

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 29.09.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 05.04.24 Bulletin 24/14.

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) : VITESCO TECHNOLOGIES GmbH—
DE.

72 Inventeur(s) : SANS Mariano.

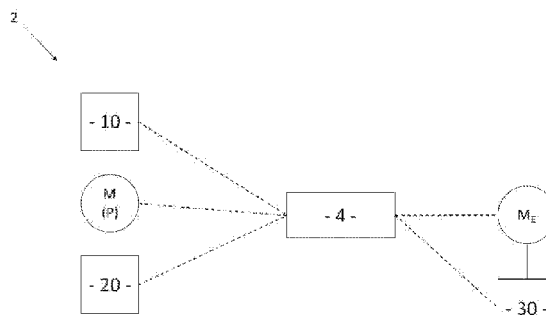
73 Titulaire(s) : VITESCO TECHNOLOGIES GmbH.

74 Mandataire(s) : VITESCO TECHNOLOGIES
FRANCE.

54 PROCÉDE D'OPTIMISATION D'UN CRITÈRE OU D'UNE COMBINAISON DE CRITÈRES RELATIF(S) A UN
VEHICULE AUTOMOBILE.

57 L'invention concerne un procédé d'optimisation d'un
critère ou d'une combinaison de critères relatif(s) à un véhi-
cule automobile (2) comprenant un réservoir de carburant
ou d'hydrogène, une batterie et/ou des super-capacités
(30), un moteur thermique (M) ou une pile à combustible (P),
une machine électrique (ME), une pluralité de dispositifs,
chacun caractérisé par au moins une variable d'état, et un
calculateur (4) configuré pour gérer la chaîne de traction du
véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé et étant
apte à commander le moteur thermique (M) ou la pile à com-
bustible (P), la machine électrique (ME) et/ou les dispositifs
par l'émission d'un ensemble de consignes. L'invention
concerne également un calculateur (4) et un produit pro-
gramme d'ordinateur pour la mise en œuvre d'un tel procé-
dé, ainsi qu'un véhicule automobile (2) comprenant un tel
calculateur (4).

Figure de l'abrégé : Fig. 1



Description

Titre de l'invention : PROCEDE D'OPTIMISATION D'UN CRITERE OU D'UNE COMBINAISON DE CRITERES RELATIF(S) A UN VEHICULE AUTOMOBILE

- [0001] La présente invention concerne l'optimisation d'un critère ou d'une combinaison de critères relatif(s) à un véhicule automobile, et plus particulièrement un procédé d'optimisation d'un critère ou d'une combinaison de critères d'un véhicule automobile sur un trajet prédéfini. L'invention vise en particulier à générer des consignes optimisées pour commander le véhicule sur ledit trajet à parcourir en minimisant le critère ou la combinaison de critères. Le critère à optimiser est typiquement un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé du véhicule ou une durée d'un trajet prédéterminé du véhicule. La combinaison de critères à optimiser consiste en une combinaison d'au moins deux critères choisis parmi le groupe consistant en : un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé et une durée d'un trajet prédéterminé. Par « consommation en énergie du véhicule » on entend au sens de la présente invention une consommation en carburant, en hydrogène, en énergie électrique, en courant électrique délivré par les branches d'un chargeur électronique d'une batterie électrique du véhicule, en nombre de redémarrages d'un groupe électrogène dans un véhicule hybride série (aussi appelé « range extender » en anglais), ou encore une consommation combinée de plusieurs de ces éléments. Par « état de santé du véhicule » on entend au sens de la présente invention un pourcentage qui évolue de 100 % à 0 % et qui permet de caractériser le niveau de détérioration d'une batterie électrique et/ou d'une ou plusieurs super-capacités et/ou d'une pile à combustible du véhicule, en tenant compte des coûts de remplacement et de maintenance.
- [0002] Dans un véhicule automobile, il est connu d'optimiser la consommation en énergie de la chaîne de traction sur un trajet donné ou prévu. Une telle optimisation peut être réalisée sur le carburant, sur l'énergie électrique, sur la consommation en hydrogène (dans le cas d'un véhicule muni d'une pile à combustible) ou sur deux ou trois de ces critères à la fois.
- [0003] De manière connue, l'optimisation peut être réalisée en utilisant le principe connu sous le nom du Principe du Maximum de Pontryagin (PMP). Cette méthode consiste à minimiser la fonction Hamiltonienne (ou Hamiltonien) à partir du critère à optimiser, par exemple la quantité de carburant ou d'hydrogène ou encore l'énergie électrique consommée, et la description de la dynamique du système. La dynamique du système est définie à partir de l'état de différentes variables du véhicule (vitesse du véhicule, état de charge de la batterie, et/ou des super-capacités, températures, etc.) et de dif-

férentes entrées ou consignes (consignes de couple à appliquer sur les roues du véhicule pour le moteur thermique ou pour la ou les machines électriques, de consignes de couple à appliquer pour le ou les moteurs du groupe électrogène, et/ou de consignes de puissance ou de courant pour la pile à combustible, et/ou encore de consignes de chauffage du catalyseur, et/ou encore de consignes de commande du circuit de refroidissement, etc.). La fonction Hamiltonienne est minimisée afin de déterminer les consignes permettant d'obtenir le minimum de consommation de carburant ou d'hydrogène, et/ou d'énergie électrique.

[0004] Chaque entrée ou consigne est dépendante de l'état de certaines variables. Par exemple, la consigne de couple pour la machine électrique à appliquer sur les roues du véhicule est dépendante de la vitesse du véhicule et de l'état de charge de la batterie, la consigne de commande du circuit de refroidissement est dépendante de la température en temps réel dans le circuit de refroidissement, la consigne de chauffage du catalyseur est dépendante de la température en temps réel dans le catalyseur.

[0005] L'Hamiltonien ainsi déterminé est ensuite minimisé. Autrement dit, les valeurs des consignes pour lesquelles la valeur de l'Hamiltonien est la plus faible sont sélectionnées et appliquées au véhicule. Les valeurs de consignes sont ainsi déterminées en temps réel en fonction de l'état actuel du système.

[0006] L'application d'un tel modèle PMP utilise ainsi un modèle interne décrivant la dynamique du système à commander (ici le véhicule automobile et sa chaîne de traction), via des équations différentielles qui donnent une représentation du système. Un tel modèle PMP est par conséquent principalement basé sur une stratégie de commande optimale par boucle ouverte, qui calcule la solution de commande optimale en fonction des prédictions du modèle interne, avec très peu de rétroaction provenant de mesures courantes sur le système. Lorsque le modèle interne diffère très peu du système physique réel, l'utilisation d'un tel modèle PMP fournit une solution acceptable du point de vue de la précision, de sorte que le modèle conduit à une solution optimale correcte. Toutefois, le modèle interne peut différer du système physique réel, du fait notamment de simplifications de modèle, de perturbations externes, d'effets de vieillissement, etc. Le résultat fourni par un tel modèle souffre alors d'un manque de précision et/ou de stabilité du point de vue de la stratégie de commande d'optimisation employée.

[0007] Il existe donc un besoin de pouvoir disposer d'un procédé de commande optimale permettant l'optimisation d'un critère ou d'une combinaison de critères relatif(s) à un véhicule automobile par mise en œuvre d'un modèle PMP, tout en étant auto-adaptatif afin de tenir compte, de manière itérative, des écarts avec le système physique réel que constitue le véhicule.

[0008] Le document « Adaptive Control of a Hybrid Powertrain with Map-based ECMS –

IFAC Proceedings – Vol 44, Issue 1, 2011, p2949-2954 » décrit une stratégie de commande optimale auto-adaptative appliquée sur des véhicules hybrides (de type à batterie électrique et pile à combustible). La stratégie de commande optimale met en œuvre un principe connu sous le nom de principe de minimisation de la consommation équivalente (dit principe ECMS en anglais, pour « Equivalent Consumption Minimization Strategy »). La stratégie de commande optimale mise en œuvre par ce principe ECMS consiste à considérer la batterie électrique du véhicule comme étant un réservoir de combustible auxiliaire, ce qui lui permet de choisir à chaque instant la commande qui minimise l'énergie totale prélevée aux deux réservoirs (le réservoir d'hydrogène constituant la source principale, la batterie électrique constituant le réservoir auxiliaire) par l'introduction de facteurs d'équivalence permettant de ramener les différentes consommations dans le même espace énergétique. Toutefois, une telle stratégie de commande auto-adaptative ne dispose pas des équations dites « conditions d'optimalité » utilisant les « co-états » ou « variables duales » nécessaires, et n'est pas transposable telle quelle dans un procédé de commande optimale mettant en œuvre un modèle PMP.

[0009] Il existe donc le besoin d'une solution permettant de remédier au moins en partie à ces inconvénients.

[0010] A cette fin et selon un premier aspect, l'invention concerne un procédé, mis en œuvre dans un calculateur embarqué au sein d'un véhicule automobile, d'optimisation d'un niveau de pollution du véhicule, le véhicule comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir de carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la machine électrique, et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, le calculateur étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile sur un trajet prédéterminé et étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le niveau de pollution à optimiser étant représenté par une équation de critère

fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure du niveau de pollution du véhicule, ledit procédé étant mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, le procédé comprenant, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :

- a) détermination d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
- b) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état,
- c) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour le niveau de pollution à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,
- d) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour le niveau de pollution à optimiser déterminées pour ladite consigne,
- e) détermination de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- f) calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du niveau de pollution pour ladite consigne,
- g) intégration temporelle de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle de la valeur du niveau de pollution calculée, fournissant une valeur de niveau de pollution globale estimée,
- h) comparaison de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction, le premier terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul b) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul b), et/ou comparaison de la valeur de niveau de pollution globale estimée à une valeur de niveau de pollution mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction, le second terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul c) à

l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul c).

[0011] Selon un deuxième aspect, l'invention concerne également un procédé, mis en œuvre dans un ordinateur embarqué au sein d'un véhicule automobile, d'optimisation de la consommation en énergie du véhicule, le véhicule comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir de carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la machine électrique, et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, le ordinateur étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile sur un trajet pré-déterminé et étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, la consommation en énergie à optimiser étant représentée par une équation de critère fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure de la consommation en énergie du véhicule, ledit procédé étant mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, le procédé comprenant, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :

- i) détermination d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
- j) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état,
- k) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour la consommation en énergie à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,
- l) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de

ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour la consommation en énergie à optimiser déterminées pour ladite consigne,

- m) détermination de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- n) calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur de la consommation en énergie pour ladite consigne,
- o) intégration temporelle de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle de la valeur de la consommation en énergie calculée, fournissant une valeur de consommation en énergie globale estimée,
- p) comparaison de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction, le premier terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul j) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul j), et/ou comparaison de la valeur de consommation en énergie globale estimée à une valeur de consommation en énergie mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction, le second terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul k) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul k).

[0012] Selon un troisième aspect, l'invention concerne également un procédé, mis en œuvre dans un calculateur embarqué au sein d'un véhicule automobile, d'optimisation d'un état de santé du véhicule, le véhicule comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir de carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la machine électrique, et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, le calculateur étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile sur un trajet prédéterminé et étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés

par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, l'état de santé à optimiser étant représenté par une équation de critère fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure de l'état de santé du véhicule, ledit procédé étant mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, le procédé comprenant, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :

- q) détermination d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
- r) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations,
- s) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour l'état de santé à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,
- t) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour l'état de santé à optimiser déterminées pour ladite consigne,
- u) détermination de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- v) calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur de l'état de santé pour ladite consigne,
- w) intégration temporelle de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle de la valeur de l'état de santé calculée, fournissant une valeur d'état de santé global estimée,
- x) comparaison de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction, le premier terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul r) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul r), et/ou comparaison de la valeur d'état de santé global estimée à une

valeur d'état de santé mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction, le second terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul s) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul s).

- [0013] Selon un quatrième aspect, l'invention concerne également un procédé, mis en œuvre dans un calculateur embarqué au sein d'un véhicule automobile, d'optimisation d'une durée d'un trajet prédéterminé du véhicule, le véhicule comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir de carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la machine électrique, et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, le calculateur étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile sur un trajet prédéterminé et étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, la durée du trajet prédéterminé à optimiser étant représentée par une équation de critère fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure de la durée du trajet prédéterminé du véhicule, ledit procédé étant mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, le procédé comprenant, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :
- y) détermination d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
 - z) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état,
 - aa) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour la durée du trajet prédéterminé à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,

- bb) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour la durée du trajet prédéterminé à optimiser déterminées pour ladite consigne,
- cc) détermination de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- dd) calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur de la durée du trajet pour ladite consigne,
- ee) intégration temporelle de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle de la valeur de la durée du trajet calculée, fournissant une valeur de durée du trajet globale estimée,
- ff) comparaison de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction, le premier terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul z) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul z), et/ou comparaison de la valeur de durée du trajet globale estimée à une valeur de durée du trajet mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction, le second terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul aa) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul aa).

[0014] Selon un cinquième aspect, l'invention concerne également un procédé, mis en œuvre dans un calculateur embarqué au sein d'un véhicule automobile, d'optimisation d'une combinaison d'au moins deux critères relatifs au véhicule et choisis parmi le groupe consistant en : un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé et une durée d'un trajet prédéterminé, le véhicule comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir de carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la machine électrique, et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, le calculateur étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile sur ledit trajet prédéterminé et étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la

machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, la combinaison de critères à optimiser étant représentée par une équation de critère fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure de chacun des critères de la combinaison de critères à optimiser, ledit procédé étant mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, le procédé comprenant, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :

- gg) détermination d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
- hh) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état,
- ii) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour la combinaison de critères à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,
- jj) calcul, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour la combinaison de critères à optimiser déterminées pour ladite consigne,
- kk) détermination de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- ll) calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul, pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur de chaque critère de la combinaison de critères pour ladite consigne,
- mm) intégration temporelle de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle, pour

- chaque critère de la combinaison de critères, de la valeur calculée de ce critère, fournissant une valeur de critère globale estimée,
- nn) comparaison de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction, le premier terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul hh) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul hh), et/ou comparaison, pour chaque critère de la combinaison de critères, de la valeur de critère globale estimée à une valeur de critère mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction, le second terme de correction ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul ii) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul ii).

[0015] Dans chacun des procédés décrits ci-dessus, les étapes sont rebouclées de manière itérative à chaque nouvel instant d'échantillonnage. En outre, chacun des procédés est mis en œuvre pour un trajet prédéfini/donné pour le véhicule. Un tel trajet est par exemple prédit par un système de type « horizon électronique d'informations » (ou « eHorizon » en anglais, qui est basé classiquement sur le standard de format de données ADASIS – de l'anglais « Advanced Driver-Assistance Systems Interface Specifications » - pour les systèmes d'aide à la conduite prédictifs, ou sur tout autre type de dispositif), qui est relié au calculateur du véhicule. De manière connue en soi, un tel système de type « eHorizon » permet de gérer aussi bien des données statiques relatives à l'infrastructure routière (telles que par exemple la nature des routes, des carrefours, les vitesses limites réglementaires appliquées, etc.), que des données dynamiques (vitesse moyenne des véhicules situés sur la route, densité du trafic, données dynamiques relatives aux éléments d'infrastructure routière, etc.). Un tel système de type « eHorizon » est apte à recevoir ces données, à les décoder (via un décodeur), à les reconstituer (via un reconstituteur de données), et à les transmettre au calculateur du véhicule, et peut mettre en œuvre des algorithmes de prédiction de trajet des véhicules utilisant la notion de « trajet ou chemin le plus probable » (« Most Probable Path » en anglais).

[0016] Chacun des procédés selon l'invention permet de définir des consignes de couple afin de fournir la puissance et l'accélération demandées par le conducteur au cours du fonctionnement du véhicule sur le trajet donné ou prévu, tout en minimisant le niveau de pollution, la consommation énergétique et/ou l'état de santé du véhicule. De plus, grâce au calcul et à la détermination des premier et second termes de correction, qui sont réinjectés en entrée des premières étapes de calcul via une boucle de rétroaction, chacun des procédés permet de simuler le comportement du modèle à chaque instant d'échantillonnage et de le comparer en temps réel au comportement du système

physique considéré (le véhicule et sa chaîne de traction). Chaque procédé utilise les équations d'état directes du modèle PMP dans des étapes permettant de déterminer les premier et second termes de correction, dans une stratégie d'« observateur » intégré. Ceci permet d'adapter les paramètres du modèle et de les faire correspondre davantage au système physique réel (le véhicule et sa chaîne de traction). Une telle stratégie de commande optimale par boucle fermée (et rétroaction) est donc auto-adaptative, au sens où les paramètres du modèle sont ajustés à chaque instant d'échantillonnage en fonction du comportement du système physique, ce qui rend chaque procédé selon l'invention plus précis et/ou plus stable du point de vue de la stratégie de commande d'optimisation, par rapport aux procédés de l'art antérieur.

- [0017] De préférence, les étapes de calcul, pour chacune des consignes, de la valeur du gradient d'état et de la valeur du critère, les étapes d'intégration temporelle, et les étapes de comparaison sont toutes mises en œuvre dans chacun des procédés selon l'invention. Autrement dit, dans chacun des procédés selon l'invention, les premier et second termes de correction sont de préférence déterminés et fournis en entrée des premières étapes de calcul.
- [0018] De préférence, le premier terme de correction, respectivement le second terme de correction, est utilisé dans l'étape de calcul via une relation mathématique d'addition ou de multiplication avec les équations d'état, respectivement avec l'équation de critère.
- [0019] De préférence, la ou chaque étape de comparaison est mise en œuvre via une régulation, par un régulateur embarqué au sein du véhicule, de type régulation proportionnel-intégral-dérivé, ou via une réestimation des variables d'état.
- [0020] L'invention concerne également un calculateur pour la gestion de la chaîne de traction d'un véhicule automobile sur un trajet prédéterminé, le véhicule comprenant, outre le calculateur, un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir en carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la machine électrique, et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, le calculateur étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine

électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure d'un critère ou d'une combinaison de critères du véhicule à optimiser, le calculateur étant configuré pour mettre en œuvre les étapes d'un des procédés tels que décrits précédemment.

[0021] L'invention concerne également un véhicule automobile comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique alimenté par le réservoir en carburant ou une pile à combustible alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités, au moins un dispositif relatif au moteur thermique ou à la pile à combustible, au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, et un calculateur pour la gestion de la chaîne de traction d'un véhicule automobile sur un trajet prédéterminé, le calculateur étant apte à commander le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique et/ou les dispositifs par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique ou la pile à combustible, la machine électrique, et les dispositifs étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique ou de la pile à combustible, de la machine électrique, et des dispositifs étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule, lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure d'un critère ou d'une combinaison de critères du véhicule à optimiser, et un calculateur pour la gestion de la chaîne de traction tel que décrit précédemment.

[0022] L'invention concerne également un produit programme d'ordinateur remarquable en ce qu'il comporte un ensemble d'instructions de code de programme qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ou plusieurs processeurs, configurent le ou les processeurs pour mettre en œuvre un des procédés tels que décrits précédemment.

[0023] On décrira ci-après, à titre d'exemples non limitatifs, des formes d'exécution de la présente invention, en référence aux figures annexées sur lesquelles :

- [Fig.1] illustre schématiquement un véhicule selon l'invention, le véhicule étant muni d'un calculateur embarqué ; et
- [Fig.2] est un organigramme représentant un procédé d'optimisation d'un critère ou d'une combinaison de critère(s) relatif(s) au véhicule, mis en œuvre par le calculateur

de la [Fig.1], selon la présente invention.

- [0024] En se référant à la [Fig.2] la présente invention concerne un procédé, mis en œuvre dans un calculateur 4 embarqué au sein d'un véhicule automobile 2 (visible sur la [Fig.1]), d'optimisation d'un critère ou d'une combinaison de critères relatif(s) au véhicule automobile 2. Le véhicule automobile 2 est par exemple (mais non limitativement) un véhicule hybride. Outre le calculateur 4, un tel véhicule hybride 2 comprend également de manière classique un moteur thermique M (dans le cas d'un véhicule hybride 2 de type « thermique – électrique »), souvent nommé Moteur « ICE » pour « Internal Combustion Engine » en langue anglaise, ou bien une pile à combustible P fonctionnant par exemple à l'hydrogène (dans le cas d'un véhicule hybride 2 de type « hydrogène – électrique »). Un tel véhicule hybride 2 comprend en outre au moins une machine électrique M_E , souvent nommé « machine EMA » pour « Electrical Machine » en langue anglaise, un réservoir de carburant ou un réservoir d'hydrogène (non représentés sur la [Fig.1]) et une batterie 30 d'alimentation électrique (ou bien des super-capacités en variante non représentée).
- [0025] Le véhicule automobile 2 comprend également au moins un dispositif relatif au moteur thermique M et notamment un dispositif de refroidissement 10 du moteur thermique M et un catalyseur 20, ou au moins un dispositif relatif à la pile à combustible P (un tel dispositif n'étant pas représenté sur la [Fig.1]). Le dispositif de refroidissement 10 permet de réduire la température du moteur thermique M pendant son utilisation. Le dispositif de refroidissement 10 comprend notamment un liquide de refroidissement. Le catalyseur 20, relié au moteur thermique M par le système d'échappement, est apte à réduire la quantité de produits polluants dans les gaz d'échappements émis par le moteur thermique M avant de les évacuer à l'extérieur du véhicule. Le catalyseur 20 comprend également un dispositif de chauffage apte à augmenter la température dans le catalyseur 20, afin de mettre en œuvre la dépollution des gaz d'échappement. Le dispositif de chauffage du catalyseur 20 doit être alimenté en énergie électrique pour fonctionner. Le véhicule automobile 2 comprend également au moins un dispositif relatif à la machine électrique M_E , notamment un ensemble de convertisseurs de tension (non représenté sur la [Fig.1]) permettant de convertir la tension entre la batterie 30 et la machine électrique M_E . Le véhicule automobile 2 comprend également au moins un dispositif relatif à la batterie électrique 30 (ou aux super-capacités), un tel dispositif n'étant pas représenté sur la [Fig.1] pour des raisons de clarté.
- [0026] Le moteur thermique M est notamment apte à être alimenté à partir du carburant fourni par le réservoir de carburant, et la pile à combustible P est apte à être alimentée par le réservoir d'hydrogène. Le moteur thermique M comprend également un système d'échappement des gaz d'échappement émis lors de la combustion du mélange d'air et

de carburant dans le moteur thermique M. La machine électrique M_E est apte à être alimentée par l'énergie électrique fournie par la batterie 30.

[0027] Le véhicule 2 peut comprendre d'autres dispositifs relatifs au moteur thermique M ou à la pile à combustible P, et d'autres dispositifs relatifs à la machine électrique M_E .

[0028] On appelle « système », l'ensemble des éléments montés dans le véhicule 2, aptes à consommer ou produire de l'énergie électrique, du carburant ou de l'hydrogène. Par exemple, le système comprend l'ensemble des dispositifs décrits précédemment : le moteur thermique M ou la pile à combustible P, la machine électrique M_E , le dispositif de refroidissement 10, le catalyseur 20 et la batterie 30.

[0029] Chaque dispositif est caractérisé par au moins une variable d'état, permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif. Par exemple, le dispositif de refroidissement 10 est caractérisé par une température de liquide de refroidissement. Par exemple encore, le catalyseur 20 est caractérisé par une valeur de température interne. Par exemple toujours, la batterie 30 est caractérisée par une variable d'état de charge, le moteur thermique M est caractérisé par une vitesse de rotation, la pile à combustible P est caractérisée par une température ou des pressions régnant dans les circuits d'alimentation en hydrogène et en oxygène, etc.

[0030] Le véhicule automobile 2 comporte en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure du critère ou de la combinaison de critères à optimiser (de tels moyens de mesure n'étant pas représentés sur la [Fig.1] pour des raisons de clarté). De préférence, le véhicule automobile 2 comporte également des moyens de mesure de perturbations et/ou de points de consignes appliqué(e)s au véhicule 2 (tels que par exemple des points de consignes de couple et/ou de vitesse du véhicule 2).

[0031] Le critère ou la combinaison de critère(s) à optimiser via le procédé selon la présente invention est par exemple une consommation en énergie du véhicule 2, un niveau de pollution du véhicule 2, un état de santé du véhicule 2, ou encore une combinaison d'au moins deux critères relatifs au véhicule 2 et choisis parmi le groupe consistant en : un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé et une durée d'un trajet prédéterminé. Le critère ou la combinaison de critère(s) à optimiser est représenté par une équation de critère $g(u, q)$. L'équation de critère $g(u, q)$ est fonction au moins des valeurs de consignes instantanées u et des variables d'état q . De préférence encore, l'équation de critère est fonction également des perturbations et/ou des points de consignes w appliqué(e)s au véhicule 2, et s'écrit alors $g(u, q, w)$.

[0032] Le système est représenté par un système d'équations d'état $f(u, q)$ modélisant la dynamique du véhicule 2. Les équations d'état $f(u, q)$ sont fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées u et des variables d'état q . De préférence encore, les équations d'état sont fonctions également des perturbations et/ou des points de

consignes w appliqué(e)s au véhicule 2, et s'écrivent alors $f(u, q, w)$.

- [0033] Le calculateur 4 fait par exemple partie d'une unité de traitement de données stockant une application ou programme informatique apte à coopérer avec le calculateur 4 (l'unité de traitement de données et l'application ou le programme informatique n'étant pas représentés sur la [Fig.1] pour des raisons de clarté). En variante, l'application ou le programme informatique est stocké(e) directement dans le calculateur 4. Le calculateur 4 est relié au moteur thermique ou à la pile à combustible P, à la machine électrique M_E , à la batterie électrique 30, ainsi qu'à l'ensemble des dispositifs décrits précédemment comprenant notamment le dispositif de refroidissement 10 et le catalyseur 20.
- [0034] Le calculateur 4 est apte à recevoir la mesure de chaque valeur de variable d'état relative à chaque dispositif. De plus, le calculateur 4 est apte à commander chaque dispositif auquel il est relié, par l'émission d'une consigne, en fonction de la ou des valeurs de variables relatives à ce dispositif.
- [0035] Ainsi, par exemple, la consigne émise au moteur thermique M désigne la valeur du couple à appliquer au moteur thermique M et est notamment fonction de la vitesse du véhicule et de la demande de puissance du conducteur du véhicule. Par exemple encore, la consigne émise à la pile à combustible P désigne la puissance que l'on demande à la pile à combustible P de fournir et est fonction de l'état de charge de la batterie 30 et/ou des super-capacités, ainsi que de la demande de puissance du conducteur. Par exemple encore, la consigne émise à la machine électrique M_E désigne le couple à appliquer à la machine électrique M_E et est fonction de l'état de charge de la batterie 30 et de la demande de puissance du conducteur.
- [0036] La consigne émise au catalyseur 20 concerne la température dans le catalyseur 20 et est fonction de la température mesurée dans le catalyseur 20. La consigne émise au dispositif de refroidissement 10 concerne la température du liquide de refroidissement et est dépendante de la température mesurée du liquide de refroidissement.
- [0037] Dans un cas particulier, lorsque le critère à optimiser est la consommation en énergie du véhicule 2, la consommation énergétique à optimiser peut être la consommation d'un courant électrique délivré par les branches d'un chargeur électronique alimentant la batterie électrique 30 du véhicule 2 (de telles branches étant par exemple des branches électroniques d'un pont en aval d'un pont redresseur, et comportant chacune au moins un organe semiconducteur à commutation pilotable pour alimenter la batterie électrique 30 lors de sa phase de charge). Chacune des branches du chargeur électronique fournit un courant électrique, la somme des courants électriques fournis par les branches étant alors représentée par une consigne à émettre au chargeur électronique.
- [0038] Le calculateur 4 est également configuré pour déterminer le domaine de consignes

applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne. Le calculateur 4 est également configuré pour mettre en œuvre le principe de la méthode PMP, autrement dit la méthode du Principe du Maximum de Pontryagin, en déterminant la fonction Hamiltonienne $H(x, u^*, \lambda)$ à partir des différentes valeurs de consigne du domaine de consignes applicables. Est introduite ici la notation u^* , qui représente la commande optimale. Sont également introduits des états adjoints λ (aussi appelés « paramètres adjoints », « paramètres de Lagrange », « vecteurs adjoints », ou bien encore « vecteurs co-états »). Ces états adjoints sont associés aux équations d'état qui représentent les conditions du comportement dynamique du système physique, et vont permettre la résolution complète du problème d'optimisation.

[0039] Le calculateur 4 comprend un processeur apte à mettre en œuvre un ensemble d'instructions permettant de réaliser ces fonctions.

[0040] En référence à la [Fig.2], il va maintenant être décrit une forme de réalisation du procédé d'optimisation d'un critère ou d'une combinaison de critères du véhicule 2 selon l'invention, mis en œuvre par un calculateur 4 tel que décrit précédemment. Afin de simplifier la description, le critère à optimiser est par exemple la consommation en énergie du véhicule 2. Bien entendu tout autre critère ou combinaison de critère(s) relatif(s) au véhicule 2 peut être optimisé de la même manière en utilisant le procédé illustré sur la [Fig.2], et notamment un niveau de pollution du véhicule 2, un état de santé du véhicule 2, une durée d'un trajet prédéterminé, ou encore une combinaison d'au moins deux critères relatifs au véhicule 2 et choisis parmi le groupe consistant en : un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé et une durée d'un trajet prédéterminé.

[0041] Afin de simplifier la description, les différentes variables considérées sont les suivantes : la température du liquide de refroidissement du dispositif de refroidissement 10 et l'état de charge de la batterie 30 ou des super-capacités. Les différentes consignes de commande considérées sont par exemple : le couple du moteur thermique M et le couple de la machine électrique M_E . D'autres paramètres pourraient être considérés, concernant l'au moins un dispositif relatif à la machine électrique M_E ou des paramètres concernant la pile à combustible P ou l'au moins un dispositif relatif à la pile à combustible P , ou encore des paramètres concernant l'au moins un dispositif relatif à la batterie 30 ou aux super-capacités.

[0042] Le procédé est mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, et comporte des étapes qui sont rebouclées de manière itérative à chaque nouvel instant d'échantillonnage. La durée d'échantillonnage entre deux instants d'échantillonnage consécutifs dépend de la dynamique du système et peut être choisie comme par exemple comprise entre 10 ms et 500 ms, typiquement égale à 100 ms.

[0043] Le procédé comporte une étape initiale 22 au cours de laquelle le calculateur 4

détermine un domaine de consignes applicables $\underline{u}$ comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne u à appliquer aux variables.

[0044] Le procédé comporte ensuite une étape suivante 24 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables $\underline{u}$ déterminé, tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état $f(\underline{u}, q, w)$ décrivant le système. De préférence, au cours de l'étape de calcul 24, les gradients d'état possibles pour chaque consigne dans le domaine de consignes applicables $\underline{u}$ sont calculés en utilisant en outre un premier terme de correction K_q , dont le mode de calcul sera détaillé par la suite en décrivant l'étape de comparaison 40. Lors de la première itération du procédé, le premier terme de correction K_q est initialisé sur une valeur pré-paramétrée. Le premier terme de correction K_q est par exemple utilisé dans l'étape de calcul 24 via une relation mathématique d'addition ou de multiplication avec les équations d'état $f(\underline{u}, q, w)$.

[0045] Le procédé comporte une étape parallèle ou suivante 26 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables $\underline{u}$ déterminé, toutes les valeurs possibles pour le critère ou la combinaison de critères à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère $g(\underline{u}, q, w)$. De préférence, au cours de l'étape de calcul 26, les valeurs possibles pour le critère ou la combinaison de critères à optimiser pour chaque consigne dans le domaine de consignes applicables $\underline{u}$ sont calculées en utilisant en outre un second terme de correction K_g , dont le mode de calcul sera détaillé par la suite en décrivant l'étape de comparaison 42. Lors de la première itération du procédé, le second terme de correction K_g est initialisé sur une valeur pré-paramétrée. Le second terme de correction K_g est par exemple utilisé dans l'étape de calcul 26 via une relation mathématique d'addition ou de multiplication avec l'équation de critère $g(\underline{u}, q, w)$. En variante non représentée, les étapes de calcul 24, 26 peuvent être interverties.

[0046] Le procédé comporte ensuite une étape suivante 28 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables $\underline{u}$ déterminé, toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne $H(\underline{u}, q, \lambda, w)$ de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour le critère ou la combinaison de critères à optimiser déterminées pour cette consigne. Pour ce faire, le calculateur 4 utilise le principe de la méthode PMP, autrement dit la méthode du Principe du Maximum de Pontryagin.

[0047] La fonction Hamiltonienne $H(\underline{u}, q, \lambda, w)$ s'exprime alors comme :

$$H(\underline{u}, q, \lambda, w) = [g(\underline{u}, q, w) + K_g] + \lambda^T \cdot [f(\underline{u}, q, w) + K_q]$$

[0048] avec λ^T la transposée du vecteur adjoint λ .

[0049] Il est à noter que, lorsque la durée du trajet fait partie du ou des critères(s) à optimiser, la fonction Hamiltonienne $H(\underline{u}, q, \lambda, w)$ s'exprime alors comme :

$$\underline{H}(\underline{u}, q, \lambda, w) = [\underline{g}(\underline{u}, q, w) + K_g] + \eta + \lambda^T \cdot [f(\underline{u}, q, w) + K_q]$$

[0050] avec $\eta > 0$; η étant alors un coefficient de pondération permettant de pondérer la durée du trajet.

[0051] Le calculateur 4 détermine alors, au cours d'une étape suivante 31, l'ensemble des consignes dites « optimales » u^* , en minimisant, pour chacune des consignes, la fonction Hamiltonienne calculée au cours de l'étape précédente 28. Dans l'exemple de réalisation considéré, le calculateur 4 détermine ainsi une première consigne « thermique » optimale destinée à commander le moteur thermique M, et une seconde consigne « électrique » optimale destinée à commander la machine électrique M_E .

[0052] De préférence, le procédé comporte ensuite une étape suivante 32 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, pour chaque consigne optimale u^* , la valeur du gradient d'état pour ladite consigne u^* , en fonction de la valeur de la consigne u^* déterminée au cours de l'étape 31.

[0053] De préférence, le procédé comporte une étape parallèle ou suivante 34 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, pour chaque consigne optimale u^* , la valeur du ou de chaque critère à optimiser pour ladite consigne u^* , en fonction de la valeur de la consigne u^* déterminée au cours de l'étape 31. En variante non représentée, les étapes de calcul 32, 34 peuvent être interverties.

[0054] Lorsque le procédé comporte l'étape de calcul 32, le procédé comporte une étape suivante 36 au cours de laquelle le calculateur 4 procède à une intégration temporelle de la valeur du gradient d'état calculée au cours de l'étape 32. Cette étape d'intégration temporelle 36 fournit une valeur estimée du vecteur d'état.

[0055] Le procédé comporte ensuite une étape suivante 40 au cours de laquelle le calculateur 4 compare la valeur du vecteur d'état estimée au cours de l'étape précédente 36 à une valeur du vecteur d'état mesurée par les moyens de mesure du véhicule automobile 2. L'écart entre les deux valeurs fournit le premier terme de correction K_q . A l'issue de cette étape 40 de comparaison, le premier terme de correction K_q est fourni en entrée de l'étape de calcul 24 à l'instant d'échantillonnage suivant.

[0056] Lorsque le procédé comporte l'étape de calcul 34, le procédé comporte une étape suivante 41 au cours de laquelle le calculateur 4 procède à une intégration temporelle de la valeur du ou de chaque critère à optimiser calculée au cours de l'étape 34. Cette étape d'intégration temporelle 41 fournit une valeur de critère globale (ou cumulée) estimée.

- [0057] Le procédé comporte ensuite une étape suivante 42 au cours de laquelle le calculateur 4 compare, pour le ou chaque critère à optimiser, la valeur de critère globale estimée au cours de l'étape précédente 41 à une valeur de critère mesurée par les moyens de mesure du véhicule automobile 2. L'écart entre les deux valeurs fournit le second terme de correction K_g . A l'issue de cette étape 42 de comparaison, le second terme de correction K_g est fourni en entrée de l'étape de calcul 26 à l'instant d'échantillonnage suivant.
- [0058] De préférence, chacune des étapes de comparaison 40, 42 est mise en œuvre via une régulation, par un régulateur embarqué au sein du véhicule 2, de type régulation proportionnel-intégral-dérivé, ou bien via une réestimation des variables d'état, ou par tout autre moyen calculatoire de type rétroaction connu de l'homme de l'art apportant une valeur de correction à appliquer à chaque instant pour réduire l'erreur entre estimation et mesure.
- [0059] Le procédé peut être réitéré pendant l'utilisation du véhicule.
- [0060] Le procédé permet ainsi d'obtenir des valeurs de consignes pour lesquelles le niveau de pollution, et/ou la consommation énergétique, et/ou l'état de santé du véhicule 2, et/ou la durée du trajet sont minimales.
- [0061] De plus, le procédé permet, grâce au calcul et à la détermination des premier et second termes de correction K_q , K_g , qui sont réinjectés en entrée des premières étapes de calcul 24, 26 via une boucle de rétroaction, de simuler le comportement du modèle à chaque instant d'échantillonnage et de le comparer en temps réel au comportement du système physique (à savoir le véhicule automobile 2). Ceci permet d'adapter les paramètres du modèle et de les faire correspondre davantage au système physique réel. Une telle stratégie de commande optimale par boucle fermée (et rétroaction) est donc auto-adaptative, au sens où les paramètres du modèle sont ajustés à chaque instant d'échantillonnage en fonction du comportement du système physique, ce qui rend le procédé selon l'invention plus précis et/ou plus stable du point de vue de la stratégie de commande d'optimisation, par rapport aux procédés de l'art antérieur.
- [0062] En outre, le procédé selon l'invention :
- permet de réutiliser le modèle interne PMP connu en soi pour effectuer l'adaptation au système physique réel (calcul des gradients). Seules des intégrations temporelles numériques (et des moyens pour les effectuer) sont ajoutés au sein du calculateur 4 et dans la méthode PMP de l'art antérieur pour réaliser l'auto-adaptation ;
 - est flexible et présente en particulier une capacité à sélectionner et/ou ajuster différentes adaptations : sur un ou plusieurs états du modèle interne, et/ou sur un ou plusieurs termes du critère ou de la combinaison de critères à optimiser ;

- utilise mieux les entrées de mesures existantes (d'états courants, et de critères courants), avec une consolidation de la commande par rétroaction de la méthode d'optimisation PMP.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé, mis en œuvre dans un calculateur (4) embarqué au sein d'un véhicule automobile (2), d'optimisation d'un critère relatif au véhicule parmi le groupe consistant en : un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé et une durée d'un trajet prédéterminé, le véhicule (2) comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités (30) apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique (M) alimenté par le réservoir de carburant ou une pile à combustible (P) alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique (M_E) alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités (30), au moins un dispositif (10, 20) relatif au moteur thermique (M) ou à la pile à combustible (P), au moins un dispositif (30) relatif à la machine électrique (M_E), et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités (30), le calculateur (4) étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé et étant apte à commander le moteur thermique (M) ou la pile à combustible (P), la machine électrique (M_E) et/ou les dispositifs (10, 20, 30) par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique (M) ou la pile à combustible (P), la machine électrique (M_E), et les dispositifs (10, 20, 30) étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique (M) ou de la pile à combustible (P), de la machine électrique (M_E), et des dispositifs (10, 20, 30) étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule (2), lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le critère à optimiser étant représenté par une équation de critère fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule (2) comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure du critère à optimiser, ledit procédé étant mis en œuvre pendant une durée divisée en instants d'échantillonnage constants, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :

- a) détermination (22) d'un domaine de consignes applicables

- comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
- b) calcul (24), pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état,
- c) calcul (26), pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour le critère à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,
- d) calcul (28), pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour le critère à optimiser déterminées pour ladite consigne,
- e) détermination (31) de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- f) calcul (32), pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul (34), pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du critère à optimiser pour ladite consigne,
- g) intégration temporelle (36) de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle (41), pour le critère à optimiser, de la valeur calculée de ce critère, fournissant une valeur de critère globale estimée,
- h) comparaison (40) de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction (K_q), le premier terme de correction (K_q) ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul b) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul b), et/ou comparaison (42), de la valeur du critère globale estimée à une valeur de critère mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction (K_g), le second terme de correction (K_g) ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul

c) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul c).

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication précédente, permettant d'optimiser une combinaison d'au moins deux critères relatifs au véhicule (2) et choisis parmi le groupe consistant en : un niveau de pollution, une consommation en énergie, un état de santé et une durée d'un trajet pré-déterminé, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :

- aa) détermination (22) d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
- bb) calcul (24), pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au moins les équations d'état,
- cc) calcul (26), pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles pour la combinaison de critères à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère,
- dd) calcul (28), pour chaque consigne et dans le domaine de consignes applicables déterminé, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour la combinaison de critères à optimiser déterminées pour ladite consigne,
- ee) détermination (31) de la valeur de chaque consigne, dans le domaine de consignes applicables déterminé, pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,
- ff) calcul (32), pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur du gradient d'état pour ladite consigne, et/ou calcul (34), pour chacune des consignes, en fonction de ladite valeur déterminée de la consigne, de la valeur de chaque critère de la combinaison de critères pour ladite consigne,
- gg) intégration temporelle (36) de la valeur du gradient d'état calculée, fournissant une valeur d'état estimée, et/ou intégration temporelle (41), pour chaque critère de la com-

- binaison de critères, de la valeur calculée de ce critère, fournissant une valeur de critère globale estimée,
- hh) comparaison (40) de la valeur d'état estimée à une valeur d'état mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un premier terme de correction (K_q), le premier terme de correction (K_q) ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul bb) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul bb), et/ou comparaison (42), pour chaque critère de la combinaison de critères, de la valeur de critère globale estimée à une valeur de critère mesurée, l'écart entre les deux valeurs fournissant un second terme de correction (K_g), le second terme de correction (K_g) ainsi déterminé étant fourni en entrée de l'étape de calcul cc) à l'instant d'échantillonnage suivant et étant utilisé dans ladite étape de calcul cc).

- [Revendication 3] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le premier terme de correction (K_q), respectivement le second terme de correction (K_g), est utilisé dans l'étape de calcul (24, 26) via une relation mathématique d'addition ou de multiplication avec les équations d'état, respectivement avec l'équation de critère.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la ou chaque étape de comparaison (40, 42) est mise en œuvre via une régulation, par un régulateur embarqué au sein du véhicule (2), de type régulation proportionnel-intégral-dérivé, ou via une réestimation des variables d'état.
- [Revendication 5] Calculateur (4) pour la gestion de la chaîne de traction d'un véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé, le véhicule (2) comprenant, outre le calculateur (4), un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités (30) apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique (M) alimenté par le réservoir en carburant ou une pile à combustible (P) alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique (M_E) alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités (30), au moins un dispositif (10, 20) relatif au moteur thermique (M) ou à la pile à combustible (P), au moins un dispositif (30) relatif à la machine électrique (M_E), et au moins un dispositif relatif à la batterie électrique

ou aux super-capacités (30), le calculateur (4) étant apte à commander le moteur thermique (M) ou la pile à combustible (P), la machine électrique (M_E) et/ou les dispositifs (10, 20, 30) par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique (M) ou la pile à combustible (P), la machine électrique (M_E), et les dispositifs (10, 20, 30) étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique (M) ou de la pile à combustible (P), de la machine électrique (M_E), et des dispositifs (10, 20, 30) étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule (2), lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule (2) comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure d'un critère ou d'une combinaison de critères du véhicule (2) à optimiser, le calculateur (4) étant caractérisé en ce qu'il est configuré pour mettre en œuvre les étapes du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.

[Revendication 6]

Véhicule automobile (2) comprenant un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités (30) apte(s) à fournir de l'énergie électrique, un moteur thermique (M) alimenté par le réservoir en carburant ou une pile à combustible (P) alimentée par le réservoir d'hydrogène, au moins une machine électrique (M_E) alimentée par de l'énergie électrique fournie par la batterie et/ou les super-capacités (30), au moins un dispositif (10, 20) relatif au moteur thermique (M) ou à la pile à combustible (P), au moins un dispositif (30) relatif à la machine électrique (M_E), au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités (30), et un calculateur (4) pour la gestion de la chaîne de traction d'un véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé, le calculateur (4) étant apte à commander le moteur thermique (M) ou la pile à combustible (P), la machine électrique (M_E) et/ou les dispositifs (10, 20, 30) par l'émission d'un ensemble de consignes, le moteur thermique (M) ou la pile à combustible (P), la machine électrique (M_E), et les dispositifs (10, 20, 30) étant chacun caractérisés par au moins une variable d'état, chaque variable d'état permettant de décrire l'état de fonctionnement du dispositif qu'elle caractérise, l'ensemble du moteur thermique (M) ou de la pile à combustible (P), de la machine électrique (M_E), et des dis-

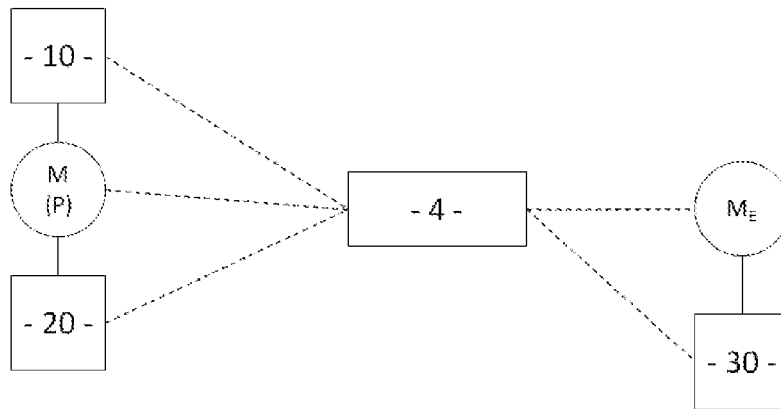
positifs (10, 20, 30) étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule (2), lesdites équations d'état étant fonctions au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule (2) comprenant en outre des moyens de mesure du ou des état(s) décrit(s) par la ou chaque variable d'état et des moyens de mesure d'un critère ou d'une combinaison de critères du véhicule (2) à optimiser, et un calculateur (4) pour la gestion de la chaîne de traction selon la revendication 5.

[Revendication 7]

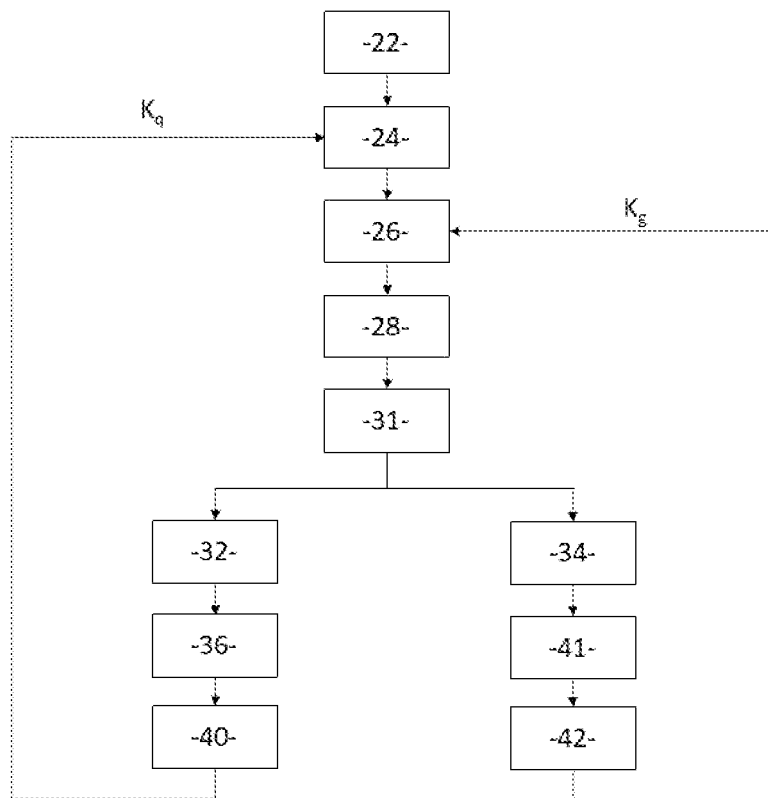
Produit programme d'ordinateur caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble d'instructions de code de programme qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ou plusieurs processeurs, configurent le ou les processeurs pour mettre en œuvre un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.

[Fig. 1]

2



[Fig. 2]



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement
national

FA 911792
FR 2209868

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	FR 3 113 270 A1 (PSA AUTOMOBILES SA [FR]; UNIV ORLEANS [FR]) 11 février 2022 (2022-02-11) * abrégé; revendications 1-10; figures 1-4 * -----	1-7	B60W20/15 B60W20/16 G05B13/04 G05B11/36 G01C21/34 B60L58/10 B60L58/30
A	EP 2 857 271 A2 (MAN TRUCK & BUS AG [DE]) 8 avril 2015 (2015-04-08) * le document en entier * -----	1-7	
A	EP 3 878 706 A1 (AVL POWERTRAIN UK LTD [GB]) 15 septembre 2021 (2021-09-15) * le document en entier * -----	1-7	
A	WO 2020/232104 A1 (CUMMINS INC [US]; KOTI ARCHIT N [US] ET AL.) 19 novembre 2020 (2020-11-19) * le document en entier * -----	1-7	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			B60W
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
27 mars 2023		Moroncini, Alessio	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE **RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2209868 FA 911792**

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 **27-03-2023**
 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 au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 3113270	A1	11-02-2022	AUCUN	
EP 2857271	A2	08-04-2015	BR 102014014713 A2	10-02-2016
			CN 104670219 A	03-06-2015
			DE 102013016569 A1	09-04-2015
			EP 2857271 A2	08-04-2015
EP 3878706	A1	15-09-2021	AUCUN	
WO 2020232104	A1	19-11-2020	CN 114144345 A	04-03-2022
			EP 3969343 A1	23-03-2022
			US 2022242394 A1	04-08-2022
			WO 2020232104 A1	19-11-2020