

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

①① N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 050 552

②① N° d'enregistrement national : **16 53496**

⑤① Int Cl⁸ : **G 06 F 11/32 (2016.01)**

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ PROCÉDE DE SURVEILLANCE DE L'ÉTAT D'UN ACTIONNEUR ELECTRO-MECANIQUE.

②② Date de dépôt : 20.04.16.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 27.10.17 Bulletin 17/43.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 05.04.19 Bulletin 19/14.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *SAGEM DEFENSE SECURITE
Société par actions simplifiée — FR.*

⑦② Inventeur(s) : BREUNEVAL ROMAIN, GUYAMIER
ALEXANDRE, NAHID-MOBARAKEH BABAK,
MANSOURI BADR et CLERC GUY.

⑦③ Titulaire(s) : SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE
Société par actions simplifiée.

⑦④ Mandataire(s) : REGIMBEAU.

FR 3 050 552 - B1



Procédé de surveillance de l'état d'un actionneur électro-mécanique

DOMAINE TECHNIQUE GENERAL

- 5 L'invention concerne le domaine de la surveillance des actionneurs dans les aéronefs, et plus précisément la surveillance des actionneurs électro-mécaniques.

10 Ces actionneurs sont destinés à actionner mécaniquement des surfaces de commande de vol primaire, telles que des ailerons, ou des surfaces de commande secondaire telles que des volets sur les ailes des aéronefs.

ETAT DE L'ART

15 L'industrie aéronautique utilise de plus en plus d'actionneurs électromécaniques (« *electromechanical actuator EMA* » en anglais) pour les systèmes de commande de vol (« *flight control system FCS* »). Ces actionneurs présentent une meilleure efficacité énergétique pour un poids plus faible que les actionneurs hydrauliques traditionnels. En
20 outre, une maintenance conditionnelle (« *condition based maintenance* ») peut être utilisée sur ce matériel.

L'inspection des actionneurs est généralement effectuée à l'aide d'une
25 méthode nommée « *Prognosis and Health Monitoring* » (PHM), comprenant six étapes (voir **figure 1**) : acquisition de données HM1, traitement de données HM2, diagnostic HM3, pronostic HM4, aides à la décision HM5 et interface HM6.

30 Les étapes HM1 à HM4 concernent à proprement parler le « *health monitoring HM* ». Pour effectuer le PHM, des caractéristiques sensibles à la dégradation du système doivent être extraites. On peut distinguer deux types d'extraction.

Un premier type d'extraction est fondé sur des outils de traitement de signal, comme des techniques temporelles (voir référence [HM-TEMP]), spectrales (voir référence [HM-SPEC]), ou fréquence/temps (voir référence [HM-T/F])

- 5 Un deuxième type d'extraction est fondé sur des algorithmes et des modélisations pour obtenir par exemple des résidus (voir références [HM-RES1] et [HM-RES2]), ou en estimant les paramètres du modèle (voir référence [HM-PAR]).

L'étape d'extraction est suivie d'une étape de diagnostic, durant laquelle
10 on évalue les caractéristiques du système pour estimer son état.

PRESENTATION DE L'INVENTION

15 Un but de l'invention est de proposer un procédé de surveillance de l'état d'un actionneur électromécanique permettant de caractériser l'état de l'actionneur, l'actionneur comprenant un moteur électrique, une pièce mobile propre à être mise en mouvement par le moteur, et des capteurs pour mesurer des données relatives à l'actionneur, l'actionneur étant
20 modélisé informatiquement par un modèle défini par des paramètres, le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :

- (E1) Application au moteur d'un signal de consigne de vitesse prédéterminé, le signal de consigne de vitesse comprenant au moins deux paliers, chaque palier étant défini comme une portion du signal de
25 consigne dans laquelle la vitesse est constante sur un intervalle de temps donné, et simultanément

- (E2) Simultanément, application à la tige de l'actionneur d'une charge selon un profil temporel prédéterminé,

- (E3) Simultanément, enregistrement de données mesurées à l'aide des
30 capteurs,

- (E4) Estimation de valeurs numériques des paramètres du modèle de l'actionneur à partir des données mesurées pendant chaque intervalle de temps correspondant aux paliers du signal de consigne,

- (E5) Extraction d'une signature de l'actionneur, la signature comprenant notamment les valeurs numériques des paramètres du modèle tels qu'obtenues à l'issue de l'étape précédente, et/ou des valeurs numériques caractéristiques d'une comparaison entre les valeurs de données mesurées par les capteurs et des valeurs de données simulées correspondantes obtenues à partir du modèle,
5
 - (E6) Classification de la signature générée parmi un ensemble de signatures de référence pour caractériser l'état de l'actionneur.
- 10 L'invention peut comprendre les caractéristiques suivantes, prises seules ou en combinaison :
- le procédé comprend une étape (E3') de traitement des données mesurées par les capteurs, le traitement comprenant une étape de détermination des valeurs moyennes des données mesurées pendant chaque intervalle de temps correspondant aux paliers du signal de consigne,
15
 - la charge appliquée à la pièce mobile est constante durant chaque palier,
 - une donnée mesurée est la position du moteur, ladite position étant filtrée à l'aide d'un filtre de Kalman pour calculer la vitesse et l'accélération du moteur en limitant les effets liés au bruit,
20
 - les paramètres définissant le modèle de l'actionneur comprennent un ou plusieurs paramètre(s) parmi : le coefficient de frottement visqueux, le coefficient de frottement sec, le coefficient de friction de charge, la valeur de l'amplitude du jeu mécanique, la raideur,
25
 - le signal de consigne de vitesse est généré à partir d'un signal de consigne de déplacement,
 - le signal de consigne de position a une forme trapézoïdale en fonction du temps, de sorte que le signal de consigne de vitesse présente au moins deux paliers présentant des valeurs de vitesse différentes,
30
 - pour chacun des paliers, au moins deux niveaux de charge différents sont appliqués à des intervalles de temps différents, de

sorte qu'au moins six quatres couples de consignes différentes sont appliqués durant l'enregistrement,

- l'étape d'estimation (E4) comprend la mise en œuvre d'un algorithme d'optimisation comprenant les étapes suivantes :
 - 5 calcul des données simulées à partir du modèle définis par des valeurs des paramètres de l'actionneur, les paramètres étant initialisés à des valeurs arbitraires,
 - calcul d'un score associé au modèle,
 - modification des valeurs des paramètres du modèles et
 - 10 répétition des étapes qui précèdent avec les valeurs de paramètres modifiées jusqu'à l'obtention d'un score prédéterminé.
- l'étape de classification (E6) est effectuée à l'aide de la méthode des k plus proches voisins parmi l'ensemble de signatures de référence.
 - 15
- l'actionneur est disposé en parallèle d'un autre actionneur identique et dans lequel l'étape d'application (E2) de la charge est effectuée au moyen de l'autre actionneur.
- les actionneurs sont montés sur un aéronef comprenant une aile et une surface volet, l'aileron étant déplacé en rotation ou en translation par rapport à l'aile à l'aide des actionneurs disposés en parallèle,
 - 20
- les données mesurées par les capteurs comprennent une ou plusieurs parmi les données suivantes : l'intensité du courant de phase, la charge appliquée, la vitesse de rotation du rotor du moteur, l'angle de rotation du rotor du moteur, la position de la tige, la tension, la température, la position de l'élément mobile,
 - 25
- les paramètres du modèle comprennent un ou plusieurs paramètre(s) parmi : une raideur, un coefficient d'amortissement de l'élément mobile, une amplitude de jeu entre l'élément mobile et une surface à laquelle est raccordée l'élément mobile,
 - 30
- l'extraction de la signature comprend des valeurs issues de calculs entre des combinaisons de données mesurées.

L'invention concerne aussi une unité de surveillance configurée pour mettre en œuvre les étapes E3 à E6 précédentes, à partir de données récupérées par les capteurs cités précédemment. En outre, l'unité de surveillance est avantageusement configurée pour appliquer les signaux de consigne de l'étape E1 à l'actionneur.

L'invention concerne aussi un actionneur électro-mécanique et une unité de surveillance associée, conforme à l'unité décrite précédemment.

10

PRESENTATION DES FIGURES

D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés, sur lesquels :

15

- La figure 1 déjà présentée illustre le « *prognosis health management* »,
- La figure 2 représente de manière schématique un actionneur électromécanique pouvant être surveillé dans le cadre de l'invention,
- La figure 3 représente de manière schématique deux actionneurs de la figure 2 installés en parallèle,
- La figure 4 représente de manière schématique un modèle de l'actionneur,
- La figure 5 représente de manière schématique des formes de signaux de consigne applicables dans le cadre de l'invention,
- La figure 6 représente de manière schématique une courbe de charge avec les couples mesurés et identifiés,
- Les figures 7a et 7b représentent de manière schématique des courbes de données (courant et charge) mesurées et de données traitées après filtrage,

20

25

30

- La figure 8 représente de manière schématique la position, la vitesse et l'accélération du rotor après filtrage et estimation à l'aide d'un filtre de Kalman,
- La figure 9 représente de manière schématique en trois dimensions de l'espace un ensemble de signatures caractéristiques d'états d'actionneurs.

DESCRIPTION DETAILLEE

10 Un exemple d'actionneur électro-mécanique 10 est illustré en **figure 2**. L'actionneur 10 représenté est un actionneur à déplacement linéaire, comprenant un carter, un moteur 11 et une pièce mobile sous la forme d'une tige mobile 12. Le moteur 11 comprend un stator 14 monté fixe par rapport au carter et un rotor 13, avec écrou, mobile en rotation par rapport au stator 14. La tige mobile 12 est mobile en translation par rapport au stator 14 du moteur 11, selon une direction de déplacement parallèle à l'axe de rotation du rotor 13. L'actionneur 10 comprend en outre une pluralité de rouleaux satellites 16 agencés entre le rotor 13 du moteur et la tige mobile 12. Une rotation du rotor 13 par rapport au stator 14 provoque un déplacement de la tige 12 en translation par rapport au stator 14. A cet effet, l'écrou du rotor 13 comprend une surface interne filetée et la tige 12 comprend une surface externe filetée. Les rouleaux 16 présentent une surface externe filetée avec le même pas de filetage que celui de la tige 12, mais ce pas est inversé par rapport à celui de la tige 12. La surface externe filetée de la tige 12 propre à coopérer avec la surface interne filetée du rotor 13 par l'intermédiaire des rouleaux 16 pour convertir un mouvement de rotation du rotor 13 en un mouvement de translation de la tige 12. Le document WO201007932 décrit un tel actionneur.

30

Un autre exemple d'actionneur concerne des actionneurs à déplacement rotatif, dans lequel la pièce mobile est mobile en rotation,

préféablement à débattement réduit, et le rotor du moteur entraîne la pièce mobile en rotation par rapport au stator.

La **figure 3** représente un ensemble d'actionnement d'une surface de
5 commande de vol, comprenant deux actionneurs électromécaniques 10
et 20 identiques à l'actionneur de la **figure 2**. Dans le cas présent, les
deux actionneurs électromécaniques 10, 20 sont disposés en parallèle
entre un bâti 100 et une surface 200. Dans un mode de réalisation
particulier, le bâti 100 est une aile d'aéronef et la surface 200 est un
10 aileron permettant de contrôler le mouvement de roulis de l'aéronef : les
actionneurs permettent de faire pivoter l'aileron par rapport à l'aile de
l'aéronef en fonction de la phase de vol (décollage, atterrissage, etc.).

La liaison entre le bâti 100 et chaque actionneur 10, 20 est typiquement
réalisée à l'aide d'une rotule fixe et la liaison entre la tige 11 de
15 l'actionneur 10, 20 et la surface 200 est typiquement réalisée à l'aide
d'une rotule mobile.

Chaque actionneur comprend des capteurs internes 17 permettant de
mesurer la position de la pièce mobile 12 (en radian ou en mètre) par
rapport au stator du moteur, la position du rotor 13 du moteur 11 (en
20 radian) par rapport au stator du moteur, la valeur de l'intensité du
courant de phase appliqué au moteur, la charge appliquée sur l'élément
mobile (en Newton ou en Newton-mètre), la valeur de la tension
d'alimentation du moteur, la température du moteur 11 (du stator 14),
la température de la transmission mécanique (par exemple les rouleaux
25 16).

Ces informations sont collectées par une unité de traitement 30. L'unité
de traitement 30 comprend une unité de calcul 31 ainsi qu'une mémoire
32 pour stocker les informations. Un capteur de température peut aussi
mesurer la température des moyens de traitement. Lorsque l'unité de
30 traitement 30 est configurée pour mettre en œuvre certaines étapes du
procédé, on parle d'unité de surveillance.

L'unité de traitement 30 peut comprendre un ordinateur embarqué sur l'aéronef, ou un ordinateur au sol auquel ont été transmises les données.

- 5 L'actionneur 10 est modélisé informatiquement à l'aide d'un modèle M. Plusieurs variantes peuvent être réalisées, en fonction de la précision recherchée.

10 Ces variantes concernent par exemple la modélisation du couple de frottement au sein de l'actionneur 10, ou encore la modélisation de la chaîne cinématique entre la tige 12 et le moteur 11.

Les couples considérés appliqués sur le moteur 11 sont les suivants :

- 15 - Le couple électromagnétique, proportionnel à l'intensité du courant i , exprimé sous la forme :

$$T_{em} = p\psi_M i_q \quad (2)$$

Avec p le nombre de paires de pôles, ψ_M le flux magnétique permanent de l'aimant et i_q le courant dans le référentiel de Park,

- 20 - Le couple de charge, transmis par la tige 12 de l'actionneur 10 au rotor 13,
 - Le couple inertiel.

Le couple inertiel s'exprime par :

$$T_i = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3)$$

Avec J l'inertie équivalente de tous les éléments (kg.m^2).

25 Dans un type de modèle, on suppose que l'actionneur 10 est la source principale de frottement (on néglige les frottements liés aux liaisons avec le volet par exemple). Dans ce cas, les frottements liés au moteur et à la tige sont considérés comme nuls. Karam (voir référence [FROT])
 30 a proposé un modèle s'exprimant de la façon suivante :

$$T_f = C_v \Omega + s(\Omega)[C_d + K_l \text{abs}(T_l)] \quad (4)$$

où T_f est le couple de frottement (Nm), Ω la vitesse du rotor (rad/s), C_v le paramètre de frottement visqueux (Nm), s la fonction signe, C_d le paramètre de frottement sec (Nm), K_l le paramètre de frottement de charge (Nm), abs la fonction valeur absolue et T_l le couple de charge, lié à la charge F_l (N) appliqué sur la tige par la relation

$$T_l = F_l \frac{l}{2\pi} = \frac{F_l}{r}$$

avec l le pas (m) et r le ratio rotation/translation.

Un autre modèle, fondé sur le premier, est illustré à l'aide de la **figure 5**. Dans ce modèle issue de la référence [JEU], la déformation de la tige et le jeu (« *backlash* » en anglais) existant au niveau du filetage entre la tige 11 et le rotor 13 sont pris en compte. Le jeu visé ici est celui qui correspond à la distance maximum ou l'angle maximum vers lequel une partie d'un système mécanique peut être déplacée dans une direction sans appliquer de force ou de mouvement mesurable à la partie suivante dans la chaîne cinématique.

x_m représente la position équivalente du moteur, x_i la position intermédiaire, x_{st} la position de la tige, k_{st} le paramètre de raideur de la tige, c_{st} le paramètre d'amortissement et $2a$ l'amplitude du jeu (m).

On définit :

- L'écart de déplacement par : $x_d = x_m - x_{st}$,
- la position du jeu par $x_b = x_i - x_{st}$ et
- la déformation de la tige par $x_s = x_m - x_i$.

La force de déformation, qui fait le lien entre le moteur 11 et la tige 12 peut être calculée comme suit :

$$F_s = F_{kst} + F_{cst} = k_{st}(x_s - x_{s0}) + c_{st}\dot{x}_s \quad (7)$$

Finalement, on peut distinguer trois cas qui permettent de définir la dynamique de x_b :

- le contact à gauche ($x_b = -a$ et $F_s \neq 0$) :

$$5 \quad \dot{x}_b = \max \left[0; \dot{x}_d + \frac{k_{st}}{c_{st}} (x_d - x_b - x_{s0}) \right] \quad (9)$$

- le contact à droite ($x_b = +a$ et $F_s \neq 0$) :

$$\dot{x}_b = \min \left[0; \dot{x}_d + \frac{k_{st}}{c_{st}} (x_d - x_b - x_{s0}) \right] \quad (10)$$

- 10 - l'absence de contact, ce qui est à l'origine du jeu, ($|x_b| < a$ et $F_s = 0$)

$$\dot{x}_b = \dot{x}_d + \frac{k_{st}}{c_{st}} (x_d - x_b - x_{s0}) \quad (11)$$

Le principe fondamental de la dynamique sur la tige 12 donne l'équation suivante :

$$m_{st} \frac{d^2 x_{st}}{dt^2} = F_s - F_{fr} - F_l \quad (12)$$

- 15 Avec m_{st} la masse de la tige et des éléments connectés, F_{fr} les forces de friction calculées par un modèle équivalent de l'équation de couple électromagnétique en linéaire, et F_l la force de charge.

Enfin, le lien avec le rotor 13 est effectué avec :

$$20 \quad J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_s = T_{em} - \frac{F_s}{r} \quad (13)$$

Le procédé de surveillance mis en œuvre par les moyens de traitement 30 vise notamment à déterminer les paramètres cités précédemment :

- 25 $C_v, C_d, K_l, a, k_{st}, c_{st}$.

Ces paramètres sont des grandeurs physiques caractéristiques de l'actionneur 10 et de son comportement dynamique. Ils sont donc pertinents pour pouvoir estimer l'état de l'actionneur 10. En particulier,

ces paramètres évoluent avec le temps et permettent de connaître l'état de vieillissement de l'actionneur 10.

Selon la référence [DEF], on distingue trois modes principaux de défaut : la fatigue du métal, la fatigue d'usure et l'accident.

Le procédé de surveillance de l'état de l'actionneur 10 comprend les étapes E1 à E6 qui suivent.

- 10 Dans une première étape E1, un signal de consigne de vitesse $\Omega(t)$ prédéterminé est appliqué au moteur 11. Cette consigne est par exemple générée par l'unité de traitement 30. Afin de simplifier la mise en œuvre du modèle, le signal de consigne de vitesse $\Omega(t)$ comprend au moins deux paliers. Par palier, on entend une portion du signal de consigne dans laquelle la vitesse est constante sur un intervalle de temps donné. En d'autres termes, la consigne de vitesse comprend au moins deux paliers de vitesse constante. Une fois la vitesse dudit palier atteinte, l'accélération devient nulle, ce qui permet de s'affranchir des effets inertiels.
- 15
- 20 La **figure 5** illustre une forme de consigne de position, à laquelle correspond une forme de consigne de vitesse.

Préférentiellement, la consigne de vitesse $\Omega(t)$ se présente sous la forme d'un signal périodique pour multiplier les mesures et limiter les incertitudes. Sur une première durée de temps $I1$, le signal est périodique et alterne entre deux valeurs égales mais de signe opposé et sur un deuxième durée de temps $I2$, le signal est périodique et alterne entre deux autres valeurs égales mais de signe opposé.

Une telle consigne peut être réalisée avec une consigne de position ayant une forme trapézoïdale en fonction du temps (cf. **figure 5** à nouveau). Ainsi, le signal de consigne de vitesse présente au moins trois paliers P1, P2, P3 présentant des valeurs de vitesse différentes (valeur négative, valeur positive et valeur nulle).

Simultanément à cette consigne de vitesse, dans une étape E2, une charge selon un profil temporel prédéterminé est appliquée à la tige 11. Cette charge correspond à un effort tendant à déplacer ladite tige dans les deux sens. Dans l'architecture présentée précédemment en **figure 3**, la charge est appliquée grâce au deuxième actionneur 20 disposé en parallèle du premier actionneur 10 (dans le cas où les essais sont menés sur le premier actionneur 10). L'effort est donc transmis via la surface 200 à l'autre actionneur 10.

Préférentiellement, la consigne de charge présente elle aussi des paliers synchronisés sur ceux de la consigne de vitesse. De cette façon, durant chaque intervalle de temps correspondant à un palier, la vitesse de l'actionneur et la charge appliquée sont constantes. Cela permet à nouveau de s'affranchir des effets relatifs à l'inertie qui complexifie la mise en œuvre de la modélisation.

Afin d'obtenir un maximum de données, il est préférable, pour chaque valeur de palier de la consigne de vitesse, de disposer de plusieurs valeurs de charges différentes. Ainsi, par exemple, il est possible de définir une consigne de charge dont la période correspond à la première durée de temps I1 précédent pour la consigne de vitesse, la consigne de charge étant répétée à l'identique sur la deuxième durée de temps I2 (cf. **figure 5** à nouveau).

Plus des couples vitesse/charge différents sont disponibles, plus le modèle pourra fournir des valeurs des paramètres précises et fiables. Il demeure néanmoins des contraintes de temps et de puissance de calcul qui doivent être pris en compte. En particulier, si les essais sont effectués sur le tarmac d'un aéroport, la durée d'acquisition peut être limitée à plusieurs dizaines de secondes.

30

Dans une étape E3, concomitante aux deux premières E1, E2, l'unité de traitement 30 acquiert et enregistre les données issues des capteurs 17 lors de l'application des deux consignes de vitesse et de charge.

Dans une étape E3' d'un mode de réalisation préférentiel, effectuée avant l'estimation des valeurs numériques, les données mesurées sont traitées par l'unité de traitement 30. Dans une sous-étape E31', chaque
5 type de donnée mesurée est moyenné sur un intervalle de temps correspondant à un palier afin d'obtenir une unique valeur par palier. Cela permet de filtrer le bruit blanc. L'intervalle de temps pour calculer la moyenne peut correspondre à l'intégralité du palier ou simplement à une partie de ce palier. Ce choix-là dépend du protocole de test, et
10 notamment de la consigne d'application de charge, qui peut par exemple appliquer deux paliers lorsque la consigne de vitesse n'en applique qu'un seul.

La **figure 6** représente une courbe de la valeur du couple appliqué au
15 moteur via la charge FI, telle que mesurée par le capteur. Les points au niveau de chaque palier représentent la valeur identifiée. On note une erreur moyenne d'environ 8% par rapport au couple mesuré, ce qui signifie que l'hypothèse selon laquelle le couple d'accélération peut être négligé est valable.

20 Des traitements conventionnels peuvent aussi être appliqués durant l'étape E3' par l'unité de traitement 30.

Par exemple, une décomposition en ondelette, typiquement de Daubechies est utilisée pour filtrer les données mesurées. La **figure 7a**
25 illustre la valeur du courant mesuré brute et la valeur filtrée et la **figure 7b** illustre la valeur de la charge mesurée brute et la valeur associée filtrée.

Par exemple, à partir de la position du rotor 13 mesurée, un filtre de Kalman est utilisé pour estimer la valeur de la vitesse et de
30 l'accélération du rotor en supprimant le bruit. La **figure 8** illustre les données de position (après filtrage) et de vitesse/accélération estimée par le filtre de Kalman. On retrouve sur ces courbes les paliers, et notamment les trois paliers P1, P2 et P3, présentés précédemment.

Le modèle de l'actionneur 10 est utilisé par l'unité de traitement 30 pour calculer les paramètres du modèle. A cette fin, dans une étape E4, l'unité de traitement 30 estime les valeurs numériques des paramètres du modèle de l'actionneur 10 à partir des données mesurées, ces données ayant éventuellement été filtrées au préalable si besoin. En particulier, comme indiqué précédemment, seules les données relatives aux paliers durant lesquelles l'accélération est nulle sont utilisées, de sorte que les effets d'inertie sont négligeables.

10

Ainsi, le principe fondamental de la dynamique se simplifie de la façon suivante :

$$T_{em} - T_l - T_f = T_{em} - T_r = 0 \quad (5)$$

L'estimation des valeurs des paramètres est typiquement effectuée à l'aide d'algorithmes de convergence connus. Par exemple, l'algorithme peut comprendre les étapes suivantes :

15

- calcul des données simulées à partir du modèle définis par des valeurs des paramètres de l'actionneur, les paramètres étant initialisés à des valeurs arbitraires,

20

- calcul d'un score associé au modèle,
- modification des valeurs des paramètres du modèles et répétition des étapes qui précèdent avec les valeurs de paramètres modifiées jusqu'à l'obtention d'un score prédéterminé.

25

Une fois les différents paramètres évalués, l'unité de traitement 30 exécute une étape E5 d'extraction d'une signature propre à l'actionneur 10.

30

La signature est généralement représentée sous la forme d'un vecteur Sig dont les composantes Sig1, Sig2, ... sont des grandeurs caractéristiques à l'état dudit actionneur. A partir de cette signature, il est ainsi possible d'établir un diagnostic précis. En fonction de l'usure de l'actionneur 10, ces grandeurs évoluent et changent de valeur.

Néanmoins, pour chaque test effectué, chaque grandeur est considérée comme constante durant la durée dudit test.

5 A cette fin, le choix de la signature, c'est-à-dire le choix des composantes Sig1, Sig2, etc. formant la signature Sig est déterminé en fonction d'un cahier des charges et de la pertinence des valeurs pouvant y figurer.

10 Les grandeurs Sig1, Sig 2, ... formant la signature Sig comprennent notamment :

- les valeurs numériques des paramètres du modèle tels qu'obtenues à l'issue de l'étape précédente et/ou,
 - des valeurs numériques caractéristiques d'une comparaison entre les valeurs de données mesurées par les capteurs et des valeurs de données simulées correspondantes obtenues à partir du modèle : par
- 15 exemple, on peut citer :

$$\max(\hat{\Omega} - \Omega), \text{avg}(\hat{\Omega} - \Omega), \min(\hat{\Omega} - \Omega)$$

Où $\hat{\Omega}$ est la vitesse estimée du rotor 13 à l'aide du modèle, max est la valeur maximale, avg est la moyenne, min est la valeur minimale.

20 La signature Sig fait donc intervenir des valeurs calculées à partir de la simulation de l'actionneur 10 selon le modèle.

Dans un mode de réalisation complémentaire, la signature comprend aussi des valeurs issues de mesure uniquement, comme :

$$\max(x_d), \text{avg}(x_d), (\min x_d)$$

25 dans le cas du second modèle présenté précédemment.

Une signature de l'actionneur peut ainsi être représentée sous la forme d'un vecteur, ici de dimension 10 :

$$Sig = \begin{bmatrix} C_v \\ C_d \\ K_l \\ \alpha \\ \max(\hat{\Omega} - \Omega) \\ \text{avg}(\hat{\Omega} - \Omega) \\ \min(\hat{\Omega} - \Omega) \\ \max(x_d) \\ \text{avg}(x_d) \\ (\min x_d) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Une signature selon un mode de réalisation préférentiel est la suivante :

$$Sig = \begin{bmatrix} C_d \\ \max(\hat{\Omega} - \Omega) \\ \text{avg}(\hat{\Omega} - \Omega) \end{bmatrix}$$

5

Enfin, dans une étape E6, l'unité de traitement 30 classe la signature extraite Sig parmi un ensemble de signatures de référence SigR pour caractériser l'état de l'actionneur. L'ensemble des signatures de référence SigR est stocké dans une base de données BDD.

10 La classification s'effectue dans l'espace des signatures, dont la dimension correspond aux nombres de composantes Sig1, Sig2,...

Il est possible que la signature extraite Sig soit de dimension N, mais que certaines grandeurs soient volontairement négligées, de sorte que la classification est effectuée dans un espace de dimension moindre, par

15 exemple un hyperespace de N-1.

Par exemple, il se peut qu'entre deux mises en œuvre du modèle, la valeur d'un paramètre varie de façon moindre que la valeur de l'erreur associée. Dans ce cas, ce paramètre peut être soit volontairement écarté

20 de la signature Sig, soit volontairement ignoré lors de la classification.

La classification peut être effectuée de différentes façons.

Une méthode de classification consiste à utiliser le principe de k plus proches voisins (KNN).

La première étape est une phase d'apprentissage préalable, durant laquelle différentes classes sont construites à partir des signatures de la base de données. Chaque classe correspond à un état de l'actionneur.

La deuxième étape est une phase de décision, qui est celle proprement mise en œuvre dans le cas du procédé de surveillance : la signature Sig extraite de l'actionneur testé est affectée à une des classes établies préalablement.

Pour cela, une distance (euclidienne, de Mahalanobis, etc.) entre la signature Sig et les signatures SigR de la base de données BDD est calculée. Sig est ensuite affectée à la classe la mieux représentée parmi ses k plus proches voisins.

Pour éviter des faux positifs (mauvaise affectation), des règles de rejet peuvent être implémentées.

Un outil de classification par type de défaut est appris depuis les données. Par exemple on peut mettre au point deux outils de classification : l'un est dédié à la distinction entre une signature dite saine et une signature hors classe des frottements secs (par exemple Fc, représentative d'un défaut accidentel), l'autre est dédié à la distinction entre une signature dite saine et une signature hors classe de l'amplitude du jeu α (représentative d'un défaut d'usure).

A titre d'exemples, des méthodes de réseaux de neurones artificiels, de machines à vecteurs de supports, de logique floue, de réseaux bayésiens peuvent être utilisées à la place de la méthode des k plus proches voisins.

30 Définition de la signature

Afin que la signature Sig soit à la fois pertinente pour évaluer l'état de l'actionneur et à la fois concise pour limiter les calculs inutiles ou

redondants, il est utile de définir préalablement à la mise en œuvre du procédé de surveillance de l'actionneur une phrase d'apprentissage pour évaluer la qualité d'une composante Sig1, Sig2... de la signature Sig.

5 Un exemple de méthode est donné ci-dessous :

Intervalle de valeurs pour les paramètres	Outils de classement	
	Frottement sec	Jeu
$a < a_{lim}$ et $F_d < F_{dlim}$	Sain (classe 1)	Sain (classe 1)
$a > a_{lim}$	Sain (classe 1)	Défaut (classe 2)
$F_d > F_{dlim}$	Défaut (classe 2)	Sain (classe 1)
$a > a_{lim}$ et $F_d > F_{dlim}$	Défaut (classe 2)	Défaut (classe 2)

10 Dans une première étape, une analyse en composante principale est effectuée pour évaluer la séparabilité des classes. La **figure 9** montre une représentation en trois dimensions de cette séparation entre la première classe (croix) et la deuxième classe (rond). La distance entre les signatures et/ou les classes est représentée sous forme d'une distance physique.

15 Pour se prémunir du surapprentissage (« *overtiffing* »), une sélection dite SBS pour « *Sequential Backwards feature Selection* » est effectuée. Cette sélection fonctionne itérativement en supprimant les composantes les moins importantes en fonction de critère(s) prédéfini(s).

20 Afin de tester cette phase d'apprentissage, une méthode de validation croisée (par exemple « *leave one out* ») est utilisée : on utilise n-1 points comme signatures de référence SigR pour générer des classes (apprentissage) et le point n est utilisé comme signature de test Sig (prédiction). La méthode est répétée n fois, en changeant de signature de test à chaque fois.

25

Références

- [HM-TEMP] - P. Večeř, M. Kreidl, and R. Šmíd, "Condition indicators for gearbox condition monitoring systems," *Acta Polytech.*, vol. 45, no. 6, 2005.
- 5
- [HM-SPEC] - J. Harmouche, C. Delpha, and D. Diallo, "Linear discriminant analysis for the discrimination of faults in bearing balls by using spectral features," presented at the International Conference on Green Energy, 2014, pp. 182–187.
- 10
- [HM- T/F] - J. Lin and M. Zhao, "A review and strategy for the diagnosis of speed-varying machinery," presented at the IEEE Conference on Prognostics and Health Management, 2014, pp. 1–9.
- 15
- [HM-RES1] - N. Leboeuf, T. Boileau, B. Nahid-Mobarakeh, G. Clerc, and F. Meibody-Tabar, "Real-Time Detection of Interturn Faults in PM Drives Using Back-EMF Estimation and Residual Analysis," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 6, pp. 2402–2412, Nov. 2011.
- 20
- [HM-RES2] - G. Vinson, M. Combacau, T. Prado, and P. Ribot, "Permanent magnets synchronous machines faults detection and identification," presented at the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 3925–3930.
- 25
- [HM-PAR] - R. S. Kraleti, M. Zawodniok, and S. Jagannathan, "Model based diagnostics and prognostics of three-phase induction motor for vapor compressor applications," presented at the IEEE Conference on Prognostics and Health Management, 2012, pp. 1–7.
- 30
- [FROT] - W. Karam, "Générateurs de forces statiques et dynamiques à haute puissance en technologie électromagnétique," Université de Toulouse, 2007.

- [JEU] - A. Lagerberg and B. Egardt, "Backlash estimation with application to automotive powertrains," *Control Syst. Technol. IEEE Trans. On*, vol. 15, no. 3, pp. 483–493, 2007.
- 5 [DEF] - P. C. Lemor, "The roller screw, an efficient and reliable mechanical component of electro-mechanical actuators," 1996, vol. 1, pp. 215–220.

Revendications

- 1.** Procédé de surveillance de l'état d'un actionneur électro-mécanique (10), l'actionneur comprenant un moteur électrique (11), une pièce mobile (12) propre à être mise en mouvement par le moteur (11), et des capteurs (17) pour mesurer des données relatives à l'actionneur (10), l'actionneur (10) étant modélisé informatiquement par un modèle défini par des paramètres (C_v , C_l , K_l , α , k), le procédé étant caractérisé en ce qu'il comprend les étapes suivantes :
- 5 - (E1) Application au moteur d'un signal de consigne de vitesse ($\Omega(t)$) prédéterminé, le signal de consigne de vitesse ($\Omega(t)$) comprenant au moins deux paliers (P_1 , P_2 , ...), chaque palier étant défini comme une portion du signal de consigne dans laquelle la vitesse est constante sur un intervalle de temps donné, et
 - 15 - (E2) Simultanément, application à la tige de l'actionneur d'une charge selon un profil temporel prédéterminé,
 - (E3) Simultanément, enregistrement de données mesurées à l'aide des capteurs (17),
 - (E4) Estimation de valeurs numériques des paramètres du modèle de l'actionneur (10) à partir des données mesurées pendant chaque intervalle de temps correspondant aux paliers du signal de consigne,
 - 20 - (E5) Extraction d'une signature de l'actionneur (Sig), la signature comprenant notamment les valeurs numériques des paramètres du modèle tels qu'obtenues à l'issue de l'étape précédente, et/ou des valeurs numériques caractéristiques d'une comparaison entre les valeurs de données mesurées par les capteurs et des valeurs de données simulées correspondantes obtenues à partir du modèle,
 - 25 - (E6) Classification de la signature générée parmi un ensemble de signatures de référence (SigR) pour caractériser l'état de l'actionneur
 - 30 (10).

- 2.** Procédé selon la revendication 1, comprenant en outre une étape de :

- Traitement des données mesurées par les capteurs (17), le traitement comprenant une étape de détermination des valeurs moyennes des données mesurées pendant chaque intervalle de temps correspondant aux paliers (P1, P2) du signal de consigne.

5

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, dans lequel la charge appliquée à la pièce mobile (12) est constante durant chaque palier.

4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel une donnée mesurée est la position du moteur (11), ladite position étant filtrée à l'aide d'un filtre de Kalman pour calculer la vitesse et l'accélération du moteur en limitant les effets liés au bruit.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les paramètres définissant le modèle de l'actionneur (10) comprennent un ou plusieurs paramètre(s) parmi : le coefficient de frottement visqueux (C_v), le coefficient de frottement sec (C_d), le coefficient de friction de charge (K_I), la valeur de l'amplitude du jeu mécanique (α), la raideur (k).

20

6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le signal de consigne de vitesse ($\Omega(t)$) est généré à partir d'un signal de consigne de déplacement ($\theta(t)$).

7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel le signal de consigne de position a une forme trapézoïdale en fonction du temps, de sorte que le signal de consigne de vitesse présente au moins deux paliers (P1, P2, P3) présentant des valeurs de vitesse différentes.

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel pour chacun des paliers, au moins deux niveaux de charge différents sont appliqués à des intervalles de temps différents, de sorte

30

qu'au moins quatre couples de consignes différentes sont appliqués durant l'enregistrement.

- 9.** Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'étape d'estimation (E4) comprend la mise en œuvre d'un algorithme d'optimisation comprenant les étapes suivantes :
- calcul des données simulées à partir du modèle définis par des valeurs des paramètres de l'actionneur, les paramètres étant initialisés à des valeurs arbitraires,
 - 10 - calcul d'un score associé au modèle,
 - modification des valeurs des paramètres du modèles et répétition des étapes qui précèdent avec les valeurs de paramètres modifiées jusqu'à l'obtention d'un score prédéterminé.
- 15 **10.** Procédé selon l'une des revendications qui précèdent, dans lequel l'étape de classification (E6) est effectuée à l'aide de la méthode des k plus proches voisins (k-NN) parmi l'ensemble de signatures de référence (BDD).
- 20 **11.** Procédé selon l'une des revendications qui précèdent, dans lequel l'actionneur (10) est disposé en parallèle d'un autre actionneur identique et dans lequel l'étape d'application (E2) de la charge est effectuée au moyen de l'autre actionneur.
- 25 **12.** Procédé selon la revendication 11, dans lequel les actionneurs sont montés sur un aéronef comprenant une aile (100) et une surface (200) déplacée en rotation ou en translation par rapport à l'aile (100) à l'aide des actionneurs (10, 20) disposés en parallèle.
- 30 **13.** Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les données mesurées par les capteurs comprennent une ou plusieurs parmi les données suivantes : l'intensité du courant de phase, la charge appliquée (FI), la vitesse de rotation du rotor (13) du moteur

(11), l'angle de rotation du rotor (13) du moteur (10), la position de la tige, la tension, la température, la position de l'élément mobile (12).

5 **14.** Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel les paramètres du modèle comprennent un ou plusieurs paramètre(s) parmi : une raideur, un coefficient d'amortissement de l'élément mobile, une amplitude de jeu entre l'élément mobile et une surface à laquelle est raccordée l'élément mobile.

10 **15.** Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel l'extraction de la signature (Sig) comprend des valeurs issues de calculs entre des combinaisons de données mesurées.

FIG. 1

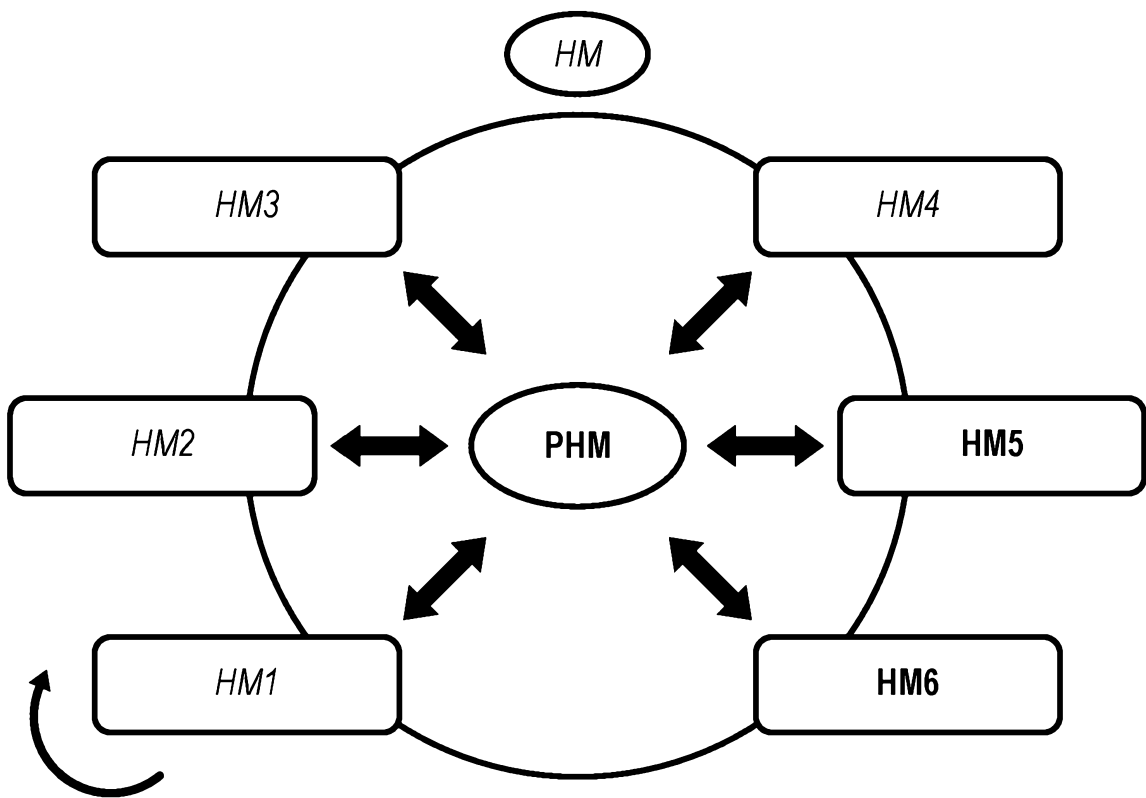


FIG. 2

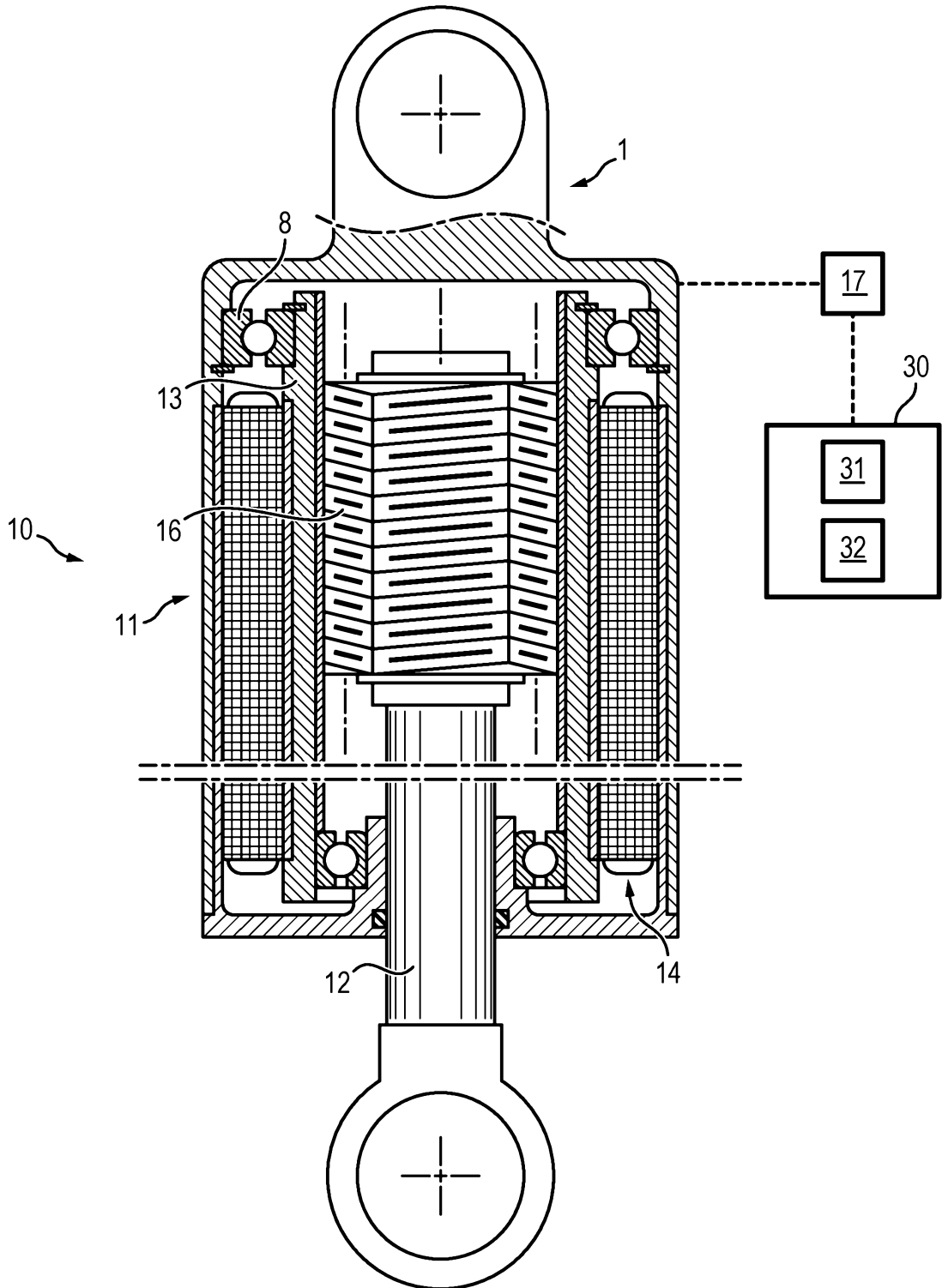


FIG. 3

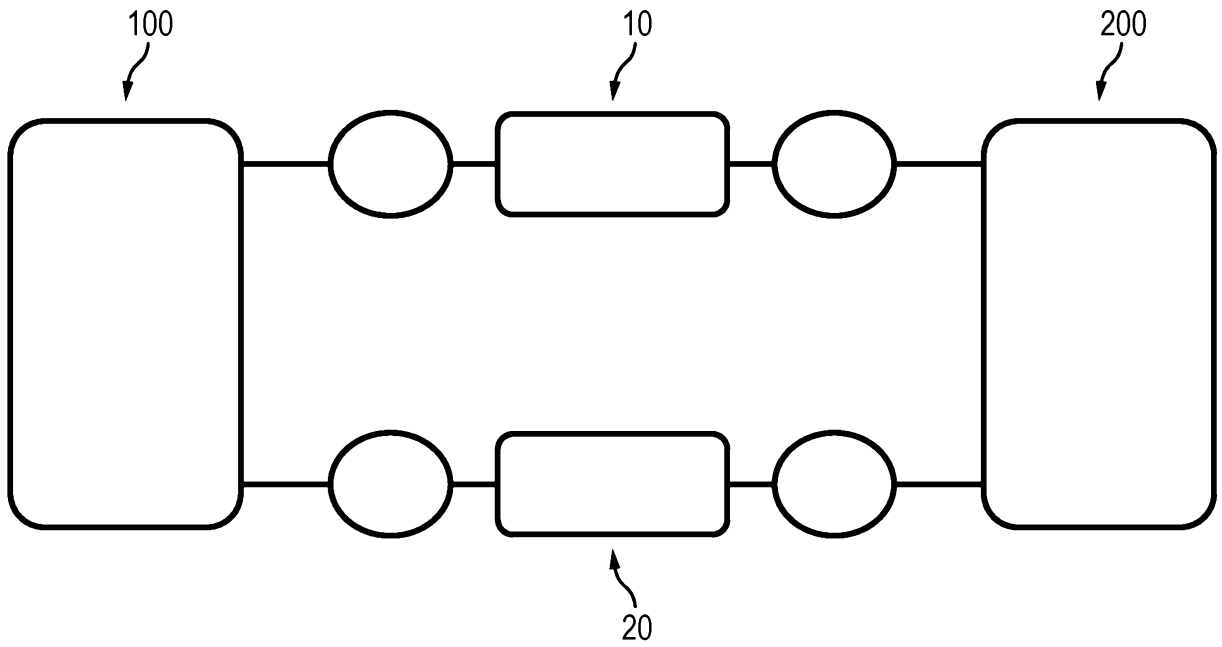


FIG. 4

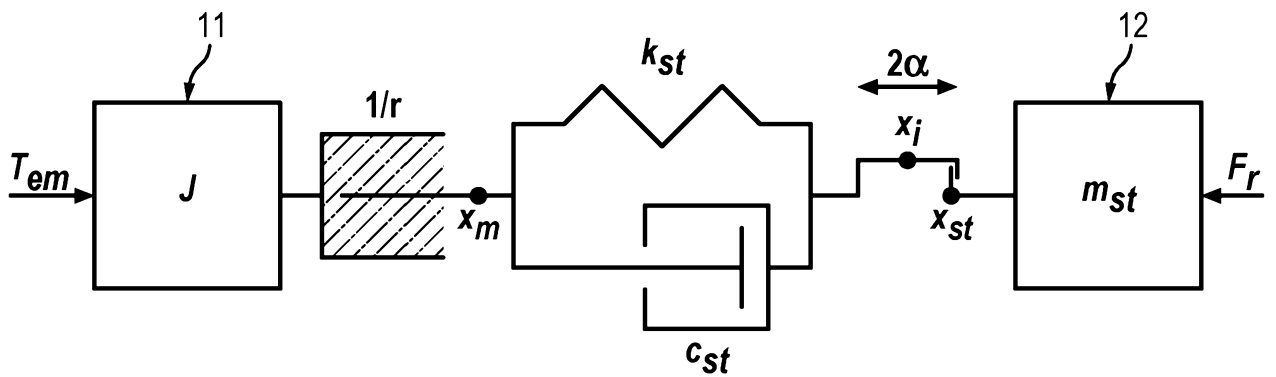


FIG. 5

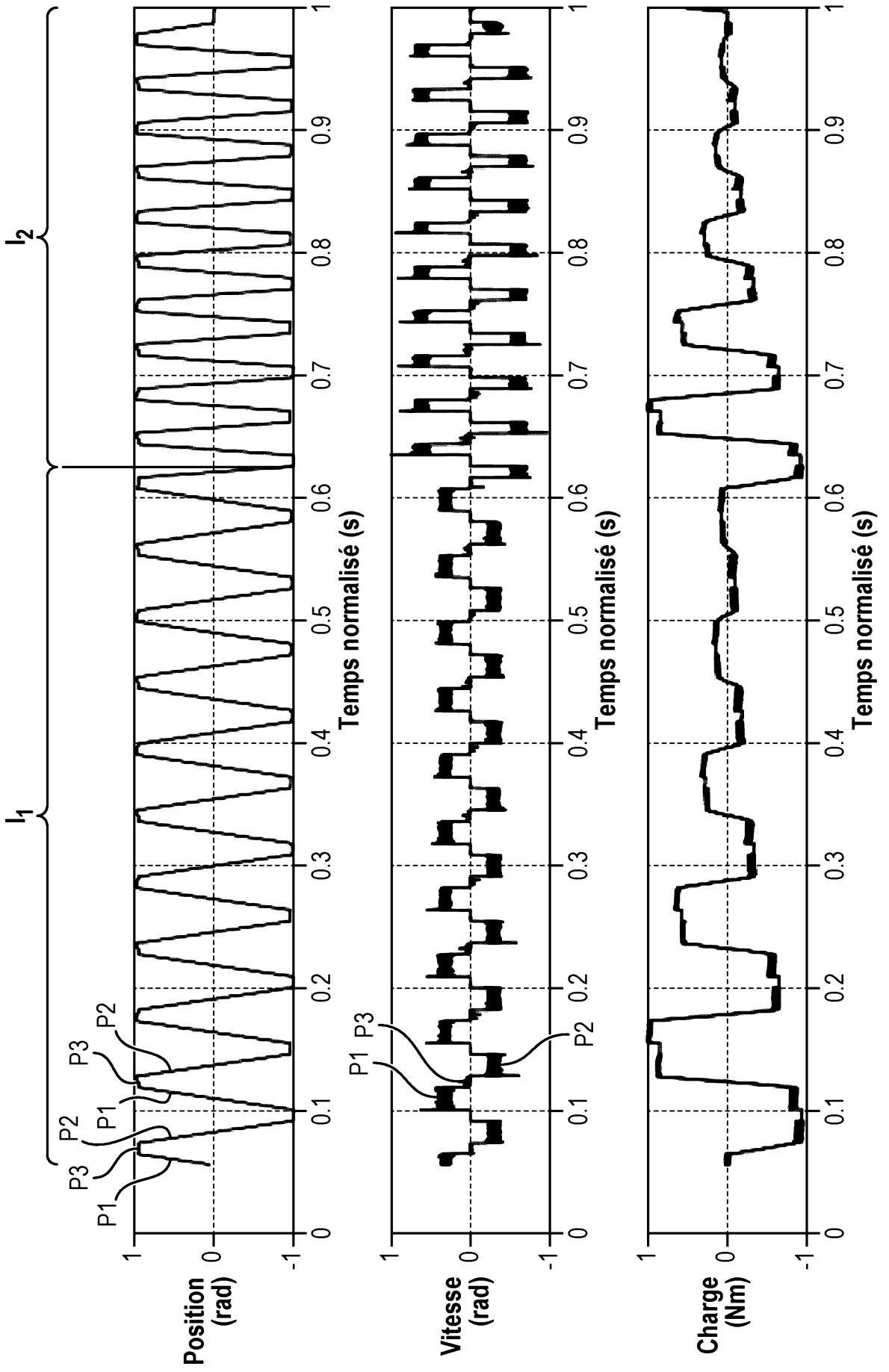


FIG. 6

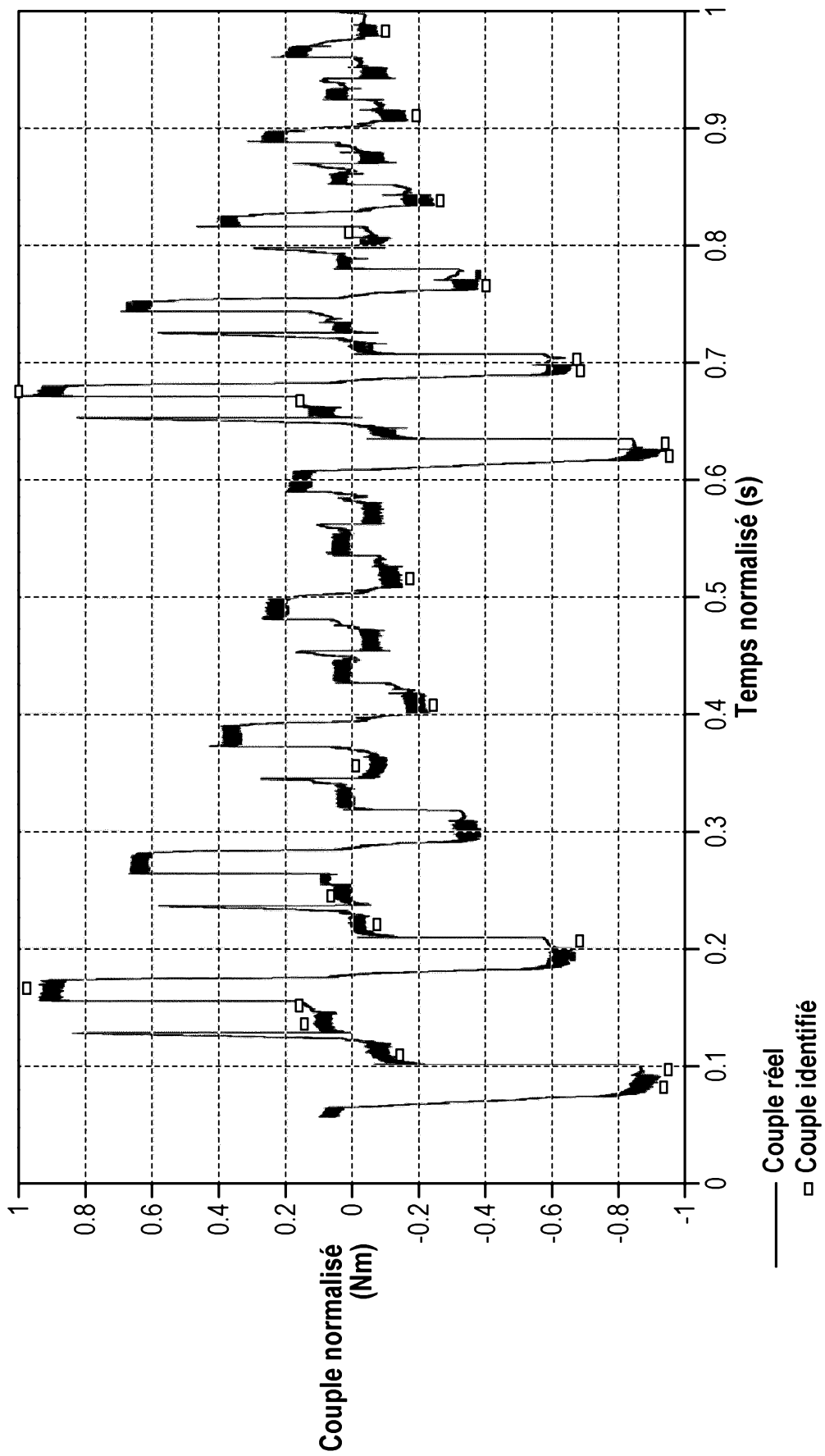


FIG. 7a

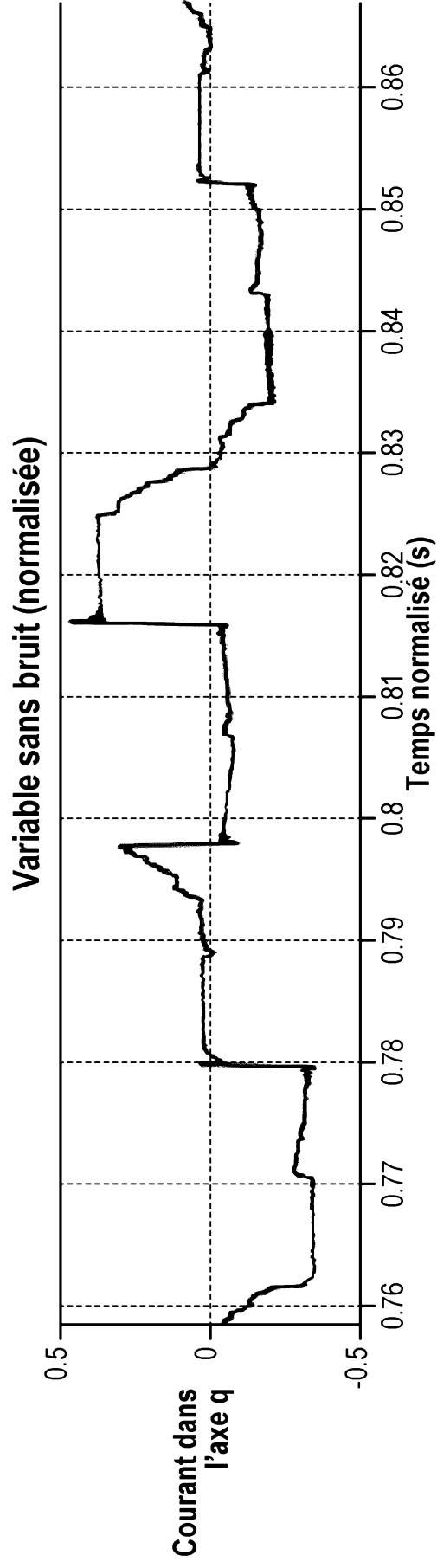
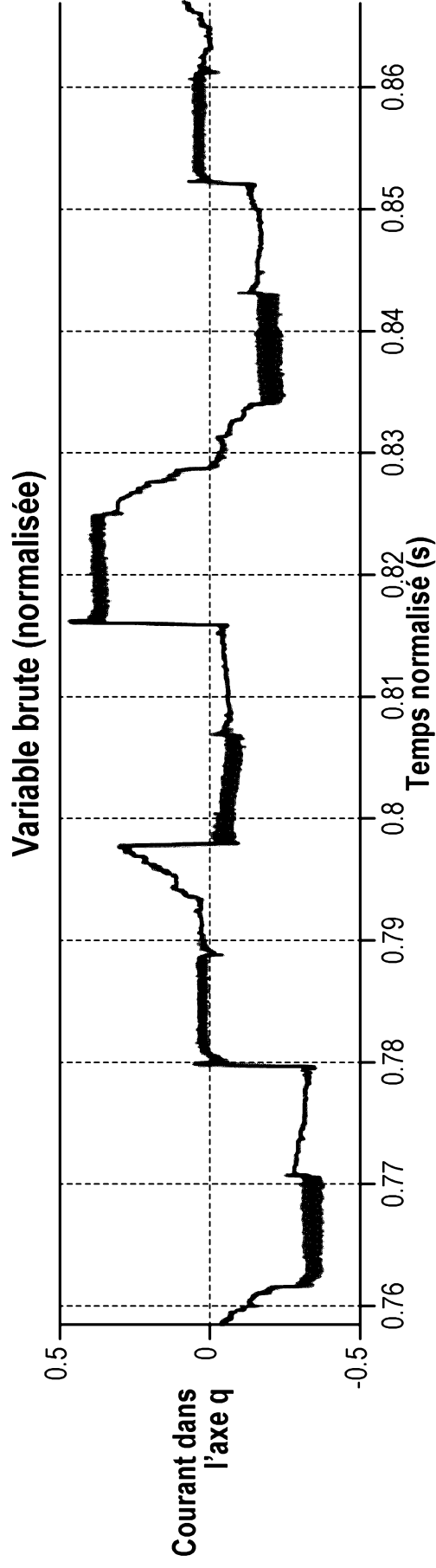


FIG. 7b

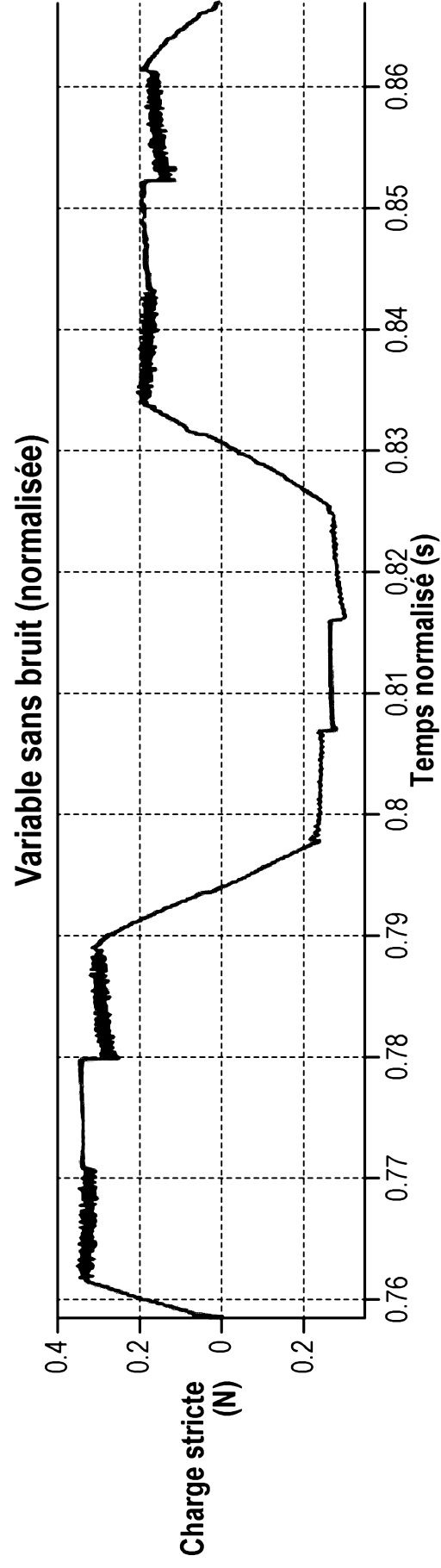
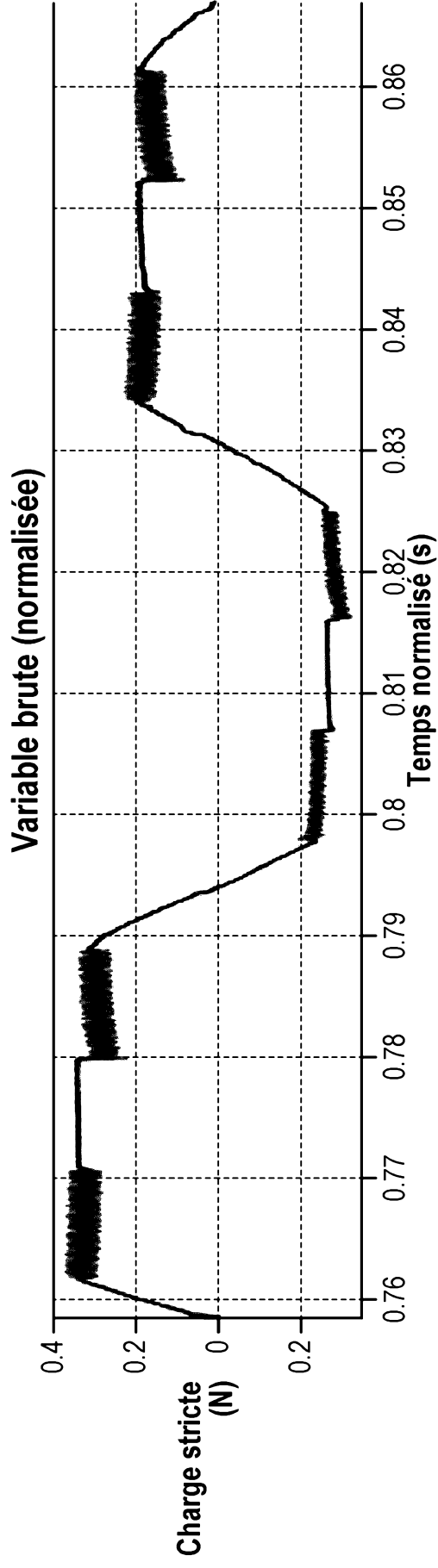


FIG. 8

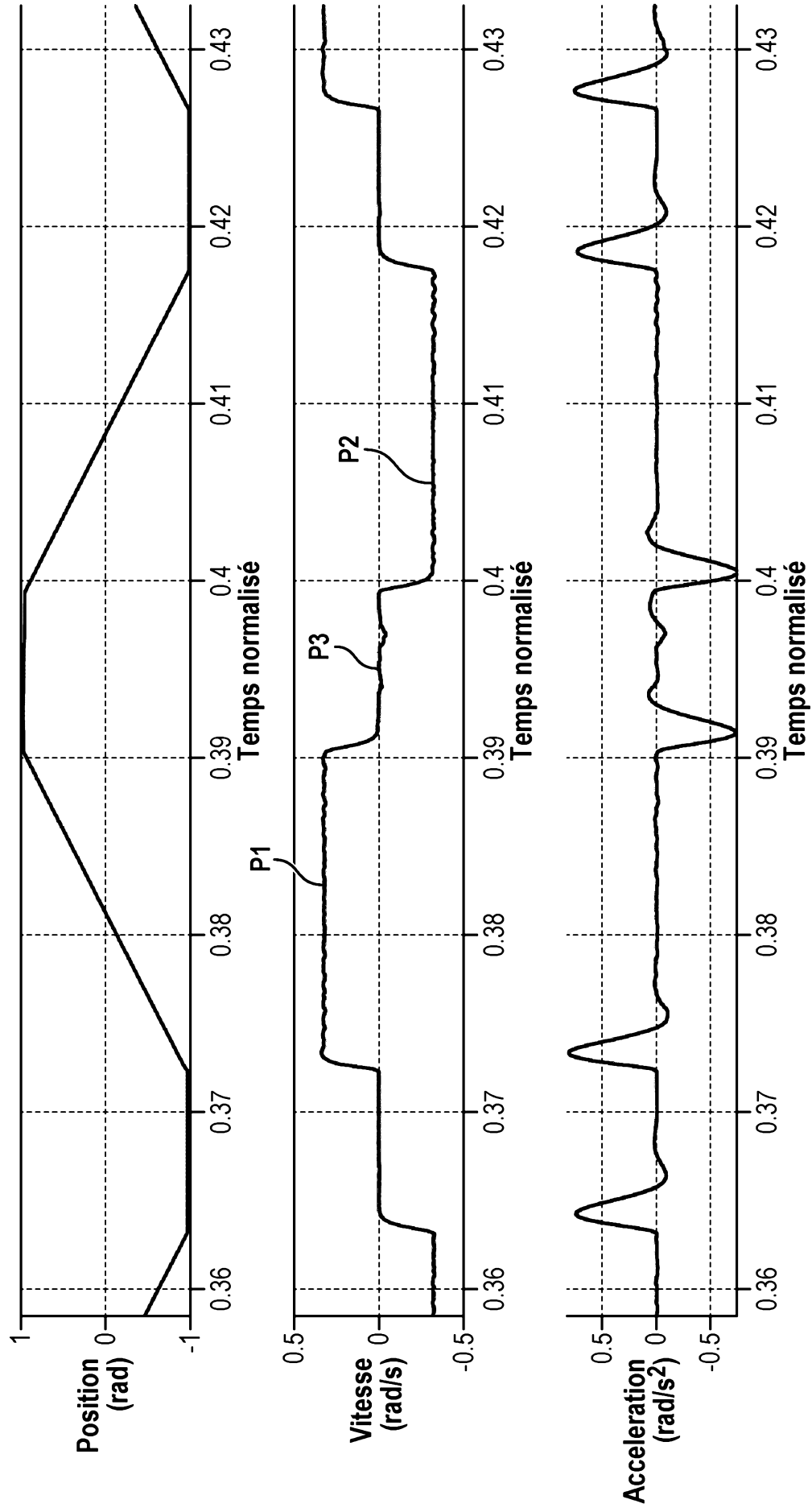
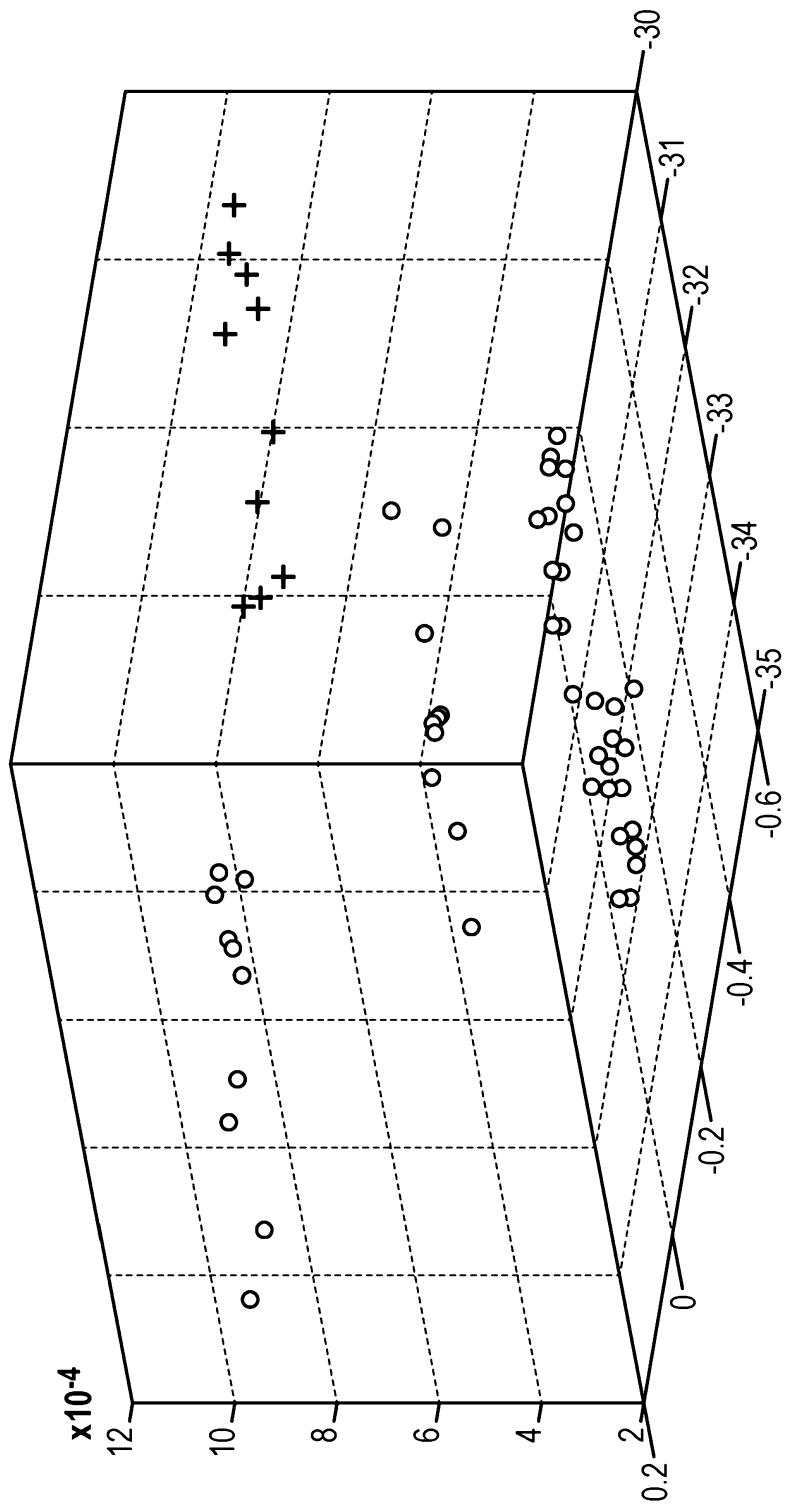


FIG. 9

Analyse en composante principale



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

FR 2 966 124 A1 (SAGEM DEFENSE SECURITE [FR]) 20 avril 2012 (2012-04-20)

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

BRUNO P LEAO ET AL: "Aircraft flap and slat systems health monitoring using Statistical Process Control techniques", AEROSPACE CONFERENCE, 2009 IEEE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 7 mars 2009 (2009-03-07), pages 1-8, XP031450258, ISBN: 978-1-4244-2621-8

BYINGTON C S ET AL: "A model-based approach to prognostics and health management for flight control actuators", AEROSPACE CONFERENCE, 2004. PROCEEDINGS. 2004 IEEE, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, vol. 6, 6 mars 2004 (2004-03-06), pages 3551-3562, XP010748482, DOI: 10.1109/AERO.2004.1368172 ISBN: 978-0-7803-8155-1

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

NEANT