

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①1 N° de publication : **3 142 512**

(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **22 12567**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **F 02 C 9/48** (2023.01), F 02 C 6/00, B 64 D 31/00,  
F 02 K 5/00, F 01 D 15/10

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤4 Procédé de commande et dispositif de commande d'une turbomachine hybride.

②2 Date de dépôt : 30.11.22.

③0 Priorité :

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 : 06.12.24 Bulletin 24/49.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *Safran Aircraft Engines Société par  
actions simplifiée (SAS) — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : BENATTIA Seif Eddine, AULNETTE  
Rudy, Charles, André et LABBE Christophe.

⑦3 Titulaire(s) : Safran Aircraft Engines Société par  
actions simplifiée (SAS).

⑦4 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

**FR 3 142 512 - B1**



## **Description**

### **Titre de l'invention : Procédé de commande et dispositif de commande d'une turbomachine hybride**

#### **DOMAINE DE L'INVENTION**

- [0001] L'invention concerne la commande d'une turbomachine hybride, c'est-à-dire d'une turbomachine présentant un entraînement thermique et un entraînement électrique.
- [0002] L'invention concerne, en particulier, un procédé de commande et un dispositif de commande multivariable, c'est-à-dire prenant en compte plusieurs degrés de liberté du système commandé.

#### **ETAT DE LA TECHNIQUE**

- [0003] Une turbomachine hybride présente deux degrés de liberté, à savoir un débit de carburant envoyé dans la chambre de combustion et un couple électrique appliqué sur un arbre moteur de la turbomachine. Par conséquent, une turbomachine hybride est considérée comme un système multivariable.
- [0004] Le débit de carburant envoyé dans la chambre de combustion et le couple électrique appliqué sur un arbre moteur de la turbomachine sont des « entrées » du système de la turbomachine. Chacune agit sur le régime moteur, c'est-à-dire une vitesse angulaire de l'arbre moteur qui est une « sortie » du système de la turbomachine.
- [0005] Les deux entrées du système, que sont le débit de carburant envoyé dans la chambre de combustion et le couple électrique appliqué sur un arbre moteur de la turbomachine, doivent être régulées : on doit en fixer automatiquement et en temps réel la valeur pour assurer un bon fonctionnement de la turbomachine, c'est-à-dire pour obtenir des valeurs des grandeurs de sortie satisfaisantes.
- [0006] Le bon fonctionnement de la turbomachine peut être, en particulier, caractérisé par le bon suivi d'une courbe de consigne par la grandeur de sortie de la turbomachine.
- [0007] Une courbe de consigne d'une grandeur de sortie, par exemple du régime moteur, est une courbe continue ou une séquence temporelle de valeurs de consigne représentant l'évolution temporelle souhaitée d'une telle grandeur de sortie, soit ici du régime de l'arbre moteur. Plus le régime moteur réel est proche de cette courbe de consigne, meilleur est le fonctionnement de la turbomachine.
- [0008] Un procédé de commande de la turbomachine est une régulation des grandeurs d'entrée du système de la turbomachine à partir d'au moins une grandeur de sortie du système de la turbomachine. Il faut disposer pour cela non seulement d'une courbe de consigne de la grandeur de sortie mais aussi d'une mesure en temps réel de la grandeur de sortie.
- [0009] Les procédés de commande d'une turbomachine hybride décrits précédemment ne

sont pas satisfaisants car ils peuvent nécessiter une grandeur de sortie supplémentaire, comme par exemple le taux d'enrichissement. Cela suppose que l'on dispose non seulement d'une courbe de consigne mais aussi d'une mesure en temps réel de cette grandeur supplémentaire. Or, ces deux éléments peuvent être difficiles à déterminer ou à mettre en œuvre, notamment le taux d'enrichissement.

[0010] Les procédés de commande d'une turbomachine hybride décrits précédemment ne sont également pas satisfaisants car ils peuvent réguler une grandeur d'entrée en fonction de l'autre, par exemple la détermination du couple électrique peut s'effectuer après et en fonction de la détermination du débit de carburant. En particulier le couple électrique peut être maintenu nul tant que le débit de carburant peut être augmenté. Les deux degrés de liberté de la turbomachine ne sont pas alors utilisés de manière indépendante et optimale.

[0011] Il existe donc un besoin d'un procédé de commande d'une turbomachine hybride qui permet d'utiliser de manière indépendante les deux degrés de liberté sans recourir à des grandeurs de sortie dont la courbe de consigne ou la mesure en temps réel est difficile à déterminer ou à mettre en œuvre.

### **Exposé de l'invention**

[0012] Un but de l'invention est de proposer un procédé de commande d'une turbomachine hybride permettant d'utiliser de manière indépendante deux degrés de liberté sans recourir à des grandeurs de sortie dont une courbe de consigne ou une mesure en temps réel est difficile à déterminer ou à mettre en œuvre.

[0013] Le but est atteint dans le cadre de l'invention grâce à un procédé de commande d'une turbomachine hybride comprenant les étapes suivantes :

- une détermination d'une séquence d'écarts, chaque écart étant une différence entre
  - une mesure d'une séquence de mesures d'un régime d'un arbre basse-pression de la turbomachine hybride et
  - une consigne d'une séquence de consignes du régime de l'arbre basse-pression,
- une détermination d'une variation d'un débit de carburant et une détermination d'une variation d'un couple électrique, le couple électrique étant configuré pour s'appliquer à l'arbre basse-pression, les déterminations étant notamment simultanées, et les déterminations utilisant chacune :
  - une différence de régime haute-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure d'une séquence de mesures d'un régime d'un arbre haute-pression de la turbomachine hybride,
  - une différence de régime basse-pression entre une dernière mesure et une

- avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression,
- un dernier écart associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression, et
  - une somme des écarts de la séquence d'écarts ; et
- [0014] une commande de la turbomachine hybride pour faire varier un débit de carburant de la variation de débit de carburant déterminée et un couple électrique de la variation de couple électrique déterminée.
- [0015] Un tel procédé est avantageusement et optionnellement complété par les différentes caractéristiques suivantes prises seules ou en combinaison :
- au cours de la détermination de la variation de débit de carburant et de la variation de couple électrique, on détermine un produit entre une matrice de gain et un vecteur, le vecteur étant formé de la différence de régime haute-pression, la différence de régime basse-pression, du dernier écart et de la somme des écarts ; et
  - la matrice de gain est obtenue par interpolation entre deux matrices de référence d'un jeu de matrices de référence de sorte à tenir compte d'un point de fonctionnement de la turbomachine hybride associé à la dernière mesure.
- [0016] L'invention porte également sur un dispositif de commande d'une turbomachine hybride comprenant :
- une entrée, configurée pour recevoir une séquence de mesures du régime d'un arbre basse-pression de la turbomachine hybride et une séquence de mesures du régime d'un arbre haute-pression de la turbomachine hybride,
  - une mémoire, configurée pour enregistrer la séquence de mesures du régime d'un arbre basse-pression, la séquence de mesures du régime d'un arbre haute-pression et une séquence de consignes du régime de l'arbre basse-pression,
  - un calculateur, configuré pour :
    - déterminer une séquence d'écarts, chaque écart étant une différence entre
      - une mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression, et
      - une consigne de la séquence de consignes du régime de l'arbre basse-pression,
  - déterminer, notamment simultanément, une variation de débit de carburant et une variation d'un couple électrique, le couple électrique étant configuré pour s'appliquer à l'arbre basse-pression, les déterminations utilisant chacune
    - une différence de régime haute-pression entre une dernière mesure et une

- avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression,
  - une différence de régime basse-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure d'une séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression,
  - un dernier écart associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression, et
  - une somme des écarts de la séquence d'écarts ; et
  - une sortie configurée pour fournir une commande à la turbomachine hybride.
- [0017] L'invention porte également sur une turbomachine comprenant un tel dispositif et un aéronef comprenant une telle turbomachine.

### **DESCRIPTION DES FIGURES**

- [0018] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront encore de la description qui suit, laquelle est purement illustrative et non limitative, et doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :
- [0019] [Fig.1] est une représentation schématique d'un dispositif de commande selon un mode de réalisation de l'invention ; et
- [0020] [Fig.2] est une représentation schématique d'un suivi de commande en accélération selon un mode de réalisation de l'invention.

### **DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION**

#### **Turbomachine hybride**

- [0021] La [Fig.1] est une représentation schématique d'un dispositif de commande selon un mode de réalisation de l'invention sur laquelle une turbomachine hybride 1 comprend un arbre moteur haute-pression et un arbre moteur basse-pression. L'arbre moteur basse-pression est mis en mouvement par un entraînement thermique et un entraînement électrique.
- [0022] L'entraînement thermique agit également sur l'arbre moteur haute-pression. L'arbre moteur haute-pression peut également être mis en mouvement par un entraînement électrique dédié.
- [0023] L'invention porte sur le contrôle hybride de l'arbre basse-pression.
- [0024] L'arbre basse-pression peut être considéré, du point de vue du contrôle, comme un système multivariable comprenant deux grandeurs de commande ou d'entrée :
- une commande de débit de carburant « WF », référencée 9 sur la [Fig.1], envoyée à une boucle locale d'un doseur de la turbomachine hybride 1,
  - une commande de couple électrique « TRQ », référencée 11 sur la [Fig.1], à appliquer par une machine électrique sur l'arbre basse-pression.
- [0025] Plus généralement, la turbomachine hybride 1 présente plusieurs grandeurs de sortie

devant être régulées et/ou limitées telles que notamment un régime de l'arbre moteur haute-pression, éventuellement une pression en entrée de chambre de combustion.

### **Dispositif de commande**

- [0026] Un dispositif de commande 3 apte à commander l'arbre haute-pression est représenté à la [Fig.1].
- [0027] Le fonctionnement de l'arbre haute-pression est régulé en utilisant des grandeurs d'entrée, représentées sur la [Fig.1] arrivant dans la turbomachine hybride 1 côté « IN », et des grandeurs de sortie, représentées sur la [Fig.1] sortant dans la turbomachine hybride 1 côté « OUT ».
- [0028] Les grandeurs d'entrée utilisées sont un débit de carburant et un couple électrique. Plus précisément, le dispositif de commande 3 fournit à la turbomachine hybride 1 la commande de débit de carburant 9 à envoyer dans la chambre de combustion et la commande de couple électrique 11 à appliquer par la machine électrique sur l'arbre basse-pression. Les grandeurs de sortie utilisées sont le régime moteur de l'arbre haute-pression et le régime moteur de l'arbre basse-pression.
- [0029] Une mesure du régime de l'arbre haute-pression 4 et une mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 sont envoyées vers le dispositif de commande 3. La mesure du régime de l'arbre haute-pression 4 et la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 supposent de disposer, dans la turbomachine hybride 1, d'un capteur du régime de l'arbre haute-pression et d'un capteur du régime de l'arbre basse-pression.
- [0030] Le dispositif de commande 3 peut également recevoir une consigne de régime de l'arbre basse-pression 7.
- [0031] Une consigne est une courbe continue ou une séquence temporelle de valeurs représentant une évolution temporelle souhaitée d'une grandeur de sortie, telle que par exemple une évolution temporelle souhaitée du régime de l'arbre basse-pression, à savoir une vitesse angulaire de l'arbre basse-pression. Notamment, la consigne peut être associée à une manœuvre particulière comme un décollage, un atterrissage, etc...
- [0032] Le dispositif de commande 3 peut également recevoir une mesure de la pression extérieure 6.
- [0033] A partir de la mesure du régime de l'arbre haute-pression 4, de la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 et de la mesure de la pression extérieure 6 reçues, le dispositif de commande 3 peut construire un indicateur, par exemple un indicateur de détection de transitoire signalant un régime de fonctionnement où les paramètres du moteur varient de manière significative (décollage, manœuvre, traversée de trous d'air, atterrissage, etc...), un indicateur de limitation de débit de carburant ou indicateur de saturation carburant signalant que ce débit ne peut plus être augmenté ou encore un indicateur de limitation de couple électrique ou indicateur de saturation électrique signalant que le couple électrique ne peut plus être augmenté.

- [0034] Le dispositif de commande 3 peut également être bouclé. A cet effet, le dispositif de commande 3 peut recevoir, en entrée,
- la commande de débit de carburant 9, selon une ligne de retour carburant 17, et/ou
  - la commande de couple électrique 11, selon une ligne de retour couple électrique 15.
- [0035] Cela signifie que le dispositif de commande 3 présente un fonctionnement par incrémentation en ce que la commande de débit de carburant 9 et la commande de couple électrique 11 déterminées à une étape k utilisent la commande de débit de carburant 9 et la commande de couple électrique 11 déterminées à une étape k-1, précédant temporellement l'étape k.
- [0036] Renvoyer la commande de débit de carburant 9, comme indiqué par la ligne de retour carburant 17, et la commande de couple électrique 11, comme indiqué par la ligne de retour couple électrique 15, au dispositif de commande 3, c'est-à-dire les commandes de débit de carburant et de couple électrique déterminées à l'étape k, permet de prendre en compte un éventuel écart entre la commande initiale et une saturation.
- [0037] Le dispositif de commande 3 peut comprendre, par exemple, une mémoire 31 configurée pour enregistrer :
- une séquence de consignes de régime de l'arbre basse-pression 7, notamment l'évolution temporelle de la vitesse angulaire de l'arbre basse-pression de la turbomachine hybride 1,
  - une séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4, notamment l'évolution temporelle de la vitesse angulaire de l'arbre haute-pression reçue de la turbomachine hybride 1, et/ou
  - une séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5, notamment l'évolution temporelle de la vitesse angulaire de l'arbre basse-pression reçue de la turbomachine hybride 1.
- [0038] Par ailleurs, la mémoire 31 peut également enregistrer des indicateurs 13 et/ou des résultats préalablement déterminés dans le dispositif de commande 3, par exemple à l'étape k-1 précédente.
- [0039] On comprend par les termes « séquence de consignes » ou « séquence de mesures », une série temporelle de valeurs successives de consignes ou de mesures. Chaque valeur est horodatée et/ou associée à un instant temporel, de sorte qu'une séquence de consignes ou de mesures correspond à une évolution temporelle d'une grandeur susceptible d'être représentée graphiquement.
- [0040] Le dispositif de commande peut également comprendre un calculateur 33 configuré pour déterminer, notamment en temps réel, la commande de débit de carburant 9 et la commande de couple électrique 11, par exemple à partir des données reçues, telles que

par exemple la mesure du régime de l'arbre haute-pression 4, la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, de la mesure de la pression extérieure 6 et/ou la consigne de régime de l'arbre basse-pression 7, et/ou enregistrées, telles que par exemple la séquence de consignes de régime moteur 7, la séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4, la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5 et/ou les indicateurs 13.

[0041] Le dispositif de commande 3 présenté à la [Fig.1] peut correspondre à une architecture de type « Plusieurs Entrées - Une seule Sortie », également désignée par l'acronyme « MISO » pour « *Multiple Input Single Output* » en anglais, puisqu'il fournit deux entrées à la turbomachine hybride 1 en fonction d'une seule sortie de celle-ci.

### **Procédé de commande**

[0042] Le dispositif de commande 3 selon l'invention permet de mettre en œuvre un procédé de commande de la turbomachine hybride 1 comprenant les étapes suivantes.

[0043] Dans une première étape, une séquence de consignes de régime de l'arbre basse-pression 7, notamment d'une vitesse angulaire de l'arbre basse-pression de la turbomachine hybride 1, est enregistrée. L'enregistrement de la première étape s'effectue par exemple dans la mémoire 31 du dispositif de commande 3. L'enregistrement de la séquence de consignes de régime de l'arbre basse-pression 7 peut avoir lieu avant une mise en fonctionnement de la turbomachine hybride 1 et/ou avant toute mesure du régime moteur sur la turbomachine hybride 1.

[0044] La séquence de consignes de régime de l'arbre basse-pression 7 peut s'écrire sous la forme de valeurs  $NLC_p$ , où  $p$  est un indice variant de 0 à  $N$  et représente une position de la valeur dans la séquence.

[0045] Dans une deuxième étape, une séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4, notamment de la vitesse angulaire de l'arbre haute-pression, et une séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5, notamment de la vitesse angulaire 5 de l'arbre basse-pression, sont enregistrées.

[0046] Une fois la turbomachine hybride 1 mise en fonctionnement, les régimes moteurs sont surveillés et des mesures successives relatives à l'arbre haute-pression et à l'arbre basse-pression sont transmises au dispositif de commande 3, formant deux séquences de mesures du régime de l'arbre haute-pression et du régime de l'arbre basse-pression, comprenant donc de plus en plus de mesures au cours du temps. L'enregistrement de la deuxième étape s'effectue dans la mémoire 31 du dispositif de commande 3.

[0047] La séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4 peut s'écrire sous la forme de valeurs  $NH_p$ , où  $p$  est un indice variant de 0 à  $k$  et représente une position de la valeur dans la séquence. L'indice  $k$  est l'indice de la dernière mesure  $NH_k$  reçue.

[0048] La séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5 peut s'écrire sous la

forme de valeurs  $NL_p$ , où  $p$  est un indice variant de 0 à  $k$  et représente une position de la valeur dans la séquence. L'indice  $k$  est l'indice de la dernière mesure  $NL_k$  reçue.

- [0049] Les indices correspondent à des pas de temps ou des points de fonctionnement successifs de la turbomachine hybride 1.
- [0050] Dans une troisième étape, le calculateur 33 détermine une séquence d'écart entre la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 et la consigne de régime de l'arbre basse-pression 7, chaque écart étant égal à une différence entre une mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 et une consigne de régime de l'arbre basse-pression 7 associée à la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5. La séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5 et la séquence de consignes de régime de l'arbre basse-pression 7 ne contiennent pas nécessairement le même nombre de valeurs, mais elles sont référencées temporellement l'une par rapport à l'autre. Autrement dit, à chaque mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 est associée une consigne de régime de l'arbre basse-pression 7, la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 et la consigne de régime de l'arbre basse-pression 7 étant en coïncidence temporelle. L'objectif de la régulation est de rendre chaque mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 la plus proche possible de sa consigne du régime de l'arbre basse-pression 7.
- [0051] La séquence d'écart peut s'écrire sous la forme de valeurs  $ENL_p$ , où  $p$  est un indice variant de 0 à  $k$ , les écarts sont calculés indice par indice selon le calcul :
- [0052]  $ENL_p = NL_p - NLC_p$ .
- [0053] Dans une quatrième étape, le calculateur 33 détermine, notamment simultanément, une variation de débit de carburant  $\Delta WF_p$  égal à une différence de la commande de débit de carburant 9 entre un instant  $p$  et un instant précédent  $p-1$ , soit :
- [0054]  $\Delta WF_p = WF_p - WF_{p-1}$
- [0055] et une variation de couple électrique  $\Delta TRQ_p$ , correspondant à une différence de la commande de couple électrique 11 entre un instant  $p$  et un instant précédent  $p-1$ , soit :
- [0056]  $\Delta TRQ_p = TRQ_p - TRQ_{p-1}$ ,
- [0057] destiné à être appliqué sur l'arbre basse-pression.
- [0058] La commande de débit de carburant 9 et la commande de couple électrique 11 sont des signaux variant au cours du temps et pouvant être discrétisés sous forme d'une séquence temporelle de commande de carburant  $WF_p$  et d'une séquence de commande de couple électrique  $TRQ_p$ .
- [0059] Les valeurs de la séquence temporelle de commande de carburant  $WF_p$  et de la séquence de commande de couple électrique  $TRQ_p$  sont indicées par un indice  $p$  variant de 0 à  $k$ , chaque commande étant associée à une même mesure.
- [0060] La variation de commande de débit de carburant  $\Delta WF_p$  et la variation de commande de couple électrique  $\Delta TRQ_p$  se déterminent en fonction :
- d'une différence de régime haute-pression entre une dernière mesure et une

- avant-dernière mesure d'une séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4 de la turbomachine hybride 1,
- d'une différence de régime basse-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5 de la turbomachine hybride 1,
- d'un écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, et
- d'une somme de tous les écarts.

[0061] La dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 est la dernière mesure reçue par le dispositif de commande 3 et constitue donc la mesure la plus récente de l'état du régime de l'arbre basse-pression. Il s'agit donc de la mesure  $NL_k$  qui correspond au dernier indice  $k$ . La différence  $\Delta NL_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5 s'écrit :

[0062]  $\Delta NL_k = NL_k - NL_{k-1}$ .

[0063] L'écart associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 s'écrit :

[0064]  $ENL_k = NL_k - NLC_k$ .

[0065] La somme de tous les écarts  $IENL_k$  et se calcule selon l'expression suivante :

[0066]  $IENL_k = ENL_0 + ENL_1 + ENL_2 + \dots + ENL_{k-1} + ENL_k$ .

[0067] La somme de tous les écarts  $IENL_k$  correspond à une intégrale de l'erreur depuis l'indice  $p=0$  jusqu'au dernier indice  $p=k$ .

[0068] Le procédé que l'on a présenté ici utilise quatre grandeurs de sortie en lien avec le régime basse-pression et le régime haute-pression (mesure de la vitesse angulaire pour chaque régime et consigne de la vitesse angulaire pour le régime basse-pression) : la différence entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure pour chaque régime, l'écart associé à la dernière mesure pour le régime basse-pression, et la somme de tous les écarts pour le régime basse-pression. Ces quatre grandeurs permettent de déterminer les grandeurs d'entrée sans avoir recours à une grandeur de sortie autre qu'une vitesse angulaire, ou une grandeur de sortie dont la courbe de consigne ou la mesure en temps réel serait difficile à déterminer ou à mettre en œuvre. Par ailleurs, lorsque la détermination des valeurs des deux grandeurs d'entrée se fait simultanément, les deux degrés de liberté de la turbomachine sont utilisés de manière plus optimale que dans l'art antérieur.

[0069] Une telle détermination s'appuie sur une modélisation particulière de la turbomachine hybride 1 par un système de type Linéaire Invariant dans le Temps, également désigné par l'acronyme LTI pour « *Linear Time-Invariant* » en anglais, où pour passer de l'indice  $k$  à l'indice  $k+1$ , le régime moteur est donné par une première équation, ou équation (1), :

[0070] 
$$\begin{bmatrix} \Delta NH_{k+1} \\ \Delta NL_{k+1} \end{bmatrix} = A \times \begin{bmatrix} \Delta NH_k \\ \Delta NL_k \end{bmatrix} + B \times \begin{bmatrix} \Delta WF_k \\ \Delta TRQ_k \end{bmatrix} \text{ (eq.1)}$$

[0071] L'équation (1) est un modèle de synthèse. Elle constitue une description mathématique du système permettant de relier les entrées, à savoir la commande de débit de carburant 9, la consigne de débit de carburant, la commande de couple électrique 11 de l'arbre basse-pression ou la consigne de couple électrique de l'arbre basse-pression, et la sortie, à savoir le régime de l'arbre basse-pression et/ou le régime de l'arbre haute-pression.

[0072] Le terme A de l'équation (1) est une matrice d'état, notamment une matrice 2\*2 dont les termes diagonaux haut-gauche et bas-droit sont liés à l'inertie de la turbomachine hybride 1.

[0073] Le terme B de l'équation (1) est une matrice de commande, notamment une matrice 2\*2 susceptible de contenir une information d'un gain du système, notamment un gain statique établissant un lien entre un incrément de consigne (débit de carburant et/ou couple électrique) et un incrément de régime (régime de l'arbre basse-pression et/ou régime de l'arbre haute-pression) obtenu par cet incrément de consigne une fois le régime stabilisé.

[0074] Pour annuler une erreur dynamique, également dénommée trainage, consistant en un retard entre une variation linéaire de la consigne et la variation correspondante du régime, il est proposé d'utiliser un modèle de synthèse « augmenté ».

[0075] A cet effet, le modèle de synthèse « augmenté » utilise en plus de la différence  $\Delta NH_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4 et La différence  $\Delta NL_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5 :

- l'écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, correspondant notamment à une erreur d'asservissement, et
- la somme de tous les écarts  $IENL_k$ , correspondant notamment à l'intégrale de l'erreur d'asservissement,

[0076] selon une deuxième équation, ou équation (2), plus générale que la première équation, ou équation (1) :

[0077] 
$$\begin{bmatrix} \Delta NH_{k+1} \\ \Delta NL_{k+1} \\ ENL_{k+1} \\ IENL_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta NH_k \\ \Delta NL_k \\ ENL_k \\ IENL_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta WF_k \\ \Delta TRQ_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta NLC_k \text{ (eq.2)}$$

[0078] Le terme  $\Delta NLC_k$  correspond à la différence entre la dernière consigne de rang k et l'avant-dernière consigne de rang k-1 et s'écrit :

[0079]  $\Delta NLC_k = NLC_k - NLC_{k-1}$ .

[0080] L'équation (2) peut être utilisée pour déterminer une troisième équation, ou équation (3), exprimant la variation de débit de carburant  $\Delta WF_k$  et la variation de couple électrique  $\Delta TRQ_k$  en fonction de :

- la différence  $\Delta NH_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression 4,
- La différence  $\Delta NL_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression 5,
- l'écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, et
- la somme de tous les écarts  $IENL_k$

[0081] sous la forme d'une troisième équation, ou équation (3) :

[0082] 
$$\begin{bmatrix} \Delta WF_k \\ \Delta TRQ_k \end{bmatrix} = -K \begin{bmatrix} \Delta NH_k \\ \Delta NL_k \\ ENH_k \\ IENH_k \end{bmatrix} \text{ (eq.3)}$$

[0083] dans laquelle, le terme « K » est une matrice de gain.

[0084] La variation de débit de carburant  $\Delta WF_k$  et la variation de couple électrique  $\Delta TRQ_k$  sont obtenues, notamment simultanément, par le produit de la matrice de gain K et d'un vecteur formé de

- la différence  $\Delta NH_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure du régime de l'arbre haute-pression 4,
- la différence  $\Delta NL_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5,
- l'écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, et
- la somme  $IENL_k$  de tous les écarts.

[0085] Pour utiliser un correcteur, il est nécessaire au préalable de déterminer la matrice de gain K, ce qui revient à effectuer « une synthèse du correcteur multi-variable ».

[0086] Une telle synthèse est du type « retour d'état linéaire quadratique », (Commande linéaire quadratique LQ) et consiste à minimiser un critère ou une quantité 'J' dans laquelle apparaissent des matrices de pondération Q, R et S.

[0087] Celles-ci sont fixées en début de calcul en fonction du comportement souhaité du moteur, et, en particulier, en fonction de l'absence de trainage souhaitée.

[0088] Plus précisément, c'est le choix des matrices de pondérations Q, R et S qui permet d'obtenir différents réglages du correcteur et le comportement moteur souhaité, par exemple la suppression du trainage, c'est-à-dire une minimisation du transfert entre la

consigne et l'erreur d'asservissement au sens de la norme 2 en contraignant la dynamique de l'erreur.

$$[0089] \quad J = \sum_{k=0}^{\infty} \left( \begin{bmatrix} \Delta NH_k & \Delta NL_k & ENL_k & IENL_k \end{bmatrix} \times Q \times \begin{bmatrix} \Delta NH_k \\ \Delta NL_k \\ ENL_k \\ IENL_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta WF_k & \Delta TRQ_k \end{bmatrix} \times R \times \begin{bmatrix} \Delta WF_k \\ \Delta TRQ_k \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} \Delta NH_k & \Delta NL_k & ENL_k & IENL_k \end{bmatrix} \times S \times \begin{bmatrix} \Delta WF_k \\ \Delta TRQ_k \end{bmatrix} \right)$$

[0090] Dans l'exemple proposé, la matrice Q peut être une matrice 4\*4, la matrice R peut être une matrice 2\*2 et la matrice S peut être une matrice 4\*2.

[0091] La minimisation du critère J par le Lagrangien permet de travailler avec une expression analytique de la matrice de gain K sous la forme :

$$[0092] \quad K = (R + B^T P B)^{-1} (B^T P A + S)$$

[0093] où les termes R, B, A et S sont des matrices connues. Seule la matrice P reste à être déterminée selon l'expression de l'unique solution de l'équation algébrique de Riccati discrète :

$$[0094] \quad \tilde{A}^T P \tilde{A} - P - (\tilde{A}^T P + S) (\tilde{B}^T P \tilde{B} + R)^{-1} (\tilde{B}^T P \tilde{A} + S^T) + Q = 0$$

[0095] avec :

$$[0096] \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0097] Cette dernière équation permet de déterminer la matrice P et, par conséquent, la matrice de gain K.

[0098] Connaître la matrice de gain K permet, lors du procédé de commande, de déterminer, notamment simultanément, la variation de débit de carburant  $\Delta WF_k$  et la variation de couple électrique  $\Delta TRQ_k$  en fonction de la différence  $\Delta NH_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure du régime de l'arbre haute-pression 4, l'écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, et la somme  $IENL_k$  de tous les écarts, en utilisant la troisième équation, ou équation (3) :

$$[0099] \quad \begin{bmatrix} \Delta WF_k \\ \Delta TRQ_k \end{bmatrix} = -K \begin{bmatrix} \Delta NH_k \\ \Delta NL_k \\ ENL_k \\ IENL_k \end{bmatrix} \text{ (eq.3)}$$

[0100] Il est à noter que la matrice de gain K dépend du point de fonctionnement moteur. Plus précisément, la matrice de gain K est déterminée à partir des matrices A et B dépendant du point de fonctionnement moteur.

[0101] Cela est pris en compte en pratique en prédéterminant un jeu de matrices de référence et, en fonction de la mesure du point de fonctionnement moteur, de calculer la matrice de gain par interpolation entre deux matrices de référence.

[0102] Le jeu de matrices de référence est préalablement déterminé avant la mise en œuvre

du procédé de commande. Chaque matrice de référence est associée à un point de fonctionnement de la turbomachine hybride 1, dit point de référence.

- [0103] Une matrice de référence est associée à une équation d'évolution d'un vecteur de suivi d'une commande de régime ou de vitesse angulaire formé d'une variation de régime ou de vitesse angulaire à un instant, d'une différence de régime ou de vitesse angulaire à la commande à l'instant et d'une intégrale de la différence
- [0104] Le point de fonctionnement peut notamment être déduit d'une mesure interne du moteur, par exemple une mesure du régime ou de la vitesse angulaire de l'arbre moteur ou une mesure d'une pression en entrée de la chambre de combustion, et d'une mesure externe au moteur, par exemple la pression extérieure. Le point de fonctionnement peut donc être associé à un vecteur de plusieurs mesures.
- [0105] Le point de fonctionnement mesuré, plus spécifiquement un vecteur « point de fonctionnement », permet de déterminer la matrice de gain  $K$  à utiliser en ce point par interpolation linéaire entre des matrices de référence associées à des vecteurs référence qui encadre le vecteur « point de fonctionnement ».
- [0106] La prise en compte de la saturation du carburant, c'est-à-dire l'impossibilité d'augmenter une consigne de carburant au-delà d'un certain maximum, également dénommée « commande saturée », et/ou du couple, c'est-à-dire l'impossibilité d'augmenter la consigne du couple électrique à cause d'une limite machine ou d'une limite d'un niveau d'hybridation, peut être gérée par une « augmentation » du modèle.
- [0107] Par exemple, le vecteur d'état comprenant
- la différence  $\Delta NH_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure du régime de l'arbre haute-pression 4,
  - la différence  $\Delta NL_k$  entre la dernière mesure et l'avant-dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5,
  - l'écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, correspondant notamment à l'erreur d'asservissement, et
  - la somme  $IENL_k$  de tous les écarts, correspondant notamment à l'intégrale de l'erreur d'asservissement,
- [0108] peut être complété d'un écart entre la commande saturée et la commande calculée par le correcteur de suivi de trajectoire.
- [0109] Différentes manières pour prendre en compte un tel vecteur d'état peuvent être envisagées, notamment en le considérant comme une perturbation et/ou selon une manière faisant appel aux outils mathématiques décrits précédemment.
- [0110] De la même manière, on peut prendre en compte :
- la saturation du couple électrique de l'arbre basse-pression, c'est-à-dire l'impossibilité d'augmenter la consigne du couple électrique de l'arbre basse-pression à cause d'une limite machine ou d'une limite d'un niveau

d'hybridation, et/ou

- la saturation du couple électrique de l'arbre haute-pression, c'est-à-dire l'impossibilité d'augmenter la consigne du couple électrique de l'arbre haute-pression à cause d'une limite machine ou d'une limite d'un niveau d'hybridation.

[0111] La consigne de débit de carburant 9 et la consigne de couple 11 sont calculées par intégration numérique selon les équations suivantes :

$$[0112] \quad \begin{cases} WF_k = \Delta WF_k + WF_{k-1} \\ TRQ_k = \Delta TRQ_k + TRQ_{k-1} \end{cases}$$

### Résultats

[0113] La [Fig.2] est une représentation schématique d'un suivi de commande en accélération selon l'invention et présente des résultats de simulations numériques de suivi de commande selon le procédé de commande précédemment présenté sont illustrés.

[0114] La [Fig.2] est donc relative à une accélération du régime moteur.

[0115] La [Fig.2] comprend un premier graphe 2A dans lequel l'axe des ordonnées correspond au régime, ou vitesse angulaire, de l'arbre basse-pression et l'axe des abscisses correspond au temps.

[0116] Le premier graphe 2A de la [Fig.2] comporte :

- une courbe de consigne 20, correspondant à la consigne de régime de l'arbre basse-pression 7,
- une courbe de régime 22, correspondant à la mesure du régime de l'arbre basse-pression 5, et
- une courbe requête de régime 24, correspondant à une requête de régime par le pilote.

[0117] Par ailleurs, la [Fig.2] comprend un deuxième graphe 2B dans lequel l'axe des ordonnées correspond à un débit de carburant et l'axe des abscisses correspond au temps.

[0118] Le deuxième graphe 2B de la [Fig.2] comporte :

- une courbe de débit carburant maximal 30, correspondant à un débit de carburant maximal à ne pas dépasser pour le régime moteur courant,
- une courbe de débit carburant minimal 34, correspondant à un débit de carburant minimal en dessous duquel il n'est pas possible de descendre, et
- une courbe de commande carburant 32, correspondant à la commande de débit de carburant 9.

[0119] De plus, la [Fig.2] comprend un troisième graphe 2C dans lequel l'axe des ordonnées correspond à un couple électrique destiné à être appliqué sur l'arbre basse-pression et l'axe des abscisses correspond au temps.

- [0120] Le troisième graphe 2C de la [Fig.2] comporte :
- une courbe de commande couple électrique 40, correspondant à la commande de couple électrique 11, et
  - une courbe couple électrique minimal 42, correspondant à un couple électrique minimal en dessous duquel il n'est pas possible de descendre.
- [0121] Le premier graphe 2A, le deuxième graphe 2B et le troisième graphe 2C de la [Fig.2] sont synchronisés, de sorte que, à chaque instant, les différents graphes donnent les valeurs de consigne, de mesure et/ou de commande correspondant au point de fonctionnement de la turbomachine hybride 1.
- [0122] La commande de débit de carburant 9 et la commande de couple électrique 11 sont générées en temps réel par le procédé de commande décrit précédemment.
- [0123] Dans la [Fig.2], les séquences de consignes, de mesures et de commandes contiennent suffisamment de points pour que le rendu sur les figures soit pour chacune assimilable à une courbe continue.
- [0124] On remarque tout d'abord que la commande de débit de carburant 9 et la commande de de couple électrique 11 varient de manière indépendante. En particulier, la commande du couple électrique 11 peut être différente de zéro, sans que la commande du débit de carburant 9 soit en saturation, c'est-à-dire confondu avec la courbe de débit carburant maximal 6 ou la courbe de débit carburant minimal 64.
- [0125] Par exemple, la courbe de commande du débit de carburant 32 en [Fig.2] n'est jamais en saturation alors que la courbe de commande du couple électrique 40 varie et prend des valeurs différentes de zéro.
- [0126] Plus précisément, lorsque le pilote demande au moteur d'accélérer selon une requête du ralenti au plein gaz, telle que représentée par la courbe requête de régime 24, dès que l'indicateur de régulation transitoire s'active, également dénommé TopAcc, se lève la régulation mise en œuvre par le procédé de commande se traduit tout d'abord par une augmentation du carburant, telle que représentée par la courbe de commande carburant 32, puis une augmentation du couple électrique de l'arbre basse-pression, telle que représentée par la courbe de commande couple électrique 40, pour annuler l'erreur dynamique au bout 3 secondes. La commande en carburant n'est alors pas saturée par sa limite maximum (courbe 30). Dès que le l'indicateur de régulation transitoire s'active, également dénommé TopAcc, est abaissé, la boucle monovariante N1stab prend seulement la main sur le carburant pour réguler le régime NL sur la consigne NL\_dmd issue du PWM et le couple BP est remis à zéro.
- [0127] Lorsque la génération des deux commandes est simultanée, elle permet d'explorer des régimes de fonctionnement de la turbomachine hybride 1 plus vastes que dans l'art antérieur et une meilleure optimisation de fonctionnement.
- [0128] Par ailleurs, l'erreur de traînage dans le résultat illustré est faible. Une erreur de

traînage correspond à un décalage temporel entre la consigne et la mesure de la grandeur de sortie. Il y a un traînage, par exemple, lorsque le régime ou la vitesse angulaire mesurée 22 est en retard par rapport au régime ou à la vitesse angulaire de consigne 20.

- [0129] La courbe de régime 22 est peu ou pas décalée temporellement par rapport à la courbe de consigne 20, de sorte que le trainage est faible.
- [0130] Un tel bénéfice provient notamment du fait que le procédé de commande correspond à une architecture du type « retour d'état » de classe 2 (c'est-à-dire comprenant 2 intégrateurs, ou deux grandeurs intégrées à savoir l'écart  $ENL_k$  associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression 5 et la somme  $IENL_k$  de tous les écarts, pour calculer, notamment simultanément, la consigne de débit de carburant 9 et la consigne de couple électrique 11.
- [0131] La consigne de débit de carburant 9 et la consigne de couple électrique 11 permettent de suivre la trajectoire d'accélération et/ou de décélération du régime moteur sans trainage lorsque la boucle de suivi de trajectoire est activée et appliquée.
- [0132] En effet, selon la phase de vol, la consigne obtenue par le calculateur, tel que décrit jusqu'à présent, peut être utilisée ou non. Selon la phase de vol, le besoin d'une erreur de trainage faible n'est pas toujours présent. C'est notamment le cas pour une phase de vol « croisière » où il y a peu de transitoires rapides et où on aura tendance à utiliser un correcteur plus adapté.
- [0133] Si le correcteur du type « retour d'état » de classe 2 n'est pas toujours appliqué, il est toutefois toujours actif, au sens où il calcule en continu une consigne. Cela permet notamment une continuité de la consigne lorsqu'on bascule d'un calculateur à un autre.
- [0134] Le procédé de commande et le dispositif de commande 3 présentés ici permettent de répondre au besoin pilote en tenant compte de la capacité du moteur à accélérer ou décélérer, et en particulier de :
- limiter le temps d'accélération des moteurs « bons » ayant une marge au pompage afin de réduire les suralimentations en carburant de la chambre de combustion, également dénommées sous le terme anglais « *over-fuelling* », et ainsi limiter une température des gaz en sortie, également dénommée sous le terme anglais « *Exhaust Gas Temperature* » ou l'acronyme EGT, durant les accélérations pour augmenter la durée de vie ; et
  - limiter la dissymétrie de poussée entre les moteurs durant l'accélération afin de réduire la traînée de l'avion et l'effet de lacet moteur.
- [0135] Le procédé de commande vient apporter une solution de régulation en boucle fermée permettant de répondre au temps de transitoire requis sans que le moteur soit contraint par ses limites d'opérabilité.
- [0136] L'avantage principal de piloter le régime de l'arbre basse-pression est de piloter une

meilleure image de la poussée pour les architectures de turbomachine hybride 1 à fort taux de dilution, également dénommées sous le terme anglais « *By Pass Ratio* » ou l'acronyme BPR.

[0137] La solution proposée est relativement simple d'un point de vue théorique, du point de vue du réglage et de la mise en œuvre.

## Revendications

[Revendication 1]

Procédé de commande d'une turbomachine hybride (1) comprenant les étapes suivantes :

- une détermination d'une séquence d'écart, chaque écart étant une différence entre
  - une mesure d'une séquence de mesures d'un régime d'un arbre basse-pression (5) de la turbomachine hybride (1) et
  - une consigne d'une séquence de consignes du régime de l'arbre basse-pression (7),
- une détermination d'une variation d'un débit de carburant et une détermination d'une variation d'un couple électrique, le couple électrique étant configuré pour s'appliquer à l'arbre basse-pression, les déterminations étant notamment simultanées, et les déterminations utilisant chacune :
  - une différence de régime haute-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure d'une séquence de mesures d'un régime d'un arbre haute-pression de la turbomachine hybride (1),
  - une différence de régime basse-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression,
  - un dernier écart associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression, et
  - une somme des écarts de la séquence d'écarts ; et
- une commande de la turbomachine hybride (1) pour faire varier un débit de carburant de la variation de débit de carburant déterminée et un couple électrique de la variation de couple électrique déterminée.

[Revendication 2]

Procédé de commande selon la revendication 1, dans lequel, au cours de la détermination de la variation de débit de carburant et de la variation de couple électrique, on détermine un produit entre une matrice de gain

et un vecteur, le vecteur étant formé de la différence de régime haute-pression, la différence de régime basse-pression, du dernier écart et de la somme des écarts.

[Revendication 3]

Procédé de commande selon la revendication 2, dans lequel la matrice de gain est obtenue par interpolation entre deux matrices de référence d'un jeu de matrices de référence de sorte à tenir compte d'un point de fonctionnement de la turbomachine hybride (1) associé à la dernière mesure.

[Revendication 4]

Dispositif de commande (3) d'une turbomachine hybride (1) comprenant :

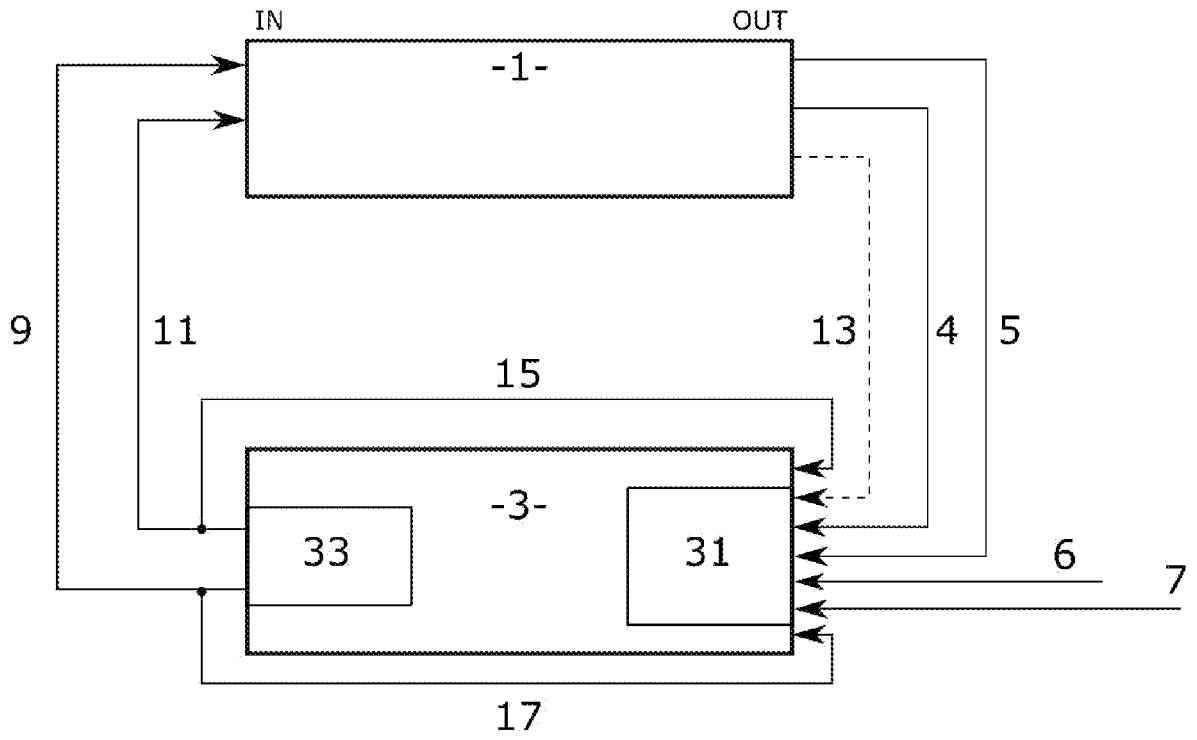
- une entrée, configurée pour recevoir une séquence de mesures du régime d'un arbre basse-pression (5) de la turbomachine hybride (1) et une séquence de mesures du régime d'un arbre haute-pression (4) de la turbomachine hybride (1),
- une mémoire (31), configurée pour enregistrer la séquence de mesures du régime d'un arbre basse-pression (5), la séquence de mesures du régime d'un arbre haute-pression (4) et une séquence de consignes du régime de l'arbre basse-pression (7),
- un calculateur (33), configuré pour :
  - déterminer une séquence d'écarts, chaque écart étant une différence entre
    - une mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre basse-pression (5), et
    - une consigne de la séquence de consignes du régime de l'arbre basse-pression (7),
- déterminer, notamment simultanément, une variation de débit de carburant et une variation d'un couple électrique, le couple électrique étant configuré pour s'appliquer à l'arbre basse-pression, les déterminations utilisant chacune
  - une différence de régime haute-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure de la séquence de mesures du régime de l'arbre haute-pression,
  - une différence de régime basse-pression entre une dernière mesure et une avant-dernière mesure d'une séquence de

- mesures du régime de l'arbre basse-pression,
- un dernier écart associé à la dernière mesure du régime de l'arbre basse-pression, et
- une somme des écarts de la séquence d'écarts ; et
  
- une sortie configurée pour fournir une commande à la turbomachine hybride (1).

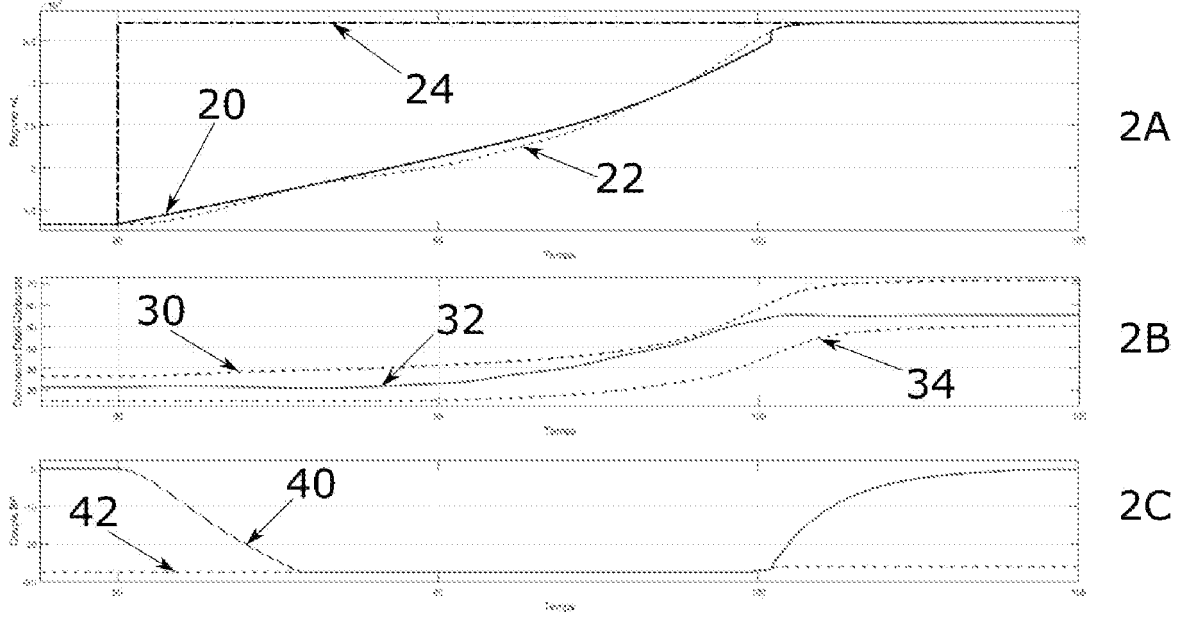
[Revendication 5] Turbomachine hybride (1) comprenant un dispositif de commande (3) selon la revendication 4.

[Revendication 6] Aéronef comprenant une turbomachine hybride (1) selon la revendication 5.

[Fig. 1]



[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**

WO 2022/112028 A1 (SAFRAN AIRCRAFT ENGINES  
[FR]) 2 juin 2022 (2022-06-02)

US 2018/045123 A1 (LIACU BOGDAN CHRISTIAN  
[FR]) 15 février 2018 (2018-02-15)

US 4 276 744 A (PISANO ALAN D)  
7 juillet 1981 (1981-07-07)

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

NEANT