

⑤④ Procédé assisté par ordinateur de conception d'une électrode négative et dispositifs associés.

②② Date de dépôt : 12.05.20.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *SAFT Société par actions simplifiée
à associé unique* — FR.

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 19.11.21 Bulletin 21/46.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 29.12.23 Bulletin 23/52.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑦② Inventeur(s) : DESPREZ Philippe et BIENSAN
Philippe.

⑦③ Titulaire(s) : *SAFT Société par actions simplifiée à
associé unique.*

⑦④ Mandataire(s) : Lavoix.



Description

Titre de l'invention : Procédé assisté par ordinateur de conception d'une électrode négative et dispositifs associés

- [0001] La présente invention concerne un procédé de conception d'une électrode négative d'un élément électrochimique. L'invention porte également sur des dispositifs associés, à savoir une électrode négative, un élément électrochimique, une batterie, un produit programme d'ordinateur, un support lisible d'informations et un ensemble de conception.
- [0002] Dans le domaine des véhicules électriques et hybrides, il est utilisé des éléments de stockage de l'énergie, et plus précisément des accumulateurs de type lithium. Cette utilisation exploite les excellentes densités énergétique et volumique des batteries rechargeables lithium-ion.
- [0003] Le fonctionnement de telles batteries est basé sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive et une électrode négative séparée par un séparateur poreux, le tout imbibé par un électrolyte.
- [0004] Du fait des normes appliquées dans le cadre des véhicules hybrides et électriques, il est souhaitable que les batteries présentent en fonctionnement des bonnes propriétés tout au long du cycle de vie de la batterie.
- [0005] La réponse électrique d'une batterie d'énergie est difficile à prédire parce qu'elle dépend à la fois d'une multitude de paramètres internes et des sollicitations externes.
- [0006] Les paramètres internes d'une cellule de batterie dépendent de la composition et de la géométrie de chaque élément la constituant (électrodes, électrolyte ou collecteurs) et des interactions entre les éléments (réactions chimiques, dissolutions, transferts thermiques ou efforts mécaniques). Les sollicitations externes, typiquement le courant et la température viennent altérer chaque paramètre interne.
- [0007] Ce qui rend encore plus difficile la connaissance des batteries est la dégradation de leurs caractéristiques au cours du temps. Cette dégradation est connue sous le nom de vieillissement et constitue un des principaux inconvénients de ce type de système de stockage d'énergie. Le vieillissement des batteries repose sur des phénomènes physico-chimiques parasites, c'est-à-dire des transformations qui n'ont pas pour but la conversion d'énergie et qui sont inévitables. Le vieillissement des batteries peut être plus ou moins rapide en fonction du type d'utilisation et peut engendrer des problèmes de sécurité.
- [0008] Pour prendre en compte un tel vieillissement, il est connu de contrôler la charge de la batterie de manière spécifique.
- [0009] En particulier, le document EP 3 254 885 A1 propose un procédé de détermination

de caractéristiques physiques de batteries embarquées dans un véhicule électrique, ledit véhicule étant destiné à effectuer au moins une mission. Le procédé comporte une étape préalable de saisie de paramètres physiques caractérisant l'au moins une mission que le véhicule va effectuer prochainement, et une étape de sélection de caractéristiques physiques parmi un ensemble de caractéristiques en fonction de l'au moins une mission que ledit véhicule va effectuer prochainement.

- [0010] Selon un premier mode de réalisation, l'étape de sélection détermine un profil de charge de la batterie pour la charger à partir d'un état quasi déchargé, ledit profil de charge étant déterminé en fonction de la prochaine mission à effectuer.
- [0011] Selon un autre mode de réalisation, l'étape de sélection détermine le nombre de cellules de la batterie et la capacité globale de la batterie en fonction de l'ensemble des missions que ledit véhicule doit effectuer.
- [0012] Toutefois, chacun des modes de réalisation du document EP 3 254 885 A1 conduit à fabriquer des batteries dont le système de contrôle est complexe puisque le système de contrôle est propre à fonctionner selon de multiples modes de fonctionnement pour faire en sorte que la batterie soit adaptée à tous les cas d'usage.
- [0013] Il existe donc un besoin pour un procédé permettant d'obtenir une batterie respectant des contraintes de fonctionnement et qui soit de fabrication plus aisée.
- [0014] La description porte sur un procédé de conception d'une électrode négative d'un élément électrochimique, notamment d'une batterie lithium-ion, le procédé de conception étant mis en œuvre par ordinateur, le procédé comportant une phase d'optimisation des valeurs d'un jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative, pour obtenir un jeu de paramètres optimisé, la phase d'optimisation comportant la fourniture de valeurs initiales pour les paramètres relatifs à l'élément électrochimique, les paramètres relatifs à l'élément électrochimique comprenant les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative. La phase d'optimisation comprend également la fourniture d'une valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique jusqu'à la fin d'un intervalle de temps d'utilisation de l'élément électrochimique, l'intervalle de temps d'utilisation étant supérieur ou égal à un an. La phase d'optimisation comporte aussi au moins une optimisation d'une valeur d'au moins un paramètre parmi le jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative à l'aide d'une technique d'optimisation, les autres paramètres présentant une évolution temporelle fixée, par exemple une valeur constante égale à la valeur initiale du paramètre, la technique d'optimisation comportant l'utilisation d'un modèle de vieillissement associant aux paramètres relatifs à l'élément électrochimique la performance électrique de l'élément électrochimique et la technique d'optimisation étant mise en œuvre sous la contrainte que l'élément électrochimique présente la valeur de performance électrique à respecter jusqu'à la fin de l'intervalle de temps d'utilisation, pour obtenir

une valeur optimisée pour chaque paramètre optimisé, le jeu de paramètres optimisé étant l'ensemble des valeurs finales de chaque paramètre, la valeur finale étant soit la valeur initiale en l'absence d'application de l'optimisation audit paramètre soit la valeur optimisée.

- [0015] Suivant des modes de réalisation particuliers, le procédé de conception comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou suivant toutes les combinaisons techniquement possibles :
- [0016] - au moins un paramètre des autres paramètres est la tension maximale de l'élément électrochimique.
- [0017] - la tension maximale de l'élément électrochimique présente au cours du temps une première valeur puis une deuxième valeur, la deuxième valeur étant strictement supérieure à la première valeur.
- [0018] - les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative sont choisis dans la liste constituée de : la densité du matériau formant l'électrode négative, la fraction de porosité du dépôt formant l'électrode négative, le grammage de l'électrode négative, l'épaisseur de l'électrode négative et la capacité de l'électrode négative.
- [0019] - l'élément électrochimique comporte également une électrode positive, les paramètres relatifs à l'élément électrochimique étant les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative, des paramètres relatifs à l'électrode positive et des paramètres relatifs à l'utilisation de l'élément électrochimique.
- [0020] - le modèle de vieillissement est un modèle selon lequel la performance électrique de l'élément électrochimique est donnée par l'évolution temporelle de l'interface solide-électrolyte.
- [0021] - le paramètre optimisé est l'épaisseur de l'électrode négative.
- [0022] - le procédé comporte, en outre, une phase de fabrication de l'électrode négative présentant les valeurs du jeu de paramètres optimisé.
- [0023] - l'électrode négative est réalisée en graphite ou en un matériau comprenant du graphite et du silicium.
- [0024] - l'électrode positive est réalisée en un matériau comprenant au moins un élément choisi dans la liste constituée des oxydes lithiés de nickel, manganèse et cobalt, des oxydes de lithiés nickel, cobalt et aluminium, du phosphate de fer lithié LiFePO_4 , du phosphate de fer et de manganèse lithié LiFeMnPO_4 .
- [0025] La présente description concerne aussi une électrode négative d'un élément électrochimique, notamment d'une batterie lithium-ion, présentant des paramètres relatifs à l'électrode négative, les paramètres ayant pour valeur la valeur du jeu de paramètres optimisé après mise en œuvre d'un procédé de conception d'une électrode négative tel que précédemment décrit.
- [0026] En outre, la description se rapporte aussi à un dispositif, notamment élément électro-

chimique ou batterie, comportant une électrode négative tel que précédemment décrit.

[0027] La présente description a également pour objet un produit programme d'ordinateur comportant un support lisible d'informations, sur lequel est mémorisé un programme d'ordinateur comprenant des instructions de programme, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données et mettant en œuvre la phase d'optimisation d'un procédé de conception d'une électrode négative d'un élément électrochimique tel que précédemment décrit lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement des données.

[0028] En outre, la description se rapporte aussi à un support lisible d'informations comportant des instructions de programme formant un programme d'ordinateur, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données et mettant en œuvre la phase d'optimisation d'un procédé de conception d'une électrode négative d'un élément électrochimique tel que précédemment décrit lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement de données.

[0029] La présente description a également pour objet un ensemble de conception propre à concevoir une électrode négative d'un élément électrochimique, notamment d'une batterie lithium-ion, l'ensemble de conception comportant un système propre à optimiser des valeurs d'un jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative pour obtenir un jeu de paramètres optimisé en interaction avec un produit programme d'ordinateur. Le système est propre à recevoir des valeurs initiales pour les paramètres relatifs à l'élément électrochimique, les paramètres relatifs à l'élément électrochimique comprenant les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative, à recevoir une valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique jusqu'à la fin d'un intervalle de temps d'utilisation de l'élément électrochimique, l'intervalle de temps d'utilisation étant supérieur ou égal à un an, à optimiser une valeur d'au moins un paramètre parmi le jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative, les autres paramètres présentant une évolution temporelle fixée, par exemple une valeur constante égale à la valeur initiale du paramètre, à l'aide d'une technique d'optimisation, la technique d'optimisation comportant l'utilisation d'un modèle de vieillissement associant aux paramètres relatifs à l'élément électrochimique l'évolution temporelle de la performance électrique de l'élément électrochimique et la technique d'optimisation étant mise en œuvre sous la contrainte que l'élément électrochimique présente la valeur de performance électrique à respecter jusqu'à la fin de l'intervalle de temps d'utilisation, pour obtenir une valeur optimisée pour chaque paramètre optimisé, le jeu de paramètres optimisé étant l'ensemble des valeurs finales de chaque paramètre, la valeur finale étant soit la valeur initiale en l'absence d'application de l'optimisation audit paramètre soit la valeur optimisée. L'ensemble de conception comporte une unité de fabrication propre à fabriquer l'électrode négative présentant les valeurs du jeu de

paramètre optimisé.

- [0030] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description qui suit de modes de réalisation de l'invention, donnée à titre d'exemple uniquement et en référence aux dessins qui sont :
- [0031] - [Fig.1][Fig.1], une représentation schématique d'un ensemble de conception et d'un produit programme d'ordinateur,
- [0032] - [Fig.2][Fig.2], un ordinogramme d'un exemple de mise en œuvre d'un procédé de conception par l'ensemble de conception de la [Fig.1],
- [0033] - [Fig.3][Fig.3], une représentation schématique d'un exemple de batterie,
- [0034] - [Fig.4][Fig.4], un graphe montrant l'évolution de la tension ouverte d'une électrode en graphite/silicium, en décharge, en fonction de la charge de l'élément électrochimique comportant ladite électrode,
- [0035] - [Fig.5][Fig.5], un graphe montrant l'évolution de la tension ouverte d'une cellule électrochimique comportant une électrode oxyde de nickel, manganèse et cobalt en fonction de la charge dudit élément électrochimique,
- [0036] - [Fig.6][Fig.6], une représentation schématique des capacités des électrodes à un instant initial, et
- [0037] - [Fig.7][Fig.7], une représentation schématique des capacités des électrodes à un instant ultérieur correspondant à la fin d'un intervalle de temps d'utilisation des électrodes.
- [0038] Un ensemble de conception 10 et un produit programme d'ordinateur 12 sont représentés sur la [Fig.1].
- [0039] L'interaction entre l'ensemble de conception 10 et le produit programme d'ordinateur 12 permet la mise en œuvre d'un procédé de conception d'une électrode négative. Le procédé de conception est ainsi un procédé mis en œuvre par ordinateur.
- [0040] L'ensemble de conception 10 comporte un système 14 et une unité de fabrication 16.
- [0041] Le système 14 est un ordinateur de bureau. En variante, le système 14 est un ordinateur monté sur un rack, un ordinateur portable, une tablette, un assistant numérique personnel (PDA) ou un smartphone.
- [0042] Dans le cas de la [Fig.1], le système 14 comprend un calculateur 18, une interface utilisateur 20 et un dispositif de communication 22.
- [0043] Le calculateur 18 est un circuit électronique conçu pour manipuler et/ou transformer des données représentées par des quantités électroniques ou physiques dans des registres du système 14 et/ou des mémoires en d'autres données similaires correspondant à des données physiques dans les mémoires de registres ou d'autres types de dispositifs d'affichage, de dispositifs de transmission ou de dispositifs de mémorisation.
- [0044] En tant qu'exemples spécifiques, le calculateur 18 comprend un processeur

monocœur ou multicœurs (tel qu'une unité de traitement centrale (CPU), une unité de traitement graphique (GPU), un microcontrôleur et un processeur de signal numérique (DSP)), un circuit logique programmable (comme un circuit intégré spécifique à une application (ASIC), un réseau de portes programmables *in situ* (FPGA), un dispositif logique programmable (PLD) et des réseaux logiques programmables (PLA)), une machine à états, une porte logique et des composants matériels discrets.

- [0045] Le calculateur 18 comprend une unité de traitement de données 24 adaptée pour traiter des données, notamment en effectuant des calculs, des mémoires 26 adaptées à stocker des données et un lecteur 28 adapté à lire un support lisible par ordinateur.
- [0046] L'interface utilisateur 20 comprend un dispositif d'entrée 30 et un dispositif de sortie 32.
- [0047] Le dispositif d'entrée 30 est un dispositif permettant à l'utilisateur du système 14 de saisir sur le système 14 des informations ou des commandes.
- [0048] Sur la [Fig.1], le dispositif d'entrée 30 est un clavier. En variante, le dispositif d'entrée 30 est un périphérique de pointage (tel qu'une souris, un pavé tactile et une tablette graphique), un dispositif de reconnaissance vocale, un oculomètre ou un dispositif haptique (analyse des mouvements).
- [0049] Le dispositif de sortie 32 est une interface utilisateur graphique, c'est-à-dire une unité d'affichage conçue pour fournir des informations à l'utilisateur du système 14.
- [0050] Sur la [Fig.1], le dispositif de sortie 32 est un écran d'affichage permettant une présentation visuelle de la sortie. Dans d'autres modes de réalisation, le dispositif de sortie 32 est une imprimante, une unité d'affichage augmenté et/ou virtuel, un haut-parleur ou un autre dispositif générateur de son pour présenter la sortie sous forme sonore, une unité produisant des vibrations et/ou des odeurs ou une unité adaptée à produire un signal électrique.
- [0051] Dans un mode de réalisation spécifique, le dispositif d'entrée 30 et le dispositif de sortie 32 sont le même composant formant des interfaces homme-machine, tel qu'un écran interactif.
- [0052] Le dispositif de communication 22 permet une communication unidirectionnelle ou bidirectionnelle entre les composants du système 14. Par exemple, le dispositif de communication 22 est un système de communication par bus ou une interface d'entrée / sortie.
- [0053] La présence du dispositif de communication 22 permet que, dans certains modes de réalisation, les composants du calculateur 18 soient distants les uns des autres.
- [0054] Le produit programme informatique 12 comprend un support lisible par ordinateur 34.
- [0055] Le support lisible par ordinateur 34 est un dispositif tangible lisible par le lecteur 28 du calculateur 18.

- [0056] Notamment, le support lisible par ordinateur 34 n'est pas un signal transitoire en soi, tels que des ondes radio ou d'autres ondes électromagnétiques à propagation libre, telles que des impulsions lumineuses ou des signaux électroniques.
- [0057] Un tel support de stockage lisible par ordinateur 34 est, par exemple, un dispositif de stockage électronique, un dispositif de stockage magnétique, un dispositif de stockage optique, un dispositif de stockage électromagnétique, un dispositif de stockage à semi-conducteur ou toute combinaison de ceux-ci.
- [0058] En tant que liste non exhaustive d'exemples plus spécifiques, le support de stockage lisible par ordinateur 34 est un dispositif codé mécaniquement, tel que des cartes perforées ou des structures en relief dans une gorge, une disquette, un disque dur, une mémoire morte (ROM), une mémoire vive (RAM), une mémoire effaçable programmable en lecture seule (EROM), une mémoire effaçable électriquement et lisible (EEPROM), un disque magnéto-optique, une mémoire vive statique (SRAM), un disque compact (CD-ROM), un disque numérique polyvalent (DVD), une clé USB, un disque souple, une mémoire flash, un disque à semi-conducteur (SSD) ou une carte PC telle qu'une carte mémoire PCMCIA.
- [0059] Un programme d'ordinateur est stocké sur le support de stockage lisible par ordinateur 34. Le programme d'ordinateur comprend une ou plusieurs séquences d'instructions de programme mémorisées.
- [0060] De telles instructions de programme, lorsqu'elles sont exécutées par l'unité de traitement de données 24, entraînent l'exécution d'étapes du procédé de conception.
- [0061] Par exemple, la forme des instructions de programme est une forme de code source, une forme exécutable par ordinateur ou toute forme intermédiaire entre un code source et une forme exécutable par ordinateur, telle que la forme résultant de la conversion du code source via un interpréteur, un assembleur, un compilateur, un éditeur de liens ou un localisateur. En variante, les instructions de programme sont un microcode, des instructions firmware, des données de définition d'état, des données de configuration pour circuit intégré (par exemple du VHDL) ou un code objet.
- [0062] Les instructions de programme sont écrites dans n'importe quelle combinaison d'un ou de plusieurs langages, par exemple un langage de programmation orienté objet (FORTRAN, C++, JAVA, HTML), un langage de programmation procédural (langage C par exemple).
- [0063] Alternativement, les instructions du programme sont téléchargées depuis une source externe via un réseau, comme c'est notamment le cas pour les applications. Dans ce cas, le produit programme d'ordinateur comprend un support de données lisible par ordinateur sur lequel sont stockées les instructions de programme ou un signal de support de données sur lequel sont codées les instructions de programme.
- [0064] Dans chaque cas, le produit programme d'ordinateur 12 comprend des instructions

qui peuvent être chargées dans l'unité de traitement de données 24 et adaptées pour provoquer l'exécution du procédé de conception lorsqu'elles sont exécutées par l'unité de traitement de données 24. Selon les modes de réalisation, l'exécution est entièrement ou partiellement réalisée soit sur le système 14, c'est-à-dire un ordinateur unique, soit dans un système distribué entre plusieurs ordinateurs (notamment via l'utilisation de l'informatique en nuage).

- [0065] L'unité de fabrication 16 est propre à fabriquer une électrode négative sur la base d'un jeu de paramètres bien choisi.
- [0066] Des exemples de jeu de paramètres correspondants sont donnés dans la suite de la description.
- [0067] Selon une variante, l'unité de fabrication 16 est propre à fabriquer tous les composants d'un dispositif comportant une électrode négative avec des paramètres additionnels relatifs aux autres composants du dispositif.
- [0068] Un exemple de tel dispositif est un élément électrochimique ou une batterie.
- [0069] Le fonctionnement de l'ensemble de conception 10 est maintenant décrit en référence à la [Fig.2] qui est un ordinogramme illustrant un exemple de mise en œuvre du procédé de conception.
- [0070] Le procédé de conception vise à concevoir une électrode négative présentant des propriétés améliorées.
- [0071] Le procédé de conception est mis en œuvre par ordinateur de sorte que le procédé peut être qualifié de procédé assisté par ordinateur. Un tel procédé est souvent désigné sous l'appellation procédé de CAO ou procédé de CAD, l'abréviation de CAO renvoyant à la dénomination française et l'abréviation de CAD renvoyant à la dénomination anglaise de « Computer Aided Design ».
- [0072] Le procédé de conception correspond également à un procédé de mise au point d'une électrode négative.
- [0073] L'électrode négative est destinée à faire partie d'un élément électrochimique d'une batterie 50 telle que représentée de manière très schématique à la [Fig.3].
- [0074] Une batterie est un assemblage de plusieurs éléments électrochimiques.
- [0075] La batterie 50 de la [Fig.3] est une batterie lithium-ion.
- [0076] Dans l'exemple, par commodité, seul un élément électrochimique 52 de la batterie 50 est représenté sachant que le procédé est applicable pour tout nombre d'élément(s) électrochimique(s) 52.
- [0077] Un élément électrochimique permet d'emmagasinier l'énergie électrique fournie par une réaction chimique et de la restituer sous forme de courant.
- [0078] Un élément électrochimique comprend classiquement au moins cinq éléments: une électrode négative, une électrode positive, un séparateur, un électrolyte, ainsi que des collecteurs de courant pour chaque électrode.

- [0079] L'ensemble d'une électrode négative et d'un collecteur de courant forme une anode tandis que l'ensemble d'une électrode positive et d'un collecteur de courant forme une cathode.
- [0080] En outre, l'ensemble de l'électrode négative, de l'électrode positive, du séparateur et de l'électrolyte est souvent dénommé selon l'appellation « cellule électrochimique élémentaire ».
- [0081] Ainsi, comme représenté sur la [Fig.3], l'élément électrochimique 52 comporte une électrode négative 54, un premier collecteur de courant 56, une électrode positive 58, un deuxième collecteur de courant 60 et un séparateur poreux imbibé d'électrolyte 62.
- [0082] L'électrode négative 54 du premier élément électrochimique 52 est l'électrode négative 54 sur laquelle le procédé de conception est utilisé.
- [0083] L'électrode négative 54 de la [Fig.3] est une électrode présentant une tension en circuit ouvert relativement plate en fin de charge.
- [0084] La tension en circuit ouvert est souvent désignée par l'acronyme OCV qui renvoie à la dénomination anglaise de « Open Circuit Voltage ».
- [0085] Dans le cadre du présent exemple, la tension en circuit ouvert OCV est mesurée en déchargeant l'élément électrochimique 52 de 1% à 5% de sa capacité C et en mesurant le potentiel après un temps de repos de 5 heures. Le cycle de décharge et de repos en partant d'un élément électrochimique chargé est reproduit jusqu'à la décharge complète de l'élément électrochimique tout en maintenant la température à 25°C. La variation de la tension en circuit ouvert OCV en fonction de l'état de charge de l'élément électrochimique est ainsi obtenue en reportant les différentes mesures effectuées sur un graphique.
- [0086] Par l'expression « une tension en circuit ouvert relativement plate en fin de charge », il est entendu que la tension en circuit ouvert présente une valeur constante à 30 mV près lorsque la charge de l'électrode négative 54 est comprise entre 70% et 90% de la charge maximale de l'électrode négative 54.
- [0087] Un exemple d'électrode négative 54 présentant une telle propriété est une électrode réalisée en un matériau comportant du graphite et du silicium.
- [0088] Un graphe montrant la variation en fonction de la charge de l'élément électrochimique 52 de la tension en circuit ouvert d'une électrode négative 54 consistant en un mélange de graphite et de silicium est proposé à la [Fig.4] et montre bien qu'une telle électrode présente une tension en circuit ouvert relativement plate en fin de charge.
- [0089] En variante, l'électrode négative 54 est réalisée en graphite.
- [0090] Le premier collecteur de courant 56 est un élément tel qu'un plot, une plaque, une feuille ou autre en un matériau suffisamment conducteur pour assurer le transport électronique, léger, fin, mécaniquement résistant pour servir de substrat à l'électrode

négative 54.

- [0091] Par exemple, le premier collecteur de courant 56 est un feuillet métallique en fer, cuivre, aluminium, nickel, titane ou acier inoxydable.
- [0092] De préférence, le premier collecteur de courant 56 est un feuillet métallique en cuivre.
- [0093] La cathode consiste en un support conducteur utilisé comme deuxième collecteur de courant 60 qui est revêtu d'une couche contenant le matériau actif cathodique et généralement, en outre, un liant et un matériau conducteur électronique.
- [0094] L'électrode positive 58 présente une tension en circuit ouvert ayant une pente en fin de charge.
- [0095] Par l'expression « une tension en circuit ouvert ayant une pente en fin de charge », il est entendu que la tension en circuit ouvert présente une valeur évoluant de plus de 100 millivolts (mV) lorsque la charge de l'élément électrochimique 52 est comprise entre 80% et 100%.
- [0096] Dans ce contexte, 100% correspond à l'état de charge typique de l'élément électrochimique 52 permettant de garantir sa durée de vie dans l'application, par exemple 4,1 Volts (V) à 4,2 V pour des éléments de type Graphite / NCA. L'acronyme NCA désigne des oxydes lithié de nickel, cobalt et aluminium.
- [0097] Un exemple d'électrode positive 58 présentant une telle propriété est une électrode réalisée en un oxyde lithié de nickel, manganèse et cobalt.
- [0098] La [Fig.5] illustre graphiquement un exemple de variation de la tension en circuit ouvert d'une telle électrode positive 58 et montre bien qu'une telle électrode présente une tension en circuit ouvert ayant une pente en fin de charge.
- [0099] En plus des matériaux actifs précités, le matériau de l'électrode positive 58 comporte usuellement également des liants ou des éléments améliorant la conductivité électronique.
- [0100] Le deuxième collecteur de courant 60 est un élément tel qu'un plot, une plaque, une feuille ou autre en un matériau suffisamment conducteur pour assurer le transport électronique, léger, fin, mécaniquement résistant pour servir de substrat à l'électrode positive 58.
- [0101] Par exemple, le deuxième collecteur de courant 60 est un feuillet métallique en fer, cuivre, aluminium, nickel, titane ou acier inoxydable.
- [0102] De préférence, le deuxième collecteur de courant 60 est un feuillet métallique en aluminium.
- [0103] L'électrolyte 62 est composé de différents sels ioniques apportant des ions servant aux réactions de stockage de charges ou faradique comme des sels de lithium, et d'un solvant ou d'un mélange de solvants pour permettre la solubilisation des ions.
- [0104] De préférence, les sels ioniques sont choisis parmi le perchlorate de lithium LiClO_4 ,

l'hexafluorophosphate de lithium LiPF_6 , le tétrafluoroborate de lithium LiBF_4 , le trifluorométhanesulfonate de lithium LiCF_3SO_3 , le bis(fluorosulfonyl)imide de lithium $\text{Li}(\text{FSO}_2)_2\text{N}$ (LiFSI), le trifluorométhanesulfonimide de lithium $\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$ (LiTFSI), le trifluorométhanesulfoneméthide de lithium $\text{LiC}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_3$ (LiTFSM), le bisperfluoroéthylsulfonimide de lithium $\text{LiN}(\text{C}_2\text{F}_5\text{SO}_2)_2$ (LiBETI), le 4,5-dicyano-2-(trifluorométhyl)imidazolidine de lithium (LiTDI), le bis(oxalatoborate) de lithium (LiBOB), le lithium difluorooxalatoborate de lithium (LiDFOB), le tris(pentafluoroéthyl)trifluorophosphate de lithium $\text{LiPF}_3(\text{CF}_2\text{CF}_3)_3$ (LiFAP) et les mélanges des précédents.

- [0105] De préférence, le solvant est un solvant ou un mélange de solvants choisi parmi les solvants organiques usuels notamment les carbonates cycliques saturés, les carbonates cycliques insaturés, les carbonates non cycliques, les esters d'alkyle, comme les formiates, les acétates, les propionates ou les butyrates, les éthers, les lactones comme la gammabutyrolactone, le bioxyde de tétrahydrothiofène, les solvants nitriles, et les mélanges de ceux-ci. Parmi les carbonates cycliques saturés, on peut citer par exemple le carbonate d'éthylène (EC), le carbonate de fluoroéthylène (FEC), le carbonate de propylène (PC), le carbonate de butylène (BC), et les mélanges de ceux-ci. Parmi les carbonates cycliques insaturés, on peut citer par exemple le carbonate de vinylène (VC), ses dérivés et les mélanges de ceux-ci. Parmi les carbonates non cycliques, on peut citer par exemple le carbonate de diméthyle (DMC), le carbonate de diéthyle (DEC), le carbonate de méthyle éthyle (EMC), le carbonate de dipropyle (DPC) et les mélanges de ceux-ci.
- [0106] On peut aussi trouver, en plus faible proportion, l'acétate de méthyle ou le formate de méthyle, l'acétonitrile, le tétrahydrofurane ou encore le gamma-butyrolactone, et des mélanges binaires ou ternaires, voire même quaternaires de ceux-ci, ainsi que des liquides ioniques.
- [0107] L'électrolyte 62 est formé en imprégnant un film avec des pores, le film étant le séparateur. Le séparateur a plusieurs rôles, à savoir isoler les électrodes négative 54 et positive 58 l'une de l'autre, maintenir l'électrolyte 62 tout en lui fournissant un passage de circulation ionique et bloquer le passage du courant électrique en présence d'une température excessive par un bouchage des pores.
- [0108] En référence à la [Fig.2], le procédé de conception comporte deux phases P1 et P2 : une phase de d'optimisation P1 et une phase de fabrication P2.
- [0109] La phase d'optimisation P1 vise à optimiser au moins un paramètre caractérisant l'électrode négative 54.
- [0110] La phase d'optimisation P1 correspond ainsi à une phase de détermination des valeurs d'un jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative 54.
- [0111] Selon l'exemple décrit, la phase d'optimisation P1 comporte une première étape de

fourniture E100, une deuxième étape de fourniture E110 et une étape d'optimisation E120.

- [0112] Lors de la première étape de fourniture E100, il est fourni des valeurs initiales pour les paramètres relatifs à l'élément électrochimique 52.
- [0113] Les paramètres relatifs à l'élément électrochimique 52 sont les paramètres caractérisant (ou relatifs à) chaque composant de l'élément électrochimique 52.
- [0114] Dans le présent cas, les paramètres relatifs à l'élément électrochimique 52 sont les paramètres de l'électrode négative 54, les paramètres de l'électrode positive 56 et les paramètres d'utilisation de l'élément électrochimique 52.
- [0115] Les paramètres d'une électrode considérés pour le procédé d'optimisation sont les paramètres permettant de fabriquer l'électrode. De tels paramètres de fabrication sont appelés dans la suite jeu de paramètres.
- [0116] Les paramètres relatifs à l'élément électrochimique 52 comprennent les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative 54 et les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode positive 56.
- [0117] Les paramètres sont la densité du matériau formant l'électrode, la fraction de porosité du dépôt (coating) formant l'électrode, le grammage de l'électrode, l'épaisseur de l'électrode et la capacité (Ah) de l'électrode.
- [0118] Un paramètre d'utilisation de l'élément électrochimique 52 est un paramètre permettant de connaître la manière dont l'élément électrochimique 52 est chargé.
- [0119] Dans l'exemple proposé, les paramètres d'utilisation sont les limites hautes et basses de tension à laquelle l'élément électrochimique 52 est chargé.
- [0120] Selon l'exemple proposé, la première étape de fourniture E100 est mise en œuvre par réception de données saisies par l'utilisateur du système 14 sur le dispositif d'entrée 30.
- [0121] Lors de la deuxième étape de fourniture E110, il est fourni une valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique 52 jusqu'à la fin d'un intervalle de temps d'utilisation de l'élément électrochimique 52.
- [0122] Autrement formulé, la valeur de performance est à respecter par l'élément électrochimique 52 pendant tout l'intervalle de temps d'utilisation.
- [0123] L'intervalle de temps d'utilisation est supérieur ou égal à un an.
- [0124] Selon d'autres exemples, l'intervalle de temps d'utilisation est supérieur ou égal à 3 ans, de préférence supérieur ou égal à 5 ans et encore préférentiellement supérieur ou égal à 8 ans.
- [0125] Plus généralement, l'intervalle de temps d'utilisation dépendra de l'application souhaitée pour la batterie 50.
- [0126] Selon l'exemple proposé, la performance électrique est la densité d'énergie.
- [0127] La densité d'énergie est la puissance d'énergie produite par l'élément électro-

chimique 52 ramenée à la masse de l'élément électrochimique 52 et s'exprime selon les cas en Watt.heure par litre (Wh/l) ou en Watt.heure par kilogramme (Wh/kg).

[0128] En variante, la performance électrique est la capacité de la batterie 50.

[0129] Selon l'exemple proposé, la deuxième étape de fourniture E110 est mise en œuvre par réception de données saisies par l'utilisateur du système 14 sur le dispositif d'entrée 30.

[0130] Selon une variante, la valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique 52 à l'instant souhaité est déduite de la valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique 52, par exemple par une division par le nombre d'éléments chimiques.

[0131] Lors de l'étape d'optimisation E120, il est optimisé une valeur d'au moins un paramètre parmi le jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative 54 à l'aide d'une technique d'optimisation.

[0132] La technique d'optimisation est appliquée avec les autres paramètres présentant une évolution temporelle fixée, par exemple une valeur constante égale à la valeur initiale du paramètre.

[0133] La technique d'optimisation comporte l'utilisation d'un modèle de vieillissement MV associant aux paramètres relatifs à l'élément électrochimique 52 l'évolution temporelle de la performance électrique de l'élément électrochimique 52.

[0134] Selon l'exemple proposé, le modèle de vieillissement MV est un modèle selon lequel la performance électrique de l'élément électrochimique 52 est donnée par l'évolution temporelle de l'interface solide-électrolyte (SEI).

[0135] En effet, le principal mécanisme de vieillissement des éléments électrochimiques avec une électrode au graphite est la croissance de la SEI. L'acronyme SEI renvoie à la dénomination anglaise de « Solid Electrolyte Interface » signifiant littéralement interface électrolyte solide. La SEI est un produit dérivé formé par réduction avec le lithium (Li^+) de l'électrolyte (généralement LiPF_6) et de ses solvants. En notant S le ou les solvants, cela revient à dire que le lithium présent dans l'électrode négative réagit avec le solvant S selon la réaction chimique $\text{LiC}_6 + \text{S} \rightarrow \text{C}_6 + \text{SLi}$. Le composé SLi correspond à la SEI. La composition de la SEI est ainsi complexe (dérivés organiques et inorganiques de lithium) puisqu'elle dépend des espèces présentes.

[0136] La formation initiale de la SEI produit une diminution rapide de la quantité de lithium cyclable. Une SEI formée initialement a un effet protecteur pour l'électrode négative (puisque'elle protège le graphite des invasions d'espèces autres que le lithium) ainsi que pour l'électrolyte (puisque'elle protège l'électrolyte de la réduction).

[0137] La croissance de la SEI est continue tout au long de la vie de la batterie car le rôle protecteur de la SEI n'est pas parfait : la réaction de réduction de l'électrolyte continue à se produire. La conséquence est une diminution de la capacité par consommation du

lithium cyclable et une augmentation de l'impédance (diminution de la conductivité ionique).

- [0138] La capacité est la quantité de charge électrique qui peut circuler dans un circuit électrique à partir d'une batterie initialement chargée jusqu'à la décharger complètement. Lorsque la capacité est rapportée à la masse, elle est dénommée capacité spécifique et volumique lorsqu'elle est rapportée au volume.
- [0139] Par ailleurs, les conditions de stockage de la batterie (température et *SoC* élevés) et l'évolution des espèces dérivées (acidification de l'électrolyte ou dissolution de métaux provenant de l'électrode positive) peuvent dégrader la SEI.
- [0140] Dans un tel scénario, la capacité diminue alors au même rythme que le lithium cesse d'être cyclable pour faire partie de la SEI. Ainsi, dans un scénario où la formation de la SEI est le principal mécanisme, lorsque l'électrode négative n'est pas limitante, la variation de la capacité de l'élément électrochimique sera la même que la variation du stock de lithium. Dans ces conditions, la capacité de l'élément électrochimique 52 se dégrade à la même vitesse que la vitesse de la réaction de formation de la SEI précédemment explicitée.
- [0141] La vitesse de réaction chimique dépend à son tour de multiples paramètres et pas seulement de la température. En particulier, la vitesse d'une réaction chimique dépend de la concentration des espèces, de la pression, de la présence de catalyseurs ou de la surface de contact.
- [0142] Des études expérimentales ont montré qu'une loi de variation du type $\alpha\sqrt{t} + \beta t$ pour déterminer la vitesse de réaction chimique est une loi empirique rendant compte du phénomène. Dans cette loi de variation, t est le temps et α et β deux paramètres dépendant des paramètres des électrodes.
- [0143] Un premier exemple de modèle de vieillissement MV est ainsi une décroissance de la capacité de l'élément électrochimique 52 avec une vitesse de décroissance donnée par une loi de variation du type $\alpha\sqrt{t} + \beta$.
- [0144] Dans un tel exemple, les coefficients α et β sont dépendants de la tension de charge de la batterie.
- [0145] D'autres types de variation peuvent être utilisés pour décrire la vitesse de la réaction chimique de formation de la SEI pour ainsi obtenir un modèle selon lequel la performance électrique de l'élément électrochimique 52 est donnée par l'évolution temporelle de l'interface solide-électrolyte (SEI).
- [0146] Par ailleurs, de nombreux autres modèles de vieillissement MV sont envisageables pour la technique d'optimisation.
- [0147] Selon un deuxième exemple, le modèle de vieillissement MV est un modèle selon lequel la performance électrique de l'élément électrochimique 52 est donnée par

l'évolution temporelle de la quantité de lithium inséré dans le graphite s'oxydant par réduction dans l'électrolyte.

- [0148] Un tel modèle de vieillissement MV est un modèle souvent qualifié de modèle LLI, l'acronyme LLI renvoie à la dénomination anglaise de « Loss of Lithium Inventory » signifiant littéralement inventaires des pertes de Lithium.
- [0149] Le deuxième exemple de modèle de vieillissement MV prend en compte d'autres phénomènes comme la déposition de lithium (plus souvent désignée sous la dénomination anglaise de « lithium plating »). Ce mécanisme consiste à une métallisation de la surface de l'électrode par déposition du lithium pendant la recharge. Il est activé à haut régime de charge, ou alors quand l'impédance de la batterie est élevée (basses températures, batterie dégradée).
- [0150] Lorsque deux mécanismes de vieillissement agissent sur le vieillissement de l'élément électrochimique 52, la formulation d'un modèle de vieillissement peut se compliquer. Dans des conditions normales d'utilisation, ces deux mécanismes de déposition de lithium et de formation de la SEI agissent à des températures bien différentes. Le premier mécanisme est prédominant à hautes températures et peut être modélisé par une loi d'Arrhenius. Par contre, le mécanisme de déposition de lithium a un comportement inverse à la loi d'Arrhenius puisqu'il est plus important à des températures plus froides. De ce fait, il est possible d'utiliser deux lois d'Arrhenius, une par mécanisme, avec la particularité d'une loi à énergie d'activation négative pour le mécanisme de déposition de lithium.
- [0151] Selon un troisième exemple, le modèle de vieillissement MV est un modèle empirique sans hypothèse sur le mécanisme de vieillissement avec un coefficient d'accélération qui est multiplié par une fonction dépendante du temps. Un tel troisième exemple suppose un ajustement préalable du modèle de vieillissement MV.
- [0152] Selon d'autres exemples, le modèle de vieillissement MV est un modèle choisi dans la littérature, par exemple dans l'article de Christoph R. Birkl et al. intitulé « *Degradation diagnostics for lithium ion cells* » paru dans la revue Journal of Power Sources en 2017 aux pages 373 à 386.
- [0153] Selon encore d'autres exemples, le modèle de vieillissement MV est évalué expérimentalement. Pour une telle détermination, il est possible d'utiliser les techniques développées dans l'article de N. Legrand et al. intitulé « *Physical characterization of the charging process of a Li-ion battery and prediction of Li plating by electrochemical modelling* » paru dans la revue Journal of Power Sources en 2014 aux pages 208 à 216.
- [0154] La technique d'optimisation est mise en œuvre sous la contrainte que l'élément électrochimique 52 présente la valeur de performance électrique à respecter jusqu'à la fin de l'intervalle de temps d'utilisation.
- [0155] Cela signifie que l'élément électrochimique 52 peut présenter des performances

initiales légèrement supérieures ou identiques à la valeur de performance électrique à respecter.

- [0156] Ceci permet de laisser un degré de liberté complémentaire pour l'élément électrochimique 52, et plus spécifiquement l'électrode négative 54.
- [0157] Le vieillissement de l'élément électrochimique 52 peut ainsi comporter une phase de montée en charge (qui correspond dans l'exemple décrit à un accroissement de la tension) permettant de maintenir la performance au cours du temps au lieu de prendre une marge de sécurité initiale assurant que la valeur de performance électrique à respecter le soit en permanence. Autrement formulé, un tel élément électrochimique 52 n'aura pas d'instant au cours de vie où sa valeur de performance électrique sera bien supérieure à la valeur de performance électrique à respecter.
- [0158] Selon un exemple, la technique d'optimisation consiste à faire varier un seul paramètre, le paramètre étant, par exemple, l'épaisseur de l'électrode négative 54 et à calculer la meilleure valeur.
- [0159] Il est ainsi obtenu une valeur optimisée pour le paramètre.
- [0160] Selon une variante, la technique d'optimisation est utilisée pour faire varier deux paramètres.
- [0161] La technique d'optimisation utilise alors une fonction de coût, par exemple donnée par une technique de moindre carré.
- [0162] Selon l'exemple proposé, deux grandeurs sont variables : l'épaisseur de l'électrode négative 54 et la tension maximale de charge de l'élément électrochimique 52.
- [0163] Plus spécifiquement, il est proposé d'optimiser l'épaisseur de l'électrode négative 54 en imposant que la tension maximale de l'élément électrochimique 52 présente au cours du temps une première valeur puis une deuxième valeur, la deuxième valeur étant strictement supérieure à la première valeur.
- [0164] Par exemple, la tension maximale de l'élément électrochimique 52 est une fonction constante par morceaux, c'est-à-dire que la tension maximale vaut une première valeur, par exemple 4,0 V, puis une deuxième valeur, par exemple 4,2 V.
- [0165] Il en résulte les représentations des figures 6 et 7 correspondant à une représentation schématique des capacités des électrodes respectivement à l'instant initial, et à la fin de l'intervalle de temps d'utilisation.
- [0166] Dans chaque figure, les contributions à la capacité de l'électrode négative 54 sont représentées sur le diagramme de gauche tandis que les contributions à la capacité de l'électrode positive 58 sont représentées sur le diagramme de droite.
- [0167] Dans le cas de la [Fig.6], la contribution de la SEI correspondent à la SEI après l'étape dite de formation permettant de créer la SEI initiale pour l'électrode négative 54 est repérée par le signe de référence 80 et la position irréversible de l'électrode positive 58 est repérée par le signe de référence 82.

- [0168] Pour le cas de la [Fig.7], la contribution de la SEI est partagée en une contribution liée au vieillissement repérée par le signe de référence 84 et une contribution liée à la formation de SEI repérée par le signe de référence 86.
- [0169] Les niveaux de tension maximale et de tension minimale pour la charge et la décharge sont représentés par les traits à 2,7 V et 4,0 V dans la [Fig.6].
- [0170] Dans cette même figure, il apparaît bien que l'électrode négative 54 présente un excédent de charge permettant de garantir la stabilité de l'élément électrochimique 52 en fonctionnement.
- [0171] En outre, le niveau de tension de 4,2 V est représenté en pointillés pour montrer que l'électrode négative 54 ne présente pas au début une capacité permettant un fonctionnement à cette tension.
- [0172] Similairement, les niveaux de tension maximale et de tension minimale pour la charge et la décharge sont représentés par les traits à 2,7 V et 4,2 V dans la [Fig.6].
- [0173] Dans cette même figure, il apparaît bien que l'électrode négative 54 présente un excédent de charge permettant de garantir la stabilité de l'élément électrochimique 52 en fonctionnement. La présence de l'excédent de charge est liée à la plus grande contribution de la SEI à la capacité de l'électrode négative 54, ce qui a pour effet d'augmenter la capacité globale de l'électrode négative 54.
- [0174] En outre, le niveau de tension de 4,0 V est représenté en pointillés pour montrer que l'électrode négative 54 présente une capacité effective moindre du fait du vieillissement qu'il faut compenser par un passage de la première valeur (4,0 V) à la deuxième valeur (4,2 V).
- [0175] Le passage de la première valeur à la deuxième valeur a, par exemple, lieu à la moitié de l'intervalle de temps d'utilisation.
- [0176] Un tel exemple particulier exploite le fait que l'augmentation en tension maximale de l'élément électrochimique 52 compense le vieillissement de l'élément électrochimique 52 tout en permettant de réduire la capacité initiale de l'électrode négative 54.
- [0177] D'autres variations plus complexes de la tension maximale de l'élément électrochimique 52 peuvent être envisagées comme une variation linéaire entre la première valeur et la deuxième valeur.
- [0178] Dans tous les cas, à l'issue de l'étape d'optimisation E120, il est obtenu un jeu de paramètres optimisé pour l'électrode négative 54, le jeu de paramètres étant l'ensemble des valeurs finales de chaque paramètre, la valeur finale étant soit la valeur initiale en l'absence d'application de l'optimisation audit paramètre soit la valeur optimisée.
- [0179] Lors de la phase de fabrication, l'unité de fabrication 16 fabrique l'électrode négative 54 présentant les valeurs du jeu de paramètres optimisé.
- [0180] Un tel procédé permet d'obtenir un élément électrochimique ou une batterie 50 respectant des contraintes de fonctionnement, ici une performance électronique au bout

d'un intervalle de temps d'utilisation supérieur ou égal à un an.

- [0181] Le procédé propose de concevoir l'électrode négative 54 pour qu'en début de vie, une formation à la tension suffisante est réalisée initialement pour maintenir la performance voulue au temps souhaité. Plus précisément, la batterie 50 est chargée à une tension initiale en début de vie et la tension est remontée progressivement en suivant le modèle de vieillissement MV pour obtenir la tension maximale au bout de l'intervalle de temps d'utilisation.
- [0182] Autrement formulé, le procédé propose de charger à plus basse tension l'élément électrochimique 52 pour réduire le vieillissement (la formation de SEI dans l'exemple proposé).
- [0183] Un tel procédé permet d'obtenir si le paramètre variable pour l'électrode négative 54 est l'épaisseur un gain de l'ordre de 15% ce qui correspond à un gain en coût de l'ordre de 4 à 5%.
- [0184] D'autres gains seraient bien entendu obtenus pour des paramètres variables différents.
- [0185] La fabrication de l'électrode négative 54 est, dans chacun de ces cas, facilitée.
- [0186] Le procédé permettant d'obtenir une batterie 50 respectant des contraintes de fonctionnement et qui soit de fabrication plus aisée par une conception astucieuse de l'électrode négative 54 prenant mieux en compte l'utilisation souhaitée pour la batterie 50.
- [0187] Il est, en outre, à noter que le présent procédé s'étend aisément à des électrodes négatives 54 présentant des variations différentes de l'OCV.
- [0188] Par exemple, l'électrode négative 54 peut être réalisée en silicium qui présente un OCV moins plat en fin de charge qu'une électrode en graphite.
- [0189] Similairement au cas présenté, il y a une réduction de la capacité de l'électrode négative 54 en utilisant une gestion spécifique de l'élément électrochimique 52, à savoir une tension réduite pour l'élément électrochimique 52 en début d'utilisation puis une augmentation progressive de la tension suivant le vieillissement de l'élément électrochimique 52.
- [0190] De même, l'application du procédé à des électrodes de batteries lithium-fer-phosphate (LFP) ou lithium-fer-manganèse-phosphate (LFMP) peut être envisagée même si l'OCV présente un ou plusieurs plateaux.
- [0191] Dans un tel cas, il est à noter que la tension de fin de charge ne peut plus servir d'indicateur de fin de charge. A la place, il convient d'utiliser d'autres méthodes de détection, comme une méthode de détection du changement de volume de l'élément électrochimique en fonction de son état de charge ou une méthode acoustique.
- [0192] En variante, il est possible d'utiliser la tension mais en repérant un autre événement comme le saut de tension lié à l'insertion dans le graphite du lithium.

- [0193] Ainsi, selon un autre mode de réalisation, l'électrode positive 58 est réalisée en un mélange d'oxyde de nickel, manganèse et cobalt et de LiFePO_4 .
- [0194] Plus généralement, il est possible de réaliser l'électrode positive 58 en un matériau comprenant au moins un élément choisi dans la liste constituée des oxydes lithiés de nickel, manganèse et cobalt, des oxydes de nickel, cobalt et aluminium et de LiFePO_4 .
- [0195] L'extension à des électrodes de batterie lithium-titanate (LTO) est aussi possible pourvu que le mécanisme de consommation du lithium soit majoritaire.
- [0196] Plus généralement, le procédé est applicable à tout élément électrochimique 52 pour lequel le mécanisme de consommation du lithium, soit via SEI soit via lithium plating ou une combinaison des deux, est le mécanisme principal de vieillissement.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé de conception d'une électrode négative (54) d'un élément électrochimique (52), notamment d'une batterie (50) lithium-ion, le procédé de conception étant mis en œuvre par ordinateur, le procédé comportant une phase d'optimisation des valeurs d'un jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54), pour obtenir un jeu de paramètres optimisé, la phase d'optimisation comportant :
- la fourniture de valeurs initiales pour les paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52), les paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52) comprenant les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54),
 - la fourniture d'une valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique (52) jusqu'à la fin d'un intervalle de temps d'utilisation de l'élément électrochimique (52), l'intervalle de temps d'utilisation étant supérieur ou égal à un an,
 - au moins une optimisation d'une valeur d'au moins un paramètre parmi le jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54) à l'aide d'une technique d'optimisation, les autres paramètres présentant une évolution temporelle fixée, par exemple une valeur constante égale à la valeur initiale du paramètre, la technique d'optimisation comportant l'utilisation d'un modèle de vieillissement (MV) associant aux paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52) la performance électrique de l'élément électrochimique (52) et la technique d'optimisation étant mise en œuvre sous la contrainte que l'élément électrochimique (52) présente la valeur de performance électrique à respecter jusqu'à la fin de l'intervalle de temps d'utilisation, pour obtenir une valeur optimisée pour chaque paramètre optimisé, le jeu de paramètres optimisé étant l'ensemble des valeurs finales de chaque paramètre, la valeur finale étant soit la valeur initiale en l'absence d'application de l'optimisation audit paramètre soit la valeur optimisée.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel au moins un paramètre des autres paramètres est la tension maximale de l'élément électrochimique (52).
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 2, dans lequel la tension maximale de l'élément électrochimique (52) présente au cours du temps une première valeur puis une deuxième valeur, la deuxième valeur étant strictement

supérieure à la première valeur.

- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54) sont choisis dans la liste constituée de : la densité du matériau formant l'électrode négative (54), la fraction de porosité du dépôt formant l'électrode négative (54), le grammage de l'électrode négative (54), l'épaisseur de l'électrode négative (54) et la capacité de l'électrode négative (54).
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel l'élément électrochimique (52) comporte également une électrode positive (58), les paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52) étant les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54), des paramètres relatifs à l'électrode positive (58) et des paramètres relatifs à l'utilisation de l'élément électrochimique (52).
- [Revendication 6] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel le modèle de vieillissement (MV) est un modèle selon lequel la performance électrique de l'élément électrochimique (52) est donnée par l'évolution temporelle de l'interface solide-électrolyte (SEI).
- [Revendication 7] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le paramètre optimisé est l'épaisseur de l'électrode négative (54).
- [Revendication 8] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, dans lequel le procédé comporte, en outre, une phase de fabrication de l'électrode négative (54) présentant les valeurs du jeu de paramètres optimisé.
- [Revendication 9] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, dans lequel l'électrode négative (54) est réalisée en graphite ou en un matériau comprenant du graphite et du silicium.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 5 ou l'une quelconque des revendications 6 à 9 en combinaison avec la revendication 5, dans lequel l'électrode positive (58) est réalisée en un matériau comprenant au moins un élément choisi dans la liste constituée des oxydes lithiés de nickel, manganèse et cobalt, des oxydes de lithiés nickel, cobalt et aluminium, du phosphate de fer lithié LiFePO_4 , du phosphate de fer et de manganèse lithié LiFeMnPO_4 .
- [Revendication 11] Electrode négative (54) d'un élément électrochimique (52), notamment d'une batterie (50) lithium-ion, présentant des paramètres relatifs à l'électrode négative (54), les paramètres ayant pour valeur la valeur du jeu de paramètres optimisé après mise en œuvre d'un procédé de conception d'une électrode négative (54) selon l'une quelconque des re-

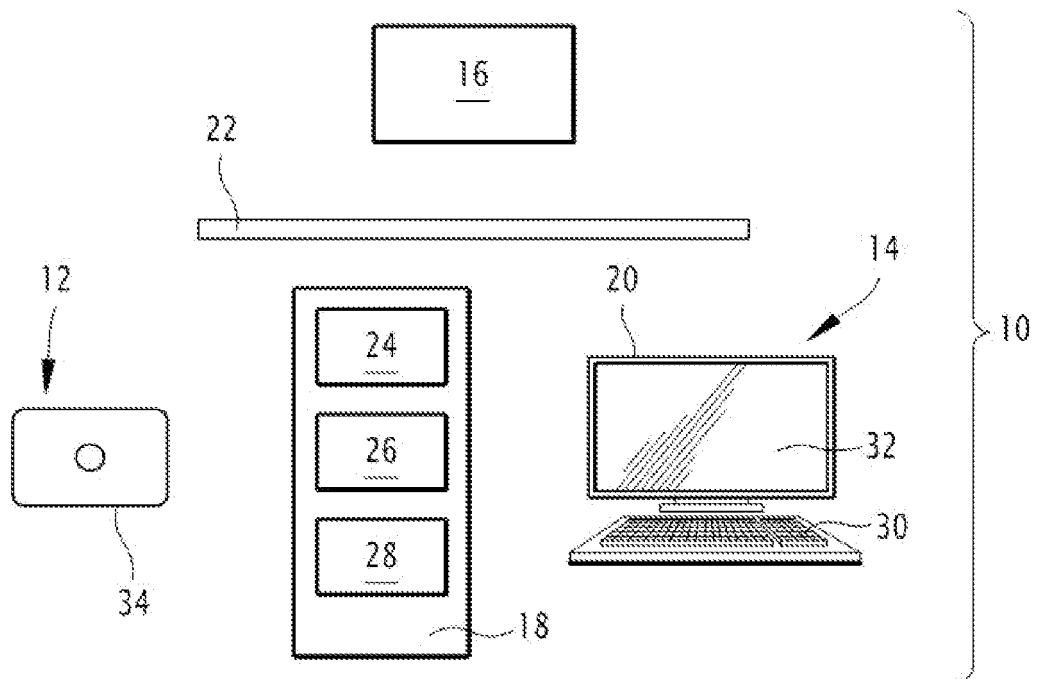
vendications 1 à 10.

- [Revendication 12] Dispositif, notamment élément électrochimique (52) ou batterie (50), comportant une électrode négative (54) selon la revendication 11.
- [Revendication 13] Produit programme d'ordinateur comportant un support lisible d'informations (34), sur lequel est mémorisé un programme d'ordinateur comprenant des instructions de programme, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données (24) et mettant en œuvre la phase d'optimisation d'un procédé de conception d'une électrode négative (54) d'un élément électrochimique (52) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement des données.
- [Revendication 14] Support lisible d'informations (34) comportant des instructions de programme formant un programme d'ordinateur, le programme d'ordinateur étant chargeable sur une unité de traitement de données (24) et mettant en œuvre la phase d'optimisation d'un procédé de conception d'une électrode négative (54) d'un élément électrochimique (52) selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 lorsque le programme d'ordinateur est mis en œuvre sur l'unité de traitement de données (24).
- [Revendication 15] Ensemble de conception (10) propre à concevoir une électrode négative (54) d'un élément électrochimique (52), notamment d'une batterie (50) lithium-ion, l'ensemble de conception (10) comportant :
- un système (14) propre à optimiser des valeurs d'un jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54) pour obtenir un jeu de paramètres optimisé en interaction avec un produit programme d'ordinateur (12), le système (14) étant propre à :
 - recevoir des valeurs initiales pour les paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52), les paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52) comprenant les paramètres du jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54),
 - recevoir une valeur de performance électrique à respecter par l'élément électrochimique (52) jusqu'à la fin d'un intervalle de temps d'utilisation de l'élément électrochimique (52), l'intervalle de temps d'utilisation étant supérieur ou égal à un an,
 - optimiser une valeur d'au moins un paramètre parmi le jeu de paramètres relatifs à l'électrode négative (54), les autres paramètres présentant une évolution temporelle fixée, par exemple une valeur

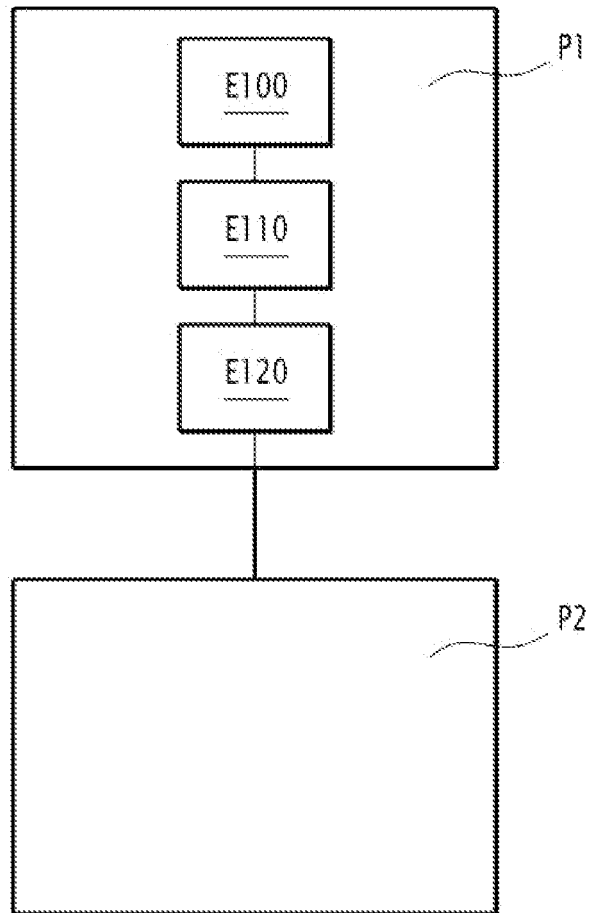
constante égale à la valeur initiale du paramètre, à l'aide d'une technique d'optimisation, la technique d'optimisation comportant l'utilisation d'un modèle de vieillissement associant aux paramètres relatifs à l'élément électrochimique (52) l'évolution temporelle de la performance électrique de l'élément électrochimique (52) et la technique d'optimisation étant mise en œuvre sous la contrainte que l'élément électrochimique (52) présente la valeur de performance électrique à respecter jusqu'à la fin de l'intervalle de temps d'utilisation, pour obtenir une valeur optimisée pour chaque paramètre optimisé, le jeu de paramètres optimisé étant l'ensemble des valeurs finales de chaque paramètre, la valeur finale étant soit la valeur initiale en l'absence d'application de l'optimisation audit paramètre soit la valeur optimisée, et

- une unité de fabrication (16) propre à fabriquer l'électrode négative (54) présentant les valeurs du jeu de paramètre optimisé.

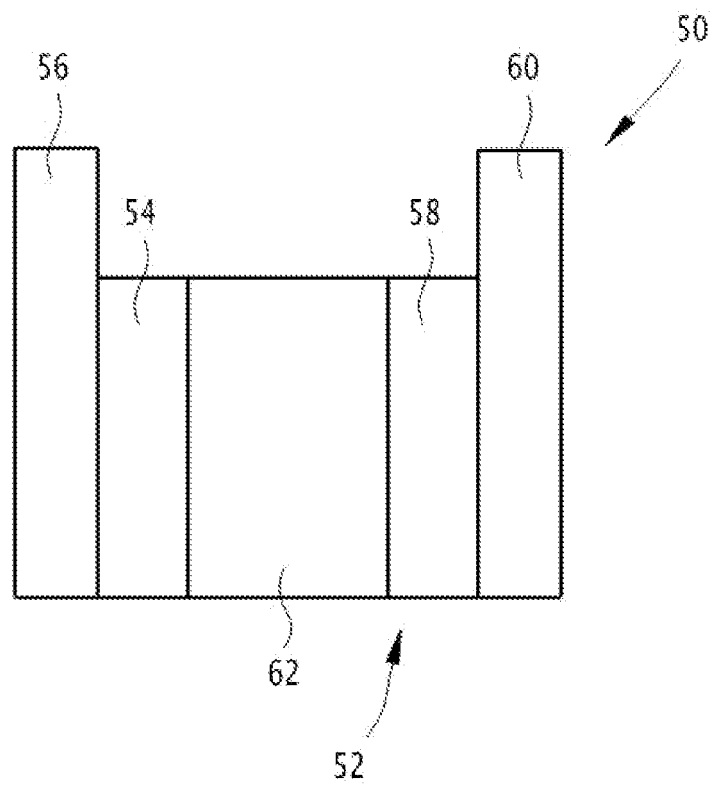
[Fig. 1]



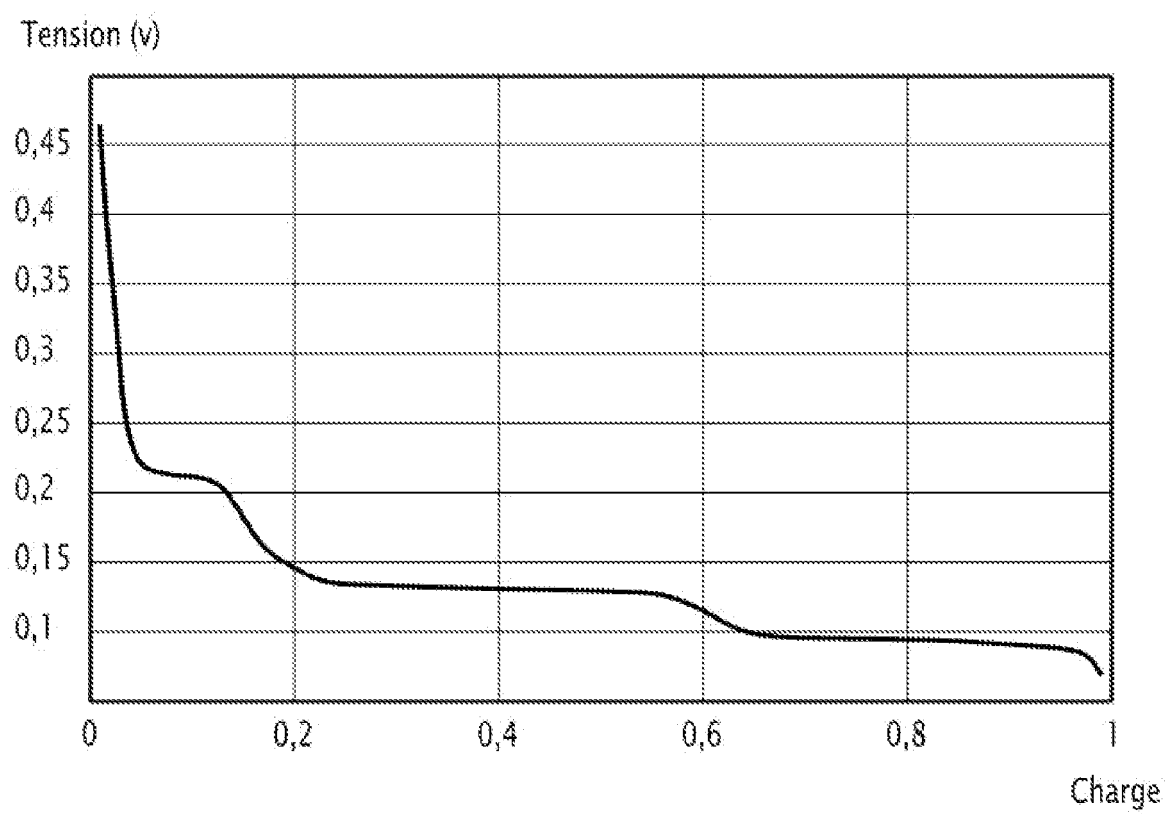
[Fig. 2]



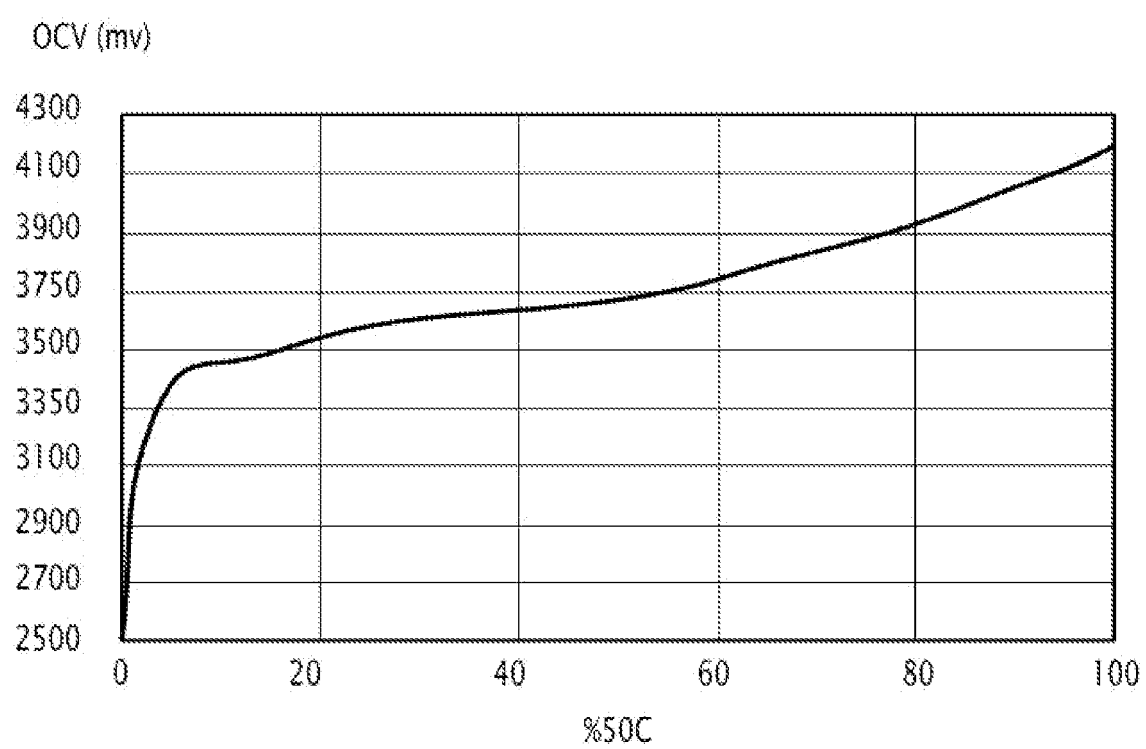
[Fig. 3]



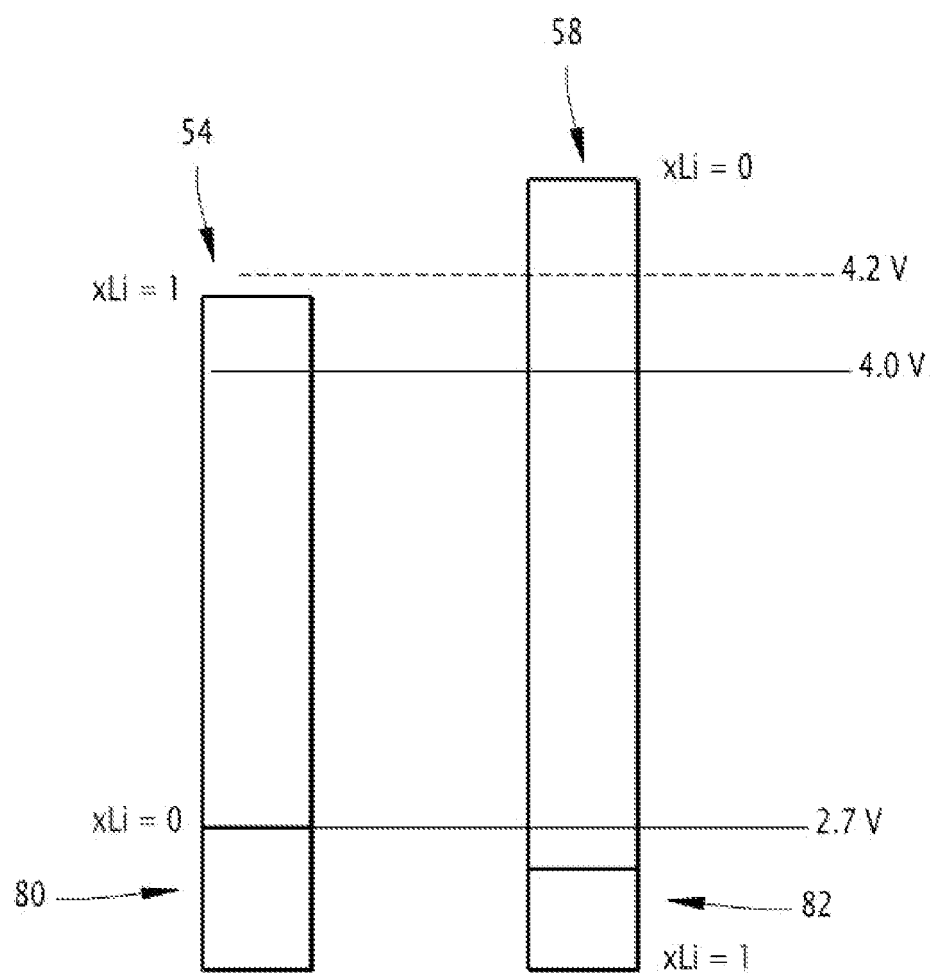
[Fig. 4]



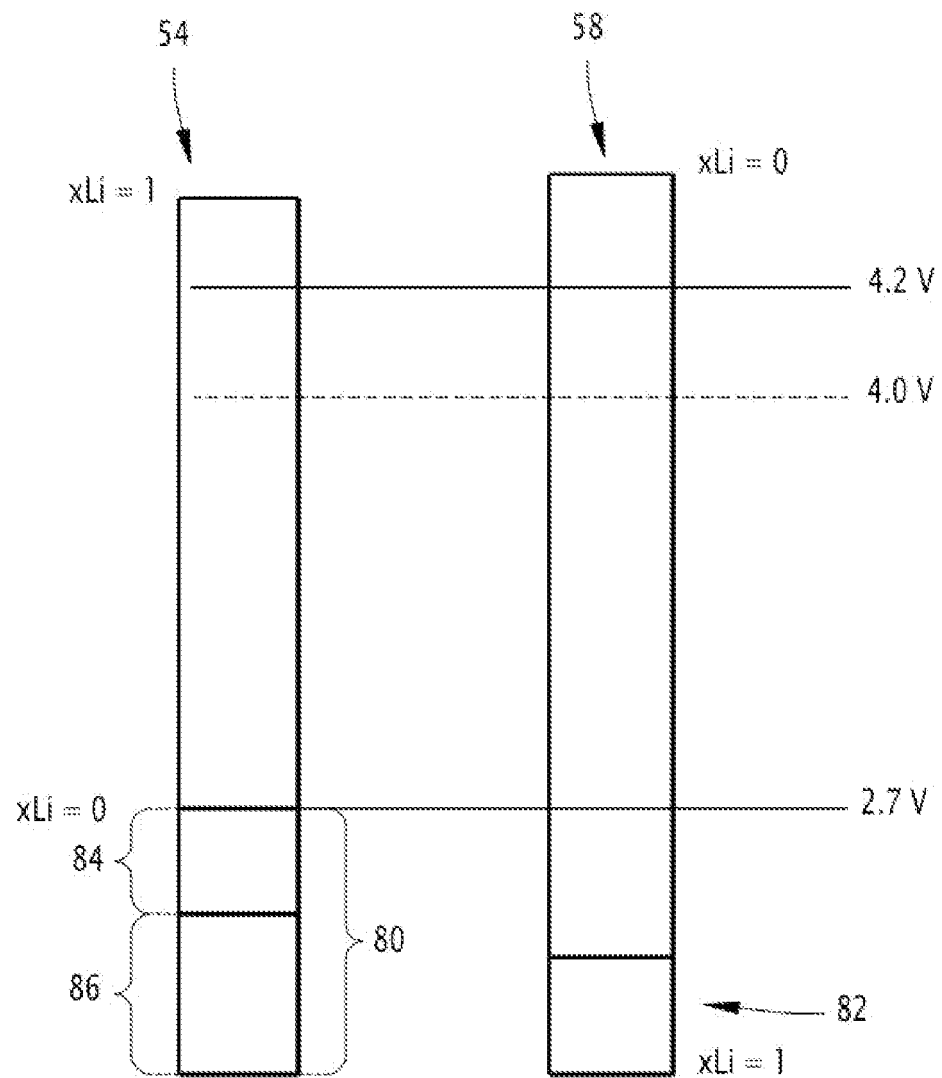
[Fig. 5]



[Fig. 6]



[Fig. 7]



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

☒ Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

☐ Le demandeur a maintenu les revendications.

☒ Le demandeur a modifié les revendications.

☐ Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

☐ Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

☒ Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

☐ Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

☐ Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

C. LIU ET AL: "Improving Battery Safety for Electric Vehicles through the Optimization of Battery Design Parameters",
ECS TRANSACTIONS,
vol. 69, no. 20,
28 décembre 2015 (2015-12-28), pages 5-15,
XP055760993,
US
ISSN: 1938-6737, DOI:
10.1149/06920.0005ecst

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

YANG XIAO-GUANG ET AL: "Modeling of lithium plating induced aging of lithium-ion batteries: Transition from linear to nonlinear aging",
JOURNAL OF POWER SOURCES, ELSEVIER SA, CH,
vol. 360, 7 juin 2017 (2017-06-07), pages 28-40, XP085135252,
ISSN: 0378-7753, DOI:
10.1016/J.JPOWSOUR.2017.05.110

BIRKL CHRISTOPH R ET AL: "Degradation diagnostics for lithium ion cells",
JOURNAL OF POWER SOURCES, ELSEVIER SA, CH,
vol. 341, 12 décembre 2016 (2016-12-12), pages 373-386, XP029864035,
ISSN: 0378-7753, DOI:
10.1016/J.JPOWSOUR.2016.12.011

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT