poutre au repos est modifiable, reste à voir l'effet que cela peut avoir sur le comportement du nouveau générateur. La dernière partie de ce chapitre s'est penchée sur cette question et montre que la précontrainte peut améliorer le contact thermique avec la source froide mais rapproche cette dernière de la source chaude ce qui est source de problèmes. Par ailleurs, la perte de contact avec la source froide provoque l'apparition d'un régime oscillatoire difficile à expliquer.

A l'issue de mes travaux de thèse plusieurs perspectives sont posées. La première concerne le matériau magnéto-calorique. Le matériau utilisé dans ces travaux est un matériau commercial et il serait intéressant de synthétiser un matériau magnéto-calorique au laboratoire, pour la génération magnéto-calorique, et de l'étudier de façon approfondie. Le développement d'une mesure fiable de température du matériau en condition de fonctionnement est impératif afin de bien comprendre le fonctionnement du système. Une mesure fiable de la température permettrait de réaliser une étude thermodynamique approfondie visant à déterminer le rôle du MMC (T_C , C_H ...etc) lors de la variation des températures des sources de chaleur. Optimiser l'extraction de l'énergie électrique produite par les matériaux piézoélectrique est un autre point qui doit être traité, car notre étude montre que les piézoélectriques ne récupèrent qu'une petite partie de l'énergie réellement dis-

ponible. Deux voies ont été identifiées, soit travailler sur le volume et le placement des piézoélectriques, soit mieux piloter les piézoélectriques grâce à de l'électronique.

Bibliographie

- [1] C. Forman, I. K. Muritala, R. Pardemann, and B. Meyer, “Estimating the global waste heat potential,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1568–1579, May 2016. (Cited on pages [iii](#), [1](#), [5](#) and [24](#).)
- [2] “Micropelt. micropelt products. <https://www.micropelt.com-en-top-products-mva-003.html> (2020),” (Cited on pages [iii](#) and [7](#).)
- [3] C. Dupuis, “Matériaux à effet magnétocalorique géant et systèmes de réfrigération magnétique,” p. 162. (Cited on pages [iii](#), [8](#) and [9](#).)
- [4] A. Smith, C. R. Bahl, R. Bjørk, K. Engelbrecht, K. K. Nielsen, and N. Pryds, “Materials Challenges for High Performance Magnetocaloric Refrigeration Devices,” *Advanced Energy Materials*, vol. 2, pp. 1288–1318, Nov. 2012. (Cited on pages [iii](#), [8](#) and [9](#).)
- [5] T. Hess, C. Vogel, L. Maier, A. Barcza, H. Vieyra, O. Schäfer-Welsen, J. Wöllenstein, and K. Bartholomé, “Phenomenological model for a first-order magnetocaloric material,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 109, pp. 128–134, Jan. 2020. (Cited on pages [iii](#), [8](#), [9](#) and [30](#).)
- [6] “Vacuumschmelze. magnetocaloric materials calorivac, <https://vacuumschmelze.de>.” (Cited on pages [iii](#), [11](#) and [29](#).)
- [7] S. M. Sandoval, K. P. Wetzlar, and G. P. Carman, “Thermomagnetic conversion efficiencies for ferromagnetic materials,” *Journal of Applied Physics*, vol. 110, p. 123923, Dec. 2011. (Cited on pages [iii](#), [12](#), [13](#) and [87](#).)
- [8] M. Ujihara, G. P. Carman, and D. G. Lee, “Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials,” *Applied Physics Letters*, vol. 91, p. 093508, Aug. 2007. (Cited on pages [iii](#), [xiii](#), [15](#), [16](#), [24](#), [25](#), [36](#), [95](#) and [131](#).)
- [9] L. Carlioz, J. Delamare, and S. Basrour, “Temperature threshold tuning of a thermal harvesting switch,” pp. 1385–1388, IEEE, June 2009. (Cited on pages [iii](#), [xiii](#), [16](#), [17](#) and [24](#).)
- [10] J. Chun, H.-C. Song, M.-G. Kang, H. B. Kang, R. A. Kishore, and S. Priya, “Thermo-Magneto-Electric Generator Arrays for Active Heat Recovery System,” *Scientific Reports*, vol. 7, p. 41383, Feb. 2017. (Cited on pages [iii](#), [xiii](#), [17](#), [18](#), [24](#), [36](#), [95](#) and [131](#).)
- [11] M. Gueltig, H. Ossmer, M. Ohtsuka, H. Miki, K. Tsuchiya, T. Takagi, and M. Kohl, “High frequency thermal energy harvesting using magnetic shape memory films,” *Advanced Energy Materials*, vol. 4, 2014. (Cited on pages [iii](#), [xiii](#), [18](#), [19](#), [24](#), [36](#), [95](#) and [131](#).)
- [12] M. Gueltig, F. Wendler, H. Ossmer, M. Ohtsuka, H. Miki, T. Takagi, and M. Kohl, “High-Performance Thermomagnetic Generators Based on Heusler Alloy Films,” *Advanced Energy Materials*, vol. 7, p. 1601879, Mar. 2017. (Cited on pages [iii](#), [xiii](#), [19](#), [20](#), [24](#), [36](#), [95](#) and [131](#).)

-
- [13] R. A. Kishore and S. Priya, “A review on design and performance of thermomagnetic devices,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 33–44, Jan. 2018. (Cited on pages iii, 13 and 20.)
- [14] T. Christiaanse and E. Brück, “Proof-of-concept static thermomagnetic generator experimental device,” vol. 1, no. 1, pp. 36–40. (Cited on pages iii, xiii, 21, 22 and 24.)
- [15] A. Waske, D. Dzekan, K. Sellschopp, D. Berger, A. Stork, K. Nielsch, and S. Fähler, “Energy harvesting near room temperature using a thermomagnetic generator with a pretzel-like magnetic flux topology,” *Nature Energy*, Dec. 2018. (Cited on pages iii, xiii, 22, 23, 24, 25, 95 and 131.)
- [16] T. Martinez, *Study of a traveling-wave piezoelectric transformer and its application to power converters*. Theses, Université Paris-Saclay, Oct. 2019. (Cited on pages v, 51 and 52.)
- [17] T. Ikeda, “Fundamentals of piezoelectricity,” *Oxford University Press*, 1990. (Cited on pages v and 52.)
- [18] “Physik instrumente france. catalogue des céramiques piézoélectriques. <https://www.pifrance.fr/fileadmin/user-upload/pi-ceramic/files/catalog-cat/pi-cat128e-r3-piezoelectric-actuators.pdf>,” (Cited on pages v and 53.)
- [19] “magsy. ndfeb magnets. <https://e-shop.magsy.fr/> (2018),” (Cited on pages v and 59.)
- [20] “Déssipateur thermique, échangeur à eau. <https://www.amazon.fr/youn-aluminium-graphique-refroidissement-waterblock>,” (Cited on pages vi and 67.)
- [21] D. Guyomar, A. Badel, E. Lefeuvre, and C. Richard, “Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 52, no. 4, pp. 584–595, 2005. (Cited on pages vi, 75 and 76.)
- [22] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, and D. Guyomar, “Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 865–876, 2005. (Cited on pages vi, 76 and 77.)
- [23] Y. Takahashi, K. Yamamoto, and M. Nishikawa, “Fundamental performance of triple magnetic circuit type cylindrical thermomagnetic engine,” *Electrical Engineering in Japan*, vol. 154, pp. 68–74, Mar. 2006. (Cited on pages xiii, 20, 21 and 24.)
- [24] Y. Takahashi, T. Matsuzawa, and M. Nishikawa, “Fundamental performance of the disc-type thermomagnetic engine,” *Electrical Engineering in Japan*, vol. 148, pp. 26–33, Sept. 2004. (Cited on pages xiii, 20, 21 and 24.)
- [25] J. Degauque, “Matériaux à propriétés magnétiques dures : matériaux industriels,” p. 29, 2001. (Cited on pages xiii and 34.)
- [26] L. Lechevallier, J.-M. L. Breton, P. Tenaud, A. Morel, and S. Brassard, “Aimants permanents - Applications et perspectives,” p. 23, 2007. (Cited on pages xiii and 34.)
- [27] P. Dumas and A. Miraoui, “Aimants permanents - Fonctionnement des circuits magnétiques,” p. 22, 2012. (Cited on pages xiii and 34.)

Bibliographie

- [28] “Simulation matériaux. comportement mecanique, liste des limites élastiques. <https://www.simulationmatériaux.com/comportementmecanique/comportement-mecanique-liste-limite-elastique.php> (2020),” (Cited on pages [xiii](#) and [36](#).)
- [29] “Ngk berylco. brochures. <http://www.ngk-alloys.com/fr/brochure1.html>,” (Cited on pages [xiii](#) and [36](#).)
- [30] “Physik instrumente. piezoelectric ceramic products. <https://www.physikinstrumente.com/en/products/piezoelectric-transducers-actuators/plates-and-blocks/>,” (Cited on pages [xiii](#), [53](#), [62](#) and [63](#).)
- [31] “tcdirect. tcdirect thermocouples. <https://www.tcdirect.fr> (2020),” (Cited on pages [xiii](#) and [71](#).)
- [32] Micro-Epsilon, “Capteurs de déplacement, de distance de position,” <https://www.micro-epsilon.fr>, 2019. (Cited on pages [xiii](#), [73](#) and [106](#).)
- [33] F. Akhtar and M. H. Rehmani, “Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks : A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 769–784, May 2015. (Cited on page [4](#).)
- [34] C. Keawboonchuay and T. G. Engel, “Maximum power generation in a piezoelectric pulse generator,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 31, no. 1, pp. 123–128, 2003. (Cited on page [4](#).)
- [35] J. Yang, Z. Chen, and Y. Hu, “An exact analysis of a rectangular plate piezoelectric generator,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 54, no. 1, pp. 190–195, 2007. (Cited on page [4](#).)
- [36] M. El-hami, P. Glynne-Jones, N. White, M. Hill, S. Beeby, E. James, A. Brown, and J. Ross, “Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator,” *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 92, pp. 335–342, Aug. 2001. (Cited on page [4](#).)
- [37] M. Miyazaki, H. Tanaka, G. Ono, T. Nagano, N. Ohkubo, T. Kawahara, and K. Yano, “Electric-energy generation using variable-capacitive resonator for power-free LSI : efficiency analysis and fundamental experiment,” in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Low Power Electronics and Design, 2003. ISLPED '03.*, (Seoul, South Korea), pp. 193–198, ACM, 2003. (Cited on page [4](#).)
- [38] ADEME, “La chaleur fatale,” <https://www.ademe.fr/chaleur-fatale>, 2017. (Cited on page [5](#).)
- [39] N. S. Hudak and G. G. Amatucci, “Small-scale energy harvesting through thermoelectric, vibration, and radiofrequency power conversion,” *Journal of Applied Physics*, vol. 103, p. 101301, May 2008. (Cited on pages [6](#) and [24](#).)
- [40] S. G.J, “Small thermoelectric generators,” *Interface : the electrochemical society. Fall*, p. 54, 2008. (Cited on page [6](#).)
- [41] S. B. Lang, *Sourcebook of pyroelectricity*. Gordon Breach Science, 1974. (Cited on page [7](#).)

-
- [42] S. Pandya, J. Wilbur, J. Kim, R. Gao, A. Dasgupta, C. Dames, and L. W. Martin, “Pyroelectric energy conversion with large energy and power density in relaxor ferroelectric thin films,” *Nature Materials*, vol. 17, pp. 432–438, May 2018. (Cited on page 7.)
- [43] P. Langevin, “Magnétisme et théorie des électrons,” *Ann. Chim. et Phys.*, vol. 8, pp. 5–70, 1905. (Cited on page 8.)
- [44] P. Weiss, “Sur un nouveau phénomène magnéto-calorique,” *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l’académie des sciences*, vol. 166, pp. 352–354, 1918. (Cited on page 8.)
- [45] P. Weiss, “Le phénomène magnéto-calorique.,” *Journal de Physique et le Radium*, vol. 2, pp. 161–182, 1921. (Cited on page 8.)
- [46] J. Kaštil, P. Javorský, and J. Kamarád, “Magnetocaloric Effect : Direct Measurement,” p. 4. (Cited on page 8.)
- [47] H. B. Callen, *Thermodynamics and an introduction to thermostatistics ; 2nd ed.* New York, NY : Wiley, 1985. (Cited on page 9.)
- [48] F. Pesty, “Études calorimétriques des comportements multicritiques des phases ondes de densité de spin dans un composé moléculaire,” *Habilitation à diriger des recherches*, pp. 77–79, 1993. (Cited on pages 9 and 10.)
- [49] M. Almanza, “La réfrigération magnétique : conceptualisation, caractérisation et simulation,” p. 160. (Cited on pages 9 and 44.)
- [50] L. CARLIOZ, *Générateur piézoélectrique à déclenchement thermo-magnétique*. PhD thesis, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2009. (Cited on page 10.)
- [51] H. Wada and Y. Tanabe, “Giant magnetocaloric effect of MnAs_{1-x}Sb_x,” *Applied Physics Letters*, vol. 79, pp. 3302–3304, Nov. 2001. (Cited on page 10.)
- [52] D. Solomon, “Improving the performance of a thermomagnetic generator by cycling the magnetic field,” *Journal of Applied Physics*, vol. 63, pp. 915–921, Feb. 1988. (Cited on pages 12 and 13.)
- [53] G. E. Achkar, A. Dianoux, A. Kheiri, D. Maillet, T. Mazet, S. Colasson, M. Feidt, C. Rado, F. Servant, and V. Paul-Boncour, “Thermomagnetic conversion of low-grade waste heat into electrical power,” *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 745, p. 032037, Sept. 2016. (Cited on page 21.)
- [54] L. Farhan, R. Kharel, O. Kaiwartya, M. Quiroz-Castellanos, A. Alissa, and M. Abdulsalam, “A concise review on internet of things (iot) -problems, challenges and opportunities,” in *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks Digital Signal Processing (CSNDSP)*, pp. 1–6, 2018. (Cited on page 24.)
- [55] C. Gray, R. Ayre, K. Hinton, and R. S. Tucker, “Power consumption of iot access network technologies,” in *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, pp. 2818–2823, 2015. (Cited on page 24.)
- [56] N. Tesla, “Thermo-magnetic motor,” Jan. 15 1889. US Patent 396,121. (Cited on page 25.)

Bibliographie

- [57] N. Tesla, “Pyromagneto-electric generator,” May 13 1890. US Patent 428,057. (Cited on page 25.)
- [58] “Pyromagnetic motor,” Mar. 27 1888. US Patent 380,100. (Cited on page 25.)
- [59] L. Brillouin and H. P. Iskenderian., “Thermomagnetic generator,” *Fed. Telecommun. Lab*, 1948. (Cited on page 25.)
- [60] D. Vuarnoz, A. Kitanovski, C. Gonin, Y. Borgeaud, M. Delessert, M. Meinen, and P. Egolf, “Quantitative feasibility study of magnetocaloric energy conversion utilizing industrial waste heat,” *Applied Energy*, vol. 100, p. 229–237, 02 2014. (Cited on page 25.)
- [61] M. Almanza, A. Pasko, F. Mazaleyrat, and M. Lo Bue, “First vs second order magnetocaloric material for thermomagnetic energy conversion,” in *2017 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, (Dublin, Ireland), pp. 1–1, IEEE, Apr. 2017. (Cited on pages 25, 29, 30 and 42.)
- [62] V. Priya, M. K. Rajendran, S. Kansal, G. Chowdary, and A. Dutta, “A human body heat driven high throughput thermal energy harvesting single stage regulator for wearable biomedical iot nodes,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 4989–5001, 2018. (Cited on page 25.)
- [63] S. Chalasani and J. M. Conrad, “A survey of energy harvesting sources for embedded systems,” in *Southeastcon, 2008. IEEE*, pp. 442–447, IEEE, 2008. (Cited on page 25.)
- [64] Q. Zhang and T. Zhang, “The refrigerant is also the pump,” *Science*, vol. 357, no. 6356, pp. 1094–1095, 2017. (Cited on page 25.)
- [65] M. Katter, V. Zellmann, G. W. Reppel, and K. Uestuener, “Magnetocaloric properties of $la(fe, co, si)_{13}$ bulk material prepared by powder metallurgy,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 44, no. 11, pp. 3044–3047, 2008. (Cited on page 25.)
- [66] A. Barcza, M. Katter, V. Zellmann, S. Russek, S. Jacobs, and C. Zimm, “Stability and magnetocaloric properties of sintered $la(fe, mn, si)_h$ alloys,” *Magnetism, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 10, pp. 3391–3394, 2011. (Cited on page 25.)
- [67] F. Curzon and B. Ahlborn, “Efficiency of a carnot engine at maximum power output,” *Am. J. Phys*, vol. 43, no. 1, pp. 22–24, 1975. (Cited on page 29.)
- [68] K. Abt-A, “Mode d’emploi Kit de détermination de la densité pour balance analytique KERN ABT,” p. 22. (Cited on page 33.)
- [69] F. BERNOT, “Machines à courant continu construction,” *Techniques de l’ingénieur Différents types de machines électriques tournantes*, vol. base documentaire : TIB249DUO., no. ref. article : d3556, 1999. (Cited on page 34.)
- [70] R. Ravaud, “Etude analytique des systèmes magnétomécaniques sans fer : application au haut-parleur guidé par joints de ferrofluide,” p. 190. (Cited on page 35.)
- [71] G.-D. Zhan, J. D. Kuntz, A. K. Mukherjee, P. Zhu, and K. Koumoto, “Thermoelectric properties of carbon nanotube/ceramic nanocomposites,” *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 77–82, Jan. 2006. (Cited on page 35.)
- [72] Aviva-Metals, “Le cuivre au beryllium,” <https://www.avivametals.eu-collections-beryllium-copper>, 2020. (Cited on page 36.)

- [73] M. Gutowski, “How to justify that 3d result is more accurate than 2d result ?,” 05 2016. (Cited on page 37.)
- [74] P. Mocellin, “How to justify that 3d result is more accurate than 2d result ?,” 05 2016. (Cited on page 37.)
- [75] A. Jenkins, “Self-oscillation,” *Physics Reports*, vol. 525, pp. 167–222, Apr. 2013. (Cited on page 39.)
- [76] M. Almanza, A. Pasko, F. Mazaleyrat, and M. LoBue, “Numerical study of thermomagnetic cycle,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 426, pp. 64–69, 2017. (Cited on page 44.)
- [77] S. Ahmim, M. Almanza, A. Pasko, F. Mazaleyrat, and M. LoBue, “Thermal energy harvesting system based on magnetocaloric materials ,” *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 85, p. 10902, Jan. 2019. (Cited on page 47.)
- [78] L. P. V. C. Nechibvute A, Akande A R, “Modelling of a pzt beam for voltage generation,” *Pertanika Journal of Science Technology.*, vol. 19, no. 2, pp. 259–271, 2011. (Cited on page 50.)
- [79] J. Ducarne, *Modeling and optimisation of non-linear vibration damping by switch shunting of piezoelectric elements*. Theses, Conservatoire national des arts et metiers - CNAM, Mar. 2009. (Cited on page 52.)
- [80] L. Daniel, D. Hall, and P. Withers, “A multiscale model for reversible ferroelectric behaviour of polycrystalline ceramics,” *Mechanics of Materials*, vol. 71, pp. 85–100, Apr. 2014. (Cited on page 52.)
- [81] D. Berlincourt, “Piezoelectric ceramic compositional development,” 1991. (Cited on page 52.)
- [82] P. Papet, “Matériaux piézoélectriques : les céramiques oxydes à base de métaux de transition,” p. 34, 2012. (Cited on page 52.)
- [83] P. Ueberschlag, “PVDF piezoelectric polymer,” *Sensor Review*, vol. 21, pp. 118–126, June 2001. (Cited on page 52.)
- [84] “Simulation matériaux. comportement mecanique, liste des limites élastiques. <https://www.simulationmatériaux.com/comportementmecanique/comportement-mecanique-liste-limite-elastique.php> (2020),” (Cited on page 52.)
- [85] G-Poulin, “Contribution au développement d’un générateur piezoelectrique pour applications nomades,” p. 160, 2004. (Cited on page 52.)
- [86] “uhu. colle epoxy. <https://www.uhu.fr/fr/produit/colle-epoxy/5249> (2018),” (Cited on pages 59, 62 and 103.)
- [87] “rs. resistances-traversantes. <https://fr.rs-online.com/web/p/resistances-traversantes/1679610/> (2018),” (Cited on page 60.)
- [88] “rs. colles-cyanoacrylates. <https://fr.rs-online.com/web/p/colles-cyanoacrylates/>,” (Cited on page 71.)
- [89] M. ELECTRONICS, “Analog devices,” <https://www.mouser.fr/ProductDetail-Analog-Devices-LT1793ACN8PBF?qs> =

Bibliographie

- sGAepiMZZMvi6wO7nhr1L3en8ZLonfOzFvmnTchJAKs%3D*, 2019. (Cited on page 73.)
- [90] “COMSOL Multiphysics Simulation of Piezoelectric Sensor for Energy Harvesting from Railway tracks,” *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, pp. 5446–5452, July 2019. (Cited on page 74.)
- [91] L. Carlioz, *Générateur piézoélectrique à déclenchement thermo-magnétique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2009. (Cited on page 75.)
- [92] DigiKey-Electronics, “Buzzer-elements,” <https://www.digikey.si/product-detail/en/AB6505B/668-1651-ND/9083402/?itemSeq=312461098>, 2019. (Cited on page 98.)
- [93] Henkel, “Loctite 384,” <https://tdsna.henkel.com-americas-na-adhesives-hnauttds.nsf-web-A5D983A239AC5F3B882571870000D72D-File-384-EN.pdf>, 2020. (Cited on page 109.)

Titre: Conversion de la chaleur fatale de bas niveau en énergie électrique par effet magnétocalorique

Mots clés: Matériaux magnétiques, Effet magnéto-calorique, Conversion d'énergie, Auto oscillation

Résumé: Mes travaux de thèse visent à récupérer, grapiller, la chaleur fatale de bas à très bas niveau pour produire de l'énergie électrique et ainsi alimenter des petits systèmes autonomes (μW à mW). Le générateur développé convertit l'énergie en trois étapes. Tout d'abord l'énergie thermique est convertie en énergie magnétique au travers d'un cycle thermodynamique opéré à l'aide d'un matériau magnétocalorique. Cette première conversion est intimement liée à la seconde, conversion de l'énergie magnétique en énergie mécanique, car le déplacement du matériau magnétocalorique contrôle aussi le champ appliqué et les échanges thermiques avec les réservoirs. C'est l'imbrication de ces deux cy-

cles, thermodynamique et dynamique, qui permet au système d'auto-osciller. L'énergie mécanique du système pseudo-oscillant est finalement convertie en énergie électrique via des éléments piézoélectriques. Mes travaux expérimentaux, théoriques et numériques ont cherché à maximiser l'énergie électrique récupérée tout en assurant l'auto-oscillation de la structure. Les dispositifs développés sont en mesure d'auto-osciller pour des écarts de température de 35°C tout en produisant de l'énergie électrique. Notre prototype le plus performant présente une énergie de $10,6 \mu\text{J}$ par cycle pour une fréquence de $0,41 \text{ Hz}$, soit une puissance de $4,2 \mu\text{W}$ ($240 \mu\text{W}/\text{cm}^3$). Ces travaux mettent l'accent sur les cycles associés à la conversion d'énergie.

Title: Low grade thermal energy harvesting using magnetocaloric materials

Keywords: Magnetic materials, Magnetocaloric effect, Energy conversion, Self-oscillation

Abstract: The main objective of my thesis is the design and development of a device suitable to recover, and scavenge, low grade heat to produce electrical energy and thus supply small autonomous systems (μW to mW). The developed generator converts energy in three steps. First of all, thermal energy is converted into magnetic energy through a thermodynamic cycle operated by a magnetocaloric material. This first conversion is closely linked to the second, conversion of magnetic energy into mechanical energy, because the displacement of the magnetocaloric material also controls the applied field and the heat exchanges with the reservoirs. It is the in-

terweaving of these two cycles, thermodynamic and dynamic, which allows the system to self-oscillate. The mechanical energy of the pseudo-oscillating system is converted into electrical energy via piezoelectric elements. My experimental, theoretical and numerical works aimed to maximize the electrical energy recovered while ensuring the self-oscillation of the structure. All devices developed are able to self-oscillate for temperature difference of 35°C while producing electrical energy. Our most efficient prototype has an energy of $10.6\mu\text{J}$ per cycle for a frequency of 0.41 Hz , i.e. a power of $4.2\mu\text{W}$ ($240\mu\text{W}/\text{cm}^3$). This work, especially, focuses on the cycles associated with energy conversion.