

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 15.11.23.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 16.05.25 Bulletin 25/20.

56 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : STELLANTIS AUTO SAS Société par  
actions simplifiée (SAS) — FR, CENTRE NATIONAL  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement  
public — FR, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE BOR-  
DEAUX Etablissement public — FR et UNIVERSITE DE  
BORDEAUX Etablissement public — FR.

72 Inventeur(s) : MADAOUI SAID, GUILLEMARD  
FRANCK, AUDIOT NICOLAS, VINASSA Jean-Michel  
et SABATIER JOCELYN.

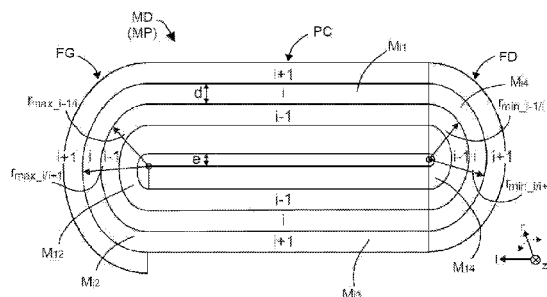
73 Titulaire(s) : STELLANTIS AUTO SAS Société par actions  
simplifiée (SAS), CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE Etablissement public, INSTITUT POLYTECH-  
NIQUE DE BORDEAUX Etablissement public, UNIVERSITE  
DE BORDEAUX Etablissement public.

74 Mandataire(s) : STELLANTIS AUTO SAS.

54 PROCÉDÉ D'ESTIMATION DE LA TEMPÉRATURE D'UNE CELLULE DE STOKAGE ELECTRIQUE  
PRISMATIQUE DANS UNE BATTERIE ELECTRIQUE DE TYPE LITHIUM-ION.

57 Le procédé comprend une étape d'acquisition de don-  
nées, une étape d'estimation d'une distribution thermique  
dans la cellule (MP) et une étape de calcul de gradient ther-  
mique à partir de la distribution thermique, l'étape d'estima-  
tion comprenant des calculs basés sur une application de  
l'équation de la chaleur de Fourier, avec la méthode dite  
« des volumes finis » et un maillage (MD) modélisant un en-  
roulement de couches en spirale de la cellule, le maillage  
comprenant des mailles parallélépipédiques (Mi1, Mi3)  
modélisant une partie centrale (PC) et des mailles arrondies  
(Mi2, Mi4) modélisant des flancs latéraux (FG, FD) de l'en-  
roulement. Conformément à l'invention, les mailles arron-  
diées d'un flanc et les mailles arrondies de l'autre flanc ont  
des rayons de courbure différents (rmax, rmin), une maille  
arrondie d'un flanc ayant, dans une même couche de l'en-  
roulement, un rayon supérieur à celui d'une maille arrondie  
correspondante de l'autre flanc.

Figure 5



## Description

### **Titre de l'invention : PROCÉDÉ D'ESTIMATION DE LA TEMPÉRATURE D'UNE CELLULE DE STOCKAGE ELECTRIQUE PRISMATIQUE DANS UNE BATTERIE ELECTRIQUE DE TYPE LITHIUM-ION**

- [0001] La présente invention concerne de manière générale le domaine de la gestion thermique des batteries électriques de type lithium-ion incorporant des cellules de stockage électrique prismatiques. Plus particulièrement, l'invention se rapporte à un procédé d'estimation de la température dans une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion. Le procédé de l'invention est applicable notamment pour la gestion thermique des batteries électriques de traction de type lithium-ion dans des véhicules électrifiés.
- [0002] Dans un véhicule électrifié, tel qu'un véhicule tout électrique ou un véhicule hybride thermique-électrique, la batterie électrique de traction peut dégager une puissance calorifique conséquente lorsqu'elle est sollicitée pour la traction du véhicule. Une gestion thermique de la batterie électrique de traction est nécessaire pour maximiser sa durée de vie, sa disponibilité et ses performances. La connaissance de la température des cellules de stockage électrique de la batterie, plus précisément, de la distribution spatiale de la température dans celles-ci, permet de calculer des gradients thermiques internes dans ces cellules. Ces gradients thermiques internes sont utilisés pour la gestion thermique de la batterie, via notamment la commande de son système de refroidissement. Ils peuvent aussi être utilisés pour l'activation de modes de traction dégradés du véhicule assurant une moindre sollicitation de la batterie, pour une réduction de ses temps de recharge via une commande optimisée de la puissance électrique de charge, ainsi que pour l'anticipation des pannes et la prévention de l'emballement thermique de la batterie.
- [0003] Des procédés d'estimation de la température dans une cellule de stockage électrique de type lithium-ion sont connus dans l'état de la technique. Ces procédés font appel à une modélisation thermique de la cellule pour obtenir une estimation de la température interne de celle-ci.
- [0004] Une approche classique de modélisation consiste à considérer la cellule comme un matériau homogène et isotrope. Il en résulte un modèle simple de la cellule, mais qui ne permet pas l'obtention des gradients thermiques internes dans cette dernière, en raison de l'hypothèse d'isotropie. Des modèles plus élaborés prennent en compte l'anisotropie des matériaux et autorisent l'obtention d'une distribution spatiale de la température dans la cellule, mais ces modèles restent trop simples et manquent de

précision pour une estimation fiable des gradients thermiques internes.

- [0005] Par ailleurs, il est connu des modèles complexes basés sur l'analyse par éléments finis, dite « FEA » pour « Finite Element Analysis » en anglais, qui procurent une définition détaillée de la structure de la cellule et permettent d'atteindre une précision élevée de la distribution spatiale de la température dans la cellule. Avec de tels modèles, il est possible d'estimer valablement les gradients thermiques internes dans la cellule, mais leur complexité demande une capacité de calcul importante, ce qui limite considérablement l'utilité de ces modèles pour certaines applications en temps réel, comme notamment la gestion thermique des batteries électriques de traction dans les véhicules électrifiés. Le document CN109902372A décrit un procédé d'estimation de la température du type ci-dessus pour une cellule lithium-ion prismatique. Le procédé de CN109902372A exige une modélisation tridimensionnelle (3D) via des logiciels de conception assistée par ordinateur, comme « AutoCAD® » ou « SolidWorks® », avec une discrétisation minutieuse de l'enroulement de couches en spirale de la cellule, dit « jelly roll » en anglais. Il requiert des ressources de calcul considérables qui ne sont pas toujours disponibles, notamment dans un système de gestion de batterie de véhicule, dit « BMS » pour « Battery Management System » en anglais.
- [0006] Dans la littérature, il est décrit des modèles optimisés pour des cellules cylindriques, peu gourmands en temps de calcul, qui prennent en compte l'anisotropie des matériaux et sont capables d'évaluer un gradient thermique interne dans la cellule.
- [0007] Dans l'article « *Aging effect of temperature gradients in Li-ion cells experimental and simulative investigations and the consequences on thermal battery management* », présenté lors du symposium « *26th Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS26), Los Angeles, California, May 6 - 9, 2012* », les auteurs Matthias Fleckenstein et al. divulguent un procédé d'évaluation du gradient thermique interne dans cellule prismatique lithium-ion. Le procédé fait appel à la méthode des volumes finis, en utilisant l'équation de la chaleur de Fourier, et propose pour le calcul un maillage de discrétisation de la cellule prismatique en 4x5x6 mailles élémentaires.
- [0008] Le maillage de discrétisation décrit dans l'article susmentionné, illustré à la [Fig.1], repose sur une représentation géométrique approximative CE d'une cellule prismatique sous la forme de trois couches en boucle superposées CS1, CS2 et CS3. L'enroulement des couches en spirale les unes sur les autres n'est pas pris en compte. L'enroulement en spirale introduit une variation du rayon de courbure dans une même couche. Le maillage de discrétisation proposé dans l'article susmentionné résulte en un manque de précision dans le calcul de la distribution spatiale de la température. De plus, le transfert de la chaleur n'est considéré ici que dans la direction radiale (cf. la flèche DR à la [Fig.1]), entre des mailles centrales MC et des mailles externes ME.
- [0009] Il est souhaitable de fournir une solution ne présentant pas les inconvénients sus-

mentionnés de la technique antérieure et adaptée pour une intégration dans un véhicule électrifié, pour estimer de manière fiable la température et les gradients thermiques dans des cellules de stockage électrique prismatique de type lithium-ion.

- [0010] Selon un premier aspect, l'invention concerne un procédé d'estimation de la température dans une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion comprenant une étape d'acquisition de données, une étape d'estimation d'une distribution spatiale thermique dans la cellule de stockage électrique prismatique et une étape de calcul de gradient thermique dans la cellule de stockage électrique prismatique à partir de la distribution spatiale thermique, l'étape d'estimation de distribution spatiale thermique comprenant des calculs basés sur une application de l'équation de la chaleur de Fourier, avec la méthode dite « des volumes finis » et un maillage de discrétisation prédéterminé modélisant un enroulement de couches en spirale dit « jelly roll » de la cellule de stockage électrique prismatique, le maillage de discrétisation comprenant une pluralité de mailles parallélipédiques modélisant une partie centrale de l'enroulement et une autre pluralité des mailles arrondies modélisant des premier et deuxième flancs latéraux arrondis distants de l'enroulement. Conformément à l'invention, les mailles arrondies modélisant le premier flanc et les mailles arrondies modélisant le deuxième flanc ont des rayons de courbure différents, une maille arrondie du premier flanc ayant, dans une même couche de l'enroulement, un rayon de courbure supérieur à celui d'une maille arrondie correspondante du deuxième flanc, de façon à modéliser fidèlement l'enroulement en spirale d'une couche sur l'autre.
- [0011] Selon une caractéristique particulière, l'étape d'estimation de distribution spatiale thermique comprend des calculs tridimensionnels en temps réel, à partir de la distribution spatiale thermique, pour estimer et suivre une évolution d'un ou plusieurs gradients thermiques de la cellule de stockage électrique prismatique dans un espace à trois dimensions.
- [0012] Selon une autre caractéristique particulière, l'étape d'estimation de distribution spatiale thermique comprend une prise en compte automatique de paramètres physico-chimiques et de caractéristiques thermo-physiques des couches.
- [0013] L'invention concerne aussi un calculateur comprenant une mémoire stockant des instructions de programme pour la mise en œuvre du procédé tel que décrit brièvement ci-dessus.
- [0014] L'invention concerne aussi un ensemble d'une batterie électrique comprenant une pluralité de cellules de stockage électrique prismatique de type lithium-ion et d'un calculateur, intégré dans un véhicule, le calculateur étant un calculateur tel que décrit ci-dessus. Dans une forme de réalisation particulière pour un véhicule électrifié, la batterie électrique est une batterie électrique de traction. Dans une autre forme de réa-

lisation particulière, le calculateur compris dans cet ensemble est un calculateur de gestion de batterie du type dit « BMS ».

- [0015] L'invention concerne aussi un véhicule comprenant un ensemble tel que décrit brièvement ci-dessus.
- [0016] D'autres avantages et caractéristiques de la présente invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description détaillée ci-dessous de plusieurs modes de réalisation particuliers de l'invention, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :
- [0017] La [Fig.1] est une représentation tridimensionnelle d'un maillage de discrétisation de la technique antérieure d'une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion.
- [0018] La [Fig.2] est un bloc-diagramme montrant schématiquement de manière simplifiée une architecture électrique d'un véhicule électrique dans lequel est mis en œuvre un mode de réalisation particulier du procédé selon l'invention.
- [0019] La [Fig.3] est une représentation tridimensionnelle d'un maillage de discrétisation pour une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion, utilisé dans le procédé de l'invention.
- [0020] La [Fig.4] est un bloc-diagramme montrant des blocs fonctionnels du procédé selon l'invention.
- [0021] La [Fig.5] est une vue plane de face du maillage de discrétisation de la [Fig.3] montrant les rayons de courbure distincts, pris en compte par le procédé de l'invention, de mailles arrondies distantes dans une même couche de l'enroulement de couches en spirale d'une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion.
- [0022] La [Fig.6] est une représentation schématique d'un ensemble formé d'une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion et d'une plaque de refroidissement.
- [0023] La [Fig.7] montre, à titre d'exemple, une courbe de courant de charge/décharge et une courbe correspondante d'un gradient thermique estimé dans l'ensemble de la [Fig.6].
- [0024] En référence aux Figs.2 à 5, il est maintenant décrit un mode de réalisation particulier du procédé selon l'invention. Dans cet exemple de réalisation, le procédé est mis en œuvre dans un véhicule électrifié sous la forme d'un véhicule tout électrique VE montré à la [Fig.2]. Le véhicule VE comprend une chaîne de traction électrique intégrant un groupe motopropulseur électrique eGMP. Le groupe motopropulseur électrique eGMP est alimenté en énergie par un pack batterie haute tension BAT\_HV, à travers un convertisseur électrique réversible de type DC/AC (non représenté).
- [0025] Le pack batterie BAT\_HV comprend ici une pluralité de cellules de stockage électrique prismatique lithium-ion MP intégrées typiquement dans des boîtiers modulaires parallélépipédiques, qui stockent l'énergie électrique, ainsi que des bus conducteurs de connexion électrique des cellules et un système de gestion thermique

(non représentés). Le pack batterie BAT\_HV est géré par un calculateur BMS.

[0026] Le calculateur BMS est relié à un réseau de communication de données eCAN, typiquement de type « CAN », du véhicule et héberge des modules logiciels embarqués qui réalisent différentes fonctions de gestion et de mesure pour le pack batterie BAT\_HV, comme par exemple une estimation d'un état de charge dit « SOC » (pour « State Of Charge » en anglais) et une estimation d'un état de santé dit « SOH » (pour « State Of Health » en anglais).

[0027] La mise en œuvre du procédé selon l'invention fait appel à un module logiciel embarqué MOD\_SW qui est hébergé ici dans le calculateur BMS susmentionnée du véhicule. Comme représenté à la [Fig.2], le module logiciel MOD\_SW est implanté dans une mémoire MEM du calculateur BMS. Le calculateur BMS peut coopérer, sous la supervision du module logiciel MOD\_SW, avec un ou plusieurs autres calculateurs du véhicule pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention, en particulier ici le calculateur eVCU qui est le calculateur superviseur de la chaîne de traction électrique du véhicule. Le module logiciel MOD\_SW autorise la mise en œuvre du procédé selon l'invention par l'exécution d'instructions de code de programme par un processeur (non représenté) du calculateur BMS.

[0028] Comme montré schématiquement à la [Fig.2], pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention, le module logiciel MOD\_SW exploite différentes informations INF\_MD, détaillées plus bas, qui sont typiquement déjà disponibles dans le calculateur BMS, obtenues en provenance d'un autre calculateur, comme le calculateur eVCU, et/ou fournies par des capteurs de mesure du pack batterie BAT\_HV. Le module logiciel MOD\_SW délivre en sortie des informations de distribution spatiale tridimensionnelle de température D\_T, de gradient thermique GD et d'alerte AL.

[0029] A la [Fig.3], un exemple d'un maillage de discrétisation MD utilisé par le procédé de l'invention pour une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion MP est représenté en trois dimensions (3D) dans un repère spatial orthogonal (X, Y, Z).

[0030] Comme visible à la [Fig.3], le maillage de discrétisation MD comprend une pluralité de mailles parallélépipédiques modélisant une partie centrale parallélépipédique PC de l'enroulement de couches en spirale et une pluralité des mailles arrondies modélisant des premier et deuxième flancs latéraux arrondis distants FG et FD de l'enroulement de couches en spirale.

[0031] Dans l'exemple représenté, la cellule MP est formée d'un enroulement en spirale de quatre couches CC1 à CC4. Le maillage MD comprend quatre tranches T1 à T4 de même hauteur suivant l'axe Z. Dans chaque tranche T1, T2, T3 ou T4, les couches sont représentées chacune par quatre mailles adjacentes correspondantes. Avec les quatre tranches, une couche complète est donc discrétisée en 4x4 mailles.

[0032] Ainsi, par exemple, comme illustrée à la [Fig.3], dans la tranche T1, la couche CC4

est discrétisée ici en quatre mailles  $M_{41}$ ,  $M_{42}$ ,  $M_{43}$  et  $M_{44}$ . Les mailles  $M_{41}$  et  $M_{43}$  ont des formes géométriques parallélépipédiques. Les mailles  $M_{42}$  et  $M_{44}$  ont des formes géométriques arrondies avec des rayons de courbures respectifs distincts  $r_{\max}$  et  $r_{\min}$ , pour représenter fidèlement l'enroulement en spirale d'une couche sur l'autre. Le rayon de courbure  $r_{\max}$  de la maille  $M_{42}$  est supérieur à celui  $r_{\min}$  de la maille  $M_{44}$ . Le volume de la maille  $M_{42}$  est donc supérieure à celui de la maille  $M_{44}$ .

- [0033] Chacune des couches CC1 à CC4 est formée d'une pluralité de sous-couches, typiquement huit couches, représentées schématiquement dans l'agrandissement AG de la [Fig.3]. Ces sous-couches correspondent à un empilement de feuilles ayant des paramètres physico-chimiques et des caractéristiques thermo-physiques différentes, à savoir notamment, des matériaux, des épaisseurs, des densités, des capacités thermiques et des conductivités thermiques différentes. Ces sous-couches correspondent notamment à une feuille de collecteur en aluminium, une feuille de collecteur en cuivre, deux feuilles de séparateur, deux feuilles d'anode et deux feuilles de cathode.
- [0034] Le processus de traitement mis en œuvre dans le procédé selon l'invention est maintenant décrit ci-dessous en référence plus particulièrement à la [Fig.4] et à la [Fig.5].
- [0035] Comme représenté schématiquement à la [Fig.4], le processus de traitement comprend essentiellement quatre blocs fonctionnels B1, B2 à B4. Ces blocs fonctionnels B1 à B4 sont respectivement un bloc d'acquisition de données, un bloc de calcul de distribution spatiale thermique, un bloc d'estimation de gradient thermique et un bloc de restitution de résultats d'estimation et d'alerte.
- [0036] Le bloc fonctionnel B1 a pour fonction d'acquérir et stocker différentes informations nécessaires à la mise en œuvre du procédé de l'invention, comme les informations INF\_MD susmentionnées. Ces informations INF\_MD comprennent notamment des données de caractéristiques géométriques de l'enroulement de couches en spirale de la cellule MP, des données des caractéristiques thermo-physiques susmentionnées des sous-couches, des données de capacité et puissance électriques, des données de courant de charge/décharge et de tension de la cellule MP, des données d'état de charge « SOC » et d'état de santé « SOH », des données aux limites comme des températures mesurées et/ou estimées de surfaces de contact avec un système de refroidissement, l'air ambiant environnant, etc., et/ou d'autres données, en fonction de l'application. Des données fixes de caractéristiques géométriques, thermo-physiques et autres sont acquises et mémorisées préalablement. Les données variables (courant, tension, température du système de refroidissement, etc.) sont typiquement acquises en temps réel pendant le déroulement du processus de traitement.
- [0037] Le bloc de calcul de distribution spatiale thermique B2 fait appel essentiellement à

quatre fonctions principales de calcul F1 à F4. Le bloc B2 délivre en sortie les informations susmentionnées de distribution spatiale tridimensionnelle de température  $D_T$ .

- [0038] La fonction F1 utilise l'équation de la chaleur de Fourier EQ1 et la méthode dite « des volumes finis » pour les calculs de température dans les différentes mailles. Les calculs sont effectués dans un repère tridimensionnel montré à la [Fig.5] ayant un axe axial (coordonnée  $l$ ), un axe radial (coordonnée  $r$ ) et un axe ortho-radial (coordonnée  $z$ ). Dans l'équation EQ1, la variable  $T_{ij}$  représente la température dans la maille  $M_{ij}$ ,  $\rho_{ij}$  la densité de la maille  $M_{ij}$  et  $C_{ij}$  sa capacité thermique massique,  $Q_{ij}$  la chaleur totale générée par la maille  $M_{ij}$  et  $V_{ij}$  son volume, et  $\lambda_r$ ,  $\lambda_l$  et  $\lambda_z$  les conductivités thermiques dans les trois axes considérés et  $S_r$ ,  $S_l$  et  $S_z$  les surfaces de contact entre mailles dans les trois axes considérés.
- [0039] La fonction F2 utilise les équations EQ2 et EQ3 pour calculer respectivement la densité  $\rho_{ij}$  de la maille  $M_{ij}$  et sa capacité thermique massique  $C_{ij}$ , à partir des caractéristiques thermo-physiques des sous-couches susmentionnées. Dans les équations EQ2 et EQ4, pour la sous-couche considérée,  $V_i$  représente le volume de la sous-couche dans la maille  $M_{ij}$ ,  $\rho_{ij}$  sa densité,  $M_i$  sa masse et  $C_{pi}$  sa capacité thermique.
- [0040] La fonction F3 est chargée du calcul des surfaces de contact entre les mailles et de leurs volumes.
- [0041] En référence aussi à la [Fig.5], le calcul pour les mailles arrondies  $M_{i2}$ ,  $M_{i4}$ , est détaillé et fait appel aux équations EQ4 à EQ6 d'une sous-fonction F30. Pour les mailles parallélépipédiques  $M_{i1}$ ,  $M_{i3}$ , le calcul n'est pas détaillé et est réalisé par une sous-fonction F31.
- [0042] Les équations EQ4 donnent les rayons de courbure des mailles arrondies  $M_{i2}$ ,  $M_{i4}$ , pour une couche  $i$ ,  $i$  étant le numéro de la couche sous la forme d'un entier croissant depuis la couche centrale jusqu'à la couche externe de l'enroulement de couches en spirale.
- [0043] Dans l'équation EQ4,  $r_{\max_{i-1/i}}$ ,  $r_{\max_{i/i+1}}$ , et  $r_{\min_{i-1/i}}$ ,  $r_{\min_{i/i+1}}$ , représentent respectivement les petits et grands rayons pour les deux mailles arrondies  $M_{i2}$  et  $M_{i4}$  de la couche  $i$ , et  $r_{\max_{0/i}}$  et  $r_{\min_{0/i}}$  les petits rayons pour les deux mailles arrondies  $M_{12}$  et  $M_{14}$  de la première couche centrale  $i=1$ , sachant que  $d$  et  $e$  sont respectivement l'épaisseur de la couche  $i$  et l'épaisseur d'un espace central creux de l'enroulement.
- [0044] Les équations EQ5 sont utilisées pour calculer les surfaces de contact entre mailles  $S_r$ ,  $S_l$  et  $S_z$ , dans les trois axes considérés, pour les mailles arrondies  $M_{i2}$  et  $M_{i4}$  de la couche  $i$ , avec  $dz$  étant la hauteur de la maille. Les volumes  $V_{ij}$  pour les mailles arrondies  $M_{i2}$  et  $M_{i4}$  sont données par les équations EQ6.
- [0045] La fonction F4 est chargée de calculer la chaleur totale  $Q_{ij}$  produite dans la maille considérée  $M_{ij}$ . Un modèle électrique est utilisé ici pour évaluer la production de



chaleur.

- [0046] Le bloc B3 reçoit les informations de distribution spatiale tridimensionnelle de température D\_T fournit par le bloc B2 et estime en temps réel et en trois dimensions (3D) un ou plusieurs gradients thermiques GD, selon le besoin et/ou l'application. Les informations de distribution spatiale de température D\_T et de gradient thermique GD sont délivrées en entrée au bloc B4.
- [0047] Le bloc B4 est chargé de la restitution des informations estimées D\_T et GD à un ou plusieurs systèmes destinataires et de la mise en œuvre d'une ou plusieurs stratégies préprogrammées d'alertes AL qui sont basées sur l'exploitation des informations D\_T, GD. Selon l'application, les informations D\_T, GD et AL seront destinées à une ou plusieurs stratégies de pilotage de système (système de refroidissement de batterie, système de gestion de batterie, groupe motopropulseur électrique, borne de recharge électrique ou autres), à un système de maintenance préventive ou autres.
- [0048] Des essais et simulations ont été réalisés par l'entité inventive et ont permis de vérifier la précision des estimations obtenues grâce au procédé de l'invention.
- [0049] En référence à la [Fig.6] et à la [Fig.7], à titre illustratif, il a été réalisé une simulation d'estimation d'un gradient thermique GD dans une cellule MP montée sur une plaque de refroidissement RE. Le gradient thermique GD est estimé pour des conditions aux limites données et un courant de charge/décharge I<sub>c</sub> ayant un profil spécifique.
- [0050] Le profil du courant I<sub>c</sub> montré à la [Fig.7] a été déterminé de façon à étudier l'effet de celui-ci sur le gradient thermique GD pendant la charge et la décharge de la cellule MP.
- [0051] La cellule MP est soumise à une conduction thermique par une face inférieure en contact avec la plaque de refroidissement RE. Le gradient thermique GD considéré ici est celui entre une section inférieure de la cellule MP proche de la plaque RE et une section supérieure distante de la cellule MP.
- [0052] Pour cette simulation, la température de l'air ambiant est fixée à 25°C et la température de refroidissement est réglée à 30°C.
- [0053] La [Fig.7] montre le gradient thermique GD observé dans la cellule MP pendant une phase de décharge DCH et une phase de recharge ultérieure CH. Le gradient thermique GD atteint GD = 0,7 °C environ pendant la phase de charge CH et est plus élevé que celui observé GD = 0,2 °C pendant la phase de décharge DCH. Cela est dû principalement au fait que le courant I<sub>c</sub> est plus important pendant la phase de recharge CH, à savoir, de 60 A environ ici alors qu'il n'est que de 20 A environ pendant la phase de décharge DCH.
- [0054] Cette simulation fait apparaître que la différence de température entre les sections supérieure et inférieure de la cellule MP augmente sensiblement à des taux de charge élevés, en particulier lorsque la température de la plaque de refroidissement est basse.

Le procédé de l'invention en procurant une estimation précise des gradients thermiques autorise une gestion thermique efficace de la cellule MP, de façon à maintenir les performances de celle-ci et à répondre aux exigences sécuritaires.

[0055] Le procédé de l'invention, contrairement aux procédés de l'état de la technique basés sur des modèles complexes, est frugal en ressources de calcul et peut être mis en œuvre dans le système de gestion de batterie d'un véhicule électrifié. Le maillage utilisé dans le procédé de l'invention offre l'avantage d'être paramétrique, ce qui le rend adaptable à différents enroulements de couches en spirale des cellules prismatiques de type lithium-ion. Il permet un enroulement des couches élémentaires les unes sur les autres, facilitant ainsi le passage de la chaleur d'une couche à une autre. Par ailleurs, le maillage du procédé de l'invention est flexible et permet de choisir le nombre de mailles selon trois axes (axe axial, axe radial et ortho-radial), ce qui apporte la possibilité d'optimiser le temps de simulation pour un suivi en temps réel de l'évolution du gradient thermique. On notera aussi que les paramètres physico-chimiques des couches élémentaires, ainsi que les paramètres du modèle électrothermique, peuvent être calculés automatiquement par le processus.

[0056] L'invention ne se limite pas au mode de réalisation particulier qui a été décrit ici à titre d'exemple. L'homme du métier, selon les applications de l'invention, pourra apporter différentes modifications et variantes entrant dans le champ de protection de l'invention.

## Revendications

- [Revendication 1] Procédé d'estimation de la température dans une cellule de stockage électrique prismatique de type lithium-ion (MP) comprenant une étape d'acquisition de données (B1), une étape d'estimation d'une distribution spatiale thermique (B2) dans ladite cellule de stockage électrique prismatique (MP) et une étape de calcul de gradient thermique (B3) dans ladite cellule de stockage électrique prismatique (MP) à partir de ladite distribution spatiale thermique, ladite étape d'estimation de distribution spatiale thermique (B2) comprenant des calculs (F1) basés sur une application de l'équation de la chaleur de Fourier, avec la méthode dite « des volumes finis » et un maillage de discrétisation prédéterminé (MD) modélisant un enroulement de couches en spirale dit « jelly roll » de ladite cellule de stockage électrique prismatique (MP), ledit maillage de discrétisation (MD) comprenant une pluralité de mailles parallélépipédiques ( $M_{i1}$ ,  $M_{i3}$ ) modélisant une partie centrale (PC) dudit enroulement et une autre pluralité des mailles arrondies ( $M_{i2}$ ,  $M_{i4}$ ) modélisant des premier et deuxième flancs latéraux arrondis distants (FG, FD) dudit enroulement, caractérisé en ce que lesdites mailles arrondies ( $M_{i2}$ ) modélisant ledit premier flanc (FG) et lesdites mailles arrondies ( $M_{i4}$ ) modélisant ledit deuxième flanc (FD) ont des rayons de courbure différents, une maille arrondie ( $M_{i2}$ ) dudit premier flanc (FG) ayant, dans une même couche (i) dudit enroulement, un rayon de courbure ( $r_{\max}$ ) supérieur à celui ( $r_{\min}$ ) d'une maille arrondie correspondante ( $M_{i4}$ ) dudit deuxième flanc (FD), de façon à modéliser fidèlement l'enroulement en spirale d'une couche sur l'autre.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite étape de calcul de gradient thermique (B3) comprend des calculs tridimensionnels en temps réel, à partir de ladite distribution spatiale thermique, pour estimer et suivre une évolution d'un ou plusieurs gradients thermiques (GD) de ladite cellule de stockage électrique prismatique (MP) dans un espace à trois dimensions.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ladite étape d'estimation de distribution spatiale thermique (B2) comprend une prise en compte automatique de paramètres physico-chimiques et de caractéristiques thermo-physiques (F2) desdites couches.
- [Revendication 4] Calculateur (BMS) caractérisé en ce qu'il comprend une mémoire (MEM) stockant des instructions de programme (MOD\_SW) pour la

mise en œuvre du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3.

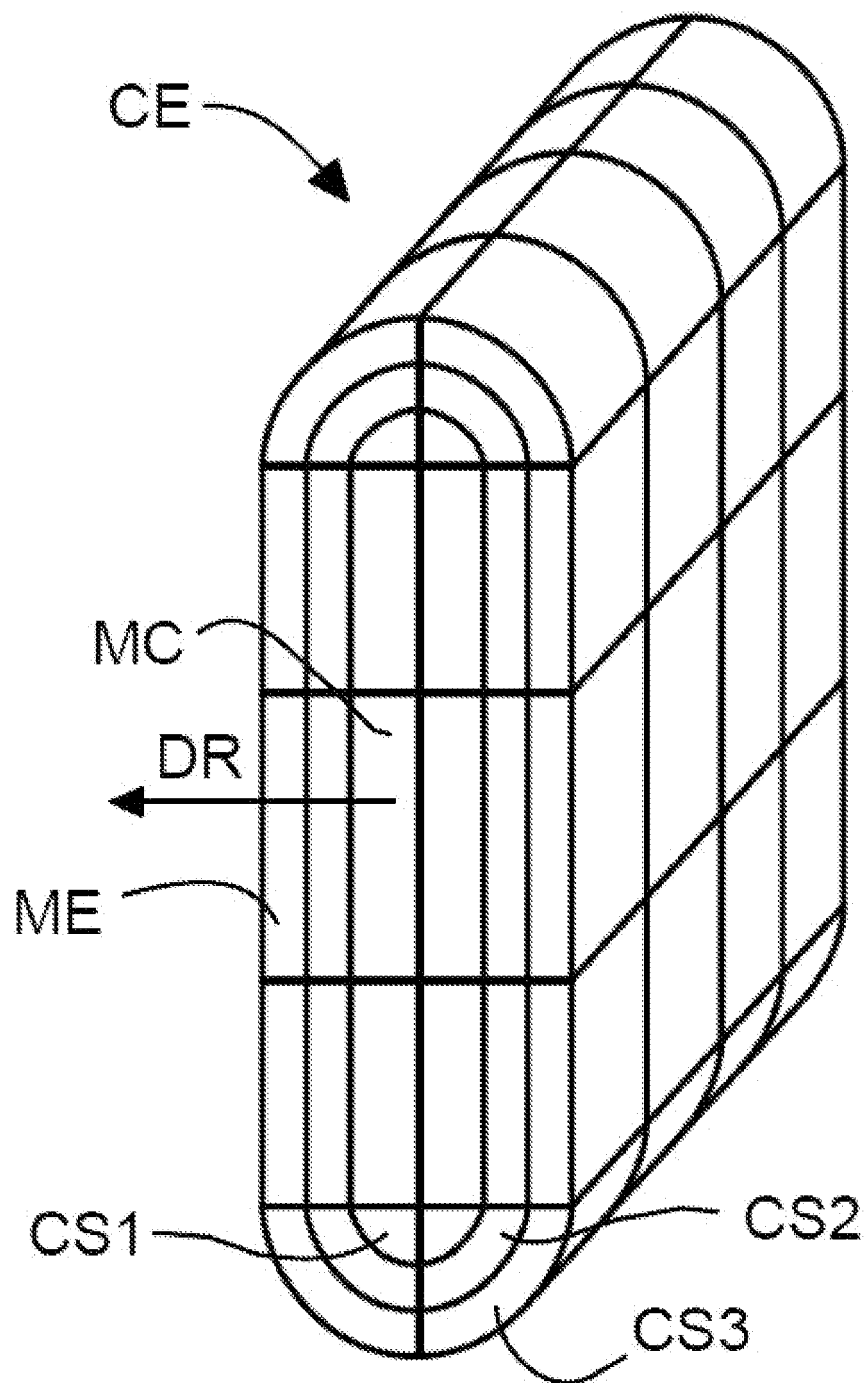
[Revendication 5] Ensemble d'une batterie électrique (BAT\_HV) comprenant une pluralité de cellules de stockage électrique prismatique de type lithium-ion (MP) et d'un calculateur, intégré dans un véhicule (VE), caractérisé en ce que ledit calculateur est un calculateur (BMS) selon la revendication 4.

[Revendication 6] Ensemble selon la revendication 5, intégré dans un véhicule électrifié (VE), caractérisé en ce que ladite batterie électrique est une batterie électrique de traction (BAT\_HV) dudit véhicule électrifié (VE).

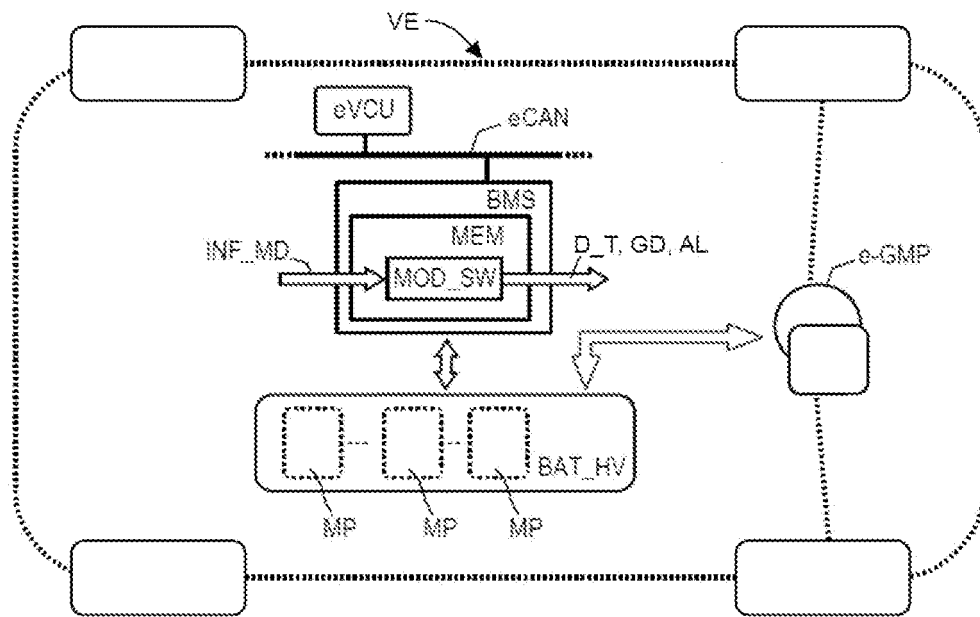
[Revendication 7] Ensemble selon la revendication 5 ou 6, caractérisé en ce que ledit calculateur est un calculateur de gestion de batterie du type dit « BMS ».

[Revendication 8] Véhicule (VE) caractérisé en ce qu'il comprend un ensemble (BAT\_HV, BMS) selon l'une quelconque des revendications 5 à 7.

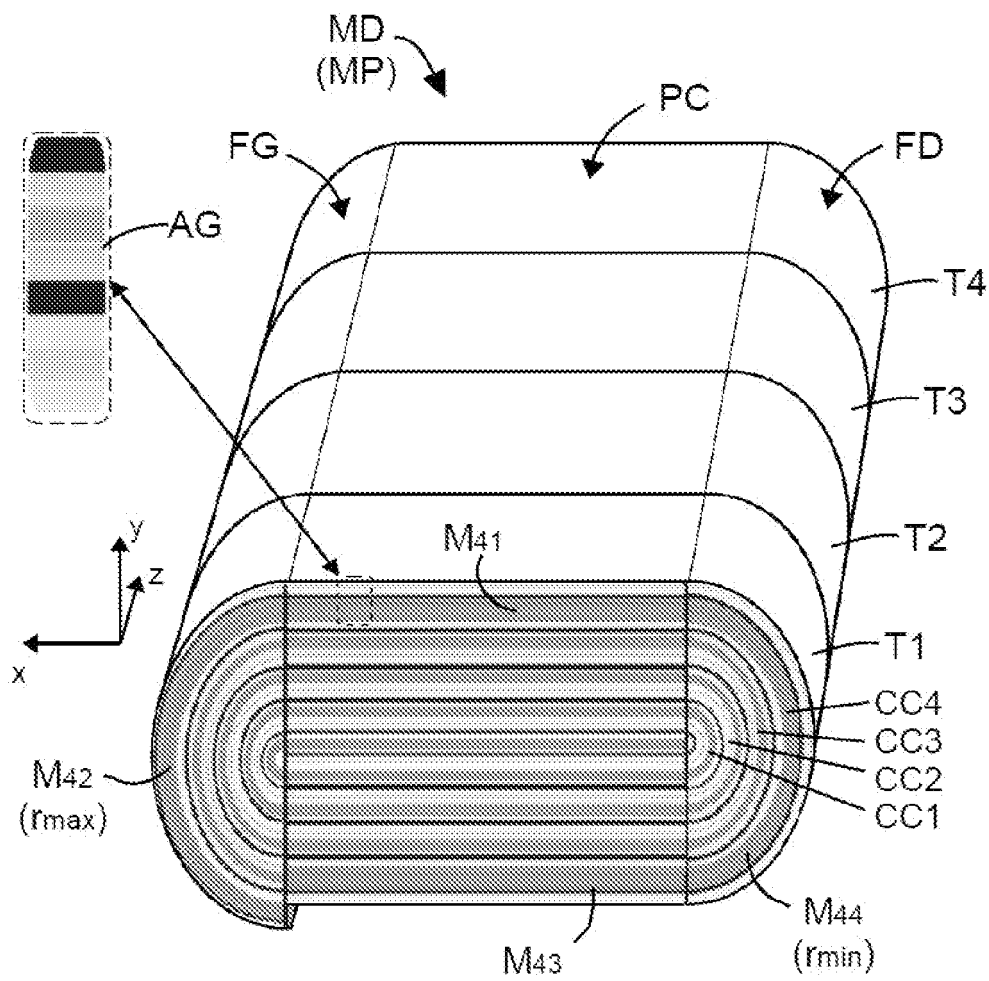
[Fig. 1]



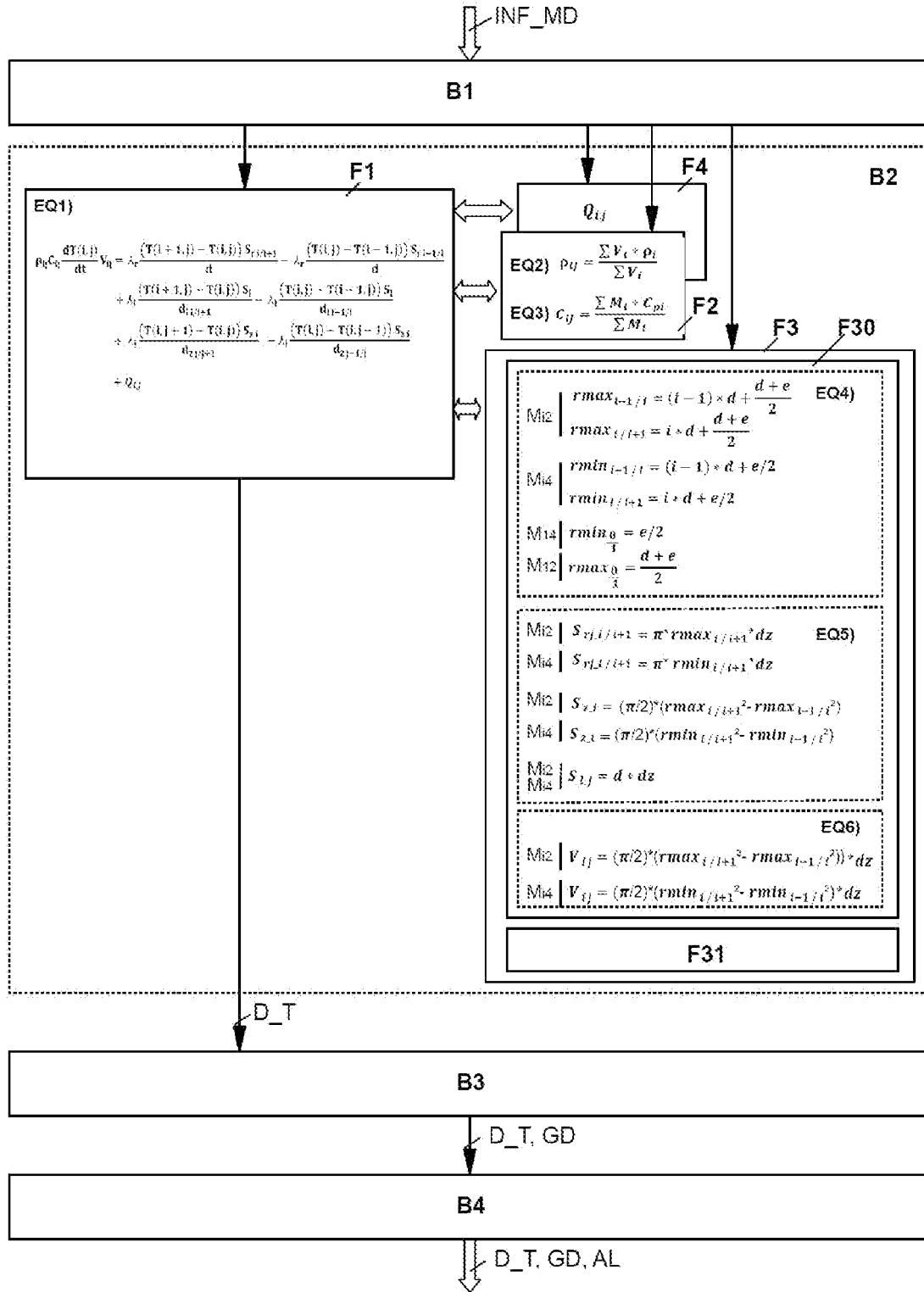
[Fig. 2]



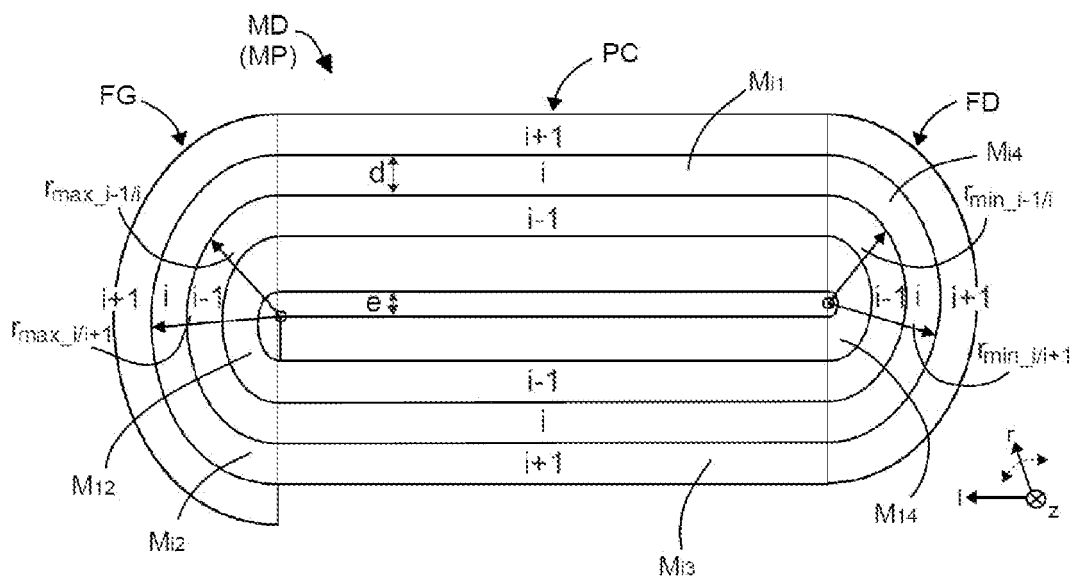
[Fig. 3]



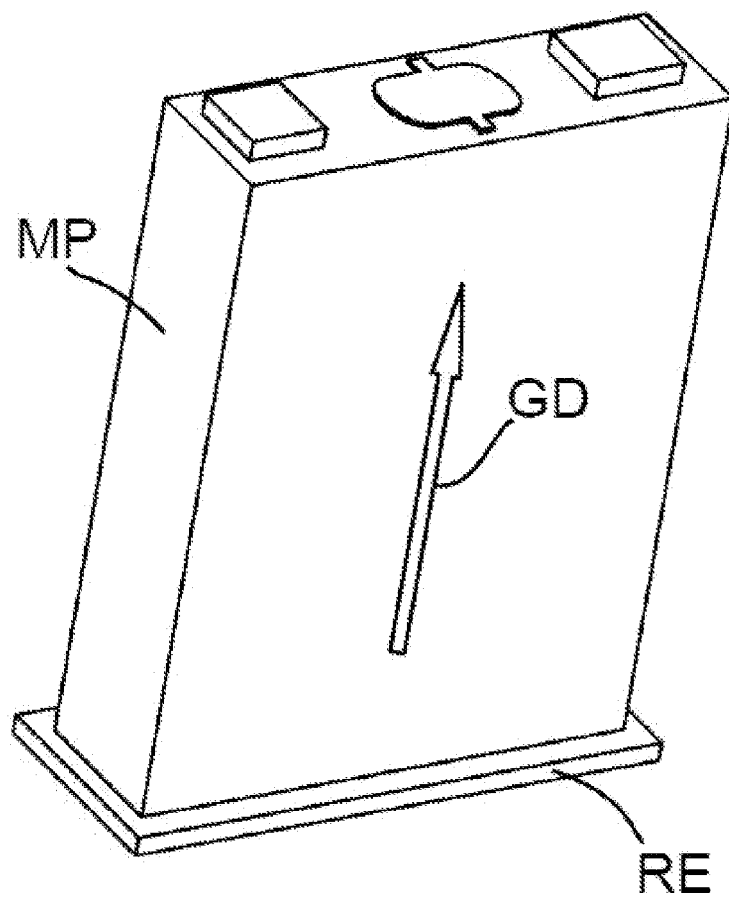
[Fig. 4]



[Fig. 5]

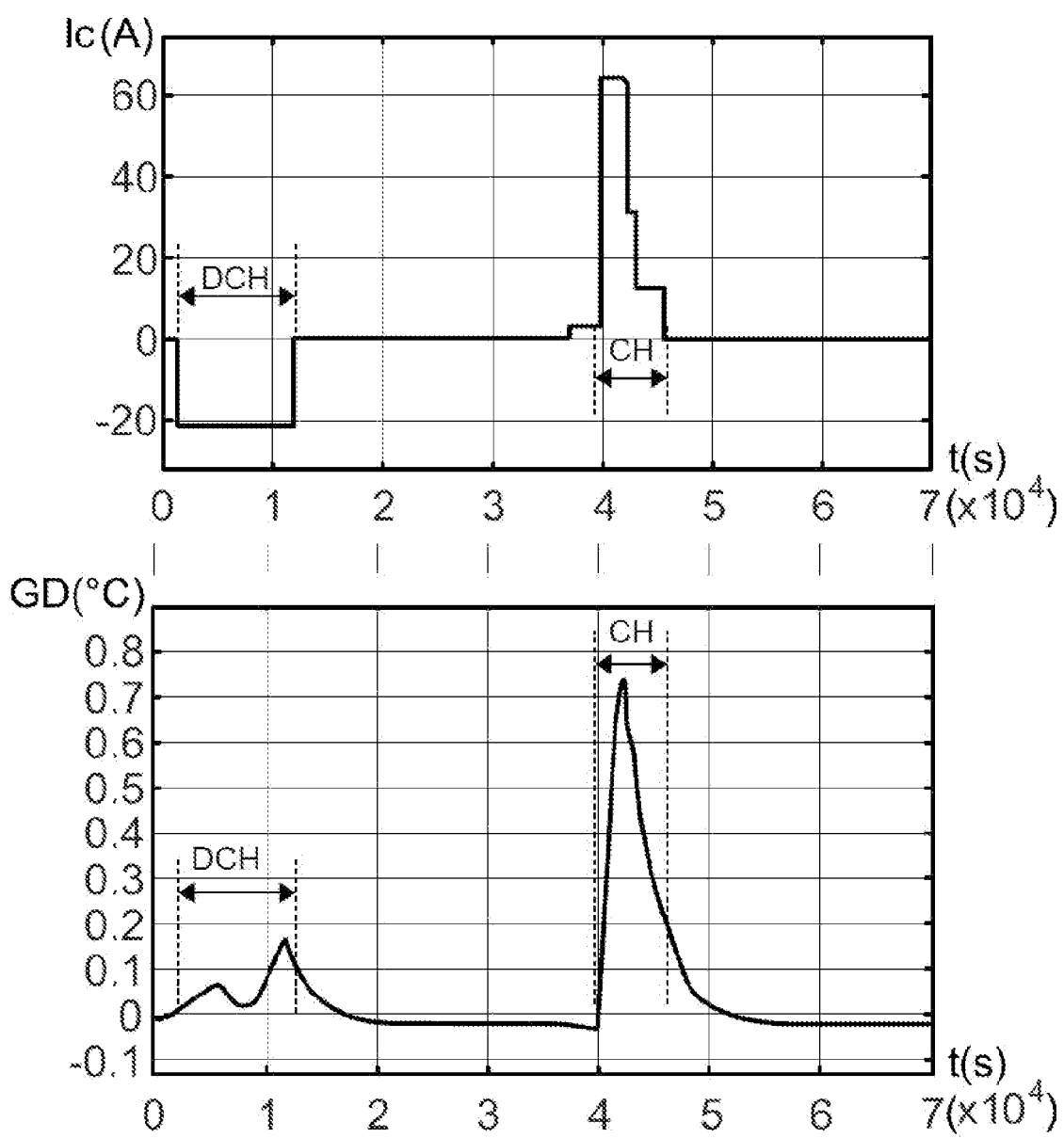


[Fig. 6]





[Fig. 7]



## RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 925768  
FR 2312509

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Revendication(s)<br>concernée(s)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Classement attribué<br>à l'invention par l'INPI             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                              | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                             |
| Y                                                                                                                                                                                                                                      | MADAOUÏ SAÏD ET AL: "A detailed<br>Electro-thermal model of an NMC<br>lithium-ion prismatic battery cell",<br>2023 IEEE 97TH VEHICULAR TECHNOLOGY<br>CONFERENCE (VTC2023-SPRING), IEEE,<br>20 juin 2023 (2023-06-20), pages 1-5,<br>XP034397087,<br>DOI:<br>10.1109/VTC2023-SPRING57618.2023.10199856<br>[extrait le 2023-08-15]<br>* colonne 3, ligne 15 - colonne 9, ligne<br>5; figures 1,7 *                                                                                                             | 1-8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | G01R 17/00                                                  |
| Y,D                                                                                                                                                                                                                                    | MATTHIAS FLECKENSTEIN ET AL: "Current<br>density and state of charge<br>inhomogeneities in Li-ion battery cells<br>with LiFePO <sub>4</sub> cathode material due to<br>temperature gradients",<br>JOURNAL OF POWER SOURCES, ELSEVIER,<br>AMSTERDAM, NL,<br>vol. 196, no. 10,<br>16 janvier 2011 (2011-01-16), pages<br>4769-4778, XP028185657,<br>ISSN: 0378-7753, DOI:<br>10.1016/J.JPOWSOUR.2011.01.043<br>[extrait le 2011-01-26]<br>* page 4772, colonne 1, ligne 33 - colonne<br>2, ligne 3; figure 6 * | 1-8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | DOMAINES TECHNIQUES<br>RECHERCHÉS (IPC)<br><br>H01M<br>B60L |
| Y                                                                                                                                                                                                                                      | US 2023/093142 A1 (GUO BANGJUN [CN] ET AL)<br>23 mars 2023 (2023-03-23)<br>* alinéa [0105]; figures 3,4 *                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 5-8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                             |
| Date d'achèvement de la recherche                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Examineur                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                             |
| 30 mai 2024                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Berkus, Frank                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                             |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | T : théorie ou principe à la base de l'invention<br>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure<br>à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date<br>de dépôt ou qu'à une date postérieure.<br>D : cité dans la demande<br>L : cité pour d'autres raisons<br>.....<br>& : membre de la même famille, document correspondant |                                                             |
| X : particulièrement pertinent à lui seul<br>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un<br>autre document de la même catégorie<br>A : arrière-plan technologique<br>O : divulgation non-écrite<br>P : document intercalaire |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                             |

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**  
**RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2312509 FA 925768**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 30 - 05 - 2024

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |
|-------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| US 2023093142 A1                                | 23 - 03 - 2023         | CN 113420471 A                          | 21 - 09 - 2021         |
|                                                 |                        | US 2023093142 A1                        | 23 - 03 - 2023         |
|                                                 |                        | WO 2022253063 A1                        | 08 - 12 - 2022         |
| -----                                           |                        |                                         |                        |