

12 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** **A1**

22 Date de dépôt : 06.07.20.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 07.01.22 Bulletin 22/01.

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) : **RENAULT S.A.S. Société par actions simplifiée (SAS) — FR.**

72 Inventeur(s) : **MADDINA Suresh Babu, STROE Nicoleta-Alexandra et TALON Vincent.**

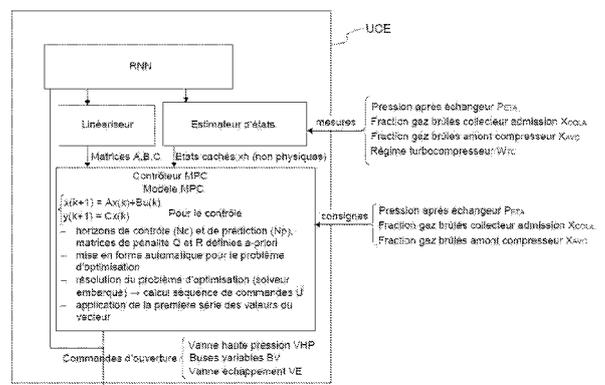
73 Titulaire(s) : **RENAULT S.A.S. Société par actions simplifiée (SAS).**

74 Mandataire(s) : **MARKS & CLERK FRANCE.**

54 **Système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile.**

57 Système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile équipé d'une unité de commande électronique (UCE), le moteur comprenant un double circuit de recirculation des gaz d'échappement comprenant un circuit de recirculation à basse pression et un circuit de recirculation à haute pression chacun muni d'une vanne de recirculation respective (VHP, VBP), un turbocompresseur comprenant une turbine à buses variables (BV) et un compresseur, les références amont et aval étant considérées selon le sens de circulation des gaz, dans lequel l'unité de commande électronique (UCE) est configurée pour commander, de manière coordonnée, les positions d'ouverture de la vanne (VHP) du circuit de recirculation à haute pression, les buses variables (BV) de la turbine du turbocompresseur, et de la vanne d'échappement (VE).

Figure pour l'abrégié : Fig. 2



## Description

### **Titre de l'invention : Système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile**

- [0001] L'invention porte sur un système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile équipé d'un double circuit de recirculation des gaz d'échappement comprenant un circuit de recirculation à basse pression et un circuit de recirculation à haute pression chacun muni d'une vanne de recirculation respective.
- [0002] Les circuits de recirculation des gaz d'échappement, ou circuits EGR permettent de prélever une partie des gaz d'échappement émis par le moteur pour les réinjecter dans le circuit d'admission d'air du moteur. La réintroduction de gaz d'échappement en entrée du moteur modifie la combustion interne du moteur et diminue le taux d'oxydes d'azotes NO<sub>x</sub> émis dans les gaz d'échappement du moteur.
- [0003] Pour répondre aux normes d'émission de polluants notamment en termes de rejets de CO<sub>2</sub>, un contrôle optimisé de la pression de suralimentation et du taux d'EGR est nécessaire. Ce contrôle s'inscrit dans le cadre d'un contrôle multi-variable, soumis à des contraintes. Les forts couplages entre les chaînes de circulation de gaz imposent la nécessité d'un contrôle coordonné, qui peut difficilement être assuré par des méthodes classiques, comme une régulation de type Proportionnel Intégral Dérivé, d'acronyme PID. En outre, le besoin de réduire l'effort de calibration oriente les choix du contrôle vers des stratégies basé sur des modèles, ou "model-based" en langue anglaise.
- [0004] L'utilisation d'un modèle de Commande Prédictive, ou "Model Predictive Control" en langue anglaise d'acronyme MPC, est une des méthodes les plus appropriées pour le contrôle multi-variable, qui permet la gestion directe des contraintes. En particulier, la présente invention porte sur le contrôle simultané de la pression de suralimentation et du taux d'EGR pour un moteur Diesel équipé d'une double boucle ou double circuit EGR (un circuit HP et un circuit basse pression BP).
- [0005] Pour la norme euro7, il faut un contrôleur robuste et facilement déployable sur toutes les architectures de moteurs Diesel, tout en réduisant le plus possible les efforts de mise au point.
- [0006] Il est connu le document EP2935846, qui porte sur un système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile utilisant un modèle de Commande Prédictive MPC, employé pour le contrôle de l'EGR et la pression dans le collecteur d'admission. Un modèle non linéaire du système à contrôler est d'abord synthétisé, duquel est extraite une famille de modèles linéarisés qui sont ensuite utilisés pour la synthèse des contrôleurs MPC. La méthode

assure le suivi des consignes et une commande peu agressive. Cette approche présente le désavantage de ne pas permettre une généralisation aux différents types de moteurs Diesel, car la procédure d'extraction de modèles dépend étroitement du moteur.

[0007] Il est également connu le document US20170167347, qui porte sur un système et procédé pour déterminer des valeurs d'actionneur cibles d'un moteur en utilisant une commande prédictive de modèle tout en satisfaisant les objectifs d'émissions et de maniabilité et en maximisant le rendement énergétique. La performance de la méthode de contrôle MPC dépend fortement du modèle de prédiction utilisé. Pour des applications de contrôle et de commande d'un moteur, les non linéarités et la complexité d'un tel système font de la modélisation le problème principal de la stratégie de contrôle et de commande. L'objectif de ce système est d'adresser la modélisation pour des méthodes basées sur des modèles, comme le MPC, et n'adresse que la formulation et la performance MPC. Cette approche présente le désavantage de ne pas permettre une généralisation aux différents types de moteurs Diesel, car la procédure d'extraction de modèles dépend étroitement du moteur.

[0008] Il est également connu le document FR2936015 qui utilise une estimation de basée sur des réseaux de neurones des variables d'état d'un moteur à combustion interne, et est uniquement restreint à une estimation de données et non à la commande du moteur.

[0009] Un but de l'invention est de pallier les problèmes précédemment cités, et notamment, d'être adaptée à tout type de moteur Diesel et de tenir compte de l'aspect dynamique du moteur.

[0010] Aussi, il est proposé, selon un aspect de l'invention, un système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile équipé d'une unité de commande électronique, le moteur comprenant un double circuit de recirculation des gaz d'échappement comprenant un circuit de recirculation à basse pression et un circuit de recirculation à haute pression chacun muni d'une vanne de recirculation respective, un turbocompresseur comprenant une turbine à buses variables et un compresseur, les références amont et aval étant considérées selon le sens de circulation des gaz. L'unité de commande électronique est configurée pour commander, de manière coordonnée, les positions d'ouverture de la vanne du circuit de recirculation à haute pression, les buses variables de la turbine du turbocompresseur, et de la vanne d'échappement, et comprend:

- un réseau de neurones récurrents configuré pour modéliser le type du moteur Diesel modélisant de manière non-linéaire ;
- un linéariseur configuré pour linéariser le modèle du réseau de neurones récurrents au point de fonctionnement courant du moteur et fournir des matrices représentative du modèle linéarisé ;
- un estimateur d'états configuré pour estimer les états cachés du réseau de neurones

récurrences, à partir du réseau de neurones récurrents et de mesures de la pression en aval de l'échangeur d'air d'admission, de la fraction de gaz brûlés dans le collecteur d'admission, et de la fraction de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur ; et

- un contrôleur basé sur un modèle de prédiction de l'évolution de l'état du moteur configuré pour estimer les commandes des positions d'ouverture de la vanne du circuit de recirculation à haute pression, des buses variables de la turbine du turbocompresseur, et de la vanne d'échappement qui minimisent une fonction de coût quadratique en erreur de suivi de consigne et variation de commande MPC en respectant des consignes de pression en aval de l'échangeur d'air d'admission, de fraction de gaz brûlés dans le collecteur d'admission, et de fraction de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur.

[0011] Un tel système permet d'être adaptable à tout type de moteur Diesel et tient compte de la dynamique du moteur.

[0012] Dans un mode de réalisation, l'estimateur d'états est configuré pour utiliser un filtre de Kalman, notamment étendu.

[0013] Ainsi, à chaque pas il est possible d'anticiper l'impact des commandes sur l'évolution de la trajectoire, et donc de mieux gérer les contraintes. De plus, une telle approche permet de considérer de multiples actionneurs, avec de forts couplages entre les chaînes contrôlées.

[0014] Selon un mode de réalisation, le modèle de prédiction linéaire est un modèle variant dans le temps dit "Linear Time-Varying" en langue anglaise, dans lequel on a :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + v_k & k \text{ représentant un pas de temps ;} \\ y_k = C_k x_k \end{cases}$$

x représentant un vecteur d'état ;

y représentant un vecteur des sorties ;

v représentant des perturbations sur l'état ; et

A, B et C étant respectivement des matrices d'état, de contrôle, et d'observations.

[0015] Ainsi, le problème de contrôle peut être formulé sous la forme standard du MPC.

[0016] Dans un mode de réalisation, la fonction coût est la suivante :

$$\min_{\Delta u} \sum_{i=1}^N \left( (y_{k+i} - y_{k+i}^{sp})^T Q (y_{k+i} - y_{k+i}^{sp}) + \Delta u_{k+i-1}^T R \Delta u_{k+i-1} \right) \text{ dans}$$

laquelle

$$x_{\min} \leq x_{k+i} \leq x_{\max} ;$$

$$u_{\min} \leq u_{k+i-1} \leq u_{\max} ; \quad N \text{ représente un horizon de prédiction en nombre pas de}$$

temps ;  $y^{sp}$  représente le vecteur de consigne de composantes lesdites consignes ;

Q et R représentent des matrices de pénalité pour le suivi du vecteur de consigne et

pour la variation d'un vecteur de commande de composantes lesdites commandes des positions d'ouverture ; et  $\Delta u_{k+i-1}$  représente l'écart entre les commandes à deux instants consécutifs.

[0017] L'utilisation d'une telle fonction de coût répond au problème de suivi de consigne et de lissage de la commande. De plus, elle peut être multicritères pour optimiser le remplissage en air des cylindres et le taux de gaz recirculé, ou être variable en fonction des points de fonctionnement du moteur et des contraintes extérieures (par exemple l'altitude).

[0018] Selon un autre aspect de l'invention, il est également proposé un procédé de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile dans lequel on commande, de manière coordonnée, les positions d'ouverture d'une vanne d'un circuit de recirculation à haute pression, des buses variables d'une turbine d'un turbocompresseur, et d'une vanne d'échappement, comprenant les étapes consistant à :

- modéliser par un réseau de neurones récurrents le type du moteur Diesel de manière non-linéaire ;
- linéariser le modèle du réseau de neurones au point de fonctionnement courant du moteur et fournir des matrices représentative du modèle linéarisé ;
- estimer les états cachés du réseau de neurones récurrents, à partir du réseau de neurones récurrents et de mesures de la pression en aval de l'échangeur d'air d'admission, de la fraction de gaz brûlés dans le collecteur d'admission, et de la fraction de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur ; et
- estimer les commandes des positions d'ouverture de la vanne du circuit de recirculation à haute pression, des buses variables de la turbine du turbocompresseur, et de la vanne d'échappement, en utilisant un modèle de prédiction de l'évolution de l'état du moteur qui minimisent une fonction de coût quadratique en erreur de suivi de consigne et variation de commande MPC en respectant des consignes de pression en aval de l'échangeur d'air d'admission, de fraction de gaz brûlés dans le collecteur d'admission, et de fraction de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur .

[0019] L'invention sera mieux comprise à l'étude de quelques modes de réalisation décrits à titre d'exemples nullement limitatifs et illustrés par les dessins annexés sur lesquels :

[0020] [fig.1] illustre schématiquement un système de contrôle et de commande, selon un aspect de l'invention ;

[0021] [fig.2] illustre schématiquement un procédé, selon un aspect de l'invention ; et

[0022] [fig.3] illustre schématiquement le modèle MPC mis en œuvre dans le contrôleur de l'UCE, selon un aspect de l'invention.

[0023] Sur l'ensemble des figures, les éléments ayant des références identiques sont similaires. Tel qu'illustré sur la figure 1, le système comprend un moteur à combustion

interne de type diesel MD connecté d'une part à un circuit d'admission destiné à alimenter le moteur en air frais, et d'autre part à un circuit d'échappement destiné à évacuer les gaz d'échappement produits par le moteur MD.

- [0024] Le circuit d'admission comprend un filtre à air FAA, un débitmètre D permettant de mesurer le débit d'air frais alimentant le circuit d'admission, un compresseur C faisant partie d'un turbocompresseur TC destiné à augmenter la pression de l'air frais d'alimentation, et un échangeur thermique ETA destiné à refroidir l'air en sortie du compresseur C.
- [0025] Le circuit d'échappement comprend une turbine T à buses variables BV, appartenant au turbocompresseur TC, permettant de moduler le débit de gaz dans la turbine T, entraînée par les gaz d'échappement en sortie du moteur MD, un dispositif catalytique DOC, pour acronyme de "Diesel Oxidation Catalyst" en langue anglaise, permettant de réduire les polluants HC et CO et un dispositif catalytique CAT permettant de réduire les NOx et les particules, comprenant un premier dispositif SCR, pour acronyme de "Selective Catalyst Reduction" en langue anglaise, qui permet de réduire les polluants Nox et un filtre SCRF qui permet de réduire les NOx et les particules, ainsi qu'une vanne d'échappement VE.
- [0026] Le moteur MD comprend également un double circuit de recirculation des gaz d'échappement dit EGR comprenant un circuit de recirculation à basse pression BP EGR et un circuit de recirculation à haute pression HPEGR.
- [0027] Le circuit de recirculation à haute pression HPEGR, reliant l'entrée du collecteur d'admission COLA à la sortie du collecteur d'échappement COLE du moteur MD, comprend une vanne de recirculation VHP.
- [0028] Le circuit de recirculation à basse pression BPEGR comprend un échangeur thermique ETBP air-air destiné à refroidir les gaz d'échappement recirculés, et une vanne de recirculation VBP disposée en aval de l'échangeur thermique ETBP et en amont du compresseur C.
- [0029] Une vanne d'admission VA est disposée en aval de l'échangeur thermique ETA et en amont du circuit de recirculation à haute pression HPEGR.
- [0030] Un capteur  $CP_{ETA}$  de mesure de pression, disposé en aval de l'échangeur thermique ETA et en amont de la vanne d'admission VA permet de mesurer la pression  $P_{ETA}$  en sortie de l'échangeur thermique ETA.
- [0031] On estime mesurer la fraction de gaz brûlés au niveau du collecteur d'admission COLA, ainsi que la fraction de gaz brûlés en entrée du compresseur C.
- [0032] Les vannes sont toutes commandées par l'unité de commande électronique UCE, et y sont donc connectées, et les capteurs de mesures également afin de transmettre les mesures effectuées à l'unité de commande électronique UCE.
- [0033] Le régime  $\omega_{TC}$  ou vitesse de rotation du turbocompresseur TC est également fourni à

l'unité de commande électronique UCE, cette grandeur étant soit mesurée soit, préférentiellement, estimée.

- [0034] La figure 2 représente schématiquement l'unité de commande électronique UCE et son fonctionnement pour contrôler et commander le moteur à combustion interne MD selon un aspect de l'invention.
- [0035] L'unité de commande électronique UCE est configurée pour commander, de manière coordonnée, les positions d'ouverture de la vanne VHP du circuit de recirculation à haute pression HP EGR, les buses variables BV de la turbine T du turbocompresseur TC, et de la vanne d'échappement VE.
- [0036] L'unité de commande électronique UCE comprend :
- un réseau de neurones récurrents RNN configuré pour modéliser le type du moteur Diesel de manière non-linéaire ;
  - un linéariseur configuré pour linéariser le modèle du réseau de neurones récurrents RNN au point de fonctionnement courant du moteur et fournir des matrices A, B, C représentatives du modèle linéarisé ;
  - un estimateur d'états configuré pour estimer les états cachés du réseau de neurones récurrents, à partir du réseau de neurones récurrents RNN et de mesures de la pression  $P_{AVC}$  en aval de l'échangeur d'air d'admission EAA, d'estimations de la fraction  $X_{COLA}$  de gaz brûlés dans le collecteur d'admission COLA, et d'estimations de la fraction  $X_{AVC}$  de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur TC ; et
  - un contrôleur basé sur un modèle de prédiction de l'évolution de l'état du moteur configuré pour estimer les commandes des positions d'ouverture de la vanne VHP du circuit de recirculation à haute pression HPEGR, des buses variables BV de la turbine T du turbocompresseur TC, et de la vanne d'échappement VE qui minimisent une fonction de coût quadratique en erreur de suivi de consigne et variation de commande MPC en respectant des consignes de pression  $P_{AVC}$  en aval de l'échangeur d'air d'admission EAA, de fraction  $X_{COLA}$  de gaz brûlés dans le collecteur d'admission COLA, et de fraction  $X_{AVC}$  de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur TC.
- [0037] L'estimateur d'états peut être configuré pour utiliser un filtre de Kalman, notamment étendu.
- [0038] Le système d'air d'un moteur Diesel avec une double boucle EGR présente une pluralité d'actionneurs, tels ceux précédemment décrits. Tous les actionneurs n'ont cependant pas la même dynamique, ce qui permet de partiellement découpler le contrôle et la commande de ces actionneurs sans une dégradation significative de la performance du moteur Diesel MD. Les actionneurs sélectionnés dans la présente invention sont la vanne VHP du circuit de recirculation à haute pression HPEGR, les buses variables BV de la turbine T, et la vanne d'échappement VE.

- [0039] Ce choix est justifié par une dynamique lente du circuit de recirculation à basse pression BPEGR, qui est de surcroît contrôlé et commandé avec seulement deux positions de la vanne basse pression VBP (ouverte ou fermée, et non des degrés d'ouverture), une dynamique rapide du débit de carburant, ainsi que de la vanne d'admission VA ou papillon.
- [0040] Les trois actionneurs choisis, VHP, BV, VE nécessitent donc un contrôle-commande coordonné en vue de suivre une consigne de pression de suralimentation et deux consignes de fractions de gaz brûlés : dans le collecteur d'admission COLA et en amont du compresseur C, ce qui est équivalent au ratio EGR.
- [0041] Des contraintes doivent également être imposées, nécessaires au bon fonctionnement du système, ainsi que pour préserver la signification physique des grandeurs: la vitesse du turbocompresseur doit être limitée à 200 krpm et les fractions de gaz brûlés doivent rester positives. Pour répondre à ces exigences, la présente invention utilise un modèle de commande prédictive MPC dans le contrôleur de l'unité de commande électronique UCE.
- [0042] Comme illustré sur la figure 3, MPC est une méthode de contrôle qui s'appuie sur un modèle de prédiction pour évaluer l'évolution d'un système ("Predicted output") pour un horizon  $N_p$  en pas de temps. Pour cela, il calcule à chaque pas une séquence de commandes futures ("Control action"), de longueur  $N_c \leq N_p$  qui minimisent une fonction de coût soumise à des contraintes sur l'état du système et sur les commandes, le long d'un horizon de prédiction fini  $N_p$ , dont la valeur dépend du problème (pas de temps et type de performance recherchée). Seulement la première commande  $U(1)$  ("applied command") est appliquée au système, combinant ainsi les avantages d'une transmission en avant ou "feedforward" en langue anglaise et d'une rétroaction ou "feedback" en langue anglaise.
- [0043] Classiquement, la fonction coût à minimiser est sous une forme quadratique avec un modèle de prédiction linéaire ou linéaire variant dans le temps (LTV pour acronyme de "Linear Time-Varying"). La stratégie peut être formalisée de la manière suivante :
- Soit le modèle 
$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + v_k \\ y_k = C_k x_k \end{cases}$$
 dans lequel  $x$  est le vecteur d'état,  $u$  le vecteur de commande,  $y$  le vecteur des sorties, et  $v$  le vecteur des perturbations sur l'état (ou des résidus de linéarisation).
- [0044] Alors pour un problème classique de suivi de trajectoire, la fonction coût à minimiser s'écrit comme suit :

$$\min_{\Delta u} \sum_{i=1}^N \left( (y_{k+i} - y_{k+i}^{sp})^T Q (y_{k+i} - y_{k+i}^{sp}) + \Delta u_{k+i-1}^T R \Delta u_{k+i-1} \right)$$

$$\mathbf{x}_{\min} \leq \mathbf{x}_{k+i} \leq \mathbf{x}_{\max}$$

$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}_{k+i-1} \leq \mathbf{u}_{\max}$  dans laquelle  $N_p$  (si  $N_c < N_p$ , les commandes qui vont du  $N_c$  à  $N_p$  seront constantes et égales à la valeur qui correspond à l'instant  $N_c$ ) est l'horizon de prédiction,  $y^{sp}$  est la consigne,  $Q$  et  $R$  des matrices de pénalités, respectivement pour le suivi de consigne et pour la variation de la commande. Cette fonction de coût traduit l'objectif de réduire l'écart entre la trajectoire prédite des sorties et leurs consignes, ainsi que l'effort de commande. Les matrices  $Q$  et  $R$  sont des paramètres à calibrer en fonction des objectifs de contrôle fixés. Cette expression conduit à une formulation classique de programmation quadratique, pour laquelle des solveurs efficaces existent (tels qpOASES, FastMPC) :

$$\min_{\mathbf{U}} \frac{1}{2} \mathbf{U}^T \mathbf{H} \mathbf{U} + \mathbf{F}^T \mathbf{U}$$

**s.t.**  $\mathbf{A}_{\text{ineq}} \mathbf{U} \leq \mathbf{b}_{\text{ineq}}$  Le défi principal de cette méthode est l'obtention du modèle de

prédiction, de la précision duquel dépend la performance de la stratégie. Le système d'air (l'objectif est de contrôler l'air, l'EGR et la suralimentation d'un moteur diesel) étant fortement non linéaire, la synthèse d'un modèle orienté-contrôle est d'autant plus difficile.

Une possibilité aurait pu consister à extraire des jacobienes numériques pour certains points, judicieusement choisis pour couvrir la plage de fonctionnement du système. Malgré sa simplicité apparente, cette approche nécessite une bonne connaissance du système contrôlé et des ressources computationnelles importantes, pour le calcul des jacobienes. De plus, une dégradation de la performance est toujours présente, en raison des interpolations pour les points qui se trouvent entre ceux définis a priori. La discrétisation en zone du domaine de fonctionnement moteur et le passage de zone en zone est aussi délicate lorsque les contrôleurs sont embarqués. Cette possibilité aurait été très complexe à réaliser et très coûteuse en calculs.

[0045] Une autre approche aurait pu consister à effectuer à chaque pas d'optimisation des linéarisations à partir des équations physiques pour arriver à un modèle sous la forme présentée précédemment. Une telle méthode est caractérisée pourtant par un haut niveau de complexité et par l'impossibilité de généralisation ; elle nécessiterait d'être adaptée pour chaque nouveau système.

[0046] Aussi le système et procédé de l'invention, illustré sur la figure 2, utilise des modèles basés sur un réseau de neurones récurrents RNN. Un réseau de neurones récurrents RNN est un modèle non linéaire entrée-sortie, capable de capturer la dynamique du système à travers les états dits "cachés", ou "hidden states" en langue anglaise.

[0047] Par exemple, on peut avoir un réseau Elman :

$$h_t = \sigma_h(W_h x_t + U_h h_{t-1} + b_h)$$

$$y_t = \sigma_y(W_y h_t + b_y)$$

[0048] ou un réseau Jordan :

$$h_t = \sigma_h(W_h x_t + U_h y_{t-1} + b_h)$$

$$y_t = \sigma_y(W_y h_t + b_y)$$

[0049] dans lesquels

$x_t$ : vecteur d'entrée

$h_t$ : vecteur de la couche cachée

$y_t$ : vecteur de sortie

$W$ ,  $U$  et  $b$ : matrices et vecteur (paramètres)

$\sigma_h$  et  $\sigma_y$ : fonction d'activation

[0050] Ce réseau de neurones récurrents RNN permet de modéliser suffisamment précisément et de façon non linéaire la chaîne d'air du moteur Diesel en intégrant correctement les phénomènes des lignes ou circuits d'air, y compris les circuits de recirculation à haute pression HPEGR et à basse pression BPEGR, mais aussi le turbocompresseur TC. En basant l'apprentissage de ce RNN sur le modèle système 0D, on capture parfaitement tous les phénomènes, tels les temps de réponse attendus. De plus, au travers de ce modèle de référence, on peut introduire des règles métiers à faire apprendre au réseau de neurones récurrents RNN afin de borner celui-ci et le rendre compatible avec une utilisation dans une unité de commande électronique du moteur. Cette méthode permet d'avoir un apprentissage fiable et explicable du réseau de neurones récurrents RNN.

[0051] Dans le cas d'un moteur Diesel avec chaîne d'air équipée d'un circuit de recirculation à haute pression HPEGR et d'un circuit de recirculation à basse pression BPEGR ayant des temps de réponse de l'ordre de 500 ms, le réseau de neurones récurrents RNN permet de capturer des dynamiques avec des constantes de temps de 1500 ms (trois fois le temps caractéristique physique du moteur). Ce temps caractéristique est le plus long du moteur et couvre les autres retards qui ont des temps plus courts comme les temps de réponse des actionneurs. Cela est réalisé en ajoutant entre 1 à 2 couches de LSTM pour "Long Term Short Memory" en langue anglaise, chaque couche LSTM étant composée de 10 à 15 neurones.

[0052] Dans le cas d'un moteur Diesel avec une chaîne d'air équipée d'actionneurs dont la progressivité n'est pas linéaire (par exemple avec la section de passage d'une vanne EGR qui est non linéaire), le réseau de neurones RNN permet de capturer les non linéarités du système physique avec l'ajout de 2 à 3 couches FC pour "fully connected" en langue anglaise. Ces FC sont elles-mêmes composées de 15 à 20 neurones. Ces FC

utilisent notamment comme fonction d'activation la tangente hyperbolique pour ses propriétés de continuité qui est aussi une caractéristique du système physique de ce type de moteur et les FC ont la propriété de bien capturer les non linéarités.

[0053] Dans le cas d'un moteur Diesel avec consignes d'EGR et de  $P_{COLA}$  venant de la partie définition des consignes de contrôle et de commande du moteur global échantillonnée à 10 ms, le réseau de neurones récurrents RNN est dynamique et pas simplement statique comme les réseaux de neurones classiques de type "Feedforward". Il est exécuté au pas de temps cadencé par l'unité de contrôle électronique UCE et ordonné/synchrone avec les consignes d'EGR et de  $P_{COLA}$ . Le RNN est donc synthétisé pour une exécution par exemple à 10 ms.

[0054] Les modèles résultants étant non linéaires, pour leur utilisation dans le cadre du MPC, on effectue des linéarisations autour du point de fonctionnement courant, à chaque pas d'optimisation. L'accès à l'expression analytique des relations qui décrivent la dynamique du système permet de symboliquement définir les matrices A, B et C du modèle linéaire et de les évaluer en temps réel, pour les valeurs courantes des états et des commandes. L'unité de commande électronique UCE embarque le modèle non linéaire, mais à chaque pas de calcul (ie 10 ms) ce modèle estime toutes les variables d'état et par un calcul formel, donc ultra rapide, et donne accès aux matrices A, B et C du modèle linéaire consommable par le MPC.

[0055] La procédure de synthèse du réseau de neurones récurrents RNN repose sur les éléments qui suivent.

[0056] L'extraction des données entrées-sorties qui caractérisent le système étudié doivent couvrir toute la plage du fonctionnement du système et être suffisamment nombreuses pour une bonne identification. Dans la méthodologie proposée, ces données sont fournies par un modèle physique.

[0057] La définition de l'architecture du réseau de neurones, dont les principaux éléments sont les nombres de couches, d'entrées, de sorties et d'états cachés. Le premier est choisi en fonction de la complexité du système (une valeur plus grande peut émuler un degré de complexité plus élevée) et les autres sont directement déduits soit de la définition du système, pour les entrées-sorties, soit des caractéristiques de celui-ci, pour les états cachés. Ces derniers correspondent aux dynamiques représentatives qui sont sélectionnées à partir d'une analyse du modèle physique.

[0058] L'entraînement du réseau de neurones, procédure qui détermine les paramètres qui interviennent dans les expressions des couches (cf Wh, Uh et bh). Une méthode de gradient est employée (méthode classique Adam), qui minimise l'erreur entre les valeurs cibles (les données de sorties, extraites du modèle physique) et les valeurs issues du réseau de neurones récurrents RNN. Pour cette procédure d'optimisation, les valeurs classiques du paramétrage sont utilisées, c'est-à-dire les valeurs par défaut qui

se retrouvent dans les solveurs.

- [0059] Les entrées du réseau de neurones RNN sont les positions d'ouverture de la vanne VHP du circuit de recirculation à haute pression HPEGR, les buses variables BV de la turbine T du turbocompresseur TC, et de la vanne d'échappement VE.
- [0060] Les sorties du réseau de neurones RNN sont la pression  $P_{AVC}$  en aval de l'échangeur d'air d'admission EAA, la fraction  $X_{COLA}$  de gaz brûlés dans le collecteur d'admission COLA, et la fraction  $X_{AVC}$  de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur TC, et le régime  $\omega_{TC}$  ou vitesse de rotation du turbocompresseur TC.
- [0061] Après la synthèse du modèle de prédiction, le MPC a besoin des paramètres qui suivent.
- [0062] Un horizon de prédiction  $N_p$  ; cette valeur doit être suffisamment élevée pour permettre d'anticiper l'activation des contraintes sur l'état, sans être trop large, ce qui signifierait s'éloigner du point du fonctionnement, autour duquel la linéarisation a été effectuée, limitant donc le domaine de validité du modèle autour de ce point; dans ce cas,  $N_p$  fixé à 10.
- [0063] Un horizon de contrôle  $N_c \leq N_p$  ; en vertu de simplicité, on peut choisir  $N_c = N_p$ , mais une valeur inférieure est possible avec une réduction du temps de calcul.
- [0064] Des facteurs de pondération Q et R ; en réalité, il suffit de choisir le ratio Q/R; plus on augmente Q, plus on favorise le suivi de trajectoire au détriment d'un effort de commande plus élevé. Par exemple,  $Q = 100$  et  $R = 1$ ; dans le cas étudié, toutes les grandeurs sont normalisées entre -1 et 1, ce qui permet d'avoir une interprétation correcte du ratio Q/R.
- [0065] Le réseau de neurones récurrents RNN permet une identification à partir d'un modèle physique et par conséquent il peut couvrir un champ de fonctionnement plus large, notamment sur les bornes du fonctionnement classique du moteur
- [0066] Une telle procédure standardisée pour la synthèse du modèle orienté contrôle commande élimine la manipulation des équations physiques qui gouvernent le fonctionnement du système.
- [0067] La présente invention permet d'éviter l'utilisation d'une famille de modèle définis a priori, et utilise un modèle non linéaire (précision plus élevée), qui peut être linéarisé à chaque pas d'optimisation.

## Revendications

[Revendication 1]

Système de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile équipé d'une unité de commande électronique (UCE), le moteur comprenant un double circuit de recirculation des gaz d'échappement (EGR) comprenant un circuit de recirculation à basse pression (BPEGR) et un circuit de recirculation à haute pression (HPEGR) chacun muni d'une vanne de recirculation respective (VHP, VBP), un turbocompresseur (TC) comprenant une turbine (T) à buses variables (BV) et un compresseur (C), les références amont et aval étant considérées selon le sens de circulation des gaz, dans lequel l'unité de commande électronique (UCE) est configurée pour commander, de manière coordonnée, les positions d'ouverture de la vanne (VHP) du circuit de recirculation à haute pression (HPEGR), les buses variables (BV) de la turbine (T) du turbocompresseur (TC), et de la vanne d'échappement (VE), et comprend :

- un réseau de neurones récurrents (RNN) configuré pour modéliser le type du moteur Diesel modélisant de manière non-linéaire ;
- un linéariseur configuré pour linéariser le modèle du réseau de neurones récurrents (RNN) au point de fonctionnement courant du moteur et fournir des matrices (A, B, C) représentative du modèle linéarisé ;
- un estimateur d'états configuré pour estimer les états cachés du réseau de neurones récurrents, à partir du réseau de neurones récurrents (RNN) et de mesures de la pression ( $P_{AVC}$ ) en aval de l'échangeur d'air d'admission (EAA), d'estimations de la fraction ( $X_{COLA}$ ) de gaz brûlés dans le collecteur d'admission (COLA), et d'estimations de la fraction ( $X_{AVC}$ ) de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur (TC) ; et
- un contrôleur basé sur un modèle de commande prédictive MPC de l'évolution de l'état du moteur configuré pour estimer les commandes des positions d'ouverture de la vanne (VHP) du circuit de recirculation à haute pression (HPEGR), des buses variables (BV) de la turbine (T) du turbocompresseur (TC), et de la vanne d'échappement (VE) qui minimisent une fonction de coût quadratique en erreur de suivi de consigne et variation de commande MPC en respectant des consignes de pression ( $P_{AVC}$ ) en aval de l'échangeur d'air d'admission (EAA), de fraction ( $X_{COLA}$ ) de gaz brûlés dans le collecteur d'admission (COLA), et de fraction

( $X_{AVC}$ ) de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur (TC).

[Revendication 2] Système selon la revendication 1, dans lequel l'estimateur d'états est configuré pour utiliser un filtre de Kalman, notamment étendu.

[Revendication 3] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le modèle de prédiction linéaire est un modèle variant dans le temps dit "Linear Time-Varying", dans lequel on a :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + v_k \\ y_k = C_k x_k \end{cases}$$

$k$  représentant un indice de pas de temps ;

$x$  représentant un vecteur d'état ;

$y$  représentant un vecteur des sorties ;

$v$  représentant des perturbations sur l'état ; et

$A$ ,  $B$  et  $C$  étant respectivement des matrices d'état, de contrôle, et d'observations.

[Revendication 4] Système selon la revendication 3, dans lequel la fonction coût est la suivante:

$$\min_{\Delta u} \sum_{i=1}^N \left( (y_{k+i} - y_{k+i}^{sp})^T Q (y_{k+i} - y_{k+i}^{sp}) + \Delta u_{k+i-1}^T R \Delta u_{k+i-1} \right)$$

dans laquelle

$$x_{\min} \leq x_{k+i} \leq x_{\max} ;$$

$$u_{\min} \leq u_{k+i-1} \leq u_{\max} ;$$

$N$  représente un horizon de prédiction, en nombre pas de temps ;

$y^{sp}$  représente le vecteur de consigne de composantes lesdites consignes ; et

$Q$  et  $R$  représentent des matrices de pénalité pour le suivi du vecteur de consigne et pour la variation d'un vecteur de commande de composantes lesdites commandes des positions d'ouverture ;

$\Delta u_{k+i-1}$  représente l'écart entre les commandes à deux instants consécutifs.

[Revendication 5] Procédé de contrôle et de commande d'un moteur à combustion interne de type Diesel de véhicule automobile dans lequel on commande, de manière coordonnée, les positions d'ouverture d'une vanne (VHP) d'un circuit de recirculation à haute pression (HPEGR), des buses variables (BV) d'une turbine (T) d'un turbocompresseur (TC), et d'une vanne d'échappement (VE), comprenant les étapes consistant à :

- modéliser par un réseau de neurones récurrents (RNN) le type du moteur Diesel de manière non-linéaire ;

- linéariser le modèle du réseau de neurones (RNN) au point de fonctionnement courant du moteur et fournir des matrices (A, B, C) représentative du modèle linéarisé ;
- estimer les états cachés du réseau de neurones récurrents, à partir du réseau de neurones récurrents (RNN) et de mesures de la pression ( $P_{AVC}$ ) en aval de l'échangeur d'air d'admission (EAA), d'estimations la fraction ( $X_{COLA}$ ) de gaz brûlés dans le collecteur d'admission (COLA), et d'estimations de la fraction ( $X_{AVC}$ ) de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur (TC) ; et
- estimer les commandes des positions d'ouverture de la vanne (VHP) du circuit de recirculation à haute pression (HPEGR), des buses variables de la turbine (T) du turbocompresseur (TC), et de la vanne d'échappement (VE), en utilisant un modèle de commande prédictive MPC de l'évolution de l'état du moteur qui minimisent une fonction de coût quadratique en erreur de suivi de consigne et variation de commande MPC en respectant des consignes de pression ( $P_{AVC}$ ) en aval de l'échangeur d'air d'admission (EAA), de fraction ( $X_{COLA}$ ) de gaz brûlés dans le collecteur d'admission (COLA), et de fraction ( $X_{AVC}$ ) de gaz brûlés en amont du compresseur du turbocompresseur (TC).

[Fig. 1]

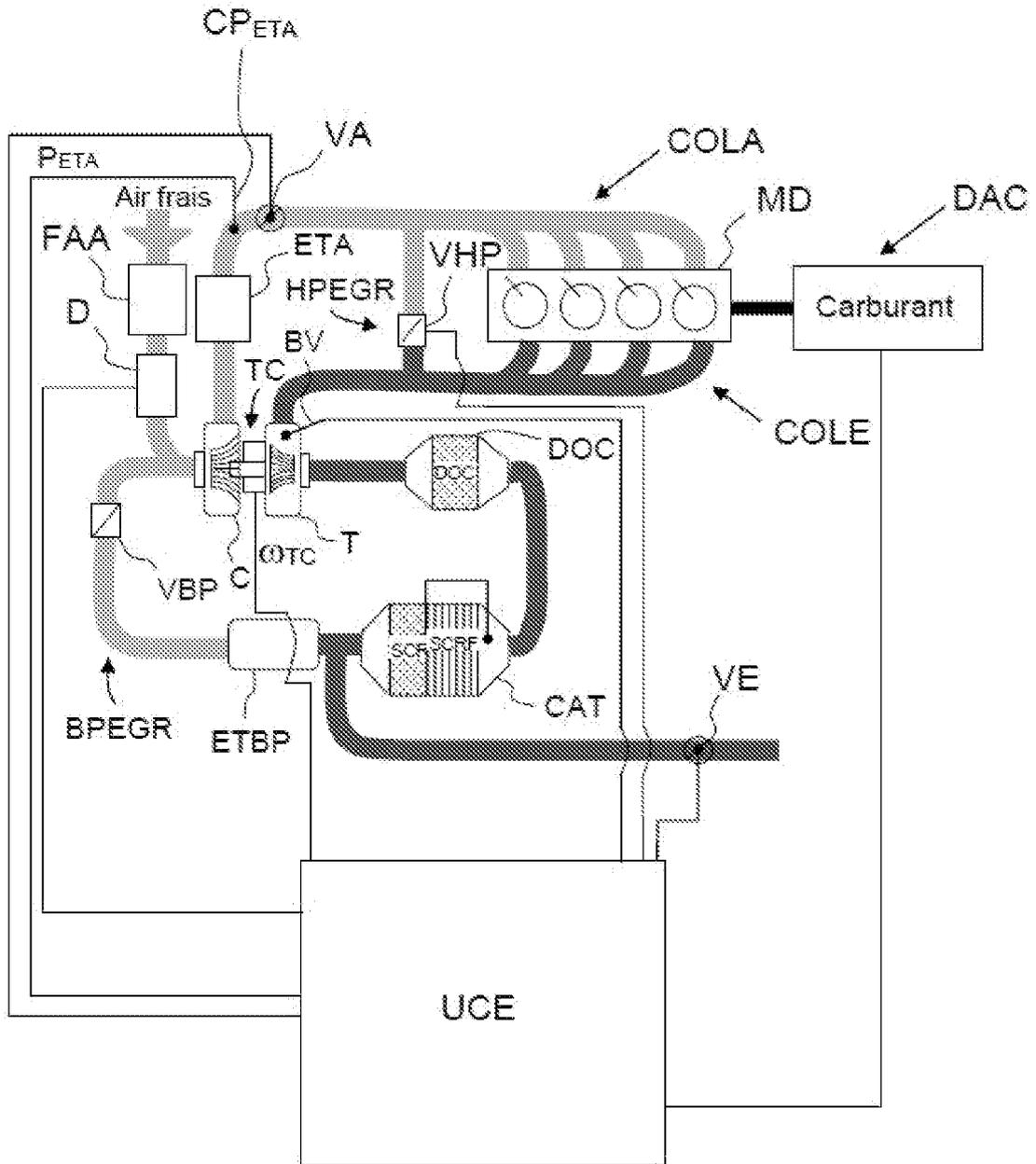


FIG.1

[Fig. 2]

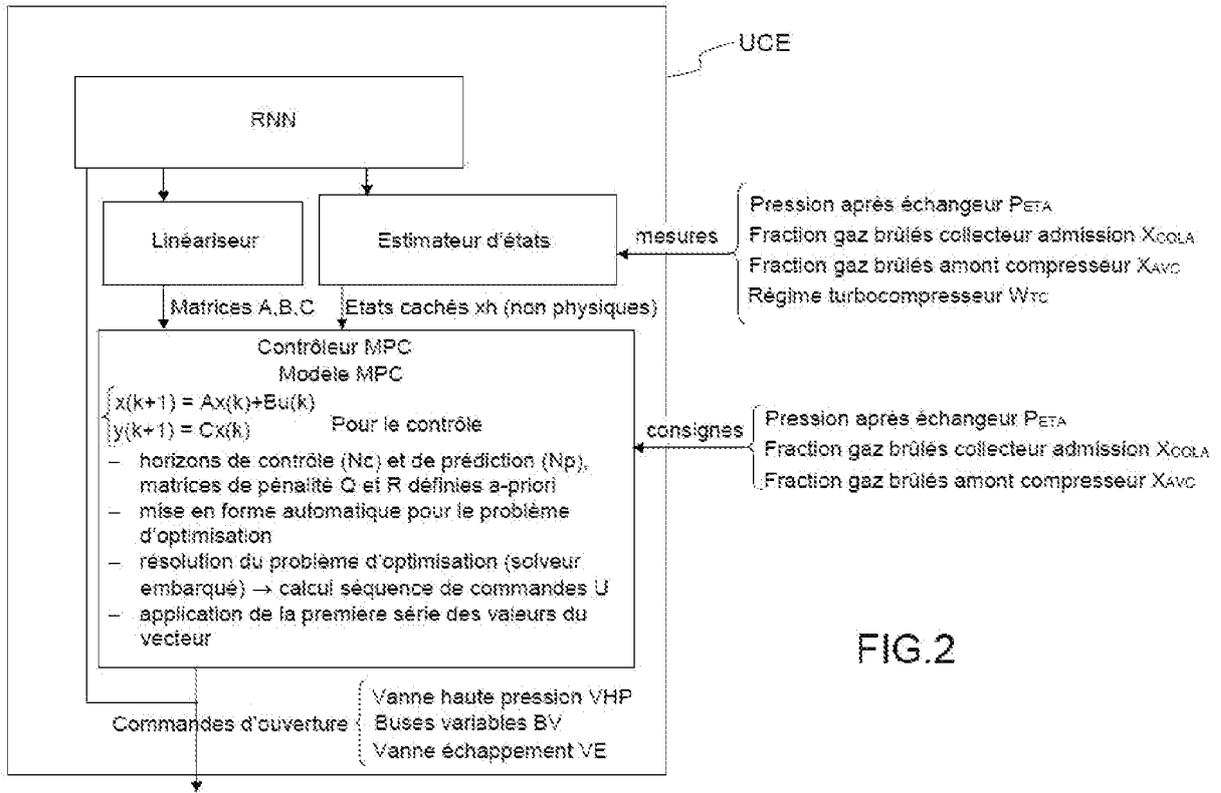


FIG.2

[Fig. 3]

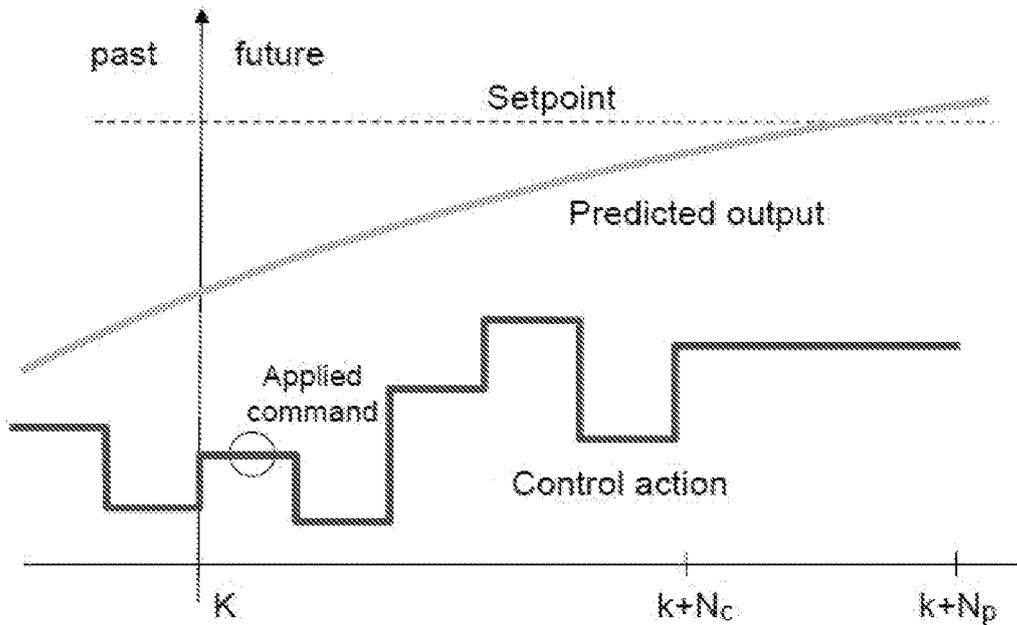


FIG.3



**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement  
national

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

FA 883068  
FR 2007141

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	EP 2 397 676 A1 (HONDA MOTOR CO LTD [JP]) 21 décembre 2011 (2011-12-21) * alinéa [0046] - alinéa [0052]; figures 1,2,30 *	1-5	F01N9/00 F01N11/00 F02D41/00
A	FR 2 901 840 A1 (RENAULT SAS [FR]) 7 décembre 2007 (2007-12-07) * page 6, ligne 5 - page 8, ligne 27; figure 1 *	1-5	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			F01N F02D F02M
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
9 décembre 2020		Zebst, Marc	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un		à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date	
autre document de la même catégorie		de dépôt ou qu'à une date postérieure.	
A : arrière-plan technologique		D : cité dans la demande	
O : divulgation non-écrite		L : cité pour d'autres raisons	
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2007141 FA 883068**

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 **09-12-2020**  
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
EP 2397676	A1	21-12-2011	EP 2397676 A1	21-12-2011
			JP 5028509 B2	19-09-2012
			JP 2012002123 A	05-01-2012
			US 2011313634 A1	22-12-2011
-----				
FR 2901840	A1	07-12-2007	AUCUN	
-----				