

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

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2013/171427 A1

(43) Date de la publication internationale
21 novembre 2013 (21.11.2013)

WIPO | PCT

- (51) Classification internationale des brevets :
G05B 23/02 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2013/051059
- (22) Date de dépôt international :
15 mai 2013 (15.05.2013)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1254506 16 mai 2012 (16.05.2012) FR
- (71) Déposant : SNECMA [FR/FR]; 2 Boulevard du Général
Martial Valin, F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeurs : MASSE, Jean-Rémi, André; Sncma PI
(AJI), Rond-Point René Ravaud-Réau, F-77550 Moissy-
Cramayel Cedex (FR). BEAUSEROY, Pierre, Jean,
Emile; 11, rue Dominique, F-10000 Troyes (FR). BOU-
LET, Xavier; Sncma PI (AJI), Rond-Point René Ravaud-

Réau, F-77550 Moissy-cramayel Cedex (FR). GRALL-
MAES, Edith; 5 rue des Baudons, F-10120 Saint-Pouange
(FR). HMAD, Ouadi; 5, résidence Boulains, F-77130
Montereau Fault Yonne (FR).

(74) Mandataires : GEVERS FRANCE et al.; 81 boulevard
Lazare Carnot, E 6, F-31000 Toulouse (FR).

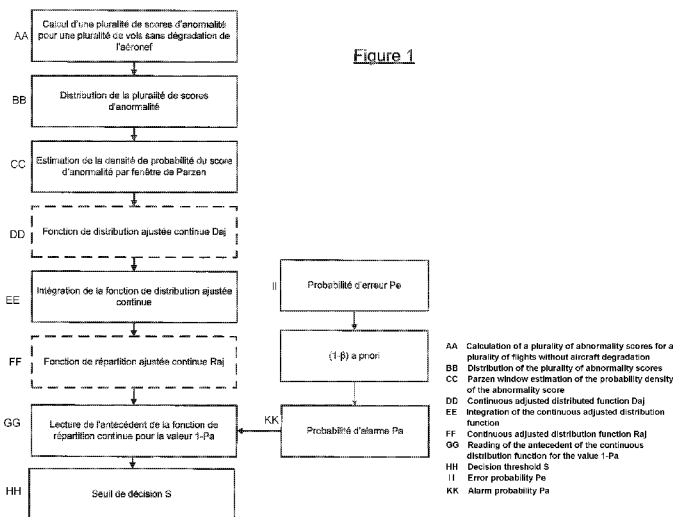
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,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

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : METHOD FOR MONITORING A DEGRADATION OF AN ON-BOARD DEVICE OF AN AIRCRAFT WITH AU-
TOMATIC DETERMINATION OF A DECISION THRESHOLD

(54) Titre : PROCÉDÉ DE SURVEILLANCE D'UNE DÉGRADATION D'UN DISPOSITIF EMBARQUE D'UN AÉRONEF
AVEC DÉTERMINATION AUTOMATIQUE D'UN SEUIL DE DÉCISION



(57) Abstract : The invention relates to a method for monitoring a degradation of an on-board device of an aircraft, comprising a step of comparing an abnormality score obtained for a given flight of the aircraft with a decision threshold (S), and a step of emitting an alarm in the event of the decision threshold (S) being exceeded, the decision threshold (S) being automatically determined for a given alarm probability P_a corresponding to the probability that an alarm is emitted during the monitoring method while the on-board device is in good condition, by means of the following steps: a step of calculating a plurality of abnormality scores for a plurality of flights of the aircraft without degradation in such a way as to obtain a distribution of the probability density of the abnormality score, the distribution being specific to the physical nature of the on-board device; a step of adjusting the distribution by a non-parametric estimator of the probability density in such a way as to obtain a continuous adjusted distribution function; a step of calculating a continuous adjusted spread function from the continuous adjusted distribution function; and a step of reading the antecedent of the continuous adjusted spread function for the value $1-P_a$, the antecedent corresponding to the decision threshold (S).

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



WO 2013/171427 A1



GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

Un procédé de surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef comprenant une étape de comparaison d'un score d'anormalité obtenu pour un vol donné de l'aéronef à un seuil de décision (S) et une étape d'émission d'une alarme en cas de dépassement du seuil de décision (S), le seuil de décision (S) étant déterminé automatiquement pour une probabilité d'alarme donnée P_a , correspondant à la probabilité qu'une alarme soit émise au cours du procédé de surveillance alors que le dispositif embarqué est sain, au moyen des étapes suivantes : une étape de calcul d'une pluralité de scores d'anormalité pour une pluralité de vols de l'aéronef sans dégradation de manière à obtenir une distribution de la densité de probabilité du score d'anormalité, la distribution étant propre à la nature physique du dispositif embarqué; une étape d'ajustement de la distribution par un estimateur non paramétrique de la densité de probabilité de manière à obtenir une fonction de distribution ajustée continue; une étape de calcul d'une fonction de répartition ajustée continue à partir de la fonction de distribution ajustée continue; et une étape de lecture de l'antécédent de la fonction de répartition ajustée continue pour la valeur $1-P_a$, l'antécédent correspondant au seuil de décision (S).

**PROCEDE DE SURVEILLANCE D'UNE DEGRADATION D'UN DISPOSITIF EMBARQUE D'UN
AERONEF AVEC DETERMINATION AUTOMATIQUE D'UN SEUIL DE DECISION**

5 DOMAINE TECHNIQUE GENERAL ET ART ANTERIEUR

La présente invention concerne le domaine de la surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef tel que, par exemple, un système de lubrification d'un turboréacteur, un
10 doseur pour l'alimentation en carburant d'un turboréacteur, une chaîne d'acquisition redondée d'un turboréacteur, un filtre à particules, etc.

Pour surveiller un dispositif embarqué, il est connu de former un indicateur qui est caractéristique d'une dégradation du dispositif embarqué. Cet indicateur est connu de l'homme du métier sous la
15 dénomination de score d'anormalité. De manière classique, un score d'anormalité est formé à partir de mesures de paramètres physiques du dispositif embarqué tels que, par exemple, une position géométrique, un courant de commande, un angle d'ouverture, une température, etc. Le score d'anormalité est caractéristique du degré de dommage de la dégradation. De préférence, un score d'anormalité est formé à chaque vol de l'aéronef.

20 A titre d'exemple, on connaît, par la demande de brevet déposée en France le 5 décembre 2011 sous le numéro 1161175 de la société SNECMA, un procédé de surveillance d'un doseur de carburant d'un turboréacteur dans lequel la dégradation relative à la dérive du courant de repos d'une servovalve commandant le doseur de carburant est surveillée. Pour former le score
25 d'anormalité qui est caractéristique de la dérive du courant de repos de la servovalve, on réalise une pluralité de mesures du courant de commande moyen et on en prend la norme.

Pour déterminer si le dispositif embarqué est effectivement dégradé, le procédé de surveillance comporte une étape de comparaison d'un score d'anormalité obtenu pour un vol donné de
30 l'aéronef à un seuil de décision et une étape d'émission d'une alarme en cas de dépassement du seuil de décision. Ainsi, en suivant l'évolution du score d'anormalité, on détecte si le degré de dégradation augmente et on peut anticiper le risque de panne du dispositif embarqué et améliorer la gestion des opérations de maintenance.

35 Le réglage du seuil de décision pour une dégradation donnée est crucial étant donné, d'une part, qu'un seuil de décision trop faible induit l'émission d'alarmes fréquentes alors que la dégradation n'est pas avérée (alarme fausse) et, d'autre part, qu'un seuil de décision trop élevé inhibe l'émission d'alarmes alors que la dégradation est avérée (non détection).

40 De manière classique, pour chaque dégradation que l'on souhaite détecter, on définit de manière empirique la valeur du seuil de décision. Afin d'assurer une sécurité maximale, la valeur des seuils de décision est généralement sous évaluée afin de minimiser le risque de non détection. Il en

5 résulte que le nombre d'alarmes fausses demeure élevé ce qui présente un inconvénient pour les compagnies aériennes qui sont contraintes à mettre en œuvre de manière fréquente une opération de maintenance alors que le dispositif aéronautique embarqué n'est pas dégradé. Pour éliminer cet inconvénient, les compagnies aériennes imposent aux fabricants de dispositifs embarqués des cahiers des charges imposant de limiter le risque d'erreur. Compte tenu de la précision exigée, toute définition empirique d'un seuil de décision pour un procédé de surveillance de pannes est alors proscrite.

10 Il existe ainsi un besoin pour déterminer de manière fiable et précise la valeur d'un seuil de décision pour la surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef.

PRESENTATION GENERALE DE L'INVENTION

15 L'invention concerne un procédé de surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef, mise en œuvre par un calculateur, le degré de la dégradation du dispositif embarqué étant défini par un score d'anormalité formé à partir de mesures de paramètres physiques du dispositif embarqué, le procédé de surveillance comprenant une étape de comparaison d'un score d'anormalité obtenu pour un vol donné de l'aéronef à un seuil de décision et une étape d'émission d'une alarme en cas de dépassement du seuil de décision, le seuil de décision étant déterminé automatiquement pour une probabilité d'alarme donnée P_a , correspondant à la probabilité qu'une alarme soit émise au cours du procédé de surveillance alors que le dispositif embarqué est sain, au moyen des étapes suivantes :

- 25 - une étape de calcul d'une pluralité de scores d'anormalité pour une pluralité de vols de l'aéronef sans dégradation de manière à obtenir une distribution de la densité de probabilité du score d'anormalité, la distribution étant propre à la nature physique du dispositif embarqué ;
- une étape d'ajustement de la distribution par un estimateur non paramétrique de la densité de probabilité de manière à obtenir une fonction de distribution ajustée continue ;
- 30 - une étape de calcul d'une fonction de répartition ajustée continue à partir de la fonction de distribution ajustée continue ; et
- une étape de lecture de l'antécédent de la fonction de répartition ajustée continue pour la valeur $1-P_a$, l'antécédent correspondant au seuil de décision.

35 Grâce à l'invention, on détermine le seuil de décision de manière automatique avec une grande précision en fonction de la probabilité d'alarme P_a correspondant aux exigences des compagnies aériennes. Un tel procédé est fiable par comparaison aux procédés selon l'art antérieur ce qui permet de détecter de manière précise toute dégradation d'un dispositif embarqué et d'anticiper toute panne de ce dernier lors de la surveillance.

40

De manière préférée, l'estimateur non paramétrique de la densité de probabilité est un estimateur par fenêtre de Parzen. Un tel estimateur est très avantageux car il accorde la même importance à la partie centrale de la distribution qu'aux parties extrêmes qui sont les plus critiques pour la surveillance de dégradation dans le domaine aéronautique pour lequel les exigences en termes de fiabilités sont importantes.

De préférence, un estimateur par fenêtre de Parzen est défini par sa largeur de fenêtre h . De manière préférée, la distribution étant formée à partir d'un nombre N de scores d'anormalité pour une pluralité de vols de l'aéronef sans dégradation, la distribution ayant un écart-type estimé $\hat{\sigma}$, la fenêtre de Parzen possède une largeur h définie selon la formule suivante :

$$h = \hat{\sigma} \left(\frac{4}{3 * N} \right)^{1/5}$$

Une telle largeur h de fenêtre de Parzen permet de garantir une précision de l'ajustement pour la surveillance de dispositifs embarqués ce qui garantit une précision du seuil de décision déterminé.

Selon un aspect préféré de l'invention, la probabilité d'alarme Pa est obtenue par la formule suivante :

$$Pa = \frac{Pe}{(1 - Pe)} \cdot (1 - \beta)_{a \text{ priori}} \cdot \frac{Pd}{(1 - Pd)}$$

formule dans laquelle :

Pe correspond à la probabilité que le dispositif embarqué soit sain alors qu'une alarme est émise ;
 Pd correspond à la probabilité d'une dégradation pour un vol donné ; et

$(1 - \beta)_{a \text{ priori}}$ correspond à la probabilité de détection d'une dégradation a priori.

De manière avantageuse, on détermine la probabilité d'alarme Pa en fonction d'une probabilité d'erreur Pe qui correspond aux exigences pratiques des compagnies aériennes qui souhaitent diminuer le nombre d'étapes de maintenance inutiles des dispositifs embarqués.

De préférence encore, le procédé comporte :

- une étape de mise en œuvre du procédé de surveillance d'une dégradation du dispositif embarqué, avec le seuil de décision préalablement déterminé, pour une pluralité de scores d'anormalité formés pour une pluralité de vols de l'aéronef avec dégradation pour en déduire une probabilité de détection d'une dégradation a posteriori $(1 - \beta)_{a \text{ posteriori}}$
- une étape de détermination d'une nouvelle probabilité d'alarme Pa en fonction de la probabilité de détection d'une dégradation a posteriori $(1 - \beta)_{a \text{ posteriori}}$ et
- une étape de détermination d'un nouveau seuil de décision affiné à partir de la nouvelle probabilité d'alarme Pa .

Ces étapes permettent avantageusement d'affiner la valeur du seuil de décision de manière rapide et fiable lorsque la probabilité d'alarme P_a est déterminée en fonction d'une probabilité d'erreur P_e .

5 **PRESENTATION DES FIGURES**

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et se référant aux dessins annexés sur lesquels :

- 10 - la figure 1 est un diagramme schématique des étapes de détermination automatique du seuil de décision selon l'invention ;
- la figure 2 est un diagramme schématique des étapes de détermination automatique du seuil de décision selon l'invention avec une étape d'affinage du seuil de décision ;
- la figure 3 représente la distribution de scores d'anormalité obtenus pour un calculateur embarqué d'un aéronef pour une pluralité de vols sans dégradation, la courbe représentant un ajustement de la distribution obtenue ;
- 15 - la figure 4 représente la fonction de répartition issue de la distribution de la figure 3, la courbe représentant un ajustement de la fonction de répartition ;
- la figure 5 est un diagramme schématique de l'étape d'affinage de la valeur du seuil de décision ;
- 20 - la figure 6 est une comparaison de différents types d'ajustements (gaussien, gamma, Parzen) de la fonction de répartition ; et
- la figure 7 est une comparaison de différents seuils de décision obtenus en fonction du type d'ajustement.

25 Il faut noter que les figures exposent l'invention de manière détaillée pour mettre en œuvre l'invention, lesdites figures pouvant bien entendu servir à mieux définir l'invention le cas échéant.

DESCRIPTION D'UN OU PLUSIEURS MODES DE REALISATION ET DE MISE EN OEUVRE

30 La détermination automatique d'un seuil de décision va être présentée pour un procédé de surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef tel que connu de l'art antérieur, par exemple, par la demande de brevet sous le numéro 1161175 de la société SNECMA.

35 De manière connue, le degré de dégradation du dispositif embarqué est défini par un score d'anormalité obtenu par calcul au moyen de mesures de paramètres physiques du dispositif embarqué tel que présenté précédemment. De manière préférée, le score d'anormalité est formé par un calculateur embarqué de l'aéronef et relié au dispositif embarqué par une liaison de communication. De manière connue, comme présenté précédemment, le procédé de surveillance
40 comprend une étape de comparaison d'un score d'anormalité obtenu pour un vol donné de

l'aéronef à un seuil de décision et une étape d'émission d'une alarme en cas de dépassement du seuil de décision.

5 Lors de l'émission d'une alarme, une étape de maintenance du dispositif embarqué doit être mise en œuvre par la compagnie aérienne afin d'éviter une panne dudit dispositif embarqué.

Probabilité d'alarme

10 Le réglage automatique d'un seuil de décision est défini pour une probabilité d'alarme donnée P_a . Par probabilité d'alarme, on entend la probabilité qu'une alarme soit émise au cours du procédé de surveillance alors que le dispositif embarqué est sain, c'est-à-dire, sans dégradation avérée. Autrement dit, une probabilité d'alarme P_a de 1% correspond à l'émission d'une alarme pour 100 vols sans dégradation.

15 En pratique, la probabilité d'alarme P_a n'est pas directement connue. En effet, les cahiers des charges des compagnies aériennes imposent comme critère une probabilité d'erreur P_e qui correspond à la probabilité que le dispositif embarqué soit sain alors qu'une alarme est émise. Autrement dit, une probabilité d'erreur P_e de 1% correspond à un dispositif embarqué sain pour 100 alarmes émises.

20

En pratique, lorsqu'une alarme est émise par le procédé de surveillance, une opération de maintenance est mise en œuvre par la compagnie aérienne. Une limitation de la probabilité d'erreur P_e permet ainsi aux compagnies aériennes de limiter le nombre d'opérations de maintenance d'un dispositif embarqué qui est sain, de telles opérations engendrant des coûts d'exploitation inutiles.

25

De manière préférée, la probabilité d'alarme P_a est déterminée en fonction de la probabilité d'erreur P_e grâce à la formule de probabilité conditionnelle (F1) ci-dessous.

30

$$(F1) P_a = \frac{P_e}{(1 - P_e)} \cdot (1 - \beta)_{\text{a priori}} \cdot \frac{P_d}{(1 - P_d)}$$

La formule (F1) comporte les paramètres suivants :

- β correspond à la probabilité de non-détection d'une dégradation pour un vol donné, $1 - \beta$ correspondant alors à la probabilité de détection d'une dégradation ; et
- 35 - P_d correspond à la probabilité d'une dégradation pour un vol donné.

La formule (F1) se déduit des équations de probabilité conditionnelle dans lesquelles la probabilité P_a correspond à une alarme sachant le dispositif sain ($P_a = P(\text{Alarme}|\text{Sain})$) et la probabilité P_e correspond à un dispositif sain sachant qu'une alarme est émise ($P_e = P(\text{Sain}|\text{Alarme})$).

$$5 \quad P(\text{Sain}|\text{Alarme}) = \frac{P(\text{Sain}) \cap P(\text{Alarme})}{P(\text{Alarme})} = \frac{P(\text{Alarme} \cap \text{Sain})}{P(\text{Alarme})} = \frac{P(\text{Alarme} \cap \text{Sain})}{P(\text{Sain})} \cdot \frac{P(\text{Sain})}{P(\text{Alarme})}$$

$$= P(\text{Alarme}|\text{Sain}) \cdot \frac{P(\text{Sain})}{P(\text{Alarme})} = P_a \cdot \frac{P(\text{Sain})}{P(\text{Alarme})}$$

Autrement dit

$$P(\text{Alarme}) = P_a \cdot \frac{P(\text{Sain})}{P(\text{Sain}|\text{Alarme})} = P_a \cdot \frac{(1 - P_d)}{P_e}$$

10

En outre, comme

$$P(\text{Alarme}) = P(\text{Alarme} \cap \text{Sain}) + P(\text{Alarme} \cap \text{Dégradé})$$

$$P(\text{Alarme}) = P(\text{Alarme}|\text{Sain}) \cdot P(\text{Sain}) + P(\text{Alarme}|\text{Dégradé}) \cdot P(\text{Dégradé})$$

15 Avec

$$P(\text{Dégradé}) = P_d$$

$$P(\text{Sain}) = 1 - P_d$$

$$P(\text{Alarme}|\text{Dégradé}) = 1 - \beta$$

$$P(\text{Alarme}|\text{Sain}) = P_a$$

20 $P(\text{Sain}|\text{Alarme}) = P_e$

$$P(\text{Alarme}) = P(\text{Alarme}|\text{Sain}) \cdot P(\text{Sain}) + P(\text{Alarme}|\text{Dégradé}) \cdot P(\text{Dégradé})$$

$$P(\text{Alarme}) = P_a \cdot (1 - P_d) + (1 - \beta) \cdot P_d$$

$$P(\text{Alarme}) = P_a \cdot (1 - P_d) + (1 - \beta) \cdot P_d$$

25

Grâce aux deux égalités relatives à $P(\text{Alarme})$, on en déduit alors (F1).

Dans la formule (F1), la probabilité d'une dégradation pour un vol donné P_d est connue par expérimentation ou estimation et peut, par exemple, être de l'ordre de 10^{-7} . La probabilité de

30 détection d'une dégradation $(1 - \beta)_{\text{a priori}}$ est fixée « a priori » à 1 et affinée par itération comme cela sera détaillé par la suite afin d'améliorer la précision du seuil de décision.

A titre d'exemple, on obtient classiquement une probabilité d'alarme P_a de l'ordre de $10E-9$ pour une probabilité d'erreur P_e exigée de l'ordre de 1%, une probabilité de détection d'une dégradation $(1 - \beta)_{a\ priori}$ de l'ordre de 1 et une probabilité d'une dégradation pour un vol P_d de l'ordre de 10^{-7} .

5

Score d'anormalité, distribution et fonction de répartition

Le dispositif embarqué sur l'aéronef comporte de manière classique une pluralité de capteurs afin de mesurer des paramètres physiques du dispositif embarqué (courant de commande, positions géométriques, températures, etc.). De manière classique, certains des paramètres physiques mesurés sont utilisés pour former un score d'anormalité qui est fonction du degré de dégradation du dispositif embarqué (erreur de positionnement, dérive du courant de commande, surchauffe, etc.). Un score d'anormalité est obtenu par transformation d'une ou plusieurs mesures de paramètres physiques du dispositif embarqué. Par exemple, les mesures obtenues sont normées par valeur absolue ou par la norme de Mahalanobis.

10
15

Comme illustré à la figure 1, le procédé selon l'invention comporte une étape de calcul d'une pluralité de scores d'anormalité pour une pluralité de vols de l'aéronef sans dégradation. Pour des vols de l'aéronef pour lequel le dispositif embarqué est sain, on calcul une pluralité de scores d'anormalité de manière classique à partir de mesures de paramètres physiques du dispositif embarqué réalisées au cours de chaque vol de l'aéronef. Les valeurs des scores d'anormalité varient en fonction des vols de l'aéronef et de la nature physique du dispositif embarqué.

20

La distribution de la densité de probabilité du score d'anormalité est représentée sur la figure 3 par un histogramme. Comme illustré sur cette figure, un score d'anormalité égal à 2 est le plus probable (densité de probabilité de 0.8). Plus le nombre de scores d'anormalité est élevé, plus la distribution est précise. Malheureusement, un nombre élevé de scores d'anormalité requiert un grand nombre de vols d'aéronef ce qui n'est pas souhaité. Dans cet exemple, les scores d'anormalité ont été obtenus sur 200 à 500 vols.

25
30

La probabilité d'alarme P_a , qui pour rappel correspond à la probabilité qu'une alarme soit émise au cours du procédé de surveillance alors que le dispositif embarqué est sain, est classiquement de l'ordre de $10E-9$. Autrement dit, le seuil de décision S conforme à la probabilité d'alarme P_a est une valeur de score d'anormalité au-dessus duquel sont $10E-9$ des scores d'anormalité obtenus pour des vols sans dégradation.

35

Même si l'on dispose d'un très grand nombre de scores d'anormalité, la distribution de la figure 3 n'est pas précise pour les quantiles de faible valeur, par exemple, pour un quantile de $10E-9$. Par analyse graphique, on peut uniquement déduire que la valeur du seuil de décision S est supérieure à 5,5 et doit être située dans la fenêtre K représentée à la figure 3. En effet, la distribution est

40

obtenue au moyen de valeurs discrètes de scores d'anormalité ce qui limite la précision de la distribution.

Ajustement de la fonction de distribution

5

Afin d'améliorer l'interprétation de la distribution, en référence à la figure 1, le procédé selon l'invention comporte une étape d'ajustement de la distribution par un estimateur de la densité de probabilité de manière à obtenir une fonction de distribution ajustée continue Daj représentée sur la figure 3. Selon l'invention, une étape d'ajustement de la fonction de distribution par fenêtre de Parzen permet d'approcher de manière précise la fonction de répartition obtenue de manière discrète.

10

Cette approche non paramétrique permet d'obtenir un ajustement proche de la distribution car un ajustement par fenêtre de Parzen accorde de manière avantageuse un même poids aux queues de la distribution qu'à la partie centrale ce qui permet d'interpréter de manière précise les quantiles extrêmes.

15

Pour rappel, l'ajustement par fenêtre Parzen est un ajustement non paramétrique pour estimer la densité de probabilité d'une variable aléatoire. Il est communément nommé estimation par noyau de la densité, parce que des fonctions dites « noyaux » sont utilisées pour estimer la densité de probabilité d'une variable aléatoire. L'expression analytique de la densité de probabilité de Parzen est :

20

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{N * h} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x - x_i}{h}\right)$$

Avec K et h, respectivement, la fonction noyau et la largeur ou profondeur de la fenêtre de Parzen.

25

Le concept de l'ajustement par fenêtre de Parzen est d'estimer la densité de probabilité d'une variable aléatoire pour chaque valeur de x grâce à une fonction noyau K() qui est la plupart du temps une fonction de densité de probabilité. Plus l'observation x est proche des échantillons d'apprentissages x_i plus la contribution de x dans la fonction noyau $\hat{f}_h(x)$ centré sur x_i est importante. Inversement, moins l'observation x est proche des échantillons d'apprentissages x_i plus la contribution de x dans la fonction noyau $\hat{f}_h(x)$ centré sur x_i est négligeable. Ensuite, l'estimateur de la fonction de densité de probabilité est formé par une moyenne des valeurs des fonctions de noyau. Cet estimateur est régi par un paramètre de lissage « h » qui est nommé largeur ou profondeur de la fenêtre. L'estimation de densité de probabilité, qui dépend du paramètre de lissage « h », présente de bonnes propriétés statistiques. Sous certaines conditions non contraignantes sur « h », l'estimateur de fenêtre de Parzen est consistant.

35

Il existe plusieurs fonctions noyaux (gaussien, box, triangle...) mais la performance de la fenêtre de Parzen repose principalement sur le choix de la largeur ou profondeur de fenêtre « h ». Un compromis entre le biais et la variance de l'estimateur doit être effectué pour choisir la largeur « h ».

5

La largeur de la fenêtre peut être choisie par validation croisée, en maximisant la probabilité de la fonction du noyau. Dans cet exemple, un noyau gaussien (F2) a été utilisé. Quant à la largeur ou profondeur de la fenêtre, elle repose sur une estimation de l'écart-type $\hat{\sigma}$ et de la taille N de l'ensemble des données d'apprentissage selon la formule (F3).

10 (F2)
$$K(x) = \frac{e^{(-0.5x^2)}}{\sqrt{2\pi}}$$

(F3)
$$h = \hat{\sigma} \left(\frac{4}{3 * N} \right)^{1/5}$$

15 Un ajustement de Parzen est très proche de la distribution élémentaire observée pour quelques vols comme cela sera présenté par la suite ce qui en fait un ajustement optimal par comparaison aux autres ajustements connus.

20 Contrairement à la distribution discrète obtenue précédemment, la fonction de distribution ajustée Daj est continue ce qui permet de connaître de manière fiable la densité de probabilité du score d'anormalité pour tout score d'anormalité. Cela est très avantageux pour des quantiles de faible valeur pour lesquels les données collectées sont très peu nombreuses.

Fonction de répartition ajustée

25 Pour déterminer la valeur du seuil de décision S de manière simple et rapide, la fonction de distribution ajustée Daj est intégrée de manière classique pour obtenir une fonction de répartition ajustée Raj qui est également continue.

30 La fonction de répartition ajustée Raj de la fonction de distribution ajustée Daj de la figure 3 est représentée sur la figure 4. Pour mémoire, une fonction de répartition F d'une variable aléatoire réelle X est la fonction F_X qui à tout réel x associe $F_X(x) = P(X \leq x)$. En référence à la figure 4, la fonction de répartition possède une valeur de 99% pour un score d'anormalité de 4,5. Ce qui signifie que 99% des scores d'anormalité pour un dispositif sain sont inférieurs à 4,5.

35 Aussi, pour respecter le critère de probabilité d'alarme Pa de l'ordre de 10E-9, il faut lire avec précision l'antécédent de la fonction de répartition ajustée Raj pour laquelle celle-ci est égale à 1-Pa, l'antécédent correspondant au seuil de décision recherché S. En effet, cela signifie que 1-10E-

9 des scores d'anormalité pour un dispositif sain sont inférieurs au seuil de décision S. Autrement dit, $10E-9$ des scores d'anormalité pour un dispositif sain qui peuvent générer une alarme sont supérieurs au seuil de décision S. L'antécédent correspond au seuil de décision S recherché pour la probabilité d'alarme P_a déterminée.

5

Détermination du seuil de décision

En référence à la figure 1, le procédé selon l'invention comporte une étape de lecture de l'antécédent de la fonction de répartition ajustée Raj pour la valeur $1-P_a$. De manière avantageuse, la fonction de répartition ajustée Raj étant continue et bijective, on peut déduire de manière très précise pour quel antécédent la fonction de répartition ajustée Raj prend la valeur $1-P_a$, c'est-à-dire, le seuil de décision S qui est ici égale à 10,5 comme illustré à la figure 3.

10

A titre d'information, il a été représenté sur la figure 6 une comparaison de plusieurs types d'ajustements de la fonction de répartition (ajustement gaussien, ajustement gamma et ajustement de Parzen). Comme représenté sur la figure 6, l'ajustement par la méthode de Parzen est très proche des valeurs de score d'anormalité obtenues pour quelques vols. De manière classique, pour valider la qualité d'un ajustement, on met en œuvre un test de pertinence de l'ajustement connu de l'homme du métier sous la désignation de test de « Kolmogorov-Smirnov ». Dans le cas présent, seul l'ajustement de Parzen passe le test de Kolmogorov-Smirnov, les autres ajustements étant rejetés.

15

20

Cette précision de l'ajustement par fenêtre de Parzen se traduit par une précision de détermination du seuil de décision. En effet, comme illustré à la figure 7, on obtient un seuil de décision de 6,5 avec un ajustement gaussien, un seuil de décision de 8,2 avec un ajustement gamma et un seuil de décision de 10,5 avec un ajustement par fenêtre de Parzen.

25

Affinage de la valeur du seuil de décision

Il a été précédemment présenté une détermination du seuil de décision dans lequel la probabilité d'alarme P_a est connue ou estimée à partir de la probabilité d'erreur P_e . Lorsque la probabilité d'alarme P_a est estimée, on peut mettre en œuvre de manière optionnelle une étape d'affinage du seuil de décision S par affinage de la probabilité de détection d'une dégradation $(1 - \beta)$ comme illustré sur les diagrammes schématiques des figures 2 et 5.

30

35

Comme illustré à la figure 2, on met en œuvre le procédé de surveillance avec le seuil de décision S tel que précédemment déterminé pour une pluralité de scores d'anormalité obtenus lors de vols avec dégradation, de préférence, obtenus par simulation. Au cours du procédé de surveillance, les différents scores d'anormalité sont comparés au seuil de décision S ce qui permet de déduire « a

posteriori » la probabilité de détection d'une dégradation $(1 - \beta)$. En effet, il suffit d'observer le nombre d'alarmes émises par rapport au nombre de vols avec dégradation surveillés.

Comme illustré à la figure 2, par itération, on remplace dans les étapes de détermination du seuil de décision la valeur $(1 - \beta)_{\text{a priori}}$ par la valeur $(1 - \beta)_{\text{a posteriori}}$ obtenue au cours de l'affinage afin d'obtenir une nouvelle valeur du seuil de décision S plus précise. L'étape d'affinage peut être itérée afin de converger vers la valeur du seuil de décision S la plus précise.

Dans une mise en œuvre de l'invention, le procédé de surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef, la méthode de détermination automatique d'un seuil de décision et le procédé de génération de dégradations sont mis en œuvre par un calculateur, de préférence, par une pluralité de processeurs du calculateur.

A titre d'exemple, le procédé de surveillance est mis en œuvre pour surveiller un doseur de carburant d'un turboréacteur d'aéronef.

Le processeur de détermination du seuil de décision reçoit une pluralité de scores d'anormalité sans dégradation du processeur de surveillance et détermine, pour une probabilité d'erreur donnée P_e et une probabilité de détection « a priori » d'une dégradation par le procédé de surveillance, le seuil de décision S. Une fois le seuil de décision S déterminé, celui-ci est transmis au processeur de surveillance qui peut alors comparer les scores d'anormalité calculés audit seuil de décision S pour surveiller l'évolution de la dégradation du doseur de carburant au fur et à mesure des vols de l'aéronef.

Pour affiner la valeur du seuil de décision S, le processeur de génération de dégradations simule des données de vol dégradées qui sont soumises au processeur de surveillance qui émet un certain nombre d'alarmes en fonction des données reçues ce qui permet d'en déduire « a posteriori » la probabilité de détection d'une dégradation par le procédé de surveillance. Cette valeur est alors communiquée au processeur de détermination du seuil de décision S qui fournit une nouvelle valeur de seuil de décision S pour la nouvelle probabilité de détection obtenue.

On itère le processus jusqu'à obtenir une convergence de la valeur du seuil de décision S. En pratique, une convergence satisfaisante est obtenue à partir de deux itérations.

L'invention a été présentée pour un doseur de carburant mais elle s'applique à tout dispositif embarqué d'un aéronef.

REVENDICATIONS

5 1. Procédé de surveillance d'une dégradation d'un dispositif embarqué d'un aéronef, mise en œuvre par un calculateur, le degré de la dégradation du dispositif embarqué étant défini par un score d'anormalité formé à partir de mesures de paramètres physiques du dispositif embarqué, le procédé de surveillance comprenant une étape de comparaison d'un score d'anormalité obtenu pour un vol donné de l'aéronef à un seuil de décision (S) et une étape d'émission d'une
10 alarme en cas de dépassement du seuil de décision (S), le seuil de décision (S) étant déterminé automatiquement pour une probabilité d'alarme donnée Pa, correspondant à la probabilité qu'une alarme soit émise au cours du procédé de surveillance alors que le dispositif embarqué est sain, au moyen des étapes suivantes :

- 15 - une étape de calcul d'une pluralité de scores d'anormalité pour une pluralité de vols de l'aéronef sans dégradation de manière à obtenir une distribution de la densité de probabilité du score d'anormalité, la distribution étant propre à la nature physique du dispositif embarqué ;
- 20 - une étape d'ajustement de la distribution par un estimateur non paramétrique de la densité de probabilité de manière à obtenir une fonction de distribution ajustée continue ;
- une étape de calcul d'une fonction de répartition ajustée continue à partir de la fonction de distribution ajustée continue ; et
- une étape de lecture de l'antécédent de la fonction de répartition ajustée continue pour la valeur 1-Pa, l'antécédent correspondant au seuil de décision (S).

25 2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel l'estimateur non paramétrique de la densité de probabilité est un estimateur par fenêtre de Parzen.

30 3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel la distribution étant formée à partir d'un nombre N de scores d'anormalité pour une pluralité de vols de l'aéronef sans dégradation, la distribution ayant un écart-type estimé $\hat{\sigma}$, la fenêtre de Parzen possède une largeur h définie selon la formule suivante :

$$h = \hat{\sigma} \left(\frac{4}{3 * N} \right)^{1/5}$$

35 4. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel la probabilité d'alarme Pa est obtenue par la formule suivante :

$$Pa = \frac{Pe}{(1 - Pe)} \cdot (1 - \beta)_{\text{a priori}} \cdot \frac{Pd}{(1 - Pd)}$$

dans laquelle :

P_e correspond à la probabilité que le dispositif embarqué soit sain alors qu'une alarme est émise ;

P_d correspond à la probabilité d'une dégradation pour un vol donné ; et

$(1 - \beta)_{a \text{ priori}}$ correspond à la probabilité de détection d'une dégradation a priori.

5

5. Procédé selon la revendication 4 comprenant :

- une étape de mise en œuvre du procédé de surveillance d'une dégradation du dispositif embarqué, avec le seuil de décision (S) préalablement déterminé, pour une pluralité de scores d'anormalité formés pour une pluralité de vols de l'aéronef avec

10

dégradation pour en déduire une probabilité de détection d'une dégradation a posteriori $(1 - \beta)_{a \text{ posteriori}}$

- une étape de détermination d'une nouvelle probabilité d'alarme P_a en fonction de la probabilité de détection d'une dégradation a posteriori $(1 - \beta)_{a \text{ posteriori}}$ et

- une étape de détermination d'un nouveau seuil de décision (S) affiné à partir de la nouvelle probabilité d'alarme P_a .

15

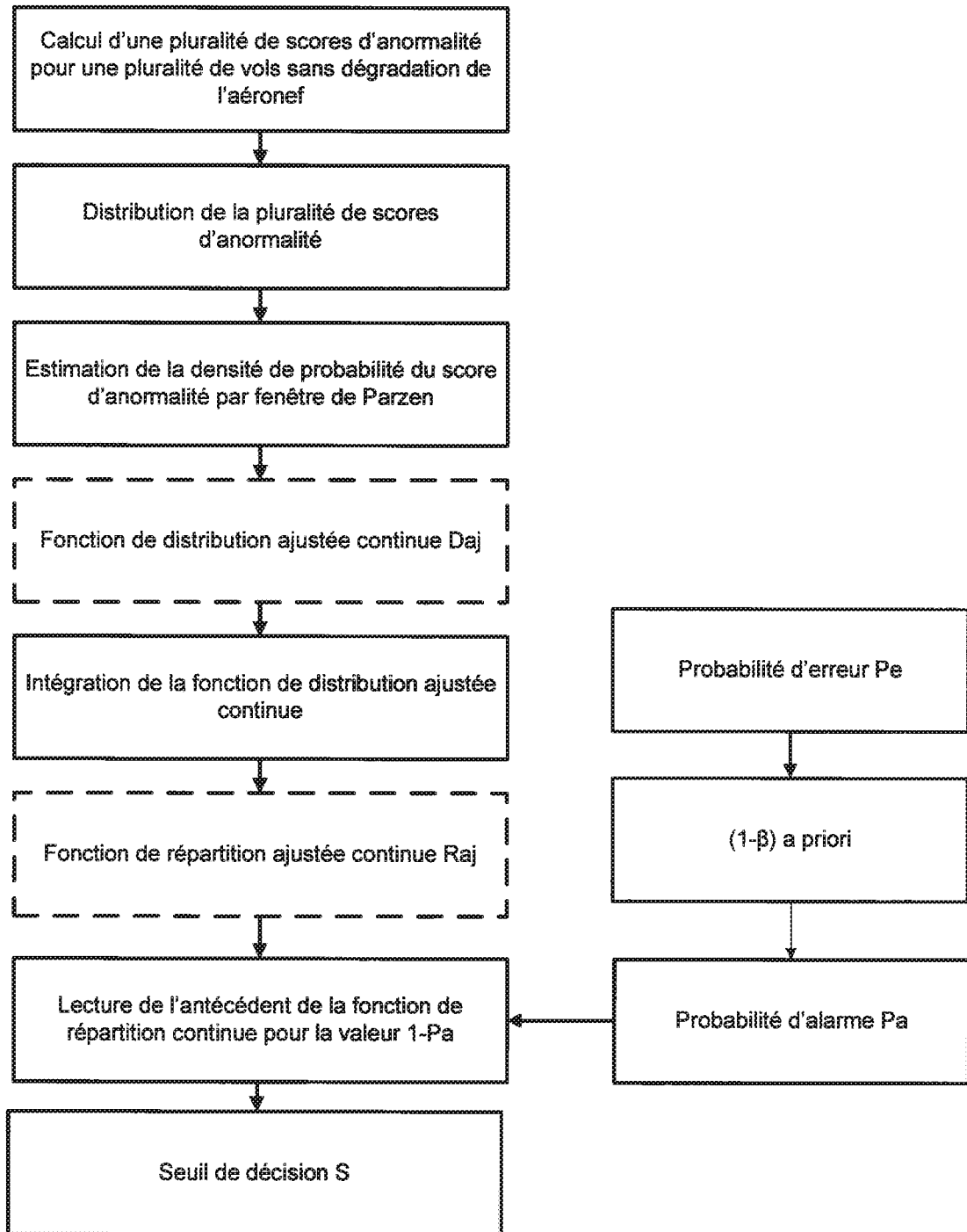


Figure 1

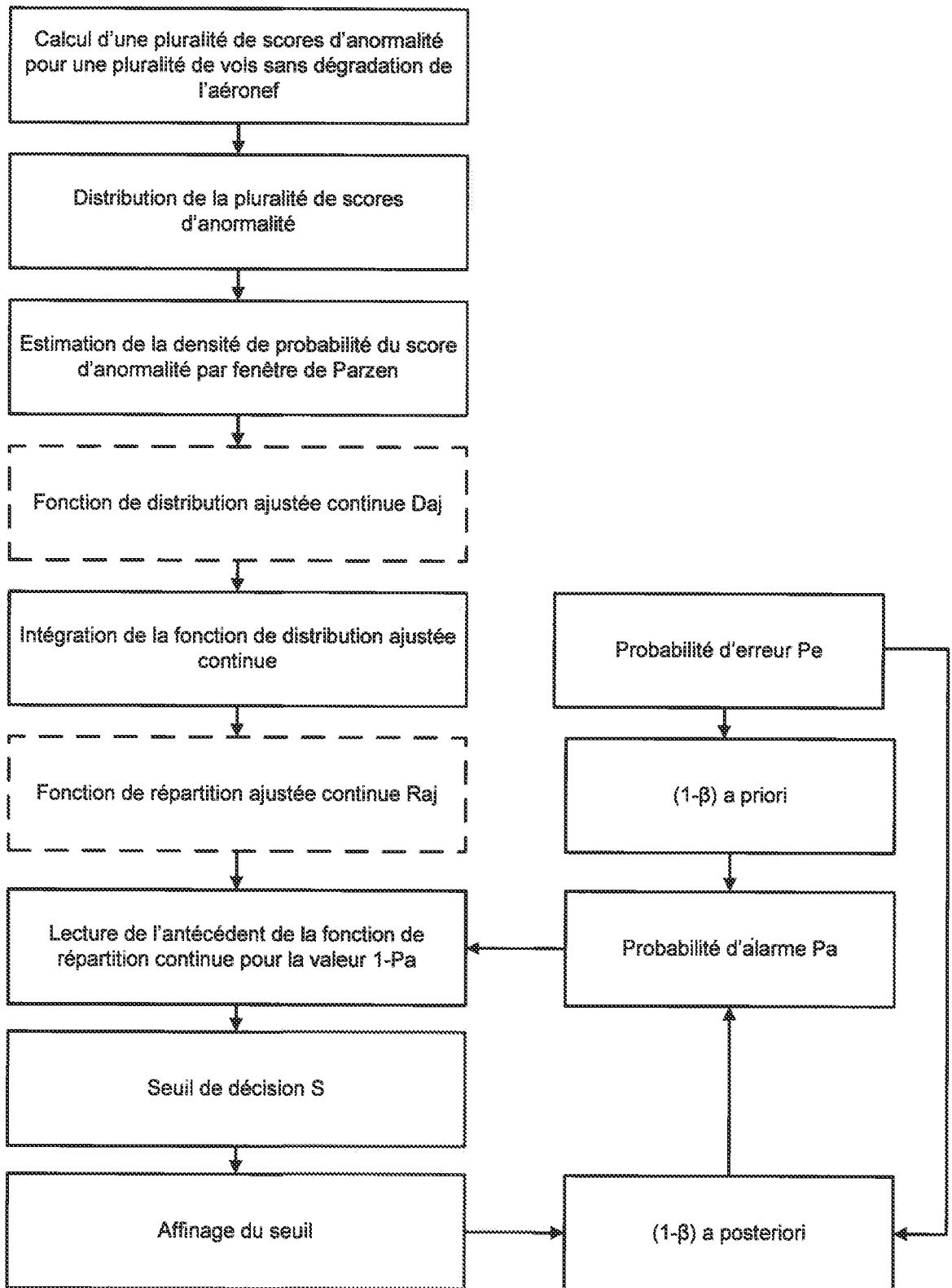


Figure 2

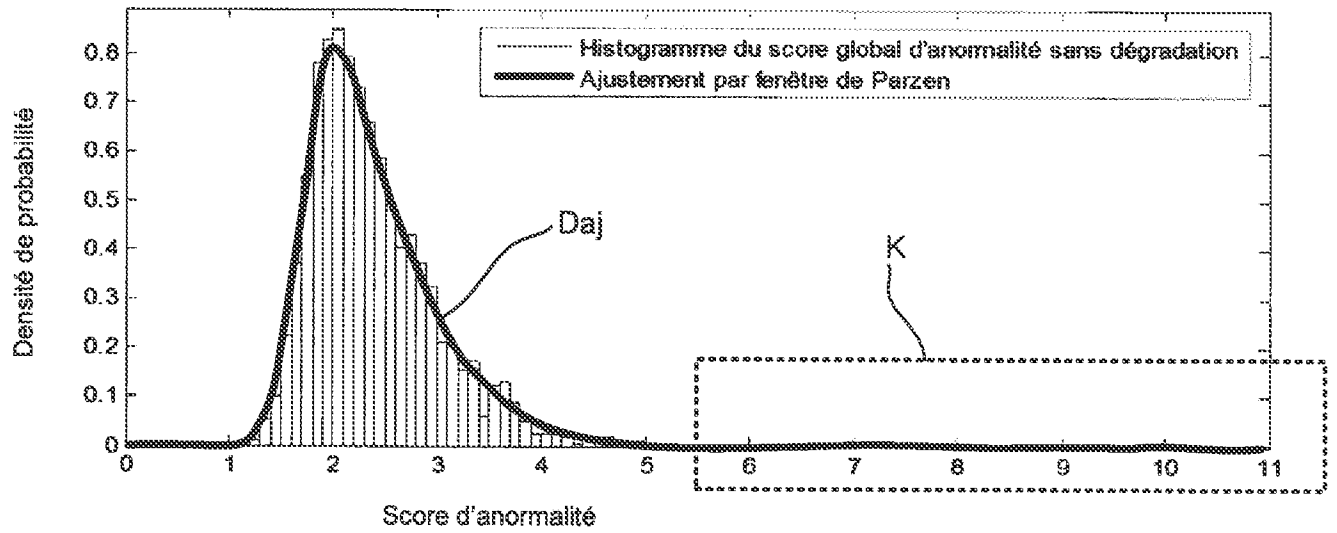


Figure 3

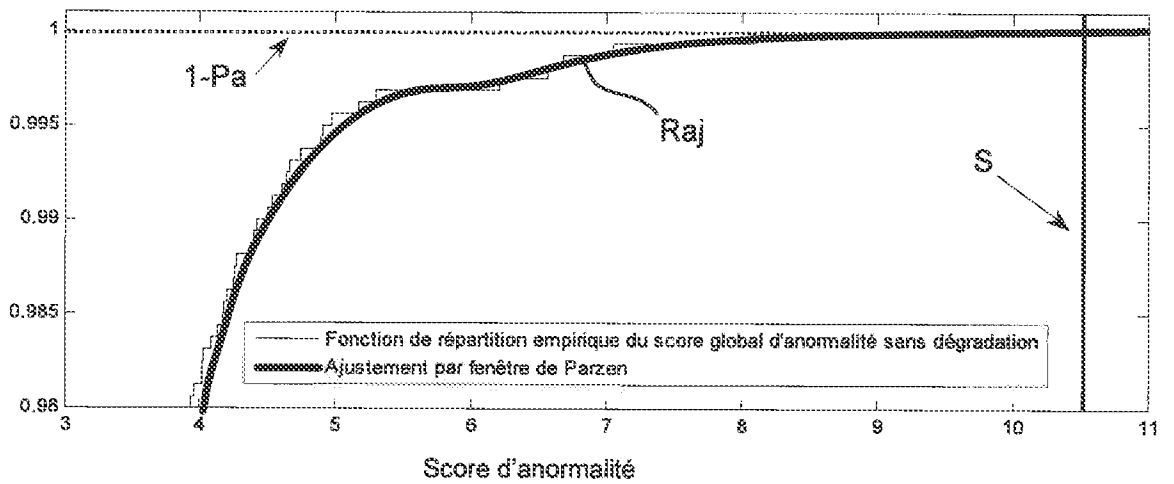


Figure 4

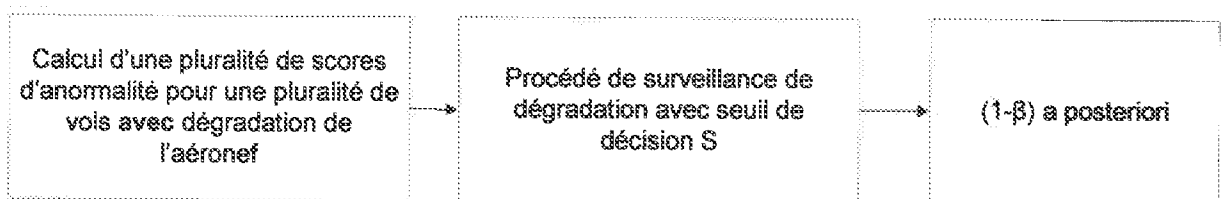


Figure 5

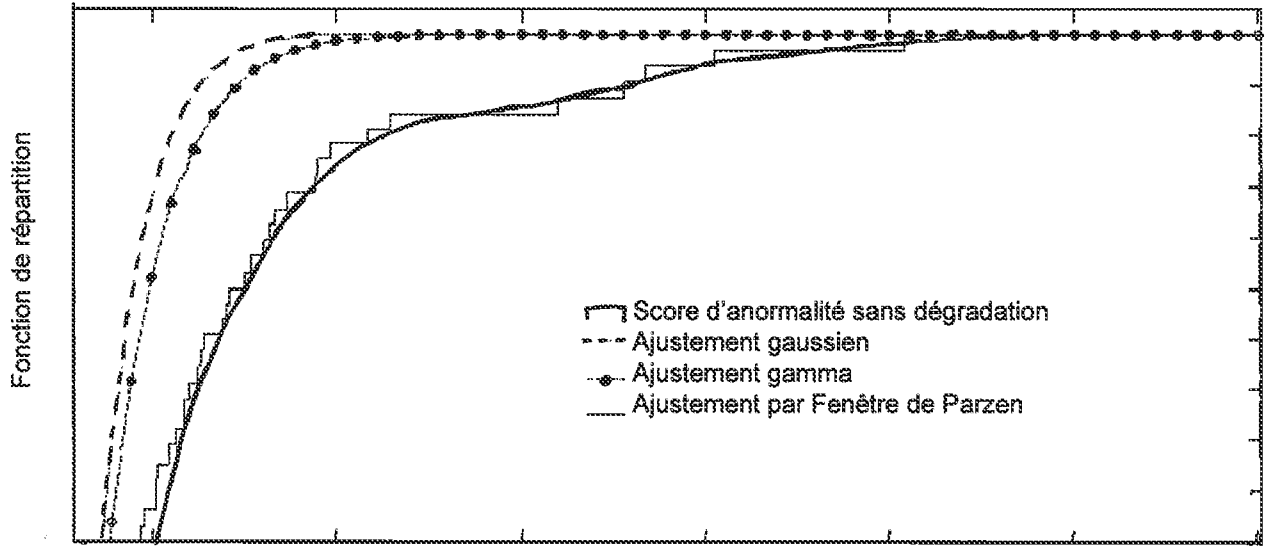


Figure 6

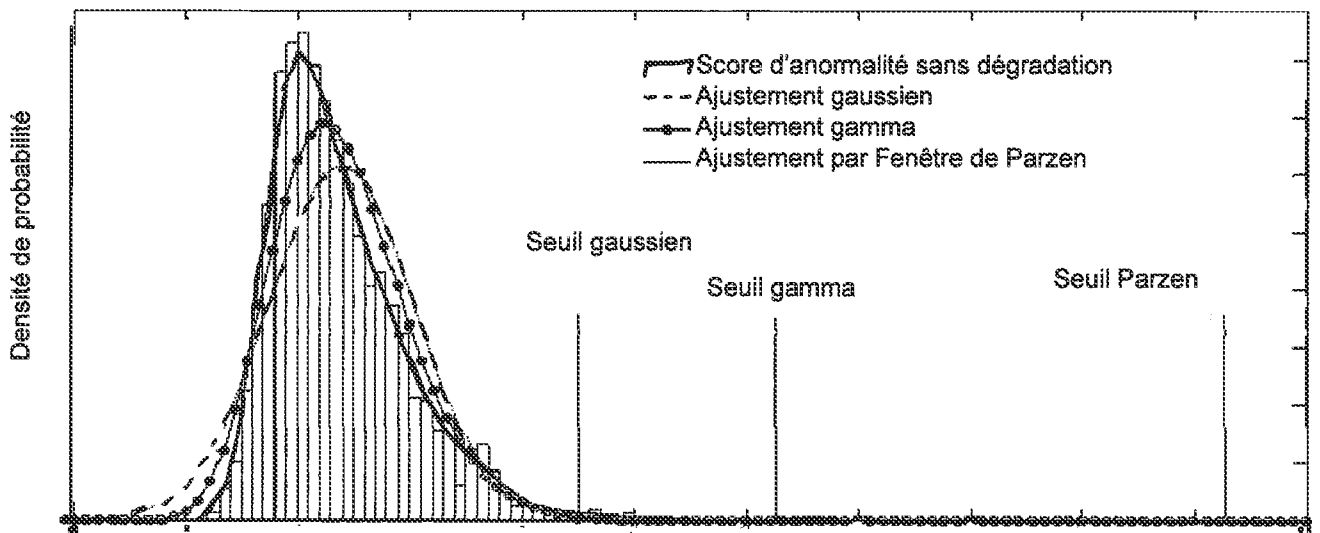


Figure 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2013/051059

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G05B23/02
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 1 677 172 A2 (GEN ELECTRIC [US]) 5 July 2006 (2006-07-05) paragraph [0006] - paragraph [0007] -----	1
A	US 2005/143873 A1 (WILSON EDWARD [US]) 30 June 2005 (2005-06-30) abstract -----	1

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

2 July 2013

Date of mailing of the international search report

09/07/2013

Name and mailing address of the ISA/
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Kelperis, K

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/FR2013/051059

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 1677172	A2 05-07-2006	CA 2524735 A1	29-06-2006
		EP 1677172 A2	05-07-2006
		US 2006142976 A1	29-06-2006

US 2005143873	A1 30-06-2005	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2013/051059

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G05B23/02 ADD.		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G05B		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	EP 1 677 172 A2 (GEN ELECTRIC [US]) 5 juillet 2006 (2006-07-05) alinéa [0006] - alinéa [0007] -----	1
A	US 2005/143873 A1 (WILSON EDWARD [US]) 30 juin 2005 (2005-06-30) abrégé -----	1
<input type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents <input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe		
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 2 juillet 2013		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 09/07/2013
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Kelperis, K

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2013/051059

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication	
EP 1677172	A2	05-07-2006	CA 2524735 A1	29-06-2006
			EP 1677172 A2	05-07-2006
			US 2006142976 A1	29-06-2006

US 2005143873	A1	30-06-2005	AUCUN	
