

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2020/217004 A1**

(43) Date de la publication internationale  
29 octobre 2020 (29.10.2020)

(51) Classification internationale des brevets :  
*B64C 27/04* (2006.01)      *G05B 17/00* (2006.01)  
*B64D 45/00* (2006.01)      *G07C 5/00* (2006.01)  
*G01M 15/14* (2006.01)

(72) Inventeur : **RAZAKARIVONY, Sébastien Philippe** ; C/  
O CEPI SEFRAN, Rond-Point René Ravaud-Réau, 77550  
MOISSY-CRAMAYEL (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2020/000143

(74) Mandataire : **AUGARDE, Eric** ; BREVALEX, 56 boulevard de l'Embouchure, B.P. 27519, 31075 TOULOUSE (FR).

(22) Date de dépôt international :  
21 avril 2020 (21.04.2020)

(81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
1904283      23 avril 2019 (23.04.2019)      FR

(71) Déposant : **SAFRAN** [FR/FR] ; 2 boulevard du Général  
Martial Valin, 75015 PARIS (FR).

(54) Title: SYSTEM AND METHOD FOR MONITORING AN AIRCRAFT ENGINE

(54) Titre : SYSTÈME ET PROCÉDÉ DE SURVEILLANCE D'UN MOTEUR D'AÉRONEF

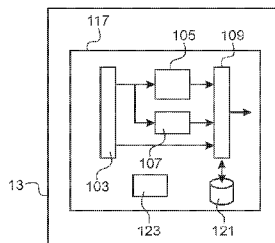
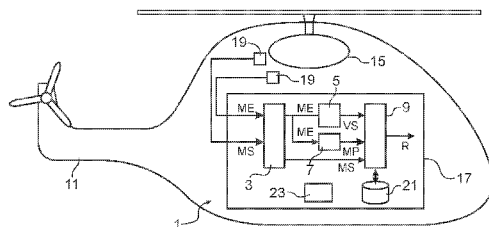


FIG. 1

(57) **Abstract:** A system for monitoring an aircraft engine, comprising: an acquisition module (3) for acquiring current measurements of physical size, referred to as input (ME) and output (MS) physical sizes, relative to the aircraft engine (15), a module (5) for simulating the physical behavior of the aircraft engine, in order to simulate output physical sizes (VS) as a function of the current measurements of input physical sizes (ME), a processor for calculating physical margins, referred to as actual physical margins (MR), between the simulated values of output physical sizes (VS) and the corresponding current measurements of output physical sizes (MS), a learning module (7) for predicting margins, said margins (MP) being predicted using current measurements of input physical sizes (ME) and in that the processor (9) is configured to calculate surveillance residuals (R) showing an indication of the status of the aircraft engine.

(57) **Abrégé :** Un système de surveillance d'un moteur d'aéronef, comportant : un module d'acquisition (3) pour acquérir des mesures courantes de grandeurs physiques, dites d'entrée (ME) et grandeurs physiques de sortie (MS), relatives audit moteur (15) d'aéronef, un module de simulation (5) du comportement physique dudit moteur d'aéronef, pour simuler des valeurs de grandeurs physiques de sortie (VS) en fonction desdites mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée (ME), un processeur (9) pour calculer des marges physiques, dites réelles (MR), entre lesdites valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie (VS) et lesdites mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie (MS), un module d'apprentissage (7) pour prédire des marges, dites marges prédites (MP), à partir des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée (ME), et en ce que ledit processeur (9) est configuré pour calculer des résidus de surveillance (R) présentant une indication de l'état du moteur d'aéronef.



WO 2020/217004 A1

**(84) États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée:**

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2(h))

## DESCRIPTION

### TITRE : Système et procédé de surveillance d'un moteur d'aéronef

#### Domaine technique

5 La présente invention se rapporte au domaine de surveillance d'un moteur d'aéronef. En particulier, l'invention concerne un procédé et un système de surveillance pour suivre l'état du moteur afin d'anticiper les opérations de maintenance.

Le terme « moteur d'aéronef » désigne l'ensemble de turbomoteurs équipant les appareils volants, notamment les hélicoptères et les avions.

10

#### Etat de la technique antérieure

Actuellement, le suivi de l'état des moteurs d'aéronefs et en particulier, les turbomoteurs d'hélicoptères est effectué par le calcul de marges ou indicateurs lors de manœuvres spécifiques dites Contrôle Santé Moteur « CSM » (ou « EPC » Engine Power  
15 Check, en anglais). Les marges sont calculées en utilisant un modèle physique simulant le comportement thermodynamique du moteur. Plus particulièrement, le modèle prend en entrée des données relatives au moteur et aux conditions de vol et ressort des données de sortie estimées à partir des données d'entrée. Les variables des données de sortie sont également enregistrées en temps réel par des capteurs de sorte que les marges sont  
20 calculées en faisant la soustraction entre les estimations et les enregistrements correspondants aux mêmes variables. Ces marges sont ensuite affichées en fonction des dates du vol permettant de les analyser visuellement ou par des techniques statistiques afin de détecter les anomalies et les tendances des marges.

Toutefois, avant de lancer une procédure automatique d'analyse de données, il est  
25 requis au préalable que le pilote place l'aéronef dans des conditions particulières de vol en phases stables. Ce problème est résolu par une méthode décrite dans le brevet FR3003032 qui permet de faire une détection automatique de ces phases stables. Cette méthode consiste à détecter les conditions dans lesquelles les contraintes de validité du modèle thermodynamique sont vérifiées, avant de calculer les marges.

Toutefois, ces marges restent valables uniquement sur les parties pour lesquelles le modèle physique reste valide, et donc souffrent de la limitation de domaine de fonctionnement de la surveillance. En outre, à cause d'un petit nombre de données dans les phases stables, il est parfois nécessaire pour un pilote d'effectuer des vols  
5 entièrement dédiés au calcul des marges, ce qui représente une charge de travail et des coûts supplémentaires.

L'objet de la présente invention est, par conséquent, de proposer un système de surveillance et de suivi d'un moteur d'aéronef remédiant aux inconvénients précités, en particulier en exploitant au mieux les données mesurées lors des vols pour déterminer  
10 des indicateurs précis sur l'état de santé du moteur.

### Présentation de l'invention

L'invention concerne un système de surveillance adapté pour surveiller un moteur d'aéronef, ledit système comportant :

15 - un module d'acquisition configuré pour acquérir au cours d'un temps de vol de l'aéronef des mesures courantes de grandeurs physiques, dites grandeurs physiques d'entrée et grandeurs physiques de sortie, relatives audit moteur d'aéronef et à son environnement,  
- un module de simulation du comportement physique dudit moteur d'aéronef, configuré pour simuler des valeurs de grandeurs physiques de sortie en fonction desdites mesures  
20 courantes de grandeurs physiques d'entrée,  
- un processeur configuré pour calculer des marges physiques, dites marges réelles, entre lesdites valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie et lesdites mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie,  
- un module d'apprentissage configuré pour prédire des marges, dites marges prédites, à  
25 partir des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée, et en ce que ledit processeur est configuré en outre pour calculer des résidus de surveillance entre lesdites marges réelles et lesdites marges prédites, lesdits résidus de surveillance présentant une indication de l'état du moteur d'aéronef.

Ce système consiste en une combinaison hybride (et non pas une simple juxtaposition)  
30 entre le module de simulation et le module d'apprentissage, créant ainsi une synergie qui

permet d'utiliser le modèle physique en dehors de son mode de fonctionnement normal, en plus bien entendu de son utilisation dans son mode de fonctionnement habituel. Ceci permet de mieux exploiter les données dans l'espace de validité du modèle physique utilisé par le module de simulation, mais aussi d'obtenir des informations en dehors de  
5 cet espace de validité. On notera par ailleurs que le module d'apprentissage aurait eu besoin de prendre en compte un très grand nombre de variables physiques s'il était utilisé tout seul. Ceci aurait drastiquement complexifié la maîtrise de l'apprentissage car les lois physiques reliant ces variables peuvent être non-linéaires et donc très sensibles aux conditions initiales de sorte que des différences infimes peuvent entraîner des résultats  
10 très différents, rendant la prédiction très bruitée.

Avantageusement, lesdites mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée et grandeurs physiques de sortie sont acquises lors des phases stables et transitoires dudit vol de l'aéronef.

En prenant en compte les phases transitoires ou instables, on obtient beaucoup plus  
15 de points de résidus et par conséquent, les résultats sont beaucoup moins bruités, permettant de réaliser automatiquement de meilleurs suivis de tendance et en conséquence, de pouvoir réagir beaucoup plus vite en cas d'anomalie. Ceci permet également de surveiller les phases instables ou transitoires (par exemple, au décollage et à l'atterrissage). Avec moins de points, il aurait été beaucoup plus difficile de déterminer  
20 la tendance.

Avantageusement, le système comporte une interface d'interaction et/ou d'affichage pour visualiser des représentations graphiques desdits résidus de surveillance.

Ceci donne des renseignements sur les tendances, anomalies ou ruptures relatives au moteur d'aéronef.

Avantageusement, le module d'apprentissage se base sur un modèle d'apprentissage  
25 construit préalablement en utilisant un moteur d'aéronef de référence durant un nombre prédéterminé de vol d'apprentissage, les mesures de grandeurs physiques d'entrée relatives au moteur de référence ainsi que les marges réelles générées par le module de simulation étant injectées lors de chaque vol d'apprentissage dans le module  
30 d'apprentissage, permettant à ce dernier de construire le modèle d'apprentissage.

Ainsi, en utilisant un moteur d'aéronef de référence dans les mêmes contextes, on permet au module d'apprentissage d'apprendre à prédire les marges de manière précise.

Avantageusement, ledit nombre de vols d'apprentissage est choisi pour assurer un compromis entre précision et stabilité du modèle d'apprentissage et en ce que seuls les premiers éléments dans la série de vols sont pris en compte. Ceci permet d'augmenter l'efficacité d'apprentissage tout en maintenant une grande précision.

On notera qu'il ne s'agit pas de la sélection d'un nombre de vol d'apprentissage quelconque, mais la sélection des premiers éléments dans la série de vols. En effet, si ces vols ne sont pas parmi les premiers vols de l'utilisation du moteur, la relation à apprendre (les marges modèle physique / système réel) change trop pour être apprise. L'erreur de modélisation ne serait plus constante mais dépendrait du temps, et ne pourrait donc plus être apprise.

Selon un mode de réalisation, ledit modèle d'apprentissage est construit selon une technique statistique de régression linéaire, réseaux de neurones, ou de forêts aléatoires.

Les grandeurs physiques d'entrée comportent au moins un paramètre d'entrée relatif au moteur d'aéronef et/ou aux conditions de vol de l'aéronef, comprenant au moins un paramètre choisi parmi la vitesse de rotation du moteur, la température extérieure, la pression extérieure, le débit du carburant, le débit d'air prélevé au sein du moteur, l'énergie électrique prélevée au sein du moteur, la position des aubes, l'altitude de vol, l'absence ou présence de filtres, et en ce que les grandeurs physiques de sortie comportent au moins un paramètre de sortie représentatif de l'état de fonctionnement du moteur d'aéronef, comprenant au moins un paramètre choisi parmi la température interne du moteur et le couple d'un arbre du moteur.

Avantageusement, les résidus de surveillance sont agrégés sous forme de moyennes ou modes pour une représentation synthétique.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, le moteur d'aéronef est un turbomoteur d'hélicoptère.

L'invention vise également un procédé de surveillance d'un moteur d'aéronef, comportant les étapes suivantes :

- acquérir au cours d'un temps de vol de l'aéronef des mesures courantes de grandeurs

physiques, dites grandeurs physiques d'entrée et grandeurs physiques de sortie, relatives audit moteur d'aéronef et à son environnement,

- simuler des valeurs de grandeurs physiques de sortie en fonction des dites mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée,

5 - calculer des marges physiques, dites marges réelles, entre les dites valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie et les dites mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie,

- prédire des marges, dites marges prédites, à partir des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée, et

10 - calculer des résidus de surveillance entre les dites marges réelles et les dites marges prédites, lesdits résidus de surveillance présentant une indication de l'état du moteur d'aéronef.

On notera que selon la présente invention un premier modèle (physique) est utilisé pour construire un meilleur modèle (empirique + physique).

15 On notera par ailleurs, que dans la présente invention, les marges prédites sont définies sur le même instant que les données utilisées. En outre, le terme « prédiction » est utilisé ici au sens de l'apprentissage statistique et donc d'une sortie du modèle empirique sur des données d'entrée.

On notera également que dans la présente invention le résidu de surveillance est  
20 défini entre les marges réelles et les marges prédites. Ainsi, les résidus de surveillance sont distincts des « marges » usuellement utilisées par l'homme du métier.

Par ailleurs, on notera que le module d'apprentissage selon la présente invention ne prédit pas l'état du système, mais le résidu entre un modèle physique et le système. Ainsi, la présente invention porte sur l'utilisation de deux modèles en cascade : le premier  
25 modèle (physique) donne des marges, et le second modèle (empirique/d'apprentissage) prédit l'écart habituel entre le modèle physique et le système réel. On notera qu'il n'est pas évident d'utiliser le modèle physique dans des zones dans lesquels il n'est pas valable selon les théories physiques. Toutefois, par construction, le système selon la présente demande apprend à corriger ces erreurs.

**Brève description des figures**

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préférentiel de l'invention, décrit en référence aux figures jointes parmi lesquelles :

5 [Fig. 1] illustre de manière schématique un système de surveillance d'un moteur d'aéronef selon un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 2] illustre de manière schématique un procédé de surveillance d'un moteur d'aéronef selon un mode de réalisation de l'invention ;

10 [Fig. 3A] illustre de manière schématique la phase d'apprentissage préalable du module d'apprentissage, selon un mode de réalisation de l'invention ;

[Fig. 3B] illustre de manière schématique la phase opérationnelle, selon un mode de réalisation de l'invention ; et

[Fig. 4] illustre un graphe représentant des marges et résidus de surveillance, selon un mode de réalisation de l'invention.

15

**Description des modes de réalisation**

Le principe de l'invention consiste à coupler un modèle physique du comportement du moteur d'aéronef avec un modèle d'apprentissage de sorte que l'exploitation des mesures acquises lors des vols est maximisée permettant ainsi un suivi complet et optimal du moteur.

20

La figure 1 illustre de manière schématique un système de surveillance d'un moteur d'aéronef selon un mode de réalisation de l'invention.

Le système de surveillance 1 comporte un module d'acquisition 3, un module de simulation 5, un module d'apprentissage 7 et un processeur 9.

25

Le système de surveillance 1 peut être entièrement compris dans un aéronef 11 ou partagé entre l'aéronef 11 et un centre de maintenance 13.

L'aéronef 11 (ici représenté par un hélicoptère mais peut être un avion) comprend un moteur 15, un ordinateur 17 de bord et des capteurs 19.

Les capteurs 19 mesurent des grandeurs physiques, dites grandeurs physiques d'entrée et grandeurs physiques de sortie, relatives au moteur 15 d'aéronef et à son environnement.

A titre d'exemple, les grandeurs physiques d'entrée peuvent comporter au moins un paramètre d'entrée relatif au moteur 15 d'aéronef et/ou aux conditions de vol de l'aéronef 11, comprenant au moins un paramètre choisi parmi la vitesse de rotation du moteur 15, la température extérieure, la pression extérieure, le débit du carburant, le débit d'air prélevé au sein du moteur 15, l'énergie électrique prélevée au sein du moteur 15, la position des aubes, l'altitude de vol, et l'absence ou présence de filtres. Les grandeurs physiques de sortie peuvent comporter au moins un paramètre de sortie représentatif de l'état de fonctionnement du moteur d'aéronef, comprenant au moins un paramètre choisi parmi la température interne du moteur 15 et le couple d'un arbre du moteur 15.

L'ordinateur 17 de bord comprend le processeur 9, les modules d'acquisition 3, de simulation 5 et d'apprentissage 7 ainsi qu'une mémoire 21 d'enregistrement et une interface 23. On notera que le centre de maintenance 13 comporte également un ordinateur 117 qui peut comprendre les mêmes éléments (i.e. processeur 109 et modules d'acquisition 103, de simulation 105 et d'apprentissage 107, une mémoire 121 et une interface 123) que l'ordinateur 17 de bord.

La mémoire 21 (et/ou 121) forme un support d'enregistrement, lisible par le processeur 9 (et/ou 109) et sur lequel est enregistré un ou plusieurs programme(s) d'ordinateur comportant des codes d'instructions pour l'exécution du procédé de surveillance décrit ci-dessous en référence à la figure 2.

En effet, la figure 2 illustre de manière schématique un procédé de surveillance d'un moteur d'aéronef selon un mode de réalisation de l'invention.

A l'étape E1, le module d'acquisition 3 (et/ou 103) est configuré pour acquérir au cours d'un temps de vol de l'aéronef 11 les mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME et de grandeurs physiques de sortie MS.

A l'étape E2, le module de simulation 5 (et/ou 105) est adapté pour simuler le comportement physique du moteur 15 d'aéronef. En effet, le module de simulation 5

comporte un modèle thermodynamique des relations entre des grandeurs physiques relatives au moteur 15 et il agit comme un solveur qui calcule des données de sortie en fonction des données d'entrée. Ainsi, le module de simulation 5 est configuré pour simuler des valeurs de grandeurs physiques de sortie VS en fonction des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME récupérées depuis le module d'acquisition 3. Ainsi, les valeurs de grandeurs physiques de sortie VS sont simulées à partir des valeurs d'entrée observées en temps réel.

A l'étape E3, le processeur 9 (et/ou 109) est configuré pour calculer des marges physiques, dites marges réelles, entre les valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie VS et les mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie MS. Les marges réelles représentent les différences entre les données réelles du moteur observées en temps réel et les sorties calculées par le module de simulation. Autrement dit, les marges réelles définissent les erreurs réelles entre le modèle physique et les grandeurs physiques observées.

Avantageusement, les mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME et grandeurs physiques de sortie MS sont acquises par le module d'acquisition 3 lors des phases stables et transitoires du vol de l'aéronef 11.

En effet, le modèle physique dispose d'un domaine de validité spécifique, mais en dehors de ce domaine de validité, la modélisation peut être considérée comme une approximation raisonnable du comportement du moteur 15 et peut être utilisée comme support par le module d'apprentissage 7. On notera cependant que cette approximation n'est pas assez bonne pour être utilisée seule.

A l'étape E4, le module d'apprentissage 7 (et/ou 107) est configuré pour prédire des marges, dites marges prédites MP, à partir des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME (i.e. les valeurs d'entrée observées). Le module d'apprentissage 7 comporte un modèle d'apprentissage statistique basé sur une technique connue du type régression linéaire, réseaux de neurones, ou forêts aléatoires.

Le module d'apprentissage 7 se base sur un modèle d'apprentissage statistique construit préalablement pour apprendre les marges selon des techniques classiques du

type régression linéaire, ou forêts aléatoires. Cette phase d'apprentissage est décrite ultérieurement en référence à la figure 3.

Ainsi, un couplage est construit entre le module de simulation 5 et le module d'apprentissage 7, permettant à ce dernier d'apprendre à prédire des marges précises sur toutes les phases du vol à partir des marges générées par le module de simulation 5, en corrigeant les marges approximatives générées par le module simulation 5 dans les phases transitoires. Ce couplage permet de mieux exploiter les données dans l'espace de validité du modèle physique utilisé par le module de simulation 5 et d'obtenir, en plus, des informations en dehors de cet espace de validité.

A l'étape E5, le processeur 9 (et/ou 109) est configuré en outre pour calculer des résidus de surveillance R entre les marges réelles et les marges prédites. Les résidus de surveillance présentent une indication de l'état du moteur 15 d'aéronef. Le fait de suivre les résidus de surveillance permet d'améliorer les marges calculées et de pouvoir obtenir des résultats précis en dehors du domaine de validité du modèle physique.

Les résidus de surveillance R peuvent être représentés par des nuages de points ou graphique pour être visualisés sur l'interface 23 (ou 123) d'interaction et/ou d'affichage de l'ordinateur 17 (ou 117) donnant ainsi des renseignements sur les tendances, anomalies ou ruptures relatives au moteur d'aéronef. Avantagement, pour une meilleure lisibilité, les résidus de surveillance sont agrégés sous forme de moyennes, modes, ou toute autre technique de réduction de dimension pour une représentation synthétique.

Avantageusement, les données opérationnelles collectées durant le vol de l'aéronef sont déchargées en fin de vol. L'ordinateur 117 du centre de maintenance 13 effectue les étapes selon la figure 2 et les résultats sont affichés sur l'interface 123. Les experts de maintenance peuvent ainsi regarder les courbes de résidus, afin d'alerter en cas de comportements anormaux, que ce soit des ruptures dans les courbes, des tendances anormales, ou des anomalies.

Les figures 3A et 3B illustrent de manière schématique la phase d'apprentissage préalable du module d'apprentissage ainsi que la phase opérationnelle, selon un mode de réalisation de l'invention.

Plus particulièrement, la figure 3A représente la phase d'apprentissage durant laquelle le module d'apprentissage construit un modèle d'apprentissage en se basant sur un moteur d'aéronef de référence 115 très stable.

5 Afin d'augmenter la précision de l'apprentissage, il est avantageux d'avoir un moteur de référence 115 utilisé dans les mêmes contextes que les moteurs à surveiller. Il est également avantageux de prendre les premiers éléments dans la série de vols enregistrés, et non pas des vols aléatoirement choisis dans la base de données, comme il est habituellement fait en apprentissage statistique.

L'apprentissage se déroule sur une fenêtre de temps  $[t-k ; t]$  définie comme pertinente  
10 d'environ quelques heures à quelques dizaines d'heures de vol, avec un nombre d'exemples suffisants pris dans les premiers vols d'un nombre prédéterminé de vol d'apprentissage. En effet, le modèle d'apprentissage travaille sur les marges et non directement sur les variables de sortie. Par définition, les marges sont de faibles quantités et donc bruitées, ce qui nécessite de bien maîtriser la partie apprentissage, en particulier  
15 le nombre d'exemples à utiliser. Plus ce nombre est grand, plus le modèle d'apprentissage est précis. Cependant, s'il est trop grand, le moteur va changer d'état et on perd la stabilité du modèle. Ainsi, le nombre de vol d'apprentissage est choisi pour assurer un compromis entre précision et stabilité du modèle d'apprentissage et il est par conséquent, avantageux de choisir un nombre raisonnable de vols. Ce nombre dépend de  
20 la technique d'apprentissage et peut être à titre d'exemple, entre trois et dix vols.

Avantageusement, la fenêtre de temps englobe les grandeurs physiques d'entrée relatives au moteur d'aéronef et aux conditions de vol de l'aéronef, jusqu'à prédire la ou les variable(s) de grandeurs physiques de sortie, du pas de temps  $t-k$  au pas de temps  $t$ .

En effet, étant donné qu'en dehors des zones de validité du modèle physique, les  
25 variables d'entrées relatives au moteur et aux conditions extérieures ne sont pas en régime stationnaire, la technique d'apprentissage selon l'invention prend en compte le passé sur une certaine fenêtre de temps afin de réduire davantage le bruit. Autrement dit, on utilise non seulement les pas de temps précédents, de  $t-k$  à  $t-1$ , mais aussi les valeurs des variables à l'instant  $t$ . On notera que dans les méthodes classiques

d'apprentissage, seuls les pas de temps précédents sont pris en compte selon une logique prédictive.

Comme dans la phase opérationnelle, le module d'acquisition du moteur de référence 115 recueille au cours de chaque vol d'apprentissage, les mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME et de grandeurs physiques de sortie MS relatives au moteur de référence 115 durant les phases stables et transitoires du vol.

Les grandeurs physiques d'entrée ME sont injectées dans le module de simulation 5. Ce dernier estime des valeurs de grandeurs physiques de sortie VS en fonction des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME.

Le processeur calcule ensuite les différences entre les valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie VS et les mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie MS. Ces différences produisent les marges réelles MR.

Ensuite, les mesures de grandeurs physiques d'entrée ME (relatives au moteur de référence et aux conditions extérieures) sur plusieurs pas de temps ainsi que les marges réelles MR générées par le module de simulation 5 sont injectées dans le module d'apprentissage 7 permettant à ce dernier de construire le modèle d'apprentissage.

Ainsi, le module d'apprentissage 7 apprend grâce aux grandeurs physiques d'entrée affectant le moteur de référence sur plusieurs pas de temps et non uniquement sur les valeurs instantanées, les relations entre les marges réelles MR et les marges prédites MP (i.e. la différence entre les marges générées par le modèle physique et ceux générées par le modèle d'apprentissage).

L'apprentissage selon l'invention est ainsi facilité par le modèle physique qui absorbe l'impact de données de paramétrage et comble une grande partie des données. Plus particulièrement, le système de surveillance réalise une fusion entre le modèle physique et le modèle d'apprentissage où les résultats du modèle physique sont utilisés par le modèle d'apprentissage pour prédire les marges. En outre, l'apprentissage est basée sur l'historique des données et utilise toute la série temporelle enregistrée (i.e. stables et instables).

La figure 3B illustre la phase opérationnelle, selon les étapes décrites en référence à la figure 2, qui consiste à prédire les valeurs des marges obtenues et les comparer avec les marges réellement sorties par le moteur de référence.

Plus particulièrement, le module d'acquisition recueille, au cours de chaque vol  
5 opérationnel, les mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME et de grandeurs physiques de sortie MS relatives au moteur 15 sous surveillance durant toutes les phases stables et transitoires du vol.

Le module de simulation 5 estime ensuite les valeurs de grandeurs physiques de sortie VS en fonction des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME. Le  
10 processeur calcule alors les marges réelles MR en faisant la différence entre les valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie VS et les mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie MS.

Ensuite, le module d'apprentissage 7 détermine les marges prédites MP à partir des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée ME. Finalement, le processeur  
15 calcule les résidus de surveillance R entre les marges réelles MR et les marges prédites MP.

La figure 4 illustre un nuage de points représentatifs des marges et résidus de surveillance, selon un mode de réalisation de l'invention.

Selon cet exemple, l'axe des ordonnées représente les marges de la température  
20 interne du moteur 15 (ou 115) selon une échelle de 10° C et l'axe des abscisses représente les dates ou périodes des vols subdivisées en trimestres.

Chaque point noir représente la moyenne des marges réelles MR par vol et chaque point gris représente la moyenne des résidus de surveillance R par vol.

Au départ, on a une phase préliminaire d'apprentissage (période P0) où il n'y a que des  
25 points noirs (i.e. des marges réelles). Ensuite, on entre dans une phase opérationnelle (périodes P1-P8) où les résidus de surveillance R (i.e. les points gris) sont calculés en plus des marges réelles MR. On notera qu'il y a beaucoup plus de points gris que de points noirs car ces derniers ne sont calculés que sur les phases stables tandis que les points gris sont déterminés sur toutes les phases du vol.

Ainsi, en prenant en compte les phases transitoires ou instables, on obtient beaucoup plus de points de surveillance et par conséquent, les résultats sont beaucoup moins bruités, permettant de réaliser automatiquement de meilleurs suivis de tendance et du coup de pouvoir réagir beaucoup plus vite en cas d'anomalie. Ceci permet également de  
5 surveiller les phases instables ou transitoires (par exemple, au décollage et à l'atterrissage). Avec moins de points, il aurait été beaucoup plus difficile de déterminer la tendance.

On notera qu'un moteur est considéré vieux lorsqu'il n'a plus de marge (i.e. lorsque la marge de température interne selon le schéma de la figure 4 est proche de zéro). Ce  
10 schéma montre également que dans la période P6, le moteur a subi une maintenance qui a permis d'augmenter la marge.

Ainsi, le système de surveillance selon l'invention utilise le modèle physique comme une approximation de premier ordre, ce qui permet de faciliter l'apprentissage. En outre, il utilise les premiers vols d'un moteur de référence pour apprendre le modèle plutôt que  
15 de prendre des vols aléatoires. Il utilise en plus, l'historique des variables et non pas uniquement la valeur instantanée de ces variables, pour bien modéliser les parties dynamiques.

Le procédé et système de surveillance selon l'invention est adapté pour tous les moteurs d'aéronefs et en particulier, pour un moteur d'aéronef qui présente beaucoup  
20 de phases transitoires ou instables comme l'hélicoptère.

## REVENDEICATIONS

1. Système de surveillance d'un moteur d'aéronef, comportant :  
- un module d'acquisition (3) configuré pour acquérir au cours d'un temps de vol de  
5 l'aéronef des mesures courantes de grandeurs physiques, dites grandeurs physiques  
d'entrée (ME) et grandeurs physiques de sortie (MS), relatives audit moteur (15)  
d'aéronef et à son environnement,  
- un module de simulation (5) du comportement physique dudit moteur d'aéronef,  
configuré pour simuler des valeurs de grandeurs physiques de sortie (VS) en fonction  
10 desdites mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée (ME),  
- un processeur (9) configuré pour calculer des marges physiques, dites marges réelles  
(MR), entre lesdites valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie (VS) et lesdites  
mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie (MS),  
- un module d'apprentissage (7) configuré pour prédire des marges, dites marges prédites  
15 (MP), à partir des mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée (ME), et en ce que  
ledit processeur (9) est configuré en outre pour calculer des résidus de surveillance (R)  
entre lesdites marges réelles (MR) et lesdites marges prédites (MP), lesdits résidus de  
surveillance présentant une indication de l'état du moteur d'aéronef.

2. Système selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdites mesures courantes  
20 de grandeurs physiques d'entrée et grandeurs physiques de sortie sont acquises lors des  
phases stables et transitoires dudit vol de l'aéronef.

3. Système selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comporte une  
interface d'affichage (23) pour visualiser des représentations graphiques desdits résidus  
de surveillance.

25 4. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le  
module d'apprentissage (7) se base sur un modèle d'apprentissage construit  
préalablement en utilisant un moteur d'aéronef de référence (115) durant un nombre  
prédéterminé de vol d'apprentissage, les mesures de grandeurs physiques d'entrée  
relatives au moteur de référence ainsi que les marges réelles générées par le module de

simulation étant injectées lors de chaque vol d'apprentissage dans le module d'apprentissage permettant à ce dernier de construire le modèle d'apprentissage.

5 5. Système selon la revendication 4, caractérisé en ce que ledit nombre de vol d'apprentissage est choisi pour assurer un compromis entre précision et stabilité du modèle d'apprentissage et en ce que seuls les premiers éléments dans la série de vols est pris en compte.

6. Système selon la revendication 4 ou 5, caractérisé en ce que ledit modèle d'apprentissage (7) est construit selon une technique statistique de régression linéaire ou de forêts aléatoires.

10 7. Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les grandeurs physiques d'entrée comportent au moins un paramètre d'entrée relatif au moteur d'aéronef et/ou aux conditions de vol de l'aéronef, comprenant au moins un paramètre choisi parmi la vitesse de rotation du moteur, la température extérieure, la pression extérieure, le débit du carburant, le débit d'air prélevé au sein du moteur, 15 l'énergie électrique prélevée au sein du moteur, la position des aubes, l'altitude de vol, l'absence ou présence de filtres, et en ce que les grandeurs physiques de sortie comportent au moins un paramètre de sortie représentatif de l'état de fonctionnement du moteur d'aéronef, comprenant au moins un paramètre choisi parmi la température interne du moteur et le couple d'un arbre du moteur.

20 8. Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les résidus de surveillance sont agrégés sous forme de moyennes ou modes pour une représentation synthétique.

9. Système selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le moteur (15) d'aéronef est un turbomoteur d'hélicoptère.

25 10. Procédé de surveillance d'un moteur d'aéronef, comportant les étapes suivantes :  
- acquérir au cours d'un temps de vol de l'aéronef des mesures courantes de grandeurs physiques, dites grandeurs physiques d'entrée (ME) et grandeurs physiques de sortie (MS), relatives audit moteur d'aéronef et à son environnement,  
- simuler des valeurs de grandeurs physiques de sortie (VS) en fonction desdites mesures courantes de grandeurs physiques d'entrée (ME),  
30

- calculer des marges physiques, dites marges réelles (MR), entre lesdites valeurs simulées de grandeurs physiques de sortie (VS) et lesdites mesures courantes correspondantes de grandeurs physiques de sortie (MS),
  - prédire des marges, dites marges prédites (MP), à partir des mesures courantes de
- 5 grandeurs physiques d'entrée, et
- calculer des résidus de surveillance (R) entre lesdites marges réelles et lesdites marges prédites, lesdits résidus de surveillance présentant une indication de l'état du moteur d'aéronef.

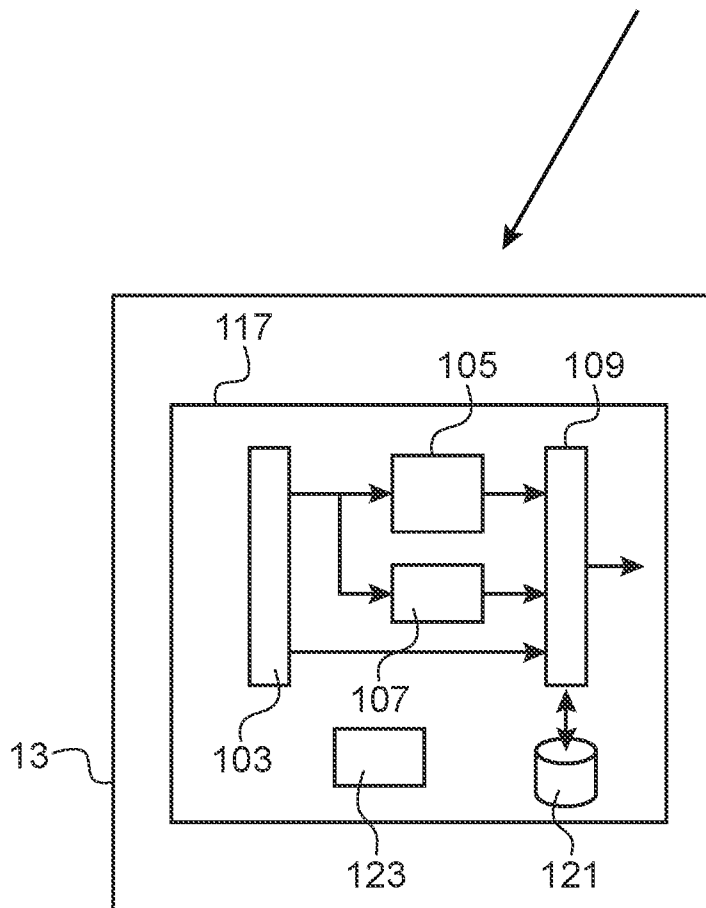
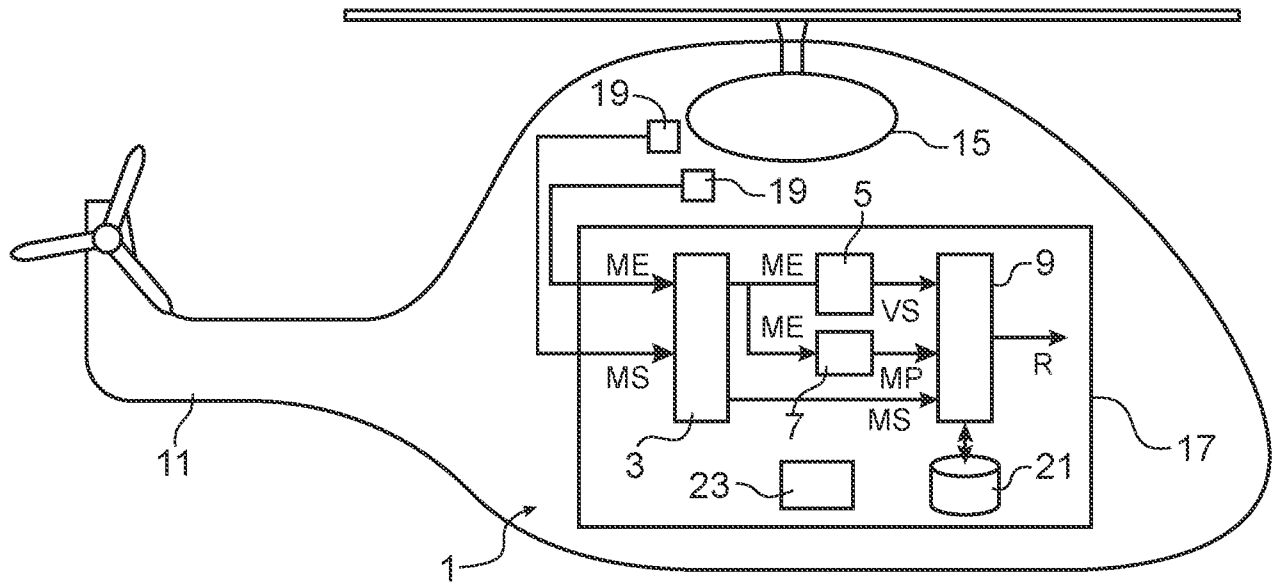


FIG. 1

2/4

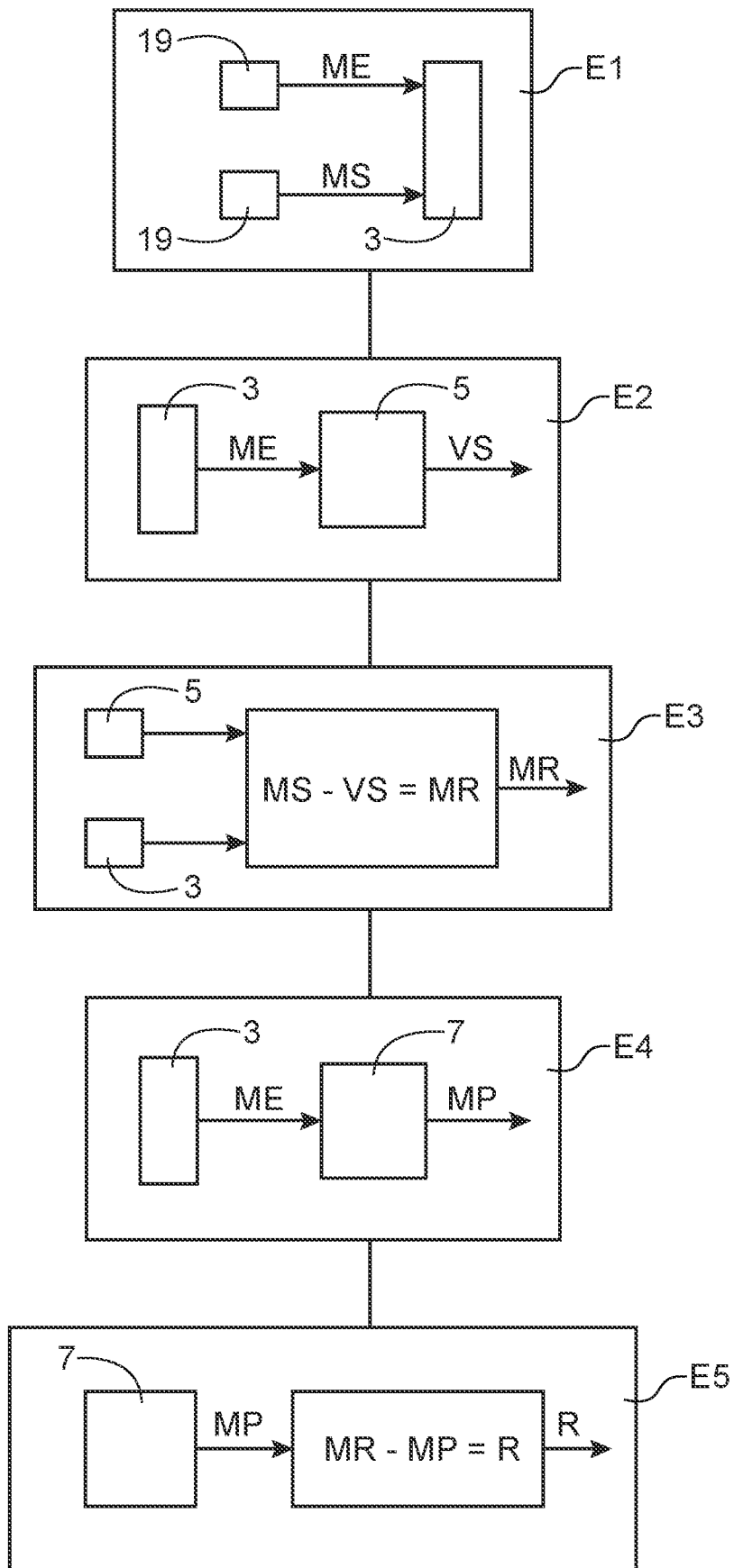


FIG.2

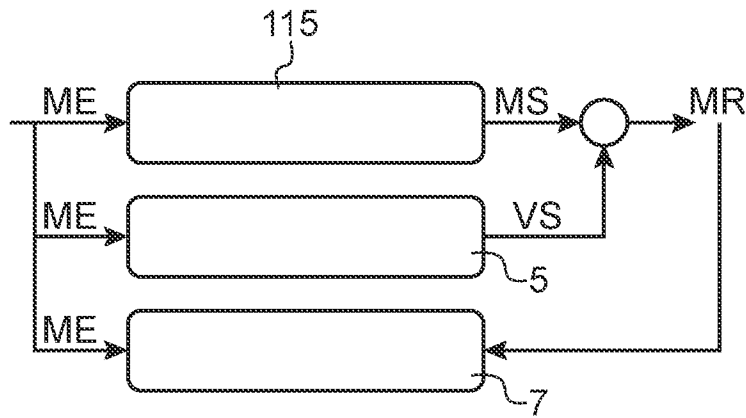


FIG.3A

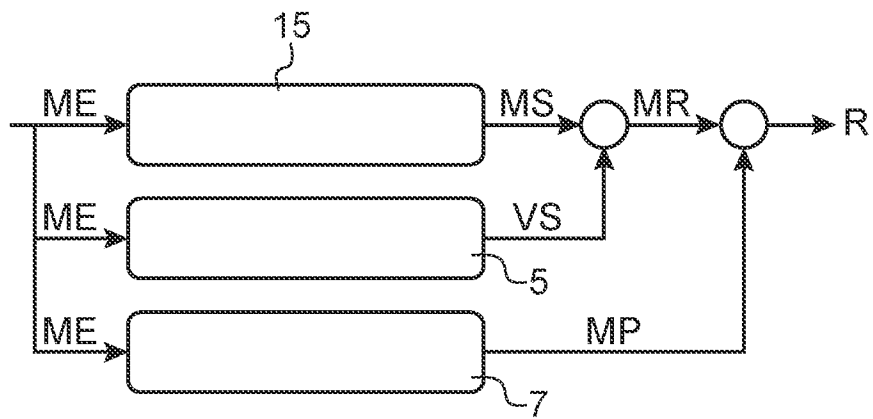


FIG.3B

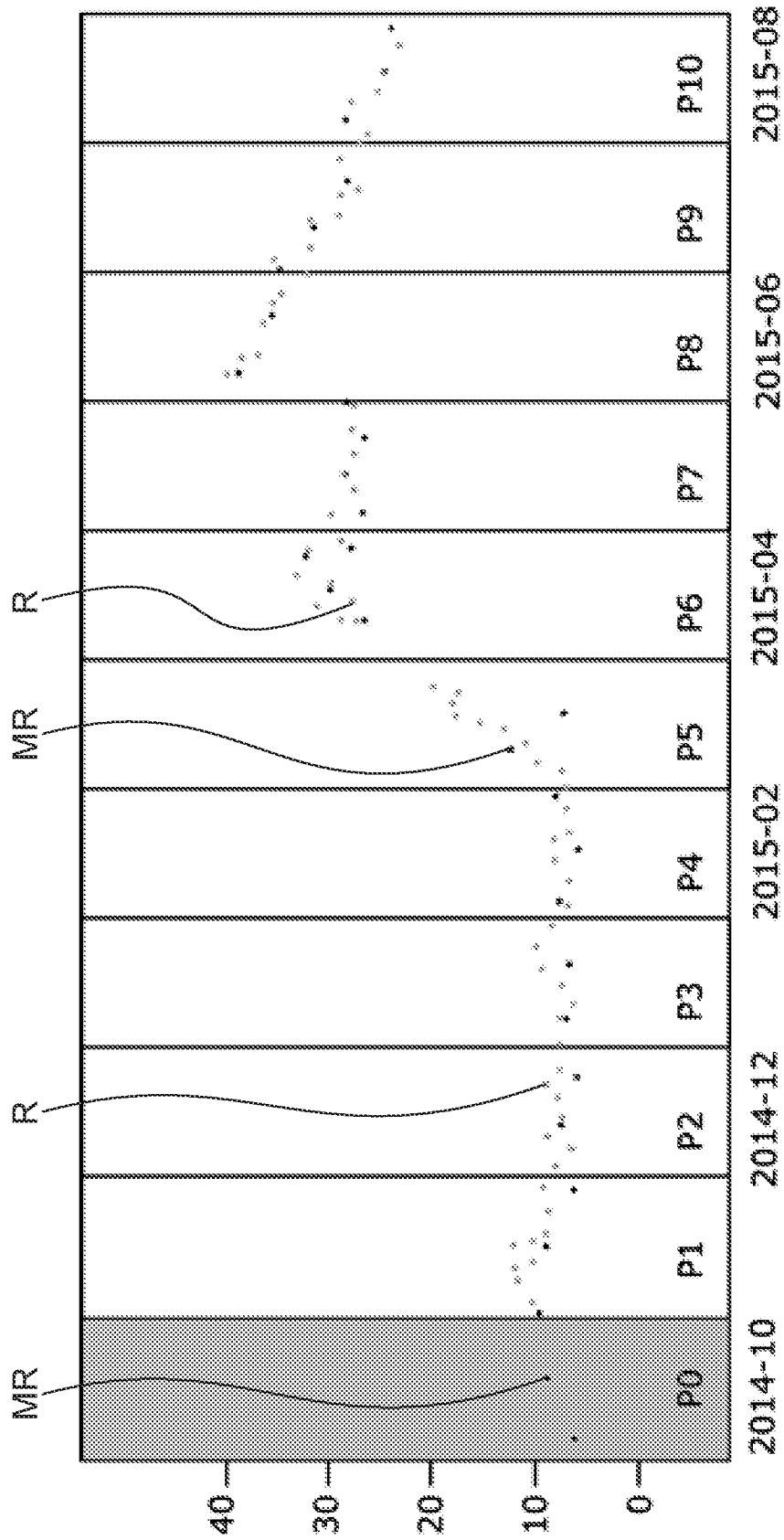


FIG.4

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/FR2020/000143**

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>B64C 27/04</i> (2006.01)i; <i>B64D 45/00</i> (2006.01)i; <i>G01M 15/14</i> (2006.01)i; <i>G05B 17/00</i> (2006.01)i; <i>G07C 5/00</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B64D; B64C; G05B; G07C; G01M		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	US 8600917 B1 (SCHIMERT JAMES [US] ET AL) 03 December 2013 (2013-12-03) column 1, line 6 - column 14, line 28 figures 1-4B	1,2,4-7,10 3,8,9
Y A	FR 3035232 A1 (SNECMA [FR]) 21 October 2016 (2016-10-21) page 1 - page 14 claims 1-14 figures 1-5B	3 1,10
Y A	US 2018268288 A1 (VANDIKE JOHN LAWRENCE [US] ET AL) 20 September 2018 (2018-09-20) paragraphs [0001] - [0150] figures 1-9	8,9 1,10
A	US 2009048730 A1 (AKKARAM SRINKANTH [US] ET AL) 19 February 2009 (2009-02-19) paragraphs [0001] - [0023] figures 1-2	1,10
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&amp;” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search <b>06 August 2020</b>		Date of mailing of the international search report <b>19 August 2020</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Glück, Michael</b>  Telephone No.



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/FR2020/000143**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	8600917	B1	03 December 2013	NONE			
FR	3035232	A1	21 October 2016	NONE			
US	2018268288	A1	20 September 2018	CN	110431296	A	08 November 2019
				EP	3596325	A1	22 January 2020
				US	2018268288	A1	20 September 2018
				WO	2018169605	A1	20 September 2018
US	2009048730	A1	19 February 2009	NONE			
EP	2549415	A1	23 January 2013	CN	102889992	A	23 January 2013
				EP	2549415	A1	23 January 2013
				US	2013024179	A1	24 January 2013

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2020/000143

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. B64C27/04 B64D45/00 G01M15/14 G05B17/00 G07C5/00 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) B64D B64C G05B G07C G01M		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 8 600 917 B1 (SCHIMERT JAMES [US] ET AL) 3 décembre 2013 (2013-12-03)	1,2,4-7, 10
Y	colonne 1, ligne 6 - colonne 14, ligne 28 figures 1-4B	3,8,9
Y	----- FR 3 035 232 A1 (SNECMA [FR]) 21 octobre 2016 (2016-10-21)	3
A	page 1 - page 14 revendications 1-14 figures 1-5B	1,10
Y	----- US 2018/268288 A1 (VANDIKE JOHN LAWRENCE [US] ET AL) 20 septembre 2018 (2018-09-20)	8,9
A	alinéas [0001] - [0150] figures 1-9	1,10
	----- -/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée		"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée  6 août 2020		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale  19/08/2020
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé  Glück, Michael

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 2009/048730 A1 (AKKARAM SRINKANTH [US] ET AL) 19 février 2009 (2009-02-19) alinéas [0001] - [0023] figures 1-2	1,10
A	----- EP 2 549 415 A1 (GEN ELECTRIC [US]) 23 janvier 2013 (2013-01-23) alinéas [0011] - [0047] figures 1-6 -----	1-10

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2020/000143

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 8600917	B1	03-12-2013	AUCUN
FR 3035232	A1	21-10-2016	AUCUN
US 2018268288	A1	20-09-2018	CN 110431296 A 08-11-2019 EP 3596325 A1 22-01-2020 US 2018268288 A1 20-09-2018 WO 2018169605 A1 20-09-2018
US 2009048730	A1	19-02-2009	AUCUN
EP 2549415	A1	23-01-2013	CN 102889992 A 23-01-2013 EP 2549415 A1 23-01-2013 US 2013024179 A1 24-01-2013