

⑫ **BREVET D'INVENTION** **B1**

⑤④ PROCÉDE D'OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION EN ENERGIE D'UN VEHICULE  
AUTOMOBILE.

②② Date de dépôt : 25.11.22.

③③ Priorité :

⑥③ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *Vitesco Technologies GmbH* — DE.

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 31.05.24 Bulletin 24/22.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 11.10.24 Bulletin 24/41.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑦② Inventeur(s) : SANS Mariano et METAYER Julien.

⑦③ Titulaire(s) : *Vitesco Technologies GmbH*.

⑦④ Mandataire(s) : *Vitesco Technologies France*.

FR 3 142 423 - B1



## Description

### **Titre de l'invention : PROCEDE D'OPTIMISATION DE LA CONSOMMATION EN ENERGIE D'UN VEHICULE AUTOMOBILE**

- [0001] La présente invention concerne l'optimisation de la consommation en énergie d'un véhicule automobile, et plus particulièrement un procédé d'optimisation de la consommation en énergie 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 la consommation en énergie du véhicule. 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.
- [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 différentes 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 (aussi appelées « équations d'état ») 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. Des équations dites « conditions d'optimalité » utilisant des « états adjoints » (aussi appelés « co-états », « paramètres adjoints », « paramètres de Lagrange », ou encore « variables duales ») sont également utilisées dans la résolution du problème d'optimisation. Ces états adjoints sont associés aux équations d'état, représentent les conditions du comportement dynamique du système physique, et permettent la résolution complète du problème d'optimisation. Les états adjoints doivent en effet respecter des équations de gradients pour garantir le caractère optimal de la solution globale fournie par le modèle PMP.
- [0007] Toutefois, le problème de l'initialisation de ces états adjoints est un problème crucial à résoudre en vue d'améliorer la précision des résultats finaux obtenus pour l'optimisation, et d'éviter que le modèle interne ne diffère trop du système physique réel. La réinitialisation (ou re-calibration) des états adjoints est en effet nécessaire à certains instants ou périodes temporel(le)s, en particulier lorsque les conditions de circulation changent (du fait notamment de perturbations externes, de nouveaux obstacles détectés sur la route, de changement d'itinéraires, etc.). A cet effet, il est connu de procéder à l'initialisation des états adjoints via une méthode dite « méthode des tirs ». Une telle méthode des tirs est basée sur des simulations itératives effectuées sur un scénario courant prédit (autrement dit sur un horizon prédictif indiquant notamment les distances, les courbes et les pentes de la route, les arrêts de signalisation obligatoires, la densité du trafic, etc. dans le cas d'un véhicule automobile, lorsqu'un tel horizon prédictif est disponible pour le système). Plus précisément, des valeurs cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints sont dans un premier temps définies au sein d'un calculateur embarqué au sein du véhicule (de telles valeurs cibles

devant être atteintes à la fin du scénario courant prédit). Des simulations de la commande optimale sont ensuite effectuées sur la base de ce scénario courant prédit, pour différentes valeurs d'initialisation des états adjoints. Chaque simulation (ou « tir ») consiste en une simulation numérique du modèle interne qui débute avec les valeurs d'initialisation des états adjoints, et qui est appliquée tout le long du scénario courant prédit. A l'issue de chaque « tir », les états finaux calculés des variables d'état ou des états adjoints sont alors comparés aux valeurs cibles prédéfinies dans le calculateur. Une correction sur les prochaines valeurs d'initialisation des états adjoints est ensuite calculée et appliquée aux équations du modèle. Les « tirs » sont répétés jusqu'à ce que les valeurs cibles soient atteintes avec une précision acceptable (déterminée via un seuil de précision prédéfini), ou jusqu'à ce qu'un nombre maximum d'itérations ait été effectué. Les valeurs d'initialisation des états adjoints qui conduisent aux « meilleurs » états finaux des variables d'état ou des états adjoints sont alors fournies en entrée du modèle PMP, pour la poursuite de la commande optimale « réelle » de la consommation en énergie du véhicule.

[0008] Quand des résolutions mathématiques directes ne sont pas disponibles à cause d'une complexité trop importante du système considéré, l'initialisation des états adjoints via une « méthode des tirs » demeure ainsi la principale méthode connue pour régler les paramètres du modèle PMP, avec une très grande influence (ou sensibilité) sur les états finaux du système. Cette initialisation requiert ainsi la plus grande des précisions, même si la consommation en énergie du véhicule est correctement minimisée sur le scénario courant prédit. Toutefois, dans les solutions de l'art antérieur, il arrive fréquemment que cette initialisation des états adjoints soit relativement imprécise et/ou devienne erronée dans des conditions de circulation réelles avec des perturbations variables ou inattendues. Ceci conduit à des valeurs finales imprécises et/ou erronées pour les variables d'état ou les états adjoints, possiblement très éloignées des valeurs cibles. L'optimalité n'est alors pas atteinte pour les conditions de circulation attendues.

[0009] Il existe donc un besoin de pouvoir disposer d'un procédé de commande optimale permettant l'optimisation de la consommation en énergie d'un véhicule automobile par mise en œuvre d'un modèle PMP, offrant une initialisation des états adjoints plus précise et plus juste, malgré les possibles écarts entre le modèle interne et le système physique réel, et permettant de conserver l'optimalité de la commande quelles que soient les conditions de circulation.

[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 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, l'itinéraire du véhicule sur une distance prédéterminée ainsi que des conditions de circulation étant prédéfinis ou prédits au sein du calculateur, 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 fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, un ensemble d'états adjoints étant associés aux équations d'état et représentant les conditions du comportement dynamique du véhicule, la consommation en énergie à optimiser étant définie dans une équation de critère comme étant la somme entre d'une part la consommation instantanée cumulée en carburant ou en hydrogène du moteur thermique ou de la pile à combustible et d'autre part un terme correctif terminal représentant une énergie électrique extraite de ou stockée dans la batterie électrique ou les super-capacités, le terme correctif terminal étant fonction de la différence d'état de charge entre d'une part l'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités à la fin du trajet prédéterminé et d'autre part l'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités au début du trajet prédéterminé, ledit terme correctif étant une fonction linéaire définie par un facteur de proportionnalité, 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 :

- calcul, pour chaque consigne, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant au moins l'équation de critère, et
- détermination de la valeur de chaque consigne pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,

le calculateur étant configuré pour définir des valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints en fonction des conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur, les variables d'état courantes étant sélectionnées par le calculateur en tant qu'états initiaux, et le procédé comportant en outre

une phase de mise à jour de l'équation de critère, ladite phase comprenant les étapes de :

- sélection d'une première valeur initiale pour les états adjoints ;
- calcul, en fonction desdits états initiaux et de la première valeur initiale sélectionnée pour les états adjoints, ainsi que d'un modèle interne préimplanté dans le calculateur, d'une première simulation du modèle interne pour lesdites conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur, un premier couple de valeurs formé par une consommation en énergie du véhicule et une différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités étant obtenu à l'issue de l'étape de calcul de la première simulation ;
- si, à l'issue de l'étape de calcul de la première simulation, les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints ne sont pas atteintes :
  - sélection d'une deuxième valeur initiale pour les états adjoints, distincte de la première valeur initiale ;
  - calcul, en fonction desdits états initiaux et de la deuxième valeur initiale sélectionnée pour les états adjoints, ainsi que du modèle interne, d'une deuxième simulation du modèle interne pour lesdites conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur, un deuxième couple de valeurs formé par une consommation en énergie du véhicule et une différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités étant obtenu à l'issue de l'étape de calcul de la deuxième simulation ;
- si, à l'issue de l'étape de calcul de la deuxième simulation, les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints ne sont pas atteintes :
  - calcul, en fonction des premier et deuxième couples de valeurs de consommation en énergie du véhicule et de différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités, d'une première estimation du facteur de proportionnalité, en utilisant une méthode d'estimation de gradient prédéfinie, la première estimation du facteur de proportionnalité étant utilisée pour mettre à jour l'équation de critère de la consommation en énergie à optimiser ; et
- rebouclage des étapes précédentes jusqu'à ce que les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints soient atteintes.

[0011] Dans le procédé décrit ci-dessus, les étapes autres que la phase de mise à jour sont rebouclées de manière itérative à chaque nouvel instant d'échantillonnage. En outre, le

procédé 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.

- [0012] Le procédé 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 la consommation énergétique du véhicule. De plus, le procédé selon l'invention permet, au cours de la phase de mise à jour, d'adapter l'estimation du terme correctif terminal ainsi que d'extraire une estimation du facteur de proportionnalité, dans une stratégie d'« observateur » intégré. De ce fait, grâce à la phase de mise à jour du procédé, l'initialisation des états adjoints est plus précise et plus juste, malgré les possibles écarts entre le modèle interne et le système physique réel, et permet de conserver l'optimalité de la commande quelles que soient les conditions de circulation.
- [0013] Selon une première variante de réalisation, ladite phase de mise à jour est mise en œuvre à des intervalles temporels réguliers prédéterminés.
- [0014] Selon une autre variante de réalisation, le procédé comporte en outre une étape de détection d'au moins une condition prédéterminée, ladite au moins une condition prédéterminée concernant l'itinéraire du véhicule et/ou les conditions de circulation prédéfinis ou prédits au sein du calculateur, et ladite phase de mise à jour est mise en œuvre uniquement lorsque ladite au moins une condition prédéterminée a été détectée par le calculateur. Une telle condition prédéterminée est par exemple relative à des perturbations externes ou à des nouveaux obstacles détectés sur la route, etc.
- [0015] Avantagusement, les conditions de circulation sont prédites au sein du calculateur selon un horizon temporel prédéterminé, via un système de gestion de données statiques et/ou dynamiques relatives à l'infrastructure routière et/ou au trafic routier relié au calculateur, le calculateur étant configuré pour recevoir lesdites conditions de circulation selon des fenêtres temporelles glissantes tout au long de l'itinéraire du véhicule sur ladite distance prédéterminée. Ceci permet de conserver l'optimalité de la commande lorsque les conditions de circulation sont prédites selon un horizon temporel fini, ainsi que de calibrer les co-états.
- [0016] De préférence, ladite méthode d'estimation de gradient prédéfinie est une méthode de régression linéaire, en particulier une méthode des moindres carrés récursifs. Une telle méthode des moindres carrés récursifs permet de filtrer les non-linéarités dans les couples de valeurs : consommation en énergie du véhicule et différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités obtenues à l'issue des différents

tirs réalisés au cours de la phase de mise à jour.

- [0017] De préférence encore, lorsque la méthode d'estimation de gradient prédéfinie est une méthode des moindres carrés récursifs, la dernière estimation du facteur de proportionnalité calculée au cours de la phase de mise à jour est sauvegardée dans le calculateur. Ceci permet de réduire substantiellement la taille des données sauvegardées en mémoire du calculateur à chaque nouvelle itération de la phase de mise à jour.
- [0018] Selon un mode de réalisation de l'invention, ledit trajet prédéterminé que doit emprunter le véhicule est segmenté par le calculateur en N segments de trajets successifs, N étant un nombre entier prédéfini, et le calculateur définit, au cours de la phase de mise à jour, une ou plusieurs valeur(s)-cible(s) pour les états adjoints sur N-1 segments de trajet, et définit une ou plusieurs valeur(s)-cible(s) pour les états finaux des variables d'état sur le segment de trajet restant.
- [0019] Selon un exemple particulier de ce mode de réalisation, lesdits N-1 segments de trajet correspondent aux N-1 premiers segments du trajet prédéterminé que doit emprunter le véhicule, ledit segment de trajet restant correspondant au dernier segment dudit trajet prédéterminé.
- [0020] De préférence, selon ce mode de réalisation, le calculateur impose aux états adjoints, sur lesdits N-1 segments de trajet, de converger vers une valeur-cible dont la valeur correspond audit facteur de proportionnalité.
- [0021] Selon un mode de réalisation de l'invention, le procédé comprend en outre, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :
- détermination d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
  - 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,
  - 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.
- [0022] 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, l'itinéraire du véhicule sur une distance prédéterminée ainsi que des conditions de circulation étant prédéfinis ou prédits au sein du calculateur, 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 fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, un ensemble d'états adjoints étant associés aux équations d'état et représentant les conditions du comportement dynamique du véhicule, le calculateur étant configuré pour mettre en œuvre les étapes du procédé tel que décrit précédemment.

[0023] 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 machine électrique, au moins un dispositif relatif à la batterie électrique ou aux super-capacités, et un calculateur pour la gestion de la chaîne de traction du véhicule automobile sur un trajet prédéterminé, l'itinéraire du véhicule sur une distance prédéterminée ainsi que des conditions de circulation étant prédéfinis ou prédits au sein du calculateur, 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 fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, dans lequel le calculateur est tel que décrit précédemment.

[0024] 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 le procédé tel que décrit précédemment.

- [0025] 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 de la consommation en énergie du véhicule, mis en œuvre par le calculateur de la [Fig.1], selon la présente invention.
- [0026] 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 de la consommation en énergie du 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<sub>E</sub>, souvent nommée « 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).
- [0027] 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<sub>E</sub>, 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<sub>E</sub>. 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.

- [0028] 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.
- [0029] 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  $M_E$ .
- [0030] 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.
- [0031] 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.
- [0032] La consommation en énergie à optimiser du véhicule 2, à optimiser via le procédé selon la présente invention, est représentée 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 de perturbations et/ou de points de consignes  $w$  appliqué(e)s au véhicule 2, et s'écrit alors  $g(u, q, w)$ . La consommation en énergie  $J$  à optimiser sur un intervalle de temps T donné est reliée à l'équation de critère via l'équation suivante :
- $$J = \int_0^T g(u, q, w) . dt$$
- [0033] Par ailleurs, la consommation en énergie  $J$  à optimiser est définie comme étant la somme entre d'une part la consommation instantanée cumulée  $J_i$  en carburant ou en hydrogène du moteur thermique M ou de la pile à combustible P, et d'autre part un terme correctif terminal  $J_c$  représentant une énergie électrique extraite de ou stockée dans la batterie 30 (ou les super-capacités). Le terme correctif terminal  $J_c$  peut être calculé à partir de la différence d'état de charge entre d'une part l'état de charge

$SoC_{final}$  de la batterie électrique 30 (ou des super-capacités) à la fin du trajet du véhicule 2 et d'autre part l'état de charge  $SoC_{initial}$  de la batterie électrique 30 (ou des super-capacités) au début du trajet du véhicule 2. Ainsi, le terme correctif terminal  $J_c$  s'exprime alors comme :  $J_c = k(SoC_{final} - SoC_{initial})$

[0034] avec  $k$  un facteur de proportionnalité positif, et la valeur de  $J_c$  étant positive si la différence  $(SoC_{final} - SoC_{initial})$  est positive (auquel cas de l'énergie électrique est stockée dans la batterie 30 ou dans les super-capacités, et le terme correctif  $J_c$  est soustrait de la consommation instantanée cumulée  $J_i$  dans l'expression de  $J$ ), la valeur de  $J_c$  étant négative si la différence  $(SoC_{final} - SoC_{initial})$  est négative (auquel cas de l'énergie électrique est extraite de la batterie 30 ou des super-capacités, et le terme correctif  $J_c$  est additionné à la consommation instantanée cumulée  $J_i$  dans l'expression de  $J$ )

[0035] La consommation en énergie  $J$  à optimiser s'exprime alors dans l'équation de critère comme :

$$J = J_i - k(SoC_{final} - SoC_{initial})$$

[0036] 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 fonction au moins des valeurs de consignes instantanées  $u$  et des variables d'état  $q$ . De préférence encore, les équations d'état sont fonction également des perturbations et/ou des points de consignes  $w$  appliqué(e)s au véhicule 2, et s'écrivent alors  $f(u, q, w)$ .

[0037] 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. Le calculateur 4 est relié également à un système de gestion de données statiques et/ou dynamiques relatives à l'infrastructure routière et/ou au trafic routier (un tel système n'étant pas représenté sur la [Fig.1]). Le système de gestion de données statiques et/ou dynamiques est par exemple configuré selon une architecture « en nuage » (ou « cloud » en anglais) et permet de fournir (voire de prédire) un horizon temporel quant au cycle de fonctionnement (ou période de changement d'état) d'éléments d'infrastructure routière détectés devant le véhicule sur son parcours, en fonction notamment de la vitesse du véhicule et de la densité de trafic sur la route. Le

système de gestion permet également de prédire les distances, les courbes et les pentes de la route, les arrêts de signalisation obligatoires, la densité du trafic, etc. Le système de gestion est par exemple 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). 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.), l'ensemble des données statiques et dynamiques représentant les conditions de circulation. 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 4, et peut mettre en œuvre des algorithmes de prédiction de trajet des véhicules utilisant par exemple la notion de « trajet ou chemin le plus probable » (« Most Probable Path » en anglais). Le calculateur 4 est configuré pour recevoir les conditions de circulation prédites par le système de gestion, selon des fenêtres temporelles glissantes tout au long de l'itinéraire du véhicule 2, sur la distance du trajet parcouru par le véhicule 2.

[0038] Le calculateur 4 est apte à recevoir une 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.

[0039] 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.

[0040] 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.

[0041] 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  $\lambda$  (aussi appelés « paramètres adjoints », « paramètres de Lagrange », « vecteurs adjoints », ou bien encore « vecteurs co-états »). Ces états adjoints sont associés aux équations d'état, représentent les conditions du comportement dynamique du système physique, et vont permettre la résolution complète du problème d'optimisation. Le calculateur 4 est en outre configuré pour définir des valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état  $q$  ou des états adjoints  $\lambda$ , en fonction des conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur 4.

- [0042] Le calculateur 4 comprend un processeur apte à mettre en œuvre un ensemble d'instructions permettant de réaliser ces fonctions.
- [0043] En référence à la [Fig.2], il va maintenant être décrit une forme de réalisation du procédé d'optimisation de la consommation en énergie du véhicule 2 selon l'invention, mis en œuvre par un calculateur 4 tel que décrit précédemment.
- [0044] Afin de simplifier la description, la variable considérée est 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.
- [0045] 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.
- [0046] Selon un mode de réalisation particulier illustré sur la figure 2, le procédé comporte une étape initiale 22 au cours de laquelle le calculateur 4 détermine un domaine de consignes applicables  $u$  comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne  $u$  à appliquer aux variables.
- [0047] 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  $u$  déterminé, tous les gradients d'état possibles pour ladite consigne, en utilisant au

moins les équations d'état  $f(u, q, w)$  décrivant le système.

- [0048] 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  $u$  déterminé, toutes les valeurs possibles pour le critère ou la combinaison de critères à optimiser, en utilisant au moins l'équation de critère  $g(u, q, w)$ . En variante non représentée, les étapes de calcul 24, 26 peuvent être interverties.
- [0049] 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  $u$  déterminé, toutes les valeurs possibles  $H$  d'une fonction Hamiltonienne  $H(u, q, \lambda, w)$  de ladite consigne, en utilisant les valeurs de gradients d'état et les valeurs possibles pour la consommation en énergie 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 Pontryaguin.
- [0050] La fonction Hamiltonienne  $H(u, q, \lambda, w)$  s'exprime alors comme :  

$$H(u, q, \lambda, w) = [g(u, q, w)] + \lambda^T [f(u, q, w)]$$
avec  $\lambda^T$  la transposée du vecteur adjoint  $\lambda$ .
- [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<sub>E</sub>.
- [0052] Selon l'invention, une phase 32 de mise à jour de l'équation de critère, effectuée par le calculateur 4, peut en outre être mise en œuvre au cours du procédé. Selon une première variante de réalisation (non illustrée sur la [Fig.2]), la phase de mise à jour 32 est mise en œuvre à des intervalles temporels réguliers prédéterminés, espacés par exemple entre eux de plusieurs minutes. Selon une autre variante de réalisation, illustrée sur la [Fig.2], le procédé comporte une étape 34 au cours de laquelle le calculateur 4 détecte au moins une condition prédéterminée. La ou les condition(s) prédéterminée(s) concernent typiquement l'itinéraire du véhicule 2 et/ou les conditions de circulation prédéfinies ou prédits au sein du calculateur 4. De telles conditions prédéterminées sont par exemple relatives à des perturbations externes, à un changement d'itinéraire ou à des nouveaux obstacles détectés sur la route, etc. La phase de mise à jour 32 est alors mise en œuvre uniquement lorsque la ou les condition(s) prédéterminée(s) ont été détectées par le calculateur 4.
- [0053] Initialement, au cours de la phase de mise à jour 32, les variables d'état courantes  $q_{courantes}$  sont sélectionnées par le calculateur 4 en tant qu'états initiaux. En outre, le

calculateur 4 définit des valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état  $q$  ou des états adjoints  $\lambda$ , en fonction des conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur 4. La phase de mise à jour 32 correspond à « méthode des tirs » et comprend une première étape 36 au cours de laquelle le calculateur 4 sélectionne une première valeur initiale pour les états adjoints  $\lambda$ .

[0054] La phase de mise à jour 32 comprend une étape suivante 38 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, en fonction des états initiaux et de la première valeur initiale sélectionnée pour les états adjoints  $\lambda$ , ainsi que d'un modèle interne préimplanté dans le calculateur 4, une première simulation du modèle interne pour les conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur 4. Un premier couple de valeurs : consommation  $J1$  en énergie du véhicule 2 et différence d'état de charge  $\Delta SoC_1$  de la batterie électrique 30 (ou des super-capacités) est alors obtenu à l'issue de cette étape de calcul 38 ; avec  $\Delta SoC_1 = (SoC_{final1} - SoC_{initial})$ .

[0055] Si, à l'issue de l'étape 38 de calcul de la première simulation, les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état  $q$  ou des états adjoints  $\lambda$  sont atteintes, la phase de mise à jour 32 se termine. Sinon, la phase de mise à jour 32 comprend une étape suivante 40 au cours de laquelle le calculateur 4 sélectionne une deuxième valeur initiale pour les états adjoints  $\lambda$ , distincte de la première valeur initiale. Selon un premier mode de réalisation avantageux, la deuxième valeur initiale est sélectionnée en faisant varier un pas fonction de l'écart entre la première valeur initiale et la valeur-cible pour les états adjoints  $\lambda$ , et en réglant judicieusement la valeur du pas. Selon un autre mode de réalisation avantageux, la deuxième valeur initiale est sélectionnée en inversant un modèle de réseau de neurones (ce qui suppose une phase préalable d'entraînement et d'apprentissage du réseau de neurones).

[0056] La phase de mise à jour 32 comprend une étape suivante 42 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, en fonction des états initiaux et de la deuxième valeur initiale sélectionnée pour les états adjoints  $\lambda$ , ainsi que du modèle interne, une deuxième simulation du modèle interne pour les conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur 4. Un deuxième couple de valeurs : consommation  $J2$  en énergie du véhicule 2 et différence d'état de charge  $\Delta SoC_2$  de la batterie électrique 30 (ou des super-capacités) est alors obtenu à l'issue de cette étape de calcul 42 ; avec  $\Delta SoC_2 = (SoC_{final2} - SoC_{initial})$ .

[0057] Si, à l'issue de l'étape 42 de calcul de la deuxième simulation, les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état  $q$  ou des états adjoints  $\lambda$  sont atteintes, la phase de mise à jour 32 se termine. Sinon, la phase de mise à jour 32 comprend une étape suivante 44 au cours de laquelle le calculateur 4 calcule, en fonction des premier et deuxième couples de valeurs : consommation  $J1, J2$  en énergie du véhicule 2 et

différence d'état de charge  $\Delta SoC_1$ ,  $\Delta SoC_2$  de la batterie électrique 30 (ou des super-capacités), une première estimation du facteur de proportionnalité  $k$ . En effet, chaque simulation du modèle interne effectuée fournit un couple de valeurs : consommation en énergie du véhicule 2 et différence d'état de charge de la batterie électrique 30 (ou des super-capacités) ; et la relation entre ces deux variables est une fonction affine. Le coefficient directeur de cette fonction affine est le facteur de proportionnalité  $k$ , l'ordonnée à l'origine étant la valeur de la consommation en énergie du véhicule 2 lorsque l'état de charge finale de la batterie électrique 30 est égal à l'état de charge initial de cette dernière.

- [0058] Cette première estimation du facteur de proportionnalité  $k$  (réalisée en utilisant une stratégie d'« observateur » intégré) est alors utilisée pour mettre à jour l'équation de critère (détaillée précédemment) de la consommation en énergie  $J$  à optimiser, l'équation de critère ainsi mise à jour étant réutilisée dans l'étape de calcul 26. Les étapes 36, 38, 40, 42, 44 de la phase de mise à jour 32 sont ensuite rebouclées en utilisant l'équation de critère mise à jour, jusqu'à ce que les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état  $q$  ou des états adjoints  $\lambda$  soient atteintes. La phase de mise à jour 32 se termine alors.
- [0059] L'étape 44 de calcul d'une estimation du facteur de proportionnalité  $k$  est effectuée par le calculateur 4 en utilisant une méthode d'estimation de gradient prédéfinie. De préférence, la méthode d'estimation de gradient peut être une méthode de régression linéaire, formulée sous forme de moindres carrés récursifs. Dans ce cas, la dernière estimation du facteur de proportionnalité  $k$  calculée au cours de l'étape de calcul 44 est sauvegardée dans le calculateur 4. En outre, une telle méthode des moindres carrés récursifs requiert une initialisation des paramètres après le deuxième tir effectué lors de l'étape 42 de calcul de la deuxième simulation. En variante, la méthode d'estimation de gradient prédéfinie peut être une méthode des valeurs moyennes, une méthode des moindres carrés généralisées, ou toute autre méthode d'estimation de gradient connue.
- [0060] Le procédé peut être réitéré pendant l'utilisation du véhicule.
- [0061] Selon un mode de réalisation de l'invention, le trajet que doit emprunter le véhicule 2 est segmenté par le calculateur 4 en  $N$  segments de trajets successifs,  $N$  étant un nombre entier prédéfini. Le calculateur 4 peut alors définir, au cours de la phase de mise à jour 32, une ou plusieurs valeur(s)-cible(s) pour les états adjoints  $\lambda$  sur  $N-1$  segments de trajet, et une ou plusieurs valeur(s)-cible(s) pour les états finaux des variables d'état  $q$  sur le segment de trajet restant. Ce segment de trajet restant correspond par exemple au dernier segment du trajet que doit emprunter le véhicule 2, les  $N-1$  segments de trajet correspondant alors aux  $N-1$  premiers segments du trajet. Dans ce cas, l'état final de l'état de charge de la batterie 30 sur le segment de trajet restant est par exemple imposé. Le segment de trajet restant peut en variante cor-

respondre à tout autre segment du trajet que doit emprunter le véhicule 2. Dans ce cas, l'état final de l'état de charge de la batterie 30 sur ce segment de trajet est par exemple imposé, typiquement lorsque le véhicule 2 atteint l'entrée d'une zone urbaine ou arrive à une borne de recharge électrique en cours de trajet. En variante, une température finale dans l'habitacle du véhicule 2 ou dans le catalyseur peut être imposée après une durée minimale donnée pour une montée en température pendant la phase de chauffe.

[0062] De préférence, selon ce mode de réalisation, le calculateur 4 impose aux états adjoints  $\lambda$ , sur les N-1 segments de trajet pour lesquels les états finaux des variables d'état  $q$  sont laissés libres, de converger vers une valeur-cible dont la valeur correspond au facteur de proportionnalité  $k$ . En effet, afin d'obtenir la valeur minimale pour la consommation en énergie  $J$  à optimiser à la fin d'un scénario prédit, sans aucune contrainte imposée aux états finaux des variables d'état  $q$ , la méthode PMP implique que les états adjoints  $\lambda$  convergent à la fin de ce scénario prédit vers une valeur-cible dont la valeur correspond au facteur de proportionnalité  $k$  (la démonstration de ce théorème étant connue de l'art antérieur).

[0063] Le procédé permet ainsi d'obtenir des valeurs de consignes pour lesquelles la consommation énergétique du véhicule 2 est minimale.

[0064] De plus, le procédé selon l'invention permet, au cours de la phase de mise à jour, d'adapter l'estimation du terme correctif terminal ainsi que d'extraire une estimation du facteur de proportionnalité, dans une stratégie d'« observateur » intégré. De ce fait, grâce à la phase de mise à jour 32 du procédé, l'initialisation des états adjoints  $\lambda$  est plus précise et plus juste, malgré les possibles écarts entre le modèle interne et le système physique réel, et cela permet de conserver l'optimalité de la commande quelles que soient les conditions de circulation.

## Revendications

[Revendication 1]

Procédé, mis en œuvre dans un calculateur (4) embarqué au sein d'un véhicule automobile (2), d'optimisation de la consommation en énergie du véhicule (2), 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), l'itinéraire du véhicule (2) sur une distance prédéterminée ainsi que des conditions de circulation étant prédéfinis ou prédits au sein du calculateur (4), le calculateur (4) étant configuré pour gérer la chaîne de traction du véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé, ledit trajet prédéterminé que doit emprunter le véhicule (2) est segmenté par le calculateur (4) en N segments de trajets successifs, N étant un nombre entier prédéfini, lesdits N-1 segments de trajet correspondent aux N-1 premiers segments du trajet prédéterminé que doit emprunter le véhicule (2), ledit segment de trajet restant correspondant au dernier segment dudit 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 dispositifs (10, 20, 30) étant représenté par un système d'équations d'état modélisant la dynamique du véhicule (2), lesdites équations d'état étant fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, un ensemble d'états adjoints étant associés aux équations d'état et représentant les conditions du comportement dynamique du véhicule (2), la consommation en énergie à optimiser étant définie dans une

équation de critère comme étant la somme entre d'une part la consommation instantanée cumulée en carburant ou en hydrogène du moteur thermique (M) ou de la pile à combustible (P) et d'autre part un terme correctif terminal représentant une énergie électrique extraite de ou stockée dans la batterie électrique ou les super-capacités (30), le terme correctif terminal étant fonction de la différence d'état de charge entre d'une part l'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités (30) à la fin du trajet prédéterminé et d'autre part l'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités (30) au début du trajet prédéterminé, ledit terme correctif étant une fonction linéaire définie par un facteur de proportionnalité, 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 :

- calcul (28), pour chaque consigne, de toutes les valeurs possibles d'une fonction Hamiltonienne de ladite consigne, en utilisant au moins l'équation de critère, et
- détermination (31) de la valeur de chaque consigne pour laquelle ladite fonction Hamiltonienne est la plus faible,

caractérisé en ce que le calculateur (4) est configuré pour définir une ou plusieurs valeur(s)-cible(s) pour les états adjoints sur N-1 segments de trajet, et définir une ou plusieurs valeur(s)-cible(s) pour les états finaux des variables d'état sur le segment de trajet restant, en fonction des conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur (4), les variables d'état courantes étant sélectionnées par le calculateur (4) en tant qu'états initiaux, et en ce que le procédé comporte en outre une phase (32) de mise à jour de l'équation de critère, ladite phase (32) comprenant les étapes de :

- sélection (36) d'une première valeur initiale pour les états adjoints ;
- calcul (38), en fonction desdits états initiaux et de la première valeur initiale sélectionnée pour les états adjoints, ainsi que d'un modèle interne préimplanté dans le calculateur (4), d'une première simulation du modèle interne pour lesdites conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur (4), un premier couple de valeurs formé par une

- consommation en énergie du véhicule (2) et une différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités (30) étant obtenu à l'issue de l'étape (38) de calcul de la première simulation ;
- si, à l'issue de l'étape (38) de calcul de la première simulation, les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints ne sont pas atteintes :
    - sélection (40) d'une deuxième valeur initiale pour les états adjoints, distincte de la première valeur initiale ;
    - calcul (42), en fonction desdits états initiaux et de la deuxième valeur initiale sélectionnée pour les états adjoints, ainsi que du modèle interne, d'une deuxième simulation du modèle interne pour lesdites conditions de circulation prédéfinies ou prédites au sein du calculateur (4), un deuxième couple de valeurs formé par une consommation en énergie du véhicule (2) et une différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités (30) étant obtenu à l'issue de l'étape (42) de calcul de la deuxième simulation ;
  - si, à l'issue de l'étape (42) de calcul de la deuxième simulation, les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints ne sont pas atteintes :
    - calcul (44), en fonction des premier et deuxième couples de valeurs de consommation en énergie du véhicule (2) et de différence d'état de charge de la batterie électrique ou des super-capacités (30), d'une première estimation du facteur de proportionnalité, en utilisant une méthode d'estimation de gradient prédéfinie, la première estimation du facteur de proportionnalité étant utilisée pour mettre à jour l'équation de critère de la consommation en énergie à optimiser ; et
  - rebouclage des étapes précédentes (36, 38, 40, 42, 44) jusqu'à ce que les valeurs-cibles pour les états finaux des variables d'état ou des états adjoints soient atteintes, le calculateur (4) étant configuré pour imposer aux états adjoints, sur lesdits N-1 segments de trajet, de converger vers une valeur-cible dont la valeur correspond audit facteur de proportionnalité.

- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel ladite phase de mise à jour (32) est mise en œuvre à des intervalles temporels réguliers prédéterminés.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 1, dans lequel le procédé comporte en outre une étape (34) de détection d'au moins une condition prédéterminée, ladite au moins une condition prédéterminée concernant l'itinéraire du véhicule et/ou les conditions de circulation prédéfinies ou prédits au sein du calculateur (4), et dans lequel ladite phase de mise à jour (32) est mise en œuvre uniquement lorsque ladite au moins une condition prédéterminée a été détectée par le calculateur (4).
- [Revendication 4] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel les conditions de circulation sont prédites au sein du calculateur (4) selon un horizon temporel prédéterminé, via un système de gestion de données statiques et/ou dynamiques relatives à l'infrastructure routière et/ou au trafic routier relié au calculateur (4), le calculateur (4) étant configuré pour recevoir lesdites conditions de circulation selon des fenêtres temporelles glissantes tout au long de l'itinéraire du véhicule (2) sur ladite distance prédéterminée.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel ladite méthode d'estimation de gradient prédéfinie est une méthode des moindres carrés récursifs.
- [Revendication 6] Procédé selon la revendication 5, dans lequel la dernière estimation du facteur de proportionnalité calculée au cours de la phase de mise à jour (32) est sauvegardée dans le calculateur (4).
- [Revendication 7] Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel le procédé comprend en outre, à chaque instant d'échantillonnage, les étapes de :
- détermination (22) d'un domaine de consignes applicables comprenant un ensemble de valeurs pour chaque consigne,
  - 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,
  - calcul (26), 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.

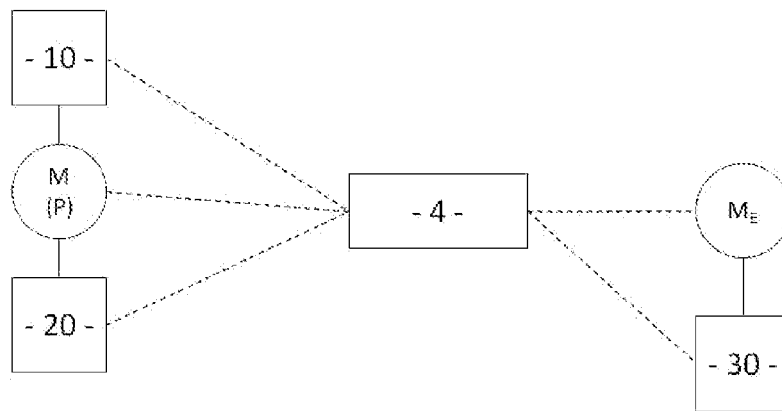
- [Revendication 8] Calculateur (4) pour la gestion de la chaîne de traction d'un véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé, le véhicule (2) comprenant, outre le calculateur (4), un réservoir de carburant ou d'hydrogène, une batterie électrique et/ou des super-capacités (30) apte(s) à fournir 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), l'itinéraire du véhicule (2) sur une distance prédéterminée ainsi que des conditions de circulation étant prédéfinis ou prédits au sein du calculateur (4), 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 fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, un ensemble d'états adjoints étant associés aux équations d'état et représentant les conditions du comportement dynamique du véhicule (2), 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 7.
- [Revendication 9] 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 du véhicule automobile (2) sur un trajet prédéterminé, l'itinéraire du véhicule (2) sur une distance prédéterminée ainsi que des conditions de circulation étant prédéfinis ou prédits au sein du calculateur (4), 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 fonction au moins des valeurs de consignes instantanées et des variables d'état, le véhicule automobile (2) étant caractérisé en ce que le calculateur (4) pour la gestion de la chaîne de traction est conforme à la revendication 8.

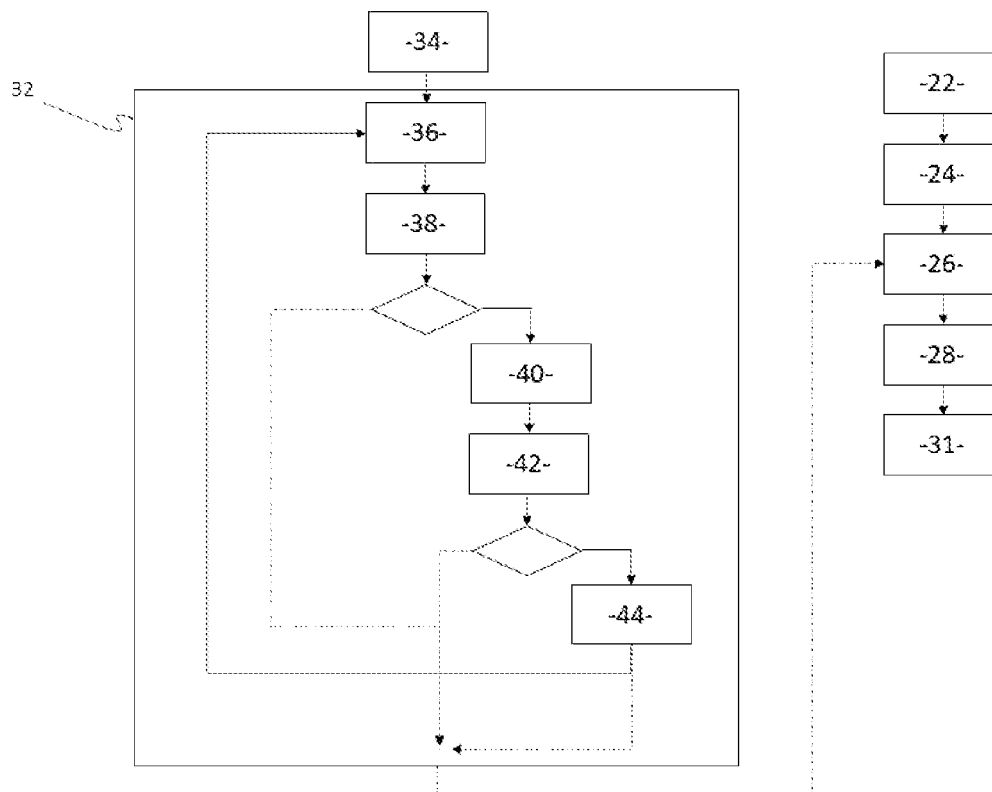
[Revendication 10] Produit programme d'ordinateur caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble d'instructions de code de programme qui, lorsqu'elles sont exécutées par un ou plusieurs processeurs, configurent le ou les processeurs pour mettre en œuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.

[Fig. 1]

2



[Fig. 2]



# 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**

NEANT

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

FR 3 120 594 A1 (PSA AUTOMOBILES SA [FR];  
UNIV ORLEANS [FR])  
16 septembre 2022 (2022-09-16)

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

NEANT