

Etude et optimisation d'un dispositif de réfrigération magnétique à géométrie linéaire

En raison d'un problème technique, notre établissement n'avait pas de climatisation l'année dernière. Ainsi, nous avons d'abord eu l'idée d'étudier les systèmes de climatisation. L'orientation vers la réfrigération magnétique a eu lieu après une vidéo-conférence organisée par notre lycée avec le professeur Mohammed Balli, un chercheur dans le domaine.

Les systèmes de réfrigération constituent une composante essentielle du milieu urbain : cela concerne surtout les pays où les conditions météorologiques sont extrêmes, dont le nombre est en hausse à cause du réchauffement climatique. La réfrigération magnétique offre une solution écologique n'utilisant pas de fréon, et ayant un excellent rendement énergétique.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- ZOUGARI Rania

Positionnement thématique (ÉTAPE 2) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Effet magnétocalorique

Machine thermique

Matériaux magnétocaloriques

Réfrigération par régénération magnétique active

Rendement

Mots-clés (en anglais)

Magnetocaloric effect

Thermal machines

Magnetocaloric materials

Active Magnetic Regeneration Refrigeration

Efficiency

Bibliographie commentée

Observé pour la première fois par le physicien Emil Werberg en 1881, l'effet magnétocalorique va permettre la conception d'un nouveau moyen de réfrigération. Les premiers dispositifs qui mettront en évidence cette possibilité n'apparaîtront que plus de 50 ans après. Ce n'est qu'au début des années 2000 que la réfrigération magnétique commence à être sérieusement considérée comme une alternative pour les machines réfrigérantes classiques.[3][8]

L'effet magnétocalorique (EMC) se traduit par l'échauffement ou le refroidissement d'un matériau magnétique magnétisé ou démagnétisé. Il est le résultat du changement de l'entropie du matériau dû aux couplages entre les moments magnétiques et le réseau atomique sous l'action d'un champ magnétique extérieur. Pour la plupart des matériaux, L'EMC est plus important au voisinage de leur température de Curie, Température au-dessus de laquelle le

matériau perd ses propriétés ferromagnétiques. [1]

L'amplitude de l'EMC dépend de l'intensité du champ magnétique appliquée au matériau ainsi que de la nature de ce dernier. Le choix de ses deux facteurs est d'ailleurs primordial afin d'avoir un système réfrigérant efficace. L'utilisation de bobines supraconductrices est une option viable pour des applications massives : elle est cependant limitée quant à ses applications commerciales en raison de considérations techniques (nécessité de refroidir les bobines). Les aimants permanents sont alors envisagés et l'étude des configurations optimales dans de tels systèmes devient un enjeu majeur.[1][2]

En pratique, la réfrigération magnétique nécessite la combinaison d'un champ magnétique relativement fort et d'un matériau à fort effet magnétocalorique. De nos jours, le choix des matériaux magnétocaloriques est devenu l'un des éléments critiques du développement de la technologie du refroidissement magnétique. Ainsi, le gadolinium métallique (Gd) est le matériau le plus utilisé dans les réfrigérateurs magnétiques à température ambiante. Ceci est dû à l'importance de l'entropie isotherme et des changements de température adiabatiques près de sa température de Curie (294 K), à savoir à température ambiante. [3]

L'exploitation directe de l'effet magnétocalorique pour refroidir au voisinage de la température ambiante ne permet pas d'atteindre des écarts de températures importants entre les sources de chaleur chaude et froide, en particulier avec des systèmes utilisant des aimants permanents. Pour des applications frigorifiques et pompes à chaleur, l'EMC peut être amplifié grâce à des cycles magnétothermiques spécifiques appelés cycle à régénération AMRR qui repose sur une source de champ magnétique, un matériau magnétocalorique et un fluide caloporteur pour le transfert thermique.[2]

Le cycle AMRR d'un système de réfrigération magnétique se décompose en deux processus adiabatiques et deux applications d'un champ magnétique constant (deux iso-champs). Une fois le matériau magnétocalorique aimanté dans des conditions adiabatiques, sa température augmente et le fluide caloporteur passe du réservoir froid vers le réservoir chaud. Ensuite on procède à une désaimantation du matériau qui conduit à son refroidissement, avec écoulement du fluide caloporteur du réservoir chaud au réservoir froid.[1]

Dans le but de trouver une solution pour le problème que pose l'aspect économique de la technologie de la réfrigération magnétique, nous procéderons à une centralisation du froid dans une zone géographique délimitée. Il faudra donc faire une étude des pertes dues au transport du froid. A cet effet, nous chercherons les causes qui augmentent les pertes au moyen d'une étude de l'écoulement permanent du fluide caloporteur dans une partie de la canalisation.[5][9]

L'enjeu de notre étude autour de la centralisation sera de voir comment optimiser le transport du froid en milieu urbain, il est important de centraliser les systèmes pour réduire les coûts d'exploitation et maximiser l'efficacité énergétique. Une centralisation des systèmes permet de regrouper les équipements dans un seul lieu, ce qui peut réduire les coûts d'installation, d'exploitation et d'entretien. Pour étudier ce problème de centralisation optimale nous avons eu recours à la théorie des graphes. L'utilisation d'un algorithme génétique permettra de trouver la configuration la plus optimale pour éviter au maximum les pertes résultant du transport.[9]

Problématique retenue

Est-ce que les systèmes de réfrigération utilisant l'effet magnéto-caloriques peuvent être efficacement utilisés en milieu urbain ? Comment peut-on optimiser leur utilisation ?

Objectifs du TIPE du candidat

1. Etablir un modèle d'un système de réfrigération magnétique à cœur linéaire.
2. Comparer les différentes possibilités pour la source du champ magnétique afin d'identifier les plus pertinentes.
3. Trouver une estimation théorique du rendement énergétique possible pour de tels systèmes à partir du modèle proposé.
4. Dimensionner les aspects pratiques (cout, encombrement, consommation puis apport) d'un tel système puis tirer des conclusions sur son utilisation effective.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] BALLI, M., MAHMED, C., DUC, D., NIKKOLA, P., SARI, O., HADORN, J. C., & RAHALI, F. : Le renouveau de la réfrigération magnétique : *Revue Générale du Froid*, 102 (1121), 45 54.
- [2] BALLI, M., SARI, O., MAHMED, C., BESSON, CH., BONHOTE, PH., DUC, D., & FORCHELET, J. : A pre-industrial magnetic cooling system for room temperature application : *Applied Energy*, 98, 556 561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.034>
- [3] SARI, O., & BALLI, M. : From conventional to magnetic refrigerator technology. : *International Journal of Refrigeration*, 37, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.027>
- [4] THAKAR, SARTHAK. M., PRAJAPATI, R. P., & SOLANKI, D. C. : Performance Analysis of a Domestic Refrigerator Using Various Alternative Refrigerant. : *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 14(03), 92 103. <https://doi.org/10.9790/1684-14030192103>
- [5] ADAMS AIR : What is the COP (Coefficient of Performance) in HVAC? What Is the COP (Coefficient of Performance) in HVAC? : <https://www.adams-air.com/houston/what-is-COP.php>
- [6] FREDRICK GRAM : Magnetic field at a distance from a bar magnet. : (2012, février 20). <https://web.archive.org/web/20120220030524/http://instruct.tri-c.edu/fgram/web/Mdipole.htm>
- [7] BARMAN, B., & PETROU, A. : Measuring the magnetization of a permanent magnet. : *American Journal of Physics*, 87(4), 275 278. <https://doi.org/10.1119/1.5092452>
- [8] L'USINE NOUVELLE : Réfrigération magnétique: Une alternative aux machines thermiques classiques. : <https://www.usinenouvelle.com/article/refrigeration-magnetique-une-alternative-aux-machines-thermiques-classiques.N1380937>
- [9] DORFNER, J., KRYSTALLAS, P., DURST, M., & MASSIER, T : District cooling network optimization with redundancy constraints in Singapore. : *Future Cities and Environment*, 3(0), <https://doi.org/10.1186/s40984-016-0024-0>

DOT

- [1] : Février 2022 : notre groupe s'intéresse aux sujets de la climatisation/réfrigération

- [2]** : Avril-mai 2022 : visioconférence avec le chercheur Mohamed Balli, pivotement vers la réfrigération magnétique puis choix définitif du sujet.
- [3]** : Juin 2022 : première essaie pour comprendre et modéliser une machine thermique avec un cœur rotatif, notre étude n'a pas abouti dû à la complexité du système. Nous avons contacté le professeur Balli qui nous a proposé des pistes pour simplifier l'étude (surtout la géométrie linéaire).
- [4]** : Août-novembre 2022 : deuxième essaie d'établir un modèle de connaissances, à ce stade plusieurs hypothèses simplificatrices sont introduites et on obtient un premier succès relatif.
- [5]** : Octobre 2022 : je n'arrive pas à trouver des données expérimentales pour l'aimantation et l'EMC du gadolinium au voisinage des températures ambiantes, l'idée vient de les retrouver expérimentalement.
- [6]** : Novembre – Décembre 2022 : établissement des protocoles expérimentales et raffinement du modèle théorique.
- [7]** : Mars 2023 : obtention d'un échantillon du Gadolinium, un délai de livraison ne permet pas de réaliser les expériences avant les épreuves d'admissibilité.
- [8]** : Mai 2023: Réalisation des mesures expérimentales et finalisation des livrables.