

(12) BREVET D'INVENTION

- (11) N° de publication : **MA 50311 A1** (51) Cl. internationale : **F25B 21/00; F25B 21/00**
- (43) Date de publication : **31.01.2022**

-
- (21) N° Dépôt : **50311**
- (22) Date de Dépôt : **15.07.2020**
- (71) Demandeur(s) : **UNIVERSITE INTERNATIONALE DE RABAT UIR, PARC TECHNOPOLIS RABAT-SHORE, CAMPUS UNIVERSITAIRE UIR, ROCADE RABAT-SALE, 11100 11100, Sala El Jadida (MA)**
- (72) Inventeur(s) : **Mohamed BALLI**
- (74) Mandataire : **BOUYA MOHSINE**

(54) Titre : **Système de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope**

- (57) Abrégé : L'invention consiste à proposer un nouveau système de réfrigération magnétique opérant sur la base de l'effet magnétocalorique (EMC) rotatif ou anisotrope. Dans ce système, le régénérateur (réfrigérant) est constitué de monocristaux magnétocaloriques orientés ou de matériaux magnétocaloriques texturés. Les effets thermiques nécessaires sont générés en faisant tourner le régénérateur (ou l'aimant) dans un champ magnétique fixe ce qui permet de rendre le réfrigérateur magnétique plus simple, compact et plus efficace. Dans ce cas, seulement une simple source de champ magnétique est nécessaire ce qui contraste avec les dispositifs magnétocaloriques rotatifs conventionnels. De plus, cette nouvelle architecture nous permet de bien maîtriser les échanges thermiques entre le fluide caloporteur (eau, gaz) et le régénérateur en simplifiant drastiquement la conception du cycle thermodynamique de fonctionnement (cycle AMR). Dans le but de réduire encore plus la consommation d'énergie associée aux mouvements de rotation du régénérateur (ou l'aimant), les efforts magnétiques en jeu peuvent être balancés (compensés) en divisant le régénérateur en deux blocs séparés. Les axes d'aimantation faciles des deux blocs sont initialement orientés suivant et perpendiculairement au champ magnétique appliqué, respectivement

Intitulé : Système de réfrigération basé sur l'effet magnéto-calorique anisotrope

Abrégé

L'invention consiste à proposer un nouveau système de réfrigération magnétique opérant sur la base de l'effet magnéto-calorique (EMC) rotatif ou anisotrope. Dans ce système, le régénérateur (réfrigérant) est constitué de monocristaux magnéto-caloriques orientés ou de matériaux magnéto-caloriques texturés. Les effets thermiques nécessaires sont générés en faisant tourner le régénérateur (ou l'aimant) dans un champ magnétique fixe ce qui permet de rendre le réfrigérateur magnétique plus simple, compact et plus efficace. Dans ce cas, seulement une simple source de champ magnétique est nécessaire ce qui contraste avec les dispositifs magnéto-caloriques rotatifs conventionnels. De plus, cette nouvelle architecture nous permet de bien maîtriser les échanges thermiques entre le fluide caloporteur (eau, gaz) et le régénérateur en simplifiant drastiquement la conception du cycle thermodynamique de fonctionnement (cycle AMR). Dans le but de réduire encore plus la consommation d'énergie associée aux mouvements de rotation du régénérateur (ou l'aimant), les efforts magnétiques en jeu peuvent être balancés (compensés) en divisant le régénérateur en deux blocs séparés. Les axes d'aimantation faciles des deux blocs sont initialement orientés suivant et perpendiculairement au champ magnétique appliqué, respectivement

Description :

Dans le contexte actuel caractérisé par la pénurie des sources énergétiques et l'augmentation des émissions de gaz nocifs (à effet de serre) dans l'atmosphère, la réduction de l'utilisation des fluides frigorigènes synthétiques ainsi que la consommation d'énergie constituent des défis majeurs pour l'industrie du froid et la communauté internationale. En effet, dans les systèmes de réfrigération conventionnels basés sur la compression et la détente des gaz, l'efficacité énergétique atteint seulement 40 % par rapport au cycle théorique de Carnot. De plus, les fluides frigorigènes présents dans les systèmes à compression-relaxation comme les CFCs, HCFCs et HFCs [1] sont toxiques et très nuisible pour l'environnement et la santé humaine. Pour faire face à ces défis, des mesures ont été adoptées par la communauté internationale afin d'encourager l'émergence de nouvelles technologies efficaces et respectueuses de l'environnement. Dans ce cadre, la réfrigération magnétique basée sur l'effet magnétocalorique [1-7] est considérée actuellement comme l'une des meilleures alternatives pour remplacer les systèmes de réfrigération traditionnels. Cette technique prometteuse, permettrait d'éliminer complètement les CFCs, HCFCs et HFCs car elle utilise des substances solides (matériaux magnétocaloriques) comme réfrigérants. De plus, l'efficacité énergétique présentée par les réfrigérateurs magnétiques est très élevée et peut atteindre jusqu'à 75 % par rapport au cycle théorique de Carnot. Il faut également mentionner que l'absence du compresseur dans les réfrigérateurs magnétiques permettrait de construire des systèmes de réfrigération plus sécuritaires tout en réduisant largement les vibrations et les nuisances sonores.

Afin de réaliser des systèmes de réfrigération magnétique plus performants, l'EMC est habituellement amplifiée en utilisant un cycle thermodynamique spécifique appelé la réfrigération magnétique active à régénération (AMR) [4]. Ce dernier se décompose en 4 étapes :

- 1) La magnétisation du matériau magnétocalorique conduit à l'augmentation de sa température par EMC.
- 2) Un fluide caloporteur (eau) circule d'un côté à l'autre du matériau magnétocalorique pour évacuer la chaleur générée vers le réservoir chaud.
- 3) Annulation du champ magnétique extérieur conduisant au refroidissement du matériau magnétocalorique.
- 4) Ecoulement du fluide caloporteur dans le sens opposé pour transférer le froid généré durant la désaimantation vers la source froide créant un gradient de température au niveau du matériau et du fluide caloporteur.

Ainsi, après chaque cycle AMR, la température de la source chaude augmente et celle de la source froide diminue pour atteindre l'état d'équilibre après un certain nombre de cycles.

Toutefois, dans les réfrigérateurs magnétiques conventionnels, les processus de magnétisation-démagnétisation sont généralement réalisés en déplaçant les matériaux magnétocaloriques vers et en dehors de la zone du champ magnétique (source magnétique) [4-7]. Cela rend ces dispositifs moins compacts et augmente considérablement l'énergie consommée à cause des efforts mécaniques en jeu, réduisant en conséquence l'efficacité énergétique du système.

Il existe actuellement deux types de réfrigérateurs magnétiques : linéaires et rotatifs [4-7]. Dans les systèmes linéaires ou réciproques [4], les fréquences du cycle AMR sont généralement limitées à des valeurs inférieures à 1Hz, ce qui constitue un obstacle devant l'augmentation de la puissance froide. Le mouvement de rotation dans les systèmes rotatifs permet d'atteindre des fréquences de fonctionnement plus élevées [7]. Toutefois, la nécessité de créer des zones de champ magnétique non-

uniforme [7] rend les sources de champs magnétiques requises (aimant) dans ce type de systèmes plus complexes, difficile à réaliser et trop coûteuses de point de vue économique. De plus, la complexité du cycle AMR dans les réfrigérateurs magnétiques rotatifs standards impacte d'une manière négative leurs coûts et performances. Ces défis pratiques ouvrent la voie à la recherche de nouveaux designs pour la réfrigération magnétique.

Ici nous proposons un système de réfrigération magnétique opérant sur la base de l'effet magnétocalorique rotatif (RMCE) ou anisotrope comme montré dans le dessin ci-dessous. Contrairement à l'EMC conventionnel, l'EMC rotatif peut être obtenu par une simple rotation de certains monocristaux magnétocaloriques présentant une forte anisotropie magnétocristalline dans un champ magnétique fixe [8]. Ainsi, des changements de température peuvent être générés sans magnétiser et démagnétiser le matériau magnétocalorique via des champs magnétiques variables. Toutefois, afin d'éviter les difficultés techniques associées à l'élaboration des monocristaux magnétocaloriques, ces derniers pourraient être substitués par des matériaux texturés ou des poudres magnétiquement orientées comme montré dans le dessin.

Dans ce système, le régénérateur magnétocalorique est divisé en deux blocs magnétocaloriques séparés. Initialement, les axes d'aimantation faciles des blocs 2 et 1 sont orientés suivant et perpendiculairement au champ magnétique, respectivement. Le réfrigérateur magnétique fonctionne comme suit :

- 1- Rotation du régénérateur constitué des deux blocs magnétocaloriques d'un angle allant de 0 à 90 °. Par conséquent, le bloc 1 se réchauffe tandis que le bloc 2 se refroidit à cause des EMC rotatifs positifs et négatifs résultants, respectivement.
- 2- Écoulement d'un fluide caloporteur (eau, gaz) à travers les blocs 1 et 2 pour évacuer simultanément la chaleur et le froid vers la source chaude et la source froide, respectivement.
- 3- Rotation du régénérateur d'un angle supplémentaire variant de 90 à 180 ° augmentant la température du bloc 2 et refroidissant le bloc 1.
- 4- Écoulement du fluide caloporteur dans le sens opposé pour évacuer la chaleur et le froid générés, respectivement, dans les blocs 2 et 1 vers le système de pompage.

En plus de la réduction du travail magnétique (champ constant), la conception proposée nous permettrait d'augmenter considérablement la différence de température entre les sources chaudes et froides. En effet, la génération simultanée des EMCs négatifs/positifs dans le régénérateur, combinée avec l'écoulement du fluide caloporteur à travers les deux blocs en sens opposés permettent de pratiquement maintenir une température constante (autour de 300 K) dans la zone intermédiaire du régénérateur (Zone 4). Cette dernière correspond à la source chaude du bloc 2 et à la source froide du bloc 1. La présence de cette zone permet de séparer « thermiquement » la source chaude de la source froide du réfrigérateur magnétique. Une telle situation aiderait à baisser d'une manière significative la température de la source froide en minimisant les pertes thermiques.

De plus :

- 1) La variation du champ magnétique dans les systèmes de refroidissement magnétiques standards conduit à l'apparition de courants électriques induits en particulier dans les matériaux magnétocaloriques métalliques. La nature stable du champ magnétique dans le réfrigérateur proposé permet d'éliminer les pertes d'énergie ainsi que les travaux magnétiques supplémentaires associés à ces courants induits.

2) Le système de réfrigération magnétique proposé est également intéressant d'un point de vue économique, car un mouvement de rotation peut être facilement réalisé à l'aide de moteurs circulaires abordables.

Description des figures

Figure 1 : Système de réfrigération magnétique basé sur l'effet magnétocalorique rotatif. HTF désigne Heat Transfer Fluid (fluide caloporteur).

Les différents composants mentionnés dans le dessin sont détaillés ci-après :

[1] Premier bloc du régénérateur contenant des matériaux magnétocaloriques texturés ou des monocristaux magnétocaloriques orientés.

[2] Deuxième bloc du régénérateur contenant des matériaux magnétocaloriques texturés ou des monocristaux magnétocaloriques orientés.

[3] Electro-aimant ou source magnétique à base d'aimant permanents permettant de générer les champs magnétiques requis pour la production de l'effet magnétocalorique.

[4] Zone intermédiaire séparant les deux blocs du régénérateur.

[5] Tuyaux contenant un fluide caloporteur (HTF). Ce dernier est utilisé pour transférer la chaleur et le froid entre le régénérateur et les sources de chaleur 6 et 7. En fonction de l'application souhaitée, ce fluide caloporteur peut être sous formes liquides ou gazeuses.

[6] Echangeur de chaleur : source chaude du réfrigérateur magnétique

[7] Echangeur de chaleur : Source froide du réfrigérateur magnétique

[8] MCM (magnetocaloric material) : réfrigérant (matériau) magnétocalorique texturé dans le but d'obtenir un EMC rotatif ou monocristaux présentant un effet magnétocalorique anisotrope. Le MCM est constitué d'un seul matériau ou d'une combinaison de plusieurs matériaux à EMC rotatif (multicouches) et dont les températures d'ordre couvrent la gamme de température souhaitée.

[9] MCM (magnetocaloric material) : réfrigérant (matériau) magnétocalorique texturé dans le but d'obtenir un EMC rotatif ou monocristaux présentant un effet magnétocalorique anisotrope. Le MCM est constitué d'un seul matériau ou d'une combinaison de plusieurs matériaux à EMC rotatif (multicouches) et dont les températures d'ordre couvrent la gamme de température souhaitée.

[10] Système de pompage (pompe) permettant de déplacer le fluide caloporteur.

[11] Moteur permettant d'entraîner l'aimant ou le régénérateur magnétocalorique dans un mouvement rotatif.

[12] L'axe d'aimantation difficile du bloc 2 est initialement perpendiculaire à la direction du champ magnétique.

[13] L'axe d'aimantation facile du bloc 2 est initialement orienté suivant la direction du champ magnétique.

[14] L'axe d'aimantation facile du bloc 1 est initialement perpendiculaire au champ magnétique.

[15] L'axe d'aimantation difficile du bloc 1 est initialement parallèle au champ magnétique.

-L'angle entre les axes 12-13 et les axes 14-15 est 90 °

Reference bibliographique

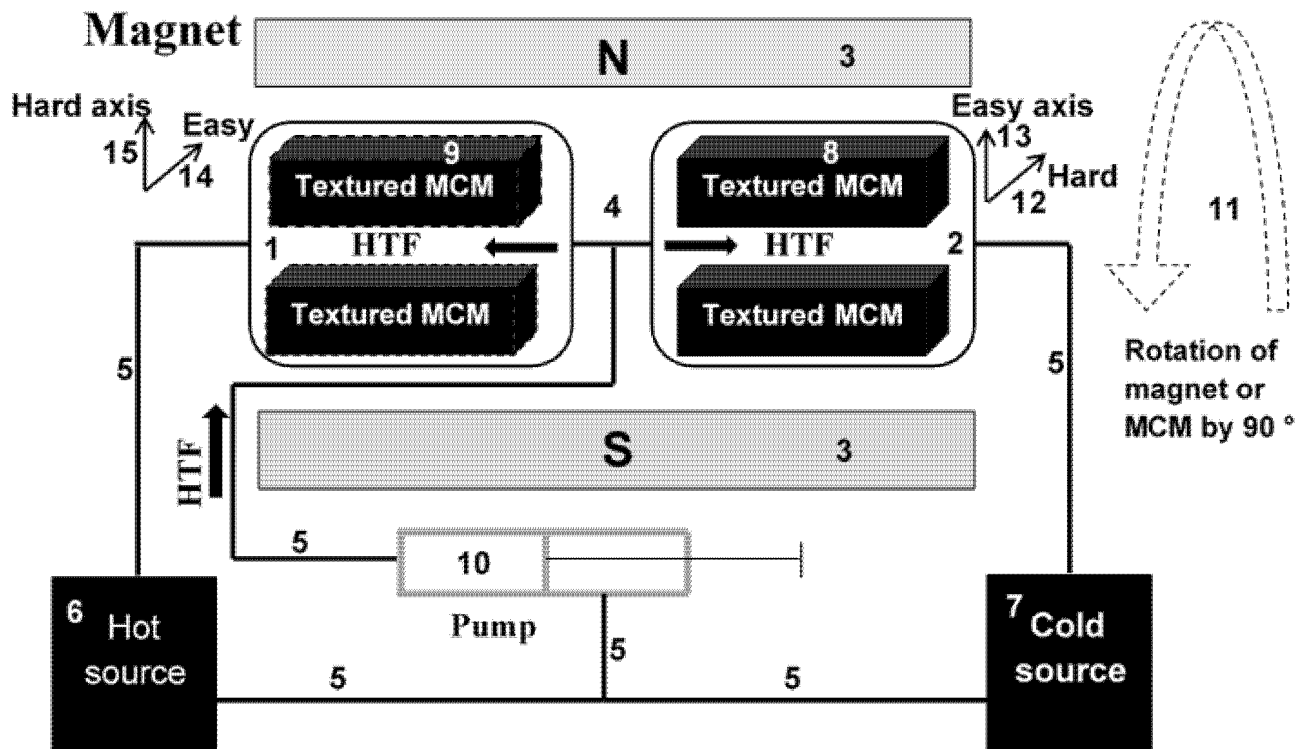
- [1] M. Balli, S. Jandl, P. Fournier, A. Kedous-Lebouc, *Appl. Phys. Rev.* 4, 021305 (2017).
- [2] X. Moya, S. Kar-Narayan, and N. D. Mathur, *Nat. Mater.* 13, 439 (2014).
- [3] K. G. Sandeman, *Scr. Mater.* 67, 566 (2012).
- [4] C. Zimm, A. Jastrab, A. Sternberg, V.K. Pecharsky, K. Gschneidner Jr., M. Osborne, I. Anderson, *Adv. Cryog. Eng.* 43, 1759 (1998).
- [5] A. M. Tishin, Yu. I. Spichkin, *The Magnetocaloric Effect and Its Applications* (IOP Publication, Bristol, UK, 2003).
- [6] A. Kitanovski et al. *Magnetocaloric energy conversion*, Springer International Pu, 2016.
- [7] K. Engelbrecht, D. Eriksen, C. R. H. Bahl, R. Bjørk, J. Geyti, J. A. Lozano, K. K. Nielsen, F. Saxild, A. Smith, and N. Pryds, *Int. J. Refrig.* 35, 1498 (2012).
- [8] M. Balli, S. Jandl, P. Fournier, M. M. Gospodinov, *Appl. Phys. Lett.* 104, 232402 (2014).

Revendications :

1. Système de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope composé de :
 - Electro-aimant (3) ou source magnétique à base d'aimant permanents permettant de générer les champs magnétiques requis pour la production de l'effet magnétocalorique (EMC).
 - Moteur (11) pour la rotation du régénérateur contenus dans les blocs (1) et (2) d'un angle supplémentaire variant de 0° à 180°.
 - Deux blocs (1) et (2) de régénérateurs contenant des matériaux magnétocaloriques texturés (MCM) (8) et (9) ou des monocristaux présentant un effet magnétocalorique anisotrope.
 - Tuyaux (5) contenant un fluide caloporteur (HTF).
 - Source chaude (6)
 - Source froide (7)
 - Système de pompage (10) permettant de déplacer le fluide caloporteur.
2. Système de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope selon la revendication 1 caractérisé en ce que le MCM est constitué d'un seul matériau ou d'une combinaison de plusieurs matériaux à effet magnétocalorique (EMC) rotatif (multicouches) et dont les températures d'ordre couvrent la gamme de température souhaitée.
3. Système de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope selon l'une quelconque des revendications, caractérisé en ce que le transfert de chaleur dans le système est assuré par, un fluide caloporteur quelconque, l'eau ou un gaz caloporteur.
4. Procédé de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope caractérisé par les étapes suivantes :
 - Rotation de l'aimant ou du régénérateur constitué des deux blocs magnétocaloriques d'un angle allant de 0 à 90°. Le bloc 1 se réchauffe tandis que le bloc2 se refroidit.
 - Actionnement de la pompe (10) pour écoulement d'un fluide caloporteur (eau, gaz) à travers les blocs 1 et 2 pour évacuer simultanément la chaleur et le froid vers la source chaude et la source froide, respectivement.
 - Rotation du régénérateur d'un angle supplémentaire variant de 90 à 180°. Le bloc 2 se réchauffe tandis que le bloc1 se refroidit
 - Écoulement du fluide caloporteur dans le sens opposé pour évacuer la chaleur et le froid générés, respectivement, dans les blocs 2 et 1 vers le système de pompage.
5. Procédé de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope selon la revendication 4 caractérisé en ce que le maintien de la température constante autour de la température ambiante (300 K) dans la zone intermédiaire du régénérateur (Zone 4) se fait par la génération simultanée des EMCs négatifs/positifs dans le régénérateur, combinée avec l'écoulement du fluide caloporteur à travers les deux blocs en sens opposés.

Dessins

Figure 1



**RAPPORT DE RECHERCHE
AVEC OPINION SUR LA BREVETABILITE**
(Conformément aux articles 43 et 43.2 de la loi 17-97 relative à la
protection de la propriété industrielle telle que modifiée et complétée
par la loi 23-13)

Renseignements relatifs à la demande	
N° de la demande : 50311	Date de dépôt : 15/07/2020
Déposant : UNIVERSITE INTERNATIONALE DE RABAT UIR	
Intitulé de l'invention : Système de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope	
Le présent document est le rapport de recherche avec opinion sur la brevetabilité établi par l'OMPIC conformément aux articles 43 et 43.2, et notifié au déposant conformément à l'article 43.1 de la loi 17-97 relative à la protection de la propriété industrielle telle que modifiée et complétée par la loi 23-13.	
Les documents brevets cités dans le rapport de recherche sont téléchargeables à partir du site http://worldwide.espacenet.com , et les documents non brevets sont joints au présent document, s'il y en a lieu.	
Le présent rapport contient des indications relatives aux éléments suivants :	
Partie 1 : Considérations générales	
<input checked="" type="checkbox"/> Cadre 1 : Base du présent rapport	
<input type="checkbox"/> Cadre 2 : Priorité	
<input type="checkbox"/> Cadre 3 : Titre et/ou Abrégé tel qu'ils sont définitivement arrêtés	
Partie 2 : Rapport de recherche	
Partie 3 : Opinion sur la brevetabilité	
<input type="checkbox"/> Cadre 4 : Remarques de forme et de clarté	
<input type="checkbox"/> Cadre 5 : Défaut d'unité d'invention	
<input type="checkbox"/> Cadre 6 : Observations à propos de certaines revendications exclues de la brevetabilité	
<input checked="" type="checkbox"/> Cadre 7 : Déclaration motivée quant à la Nouveauté, l'Activité Inventive et l'Application Industrielle	
Examineur: Mohamed EL KINANI	Date d'établissement du rapport : 26/02/2021
Téléphone: 212 5 22 58 64 14/00	



Partie 1 : Considérations générales**Cadre 1 : base du présent rapport**

Les pièces suivantes de la demande servent de base à l'établissement du présent rapport :

- Description
4 Pages
- Revendications
1-5
- Planches de dessin
1 Page

Partie 2 : Rapport de recherche

Classement de l'objet de la demande :

CIB : F25B21/00

CPC : F25B21/00

Plateformes et bases de données électroniques de recherche :

EPOQUENET, WPI, ScienceDirect, IEEE, ORBIT

Catégorie*	Documents cités avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	N° des revendications visées
X	WO2004059221 (A1) ; ECOLE D INGENIEURS DU CANTON D [CH]; KITANOVSKI ANDREJ [CH] et al. ; 15-07-2004	1-5
X	WO2010043781 (A1) ; COOLTECH APPLICATIONS SAS [FR] ; 2010-04-22	1-5

***Catégories spéciales de documents cités :**

-« X » document particulièrement pertinent ; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
-« Y » document particulièrement pertinent ; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
-« A » document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
-« P » documents intercalaires ; Les documents dont la date de publication est située entre la date de dépôt de la demande examinée et la date de priorité revendiquée ou la priorité la plus ancienne s'il y en a plusieurs
-« E » Éventuelles demandes de brevet interférentes. Tout document de brevet ayant une date de dépôt ou de priorité antérieure à la date de dépôt de la demande faisant l'objet de la recherche (et non à la date de priorité), mais publié postérieurement à cette date et dont le contenu constituerait un état de la technique pertinent pour la nouveauté

Partie 3 : Opinion sur la brevetabilité**Cadre 7 : Déclaration motivée quant à la Nouveauté, l'Activité Inventive et l'Application Industrielle**

Nouveauté	Revendications aucune Revendications 1-5	Oui Non
Activité inventive	Revendications aucune Revendications 1-5	Oui Non
Application Industrielle	Revendications 1-5 Revendications aucune	Oui Non

Il est fait référence aux documents suivants. Les numéros d'ordre qui leur sont attribués ci-après seront utilisés dans toute la suite de la procédure

D1 : WO2004059221 (A1)

D2 : WO2010043781 (A1)

1. Nouveauté (N) et activité inventive (AI) :

Le document D1 divulgue un système de réfrigération basé sur l'effet magnétocalorique anisotrope composé de :

- Electro-aimant ou source magnétique à base d'aimant permanents permettant de générer les champs magnétiques requis pour la production de l'effet magnétocalorique (EMC) ;
- Moteur pour la rotation du régénérateur contenu dans deux blocs de régénérateurs, d'un angle supplémentaire variant de 0° à 180 ° ;
- Deux blocs de régénérateurs contenant des matériaux magnétocaloriques ;
- Tuyaux contenant un fluide caloporteur (HTF) ;
- Source chaude
- Source froide
- Système de pompage permettant de déplacer le fluide caloporteur

D'où l'objet de la revendication indépendante 1 n'est pas nouveau au sens de l'article 26 de la loi 17-97 modifiée et complétée par la loi 23-13.

Par ailleurs, le système de réfrigération décrit dans le document D1 est caractérisé en ce que le MCM est constitué d'un seul matériau ou d'une combinaison de plusieurs matériaux à effet magnétocalorique disposés en multicouches (page 6) et dont les températures d'ordre couvrent la gamme de température souhaitée (page 12). Le transfert de chaleur dans le système est assuré par un fluide caloporteur quelconque, l'eau ou un gaz caloporteur (page 11, dernier paragraphe).

Le document D1 décrit un procédé de réfrigération qui couvre l'objet de la revendication 4 (pages 10-12).

La revendication 5 décrit une caractéristique induite par le fonctionnement du système décrit dans les revendications 1-4, par conséquent, l'objet de la revendication 5 est également considéré comme anticipé par D1.

D'où l'objet des revendications 2-5 n'est pas nouveau au sens de l'article 26 de la loi 17-97 modifiée et complétée par la loi 23-13.

Le document D2 anticipe également l'objet des revendications 1-5.

L'objet des revendications 1-5 ne remplit pas les critères de l'activité inventive, conformément à l'article 28 de la loi 17-97 modifiée et complétée par la loi 23-13.

2. Possibilité d'application industrielle (PAI) :

L'objet de la présente invention est susceptible d'application industrielle au sens de l'article 29 de la loi 17-97 telle que modifiée et complétée par la loi 23-13, parce qu'il présente une utilité déterminée, probante et crédible.