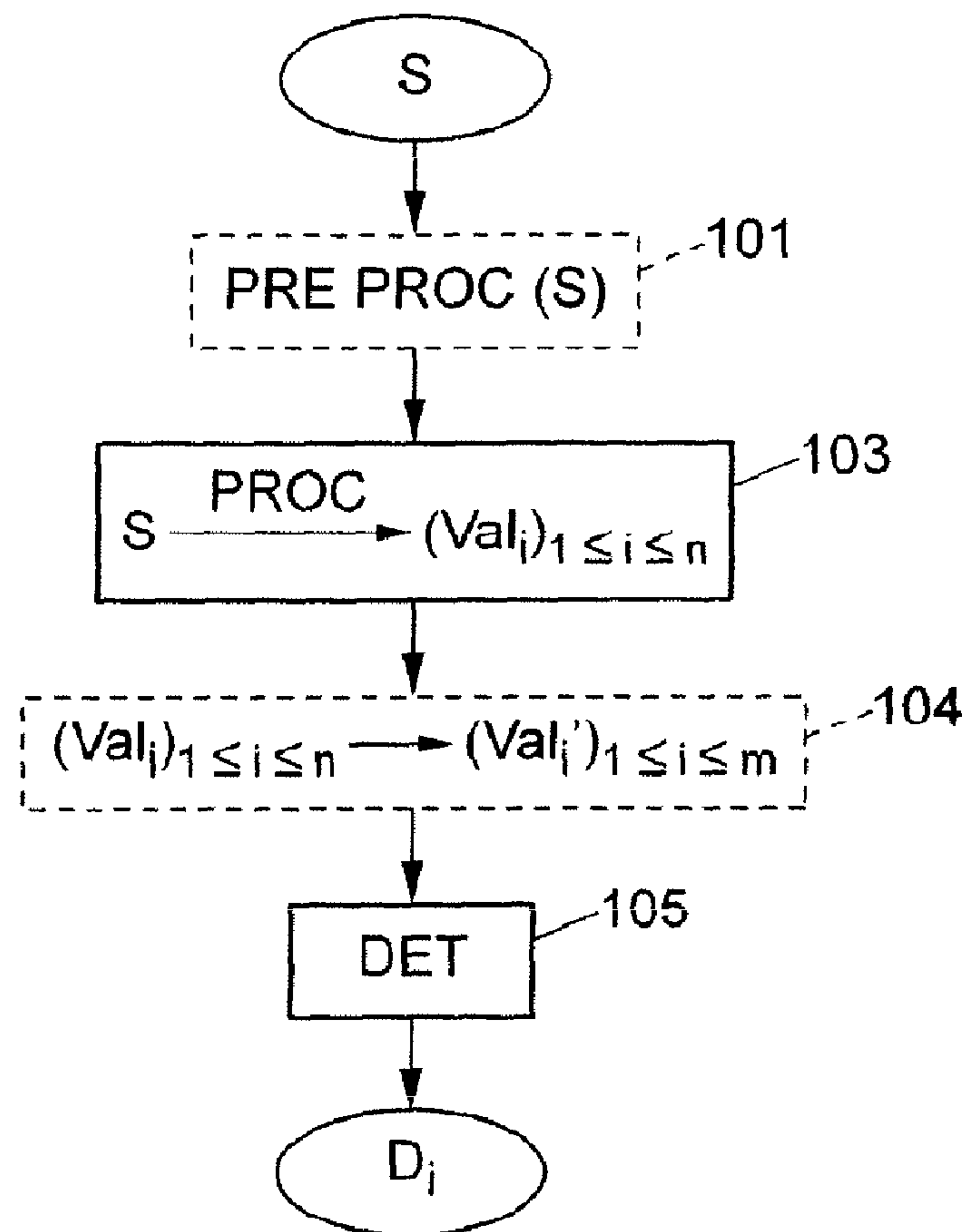




(86) **Date de dépôt PCT/PCT Filing Date:** 2010/06/24
(87) **Date publication PCT/PCT Publication Date:** 2010/12/29
(45) **Date de délivrance/Issue Date:** 2016/05/10
(85) **Entrée phase nationale/National Entry:** 2011/12/22
(86) **N° demande PCT/PCT Application No.:** FR 2010/051295
(87) **N° publication PCT/PCT Publication No.:** 2010/149935
(30) **Priorité/Priority:** 2009/06/25 (FR09 54357)

(51) **Cl.Int./Int.Cl.** *G06F 17/00* (2006.01),
G01N 37/00 (2006.01), *G06F 17/14* (2006.01),
G01R 31/36 (2006.01)
(72) **Inventeurs/Inventors:**
YOUSFISTEINER, NADIA, FR;
MOCOTEGUY, PHILIPPE, FR;
GAUTIER, LUDMILA, FR;
HISSEL, DANIEL, FR;
CANDUSSO, DENIS, FR
(73) **Propriétaires/Owners:**
ELECTRICITE DE FRANCE, FR;
UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE, FR
(74) **Agent:** NORTON ROSE FULBRIGHT CANADA
LLP/S.E.N.C.R.L., S.R.L.

(54) **Titre : DETECTION DE DEFAUT DANS UN DISPOSITIF ELECTROCHIMIQUE**
(54) **Title: DETECTION OF DEFECTS IN AN ELECTROCHEMICAL DEVICE**



(57) **Abrégé/Abstract:**

L'invention concerne un procédé de détection de défauts d'un dispositif électrochimique comprenant l'obtention (103) d'au moins une valeur caractéristique (Val_i) dépendant d'au moins une grandeur (S) reçue dudit dispositif électrochimique et la détermination



(57) Abrégé(suite)/Abstract(continued):

(105) d'au moins un défaut (D_i) dudit dispositif à partir de ladite valeur caractéristique obtenue. Dans ce procédé, une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes est réalisée pour obtenir la valeur caractéristique (Val_i) à partir de la grandeur (S) reçue. L'invention concerne également un dispositif mettant en oeuvre un tel procédé ainsi qu'un programme informatique correspondant.

(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 2010/149935 A1

(43) Date de la publication internationale
29 décembre 2010 (29.12.2010)

(51) Classification internationale des brevets :
G06F 17/00 (2006.01) *G01N 37/00* (2006.01)
G06F 17/14 (2006.01) *G01R 31/36* (2006.01)
H01M 8/04 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2010/051295

(22) Date de dépôt international :
24 juin 2010 (24.06.2010)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
09 54357 25 juin 2009 (25.06.2009) FR

(71) Déposants (pour tous les États désignés sauf US) :
ELECTRICITE DE FRANCE [FR/FR]; 22-30 avenue
de Wagram, F-75008 Paris (FR). **INRETS** [FR/FR]; 25
Avenue François Mitterrand, F-69675 Bron Cedex (FR).
UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE [FR/FR]; 1
Rue Claude Goudimel, F-25030 Besancon (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **YOUSFI-STEINER, Nadia** [FR/FR]; 36 Faubourg de Lyon, F-90000 Belfort (FR). **MOCOTEGUY, Philippe** [FR/FR]; 13 rue de la Forêt, Niederlauterbach, 67630 (FR). **GAUTIER, Ludmila** [FR/FR]; 19 rue Neuve, Roeschwoog, 67480 (FR). **HISSEL, Daniel** [FR/FR]; 7 rue des Mineurs, Ronchamp, 70250 (FR). **CANDUSSO, Denis** [FR/FR]; 5 bis, rue de Strasbourg, F-90000 Belfort (FR).

(74) Mandataires : **HASSINE, Albert** et al.; Cabinet Plasseraud, 52 rue de la Victoire, F-75440 Paris Cedex 09 (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, 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,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : DETECTION OF DEFECTS IN AN ELECTROCHEMICAL DEVICE

(54) Titre : DÉTECTION DE DÉFAUT DANS UN DISPOSITIF ÉLECTROCHIMIQUE

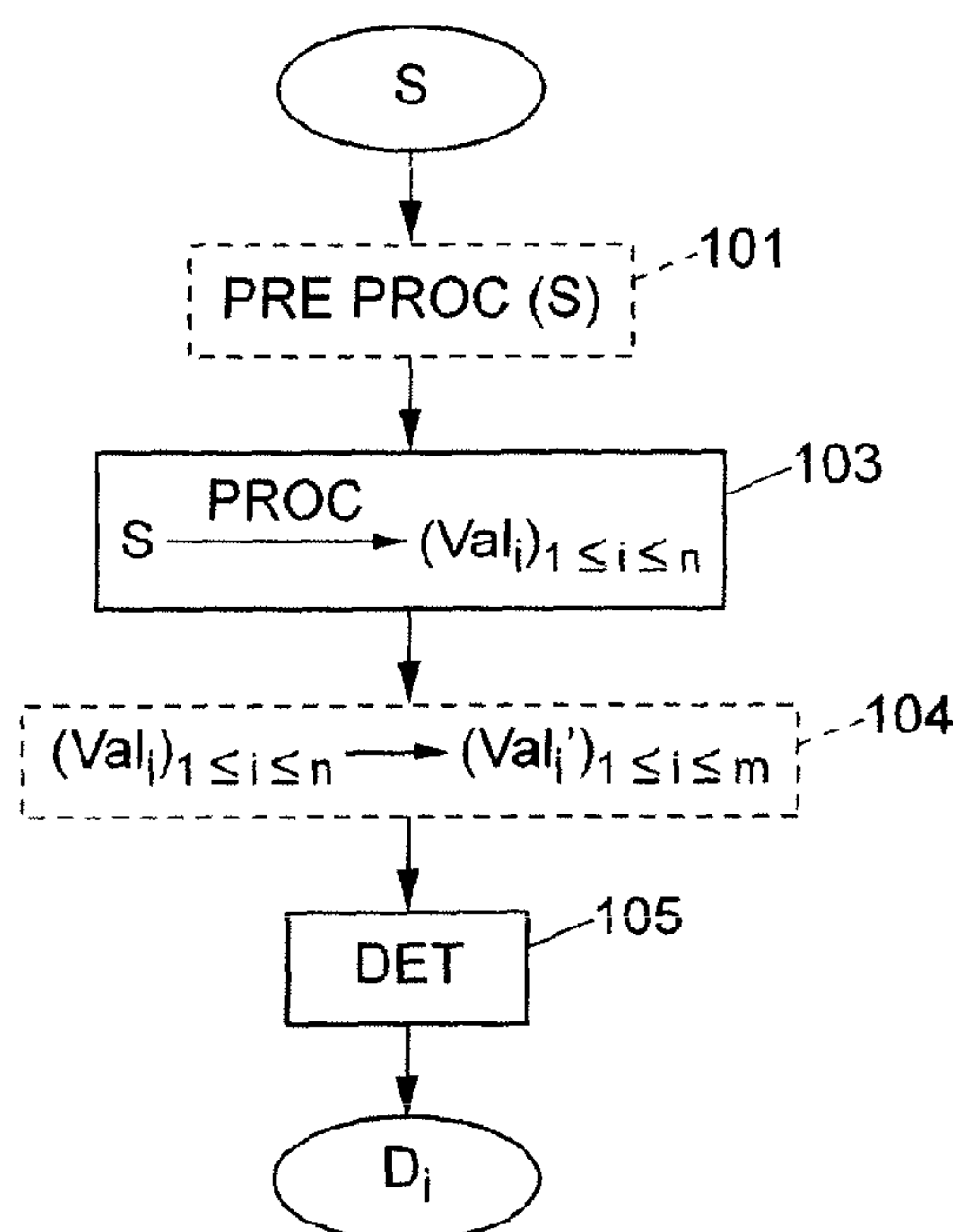


FIG. 1

(57) **Abstract** : The invention relates to a method for detecting defects in an electrochemical device, including obtaining (103) at least one characteristic value (Val_i) dependent on at least one variable (S) received from the electrochemical device and determining (105) at least one defect (D_i) in said device from the characteristic value obtained. The method comprises a mathematical operation including a wavelet transform, which operation is carried out in order to obtain the characteristic value (Val_i) from the variable (S) received. The invention also relates to a device that carries out one such method, as well as to a corresponding computer program.

(57) **Abrégé** : L'invention concerne un procédé de détection de défauts d'un dispositif électrochimique comprenant l'obtention (103) d'au moins une valeur caractéristique (Val_i) dépendant d'au moins une grandeur (S) reçue dudit dispositif électrochimique et la détermination (105) d'au moins un défaut (D_i) dudit dispositif à partir de ladite valeur caractéristique obtenue. Dans ce procédé, une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes est réalisée pour obtenir la valeur caractéristique (Val_i) à partir de la grandeur (S) reçue. L'invention concerne également un dispositif mettant en œuvre un tel procédé ainsi qu'un programme informatique correspondant.

WO 2010/149935 A1

NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, 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, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— *relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv)*

Publiée :

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

— *avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2.h)*

Détection de défaut dans un dispositif électrochimique

La présente demande concerne le domaine de la détection de défauts
5 dans des dispositifs électrochimiques.

Il existe à l'heure actuelle de multiples dispositifs dits « électrochimiques »,
c'est-à-dire utilisant la conversion d'énergie chimique en énergie électrique ou
vice versa.

Une première catégorie de ce type de dispositifs concerne des dispositifs
10 convertissant de l'énergie chimique en énergie électrique, afin de fournir celle-ci
à des appareils électriques ou de la stocker pour pouvoir la fournir
ultérieurement. De tels dispositifs peuvent être par exemple des batteries, des
piles à combustible ou des supercapacités.

Une deuxième catégorie de ce type de dispositifs concerne les dispositifs
15 utilisant divers procédés faisant appel à l'électricité pour réaliser des réactions
chimiques, ou séparer des produits ou des réactifs entre eux. De tels dispositifs
utilisent couramment des procédés dits « électrochimiques » tels que
l'électrodéposition, l'électroérosion ou l'électroflotation.

La fiabilité et la durée de vie de ces dispositifs électrochimiques sont
20 limitées par divers phénomènes. En ce qui concerne les dispositifs convertissant
l'énergie chimique en énergie électrique, comme par exemple les piles à
combustibles, deux phénomènes principaux conduisent à la chute de la
performance, voire à la défaillance complète du dispositif.

D'une part, le cyclage charge / décharge ou le fonctionnement en mode
25 transitoire, soit par l'accumulation des arrêts et des démarrages soit par les
variations de puissance demandée, réduit la durée de vie de ces dispositifs.

D'autre part, certains incidents tels que les défauts de contrôle de certains
paramètres du procédé électrochimique utilisé (interruption d'alimentation en
réactifs, mauvaise gestion des produits et sous-produits de la réaction),

l'empoisonnement du milieu, la défaillance d'un composant ou d'un module par exemple, peuvent survenir pendant leur fonctionnement.

Ainsi, ces phénomènes délétères nécessitent l'utilisation de méthodes de diagnostic afin de permettre leur détection et leur éventuelle correction.

5 Dans un dispositif électrochimique classique, les méthodes de diagnostic classiques s'appuient le plus souvent sur la connaissance d'un certain nombre de paramètres, qu'ils soient externes ou internes à ces systèmes, nécessitant une instrumentation spécifique, comme par exemple l'insertion de capteurs internes dans le dispositif électrochimique lui-même.

10 Une telle instrumentation n'est pas toujours souhaitable, car elle est souvent coûteuse et n'est pas toujours facile à mettre en place, compte tenu de la géométrie du système électrochimique rarement adaptée à l'installation de capteurs, notamment internes au dispositif.

De plus, de tels capteurs internes induisent, du fait de leur insertion, une
15 altération du dispositif pouvant augmenter la probabilité d'apparition de défauts et conduisant à de faux diagnostics. Enfin, dans le cas de l'utilisation d'un système électrochimique pour des applications mobiles, la taille du dispositif doit être réduite au minimum, ainsi que celle de l'instrumentation de diagnostic, ce qui ne permet pas d'utiliser les méthodes classiques.

20 Dans le cas particulier, et non exclusif, des piles à combustibles à membranes échangeuses de protons (PEMFC en anglais pour Proton Exchange Membrane Fuel Cell), des études ont été menées afin de comprendre les mécanismes de dégradation et d'améliorer leur fiabilité et leur durée de vie. Certains modèles physiques ont même été développés. Ils ont cependant
25 besoin d'un certain nombre de paramètres difficilement mesurables, voire non mesurables, pour pouvoir être utilisés. De plus, leur complexité conduit généralement à des besoins importants en temps de calcul qui rendent difficile leur implantation dans une optique de diagnostic en temps réel.

La présente invention vise à répondre aux inconvénients cités ci-avant.

Un objet de la présente invention est donc de proposer un procédé permettant de détecter de manière non intrusive un défaut dans un dispositif électrochimique.

5 Par ailleurs, l'invention a aussi pour objet de proposer un procédé de détection de défaut utilisant une instrumentation minimale.

Un autre objet de la présente invention est de proposer un procédé générique de détection de défauts dans un dispositif électrochimique pouvant être utilisé pour différents systèmes, indépendamment de leurs types, géométries, tailles ou applications.

10 Enfin, un autre objet de la présente invention est de proposer un procédé de détection de défaut utilisable en temps réel.

La présente invention propose à cet effet un procédé de détection d'un défaut d'un dispositif électrochimique comprenant une étape d'obtention d'au moins une valeur caractéristique à partir d'au moins une grandeur reçue dudit
15 dispositif électrochimique et une étape de détermination d'au moins un défaut dudit dispositif électrochimique à partir de cette valeur obtenue, une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes étant réalisée pour obtenir la valeur caractéristique à partir de la grandeur reçue.

Avantageusement, la transformation en ondelettes est une transformation
20 discrète en ondelettes dans laquelle la valeur caractéristique obtenue comporte au moins un coefficient d'ondelettes $S_{a,b}$ dépendant d'une variable d'échelle de valeur a et d'une variable de translation de valeur b . Cette discrétisation permet d'améliorer le temps de calcul nécessaire à la décomposition en ondelettes.

En particulier, une pluralité de valeurs caractéristiques est obtenue par la
25 décomposition d'un ensemble de coefficients d'ondelettes $w_{j,p}$, présentant une variable de niveau d'échelle j de valeur inférieure à a , en une pluralité d'ensembles de coefficients d'ondelettes $w_{j+1,p}$.

Préférentiellement, la variable d'échelle de valeur a vérifie $a=a_0^j$, où j est un niveau d'échelle et a_0 un paramètre d'échelle, et a ensembles de valeurs

caractéristiques sont obtenues par la décomposition successive, pour chaque valeur j variant de 0 à un niveau de décomposition donné, de chaque ensemble de coefficients d'ondelettes $w_{j,p}$ en a_0 ensembles de coefficients d'ondelettes $w_{j+1,p}$. Ceci permet d'obtenir un niveau détail important lors de la décomposition en ondelettes.

De préférence, le niveau de décomposition donné correspond à un niveau maximal de décomposition, ce qui permet d'atteindre un niveau de détail maximal lors de la décomposition en ondelettes.

Dans un mode de réalisation préféré, l'étape détermination comporte une étape de comparaison de la valeur caractéristique par rapport à au moins un élément de détermination séparant au moins une première classe de défaut d'une deuxième classe de défaut. Avantageusement, l'élément de détermination est défini au moyen d'une classification préalable d'une pluralité de valeurs caractéristiques en une pluralité de classes de défauts.

De préférence, entre l'obtention de la pluralité de valeurs caractéristiques et la détermination du défaut, une étape de sélection d'au moins une valeur pertinente (Val_i') parmi la pluralité de valeurs caractéristiques obtenues, la détermination du défaut s'effectuant à partir de ladite valeur pertinente. Ceci permet d'accélérer le temps de calcul.

Le procédé peut comprendre, de façon particulièrement avantageuse, une étape préliminaire de traitement de la grandeur reçue du dispositif électrochimique. En particulier, cette étape préliminaire de traitement comprend une étape d'élimination d'au moins une composante de fréquence de la grandeur reçue du dispositif électrochimique, afin d'optimiser le temps de calcul nécessaire.

L'invention propose en outre un programme informatique comportant des instructions pour mettre en œuvre les étapes du procédé ci-avant.

L'invention propose par ailleurs un dispositif de détection de défauts d'un dispositif électrochimique comportant un module de traitement adapté pour recevoir au moins une grandeur de ce dispositif électrochimique et pour générer

au moins une valeur caractéristique à partir de cette grandeur en effectuant une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes, ainsi qu'un module de détermination adapté pour déterminer au moins un défaut du dispositif électrochimique à partir d'au moins une valeur reçue du module de traitement.

Le procédé, le programme informatique et le dispositif de détection de défauts, objets de l'invention, seront mieux compris à la lecture de la description et à l'observation des dessins ci-après sur lesquels :

- la figure 1 illustre les étapes d'un procédé de détection de défaut dans un dispositif électrochimique selon l'invention;

- la figure 2 illustre un premier type d'arborescence complète découlant de l'utilisation d'une transformation discrète en ondelettes ;

- la figure 3 illustre un deuxième type d'arborescence partielle découlant de l'utilisation d'une transformation discrète en ondelettes ;

- la figure 4 illustre les notions de marge, de vecteurs support et d'hyperplan séparateur tels que définis dans une méthode de classification préalable ;

- la figure 5 illustre un exemple de classification préalable de défauts selon la présente invention, dans l'exemple particulier d'une pile à combustible ; et

- la figure 6 représente schématiquement un dispositif de détection de défaut dans un dispositif électrochimique selon la présente invention.

On se réfère tout d'abord à la **figure 1** sur laquelle sont illustrées les étapes d'un procédé de détection de défauts dans un dispositif électrochimique selon la présente invention.

On rappelle tout d'abord que le terme de « dispositif électrochimique » employé ici recouvre aussi bien tout dispositif apte à générer de l'énergie électrique, par conversion d'énergie chimique, de fournir celle-ci (soit directement, soit grâce au stockage temporaire de cette énergie électrique) que

tout dispositif apte à utiliser la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique, par exemple pour réaliser des réactions chimiques, séparer des produits ou des réactifs entre eux.

Un tel dispositif peut consister en une batterie, une pile à combustible, une supercapacité d'une part. Un tel dispositif peut consister d'autre part en un électrolyseur comme par exemple un réacteur à électrodéposition, à électroérosion, à électrosynthèse, à électropurification, à électroconcentration ou d'électroflottation. Un tel dispositif peut aussi consister en un électrodialyseur.

Afin de détecter un éventuel défaut d'un dispositif électrochimique, le procédé de la présente invention va comprendre un certain nombre d'opérations successives effectuées sur une grandeur S reçue du dispositif électrochimique, ce qui permet d'effectuer un diagnostic non intrusif, ne nécessitant pas l'insertion de capteurs internes dans la source.

La grandeur S reçue de la source peut consister en un signal de n'importe quelle nature permettant de caractériser le dispositif électrochimique.

Dans le cas d'un dispositif générateur d'électricité, cette grandeur S peut être simplement tout signal, tel qu'une tension, une intensité ou une puissance électrique, délivré en sortie du dispositif.

Dans le cas d'un dispositif utilisant de l'électricité pour effectuer une transformation chimique, cette grandeur S peut être la réponse du dispositif à un paramètre imposé en entrée d'un tel dispositif. Si par exemple une intensité est imposée en entrée, la grandeur S peut être la réponse en tension de ce dispositif. A l'inverse, si une tension est imposée en entrée, la grandeur peut être la réponse en intensité de ce dispositif. Enfin, si une puissance est imposée en entrée, la grandeur peut être la réponse en intensité ou en tension du dispositif.

Dans l'exemple non limitatif utilisé par la suite, cette grandeur S est la tension de sortie mesurée aux bornes d'une pile fonctionnant à courant imposé, mais on peut très bien imaginer utiliser le courant d'une pile fonctionnant en tension ou puissance imposée, la puissance d'une pile fonctionnant en tension

ou courant imposé ou, quelque soit le mode de fonctionnement, les pressions ou concentrations de produits ou de réactifs, les débits de réactifs ou de produits, la température ou toute variation temporelle ou spatiale de ces grandeurs.

5 Au cours d'une première étape principale 103, un premier traitement va être appliqué à la grandeur S reçue du dispositif électrochimique à diagnostiquer, afin d'en obtenir une ou plusieurs valeurs Val_i , où $1 \leq i \leq n$, permettant de caractériser un ou plusieurs défaut(s) du dispositif électrochimique.

10 En particulier, si la grandeur S est de nature analogique, les valeurs caractéristiques Val_i obtenues seront des variables numériques permettant un traitement numérique ultérieur.

A partir de ces valeurs caractéristiques Val_i obtenues, on peut alors déterminer un ou plusieurs défaut(s) du dispositif électrochimique lors d'une deuxième étape principale 105.

15 L'étape 105 peut être soit de nature non supervisée, où il s'agit de répartir les caractéristiques Val_i dans des structures plus ou moins organisées, en les regroupant selon un critère défini ou encore de nature supervisée à partir d'un ensemble de données déjà classées.

20 Pour ce faire, et dans le cas supervisé par exemple, on compare les valeurs caractéristiques Val_i obtenues avec une série de valeurs classées préalablement et associées chacune à un état particulier du dispositif électrochimique, par exemple un état où un type de défaut particulier est présent. De cette comparaison peut être alors déduit au moins un éventuel défaut D_i du dispositif électrochimique.

25 Dans la présente invention, le procédé est donc d'abord caractérisé par l'utilisation d'une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes lors de la première étape principale 103, afin d'obtenir les valeurs Val_i à partir de la grandeur S reçue.

Une ondelette est une fonction mathématique ψ localisée autour d'un temps central et limitée dans le temps. Son caractère oscillatoire et compact lui donne son nom (ondelette). Toute fonction mathématique peut être considérée comme une ondelette si elle présente les caractéristiques d'être oscillante, d'énergie finie et de moyenne égale à zéro.

Un premier avantage de l'analyse en ondelettes par rapport aux autres méthodes d'analyse d'une grandeur consiste en ce qu'une multitude de fonctions sont utilisables comme « ondelette mère ».

Une fonction fréquemment utilisée comme « ondelette mère » est la fonction « chapeau mexicain ». Son expression mathématique est la suivante :

$$(1) \quad \psi(t) = (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}}$$

A partir de cette « ondelette mère », on définit une famille d'ondelettes $(\psi_{a,b}(t))_{a,b}$ par translation temporelle et par dilatation (ou compression de l'ondelette) selon la formule suivante :

$$(2) \quad \psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

C'est cette famille d'ondelettes, servant de base de décomposition, qui permet l'analyse d'une grandeur S donnée. La variable b , dite « variable de translation », est un paramètre de localisation temporelle tandis que la variable a , dite « variable d'échelle », correspond à un facteur d'échelle. Les grandes échelles correspondent à une vue globale du signal, et les petites échelles correspondent à la description des détails. Grâce à la transformée en ondelettes, une grandeur est analysée à toutes les échelles, ce qui permet une analyse multi-résolution.

On peut ainsi faire ressortir l'information sur différents phénomènes (et par conséquent défauts) ayant lieu à différentes échelles contenues dans ce signal. A chaque niveau de décomposition, on obtient un signal à une échelle

différente, ce qui permet de localiser les phénomènes en passant d'une échelle de décomposition à la suivante (plus fine).

Pour effectuer une transformée en ondelettes, pour chaque variable d'échelle a , on déplace l'ondelette à partir de l'origine de l'axe des temps tout le long de la grandeur à analyser (en faisant varier la variable de translation b) afin de calculer une suite de corrélations entre les deux.

Les résultats de ces corrélations correspondent à un ensemble de "coefficients en ondelettes", appelés $S_{a,b}$ qui sont d'autant plus grands que la forme de l'ondelette approche celle de la grandeur à analyser, et qui vérifient l'équation suivante :

$$(3) \quad S_{a,b} = \int_R S(t) \psi_{a,b}^*(t) dt$$

où $*$ désigne le conjugué et R l'ensemble des nombres réels. La grandeur S est alors décrite par ces coefficients $S_{a,b}$, lesquels peuvent servir de valeurs caractéristiques Val_i pour déterminer par la suite un défaut du dispositif.

On parle ici de « transformée continue en ondelettes » d'une grandeur S (en anglais Continuous Wavelet Transform ou CWT) lorsque les variables a et b sont variées de façon continue. Une telle "transformée en ondelettes continue" permet une description complète du signal $S(t)$ au détriment de la difficulté à mettre en œuvre l'équation (2) et la grande redondance résultante.

Pour surmonter cette difficulté, il est avantageux d'utiliser un type de transformée en ondelettes dite « discrète », se limitant à l'utilisation de quelques valeurs discrètes pour les variables a et b . Pour de nombreuses applications, on choisit des valeurs de a et b définies par :

$$(4) \quad a = a_0^j \text{ avec } a_0 > 1$$

$$(5) \quad b = k \cdot b_0 \cdot a_0^j, \text{ avec } b_0 > 0 \text{ et } j \text{ et } k \text{ entiers}$$

Les variables j et k sont les niveaux respectivement d'échelle et de translation. Le résultat obtenu est une série de valeurs discrètes : on parlera

donc ici de « décomposition en séries d'ondelettes ». A titre purement illustratif, on choisira ici les valeurs $b_o = 1$ et $a_o = 2$, correspondant à une décomposition dite « dyadique » dans laquelle la variable d'échelle a prend les valeurs successives 1,2,4,8,etc...

5 Dans ce cas particulier, les ondelettes servant à décomposer le signal vérifient l'équation :

$$(6) \quad \psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right), \quad (j,k) \in \mathbb{Z}^2$$

Et les « coefficients d'ondelettes » sont définis par :

$$(7) \quad S_{j,k} = \int_R S(t) \psi_{j,k}^*(t) dt$$

10 Et la grandeur S d'origine est définie sur la base d'ondelettes correspondantes selon :

$$(8) \quad S(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} S_{j,k} \psi_{j,k}(t)$$

15 Du simple point de vue du traitement du signal, il n'existe que deux types d'éléments à considérer : la grandeur à analyser et la fonction qui l'analyse ou la filtre. De ce point de vue, la transformée discrète en ondelettes d'un signal peut être vue comme le passage de ce signal par un « banc de filtres ».

20 A une échelle donnée, la transformation discrète en ondelettes consiste à faire passer les coefficients d'une échelle précédente par un banc constitué de a_0 filtres. Dans un exemple où le facteur a_0 est égal à 2, un filtre passe-bas donne une image grossière du signal et un filtre passe-haut donne les détails. Ces deux filtres sont complémentaires : les fréquences coupées par l'un sont récupérées par l'autre. L'emploi itératif de bancs de filtres résulte en des arborescences illustrées par les figures 2 et 3.

25 A chaque niveau d'échelle j, on obtient des ensembles $w_{j,p}$ des coefficients où le paramètre p indique la position dans l'arbre et varie entre 0 et $2^j - 1$, et

est égal, pour chaque nœud correspondant à un ensemble de coefficients $w_{j,p}$, au nombre de « nœuds » situés à sa gauche. Il peut être considéré comme un indice fréquentiel. L'ensemble $w_{j,p}$ comprend une suite de coefficients $S_{j,k}$, où k varie de 0 à $2^{M-j}-1$, ce paramètre M correspondant à un niveau maximal de décomposition du signal à décomposer, lequel peut correspondre, par exemple dans le cas où la longueur de ce signal est une puissance entière de 2, au logarithme népérien de la longueur de ce signal.

Pour un niveau d'échelle j fixé, l'ensemble $w_{j,p}$ de coefficients vérifie donc :

$$(9) \quad w_{j,p} = \{S_{j,k}, k = 0, \dots, 2^{M-j} - 1\}$$

Sur la **figure 2** est illustrée une grandeur S à laquelle sont appliqués trois niveaux successifs de filtrage. Ainsi, à chaque niveau d'échelle j allant de 0 à un niveau maximal de décomposition M , on obtient une succession d'ensembles de coefficients $w_{j,p}$ correspondant à l'application des filtres passe-bas (symbolisée par « Lo ») et passe-haut (symbolisée par « Hi ») sur chacun des ensembles de coefficients $w_{j-1,p}$ du niveau d'échelle précédent $j-1$.

Une telle transformation, intitulée « transformation par paquets d'ondelettes », est complète dans le sens où elle permet de caractériser entièrement la grandeur S , à chaque niveau de décomposition complète. Au niveau j , on obtient 2^j ensembles de coefficients (ou nœuds). Puisque le signal est représenté entièrement à chaque niveau de décomposition, cette représentation de la grandeur S au moyen d'un « arbre » complet à plusieurs niveaux est redondante. Avec une telle arborescence, il est possible de sélectionner seulement les paquets « significatifs » d'un défaut donné et n'utiliser que ces paquets pour identifier ce défaut.

La **figure 3** illustre un autre exemple d'arborescence partielle à trois niveaux successifs de filtrage. Dans ce cas précis, on applique les filtrages passe-haut et passe-bas seulement à l'ensemble des coefficients $w_{j,p}$ présentant une variable de « position dans l'arbre » p nulle (représentant les composantes « basses fréquences » de la grandeur S), ici respectivement sur les ensembles

$w_{0,0}$, $w_{1,0}$ et $w_{2,0}$, correspondant respectivement à des échelles de valeur $a=0$, $a=2$ et $a=4$.

Dans ce cas de figure, on limite la décomposition aux seuls ensembles de coefficients $w_{j,0}$ pour tout j . Les composantes « hautes fréquences » de la grandeur S ne sont plus décomposées et sont donc analysés avec un niveau de détail moindre que celui des basses fréquences.

Une telle décomposition, où l'on sélectionne les coefficients à obtenir, est moins complète que la décomposition de la figure 2 mais peut être utile lorsque l'on sait d'avance dans quelle gamme décomposer la grandeur S pour déterminer un défaut. Dans ce cas, cette décomposition est plus rapide, plus efficace en temps de calcul et se focalise directement sur un type de défaut particulier.

De manière plus générale, les coefficients obtenus après la décomposition en ondelettes ou en paquets d'ondelettes permettent d'exploiter le contenu fréquentiel de ces signaux. Tout changement dans la grandeur décomposée et lié à un défaut donné se verra sur un ou plusieurs niveaux de décomposition dans le cas d'une transformée discrète en ondelettes ou sur un ou plusieurs paquets dans le cas d'une décomposition en paquets d'ondelettes.

Une telle décomposition va permettre de caractériser, grâce aux différents ensembles de coefficients $w_{j,p}$ obtenus, une ou plusieurs caractéristiques comme par exemple, l'énergie, l'entropie, la moyenne, le maximum, le minimum, l'écart-type, le nombre d'événements conformes à un critère, etc. Ces caractéristiques (tout comme les ensembles de coefficients $w_{j,p}$) peuvent alors correspondre aux valeurs caractéristiques Val_i qui serviront à la détermination d'un éventuel défaut lors de la deuxième étape principale 105.

Pour ce faire, on compare les valeurs Val_i obtenues avec une série de valeurs classées préalablement et associées chacune à un état particulier du dispositif électrochimique, par exemple un état normal D_0 ou à un état D_i correspondant à un type de défaut particulier. De cette comparaison peut être alors déduit un éventuel défaut du dispositif électrochimique.

Les valeurs utilisées pour la classification préalable sont des valeurs de nature similaire aux valeurs caractéristiques obtenues lors de l'étape 103, lesquelles sont classées dans une ou plusieurs classes de défauts C_1 , C_2 correspondant chacune à un type de défaut en particulier. Cette association
5 d'une valeur à un défaut peut être réalisée grâce à des données du constructeur du dispositif à analyser ou par apprentissage et retour d'expérience.

La classification préalable de valeurs en classes de défauts va permettre de définir un ou plusieurs éléments de détermination séparant ces classes. La comparaison des valeurs caractéristiques obtenues Val_i avec ces éléments de
10 détermination, lors de l'étape 105, permet alors de déterminer si la valeur Val_i appartient à une classe de défaut.

De tels éléments de détermination prennent une forme dépendant du nombre de dimensions considéré. Si la classification préalable se fait par rapport à un seul axe de détermination, ces éléments de détermination seront des
15 valeurs seuils auxquelles seront comparées les valeurs Val_i .

Dans une classification en deux dimensions, c'est-à-dire où l'on observe la corrélation entre deux valeurs Val_i , les éléments de détermination seront par exemple des droites. D'une façon générale, l'élément de détermination sera une surface séparatrice dans un espace de dimension N , par exemple : un
20 hyperplan séparateur dans le cas linéaire.

La classification préalable des valeurs peut être effectuée selon diverses méthodes. Une méthode particulièrement avantageuse consiste en l'utilisation de machines à vecteurs de support.

Les machines à vecteurs de support (Support Vector Machine, ou SVM, en anglais) sont des techniques de discrimination basées sur l'apprentissage supervisé.
25

Ces machines à vecteurs support présentent l'avantage de pouvoir travailler avec des données de grande dimension, d'être bien fondés théoriquement, et de présenter de bons résultats en pratique. De plus, quel que
30 soit le modèle d'application, la performance des machines à vecteurs supports

est de même ordre, voire supérieure à celle des autres méthodes de classification.

Les machines à vecteurs de support sont basées sur les deux idées essentielles suivantes :

5 1) La construction d'une frontière « optimale » de séparation entre les classes, permettant de maximiser la distance minimale de la frontière à l'ensemble de l'apprentissage. Ceci est fait en formulant le problème comme un problème d'optimisation quadratique, pour lequel des algorithmes connus sont mis en œuvre.

10 2) Les machines à vecteurs de support transforment l'espace de représentation des données d'entrée en un espace de plus grande dimension, possiblement de dimension infinie, afin de pouvoir ramener des cas où les données ne sont pas linéairement séparables à un cas plus simple de séparation linéaire dans un espace approprié, grâce à l'utilisation de fonctions
15 d'ites noyau (ou kernel).

Cette méthode permet initialement de classer les variables dans deux classes. Néanmoins, il existe des extensions pour la classification dans un nombre plus importants de classes.

20 Considérons le cas de deux classes « -1 » et « +1 » à séparer et l'ensemble d'apprentissage suivant :

$$(10) \quad D = \{(x_i, y_i) \in R^N \times \{-1, 1\} \text{ pour } i = 1, \dots, k\}$$

Deux cas se présentent pour la construction de l'hyperplan optimal séparant les données appartenant aux deux différentes classes : soit les données sont linéairement séparables, soit les données ne sont pas
25 linéairement séparables.

Dans le premier cas où les données sont linéairement séparables, l'hyperplan optimal H satisfait à :

$$(11) \quad \begin{cases} h(x_i) = w.x_i + b \geq 1, & \text{si } y_i = +1 \\ h(x_i) = w.x_i + b \leq -1, & \text{si } y_i = -1 \end{cases}$$

Ce qui peut s'écrire aussi sous la forme:

$$(12) \quad y_i.h(x_i) = y_i(w.x_i + b) \geq 1, \text{ pour } i = 1, \dots, k$$

La distance d'un point x à l'hyperplan est alors donnée par la projection
5 orthogonale de ce point sur l'hyperplan, selon l'équation suivante :

$$(13) \quad d(x) = \frac{|w.x + b|}{\|w\|}$$

On peut alors définir une marge Ma correspondant à la plus petite distance entre les observations des deux classes et l'hyperplan :

$$(14) \quad Ma = \min_{x, y=1} \frac{|w.x + b|}{\|w\|} - \max_{x, y=-1} \frac{|w.x + b|}{\|w\|} = \frac{2}{\|w\|}$$

10 L'hyperplan Séparateur optimal H , c'est-à-dire la frontière de décision, est celui qui maximise cette marge Ma , ce qui revient à maximiser la somme des distances des deux classes par rapport à l'hyperplan, et donc à minimiser $\|w\|$ sous la contrainte de l'équation (7). Il peut être cependant plus aisé de minimiser $\|w\|^2$ que $\|w\|$.

15 Ainsi, le problème de minimisation peut être formulé comme un problème de minimisation d'une fonction quadratique avec contraintes linéaires suivantes :

$$(15) \quad \begin{cases} \min \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ y_i(w.x_i + b) \geq 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, k\} \end{cases}$$

20 La **figure 4** permet de visualiser ces notions de marge, de vecteurs support et d'hyperplan séparateur H dans un cas particulier à deux dimensions.

Sur cette figure, deux groupes de valeurs sont classés dans deux classes C_1 et C_2 représentant respectivement un défaut D_1 et D_2 . L'hyperplan séparateur H , représentant la frontière entre ces deux classes C_1 et C_2 est celui qui minimise la marge M définie par rapport aux valeurs limites V_{s1} et V_{s2} respectives de chaque classe C_i appelées « Vecteurs support ».

Une fois cet hyperplan séparateur H défini par apprentissage préalable, l'étape de détermination 105 consiste à situer les valeurs caractéristiques obtenues par rapport à cet hyperplan séparateur H , ce qui permet de classer ces valeurs dans une des classes C_1 et C_2 et d'en déduire le défaut D_i associé.

La résolution du problème de minimisation énoncé dans (15) se fait en utilisant les multiplicateurs de Lagrange, par exemple, pour chaque contrainte. On obtient dans ce cas l'équation suivante:

$$(16) \quad L(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{p=1}^k \alpha_p \cdot (y_p (w \cdot x_p + b) - 1)$$

Le lagrangien doit être minimisé par rapport à w et b , et maximisé par rapport à α .

En annulant les dérivées partielles du lagrangien, selon les conditions de Kuhn-Tucker, on obtient le système suivant :

$$(17) \quad \begin{cases} \max \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i \cdot x_j \\ \alpha_i \geq 0 \text{ pour tout } i \\ \sum_i \alpha_i y_i = 0 \end{cases}$$

Les multiplicateurs de Lagrange optimaux sont donc α_i^* . On montre que si les α_i^* sont solutions de ce système, on a alors :

$$(18) \quad w^* = \sum \alpha_i^* y_i x_i$$

Seuls les α_i^* correspondants aux points les plus proches sont non nuls (les vecteurs supports Vs_1 et Vs_2 sur la figure 4).

L'hyperplan séparateur dans le cas de cas linéaire est donc obtenu en remplaçant w par sa valeur optimale w^* . On obtient alors, l'équation suivante:

5 (19)
$$h(x) = \sum_i \alpha_i^* y_i x_i . x + b$$

Dans l'autre cas où les données ne sont pas linéairement séparables, l'hyperplan optimal est celui qui satisfait les conditions suivantes :

- 1) la distance maximale entre les vecteurs bien classés et l'hyperplan optimal doit être maximale,
- 10 2) la distance entre les vecteurs mal classés et l'hyperplan optimal doit être minimale.

Plus formellement, on applique aux vecteurs d'entrée x une transformation non-linéaire φ . L'espace d'arrivée est appelé espace de
15 « redescription ». Dans cet espace, on cherche alors l'hyperplan vérifiant :

(20)
$$H : x \rightarrow w.\varphi(x) + b$$

avec $y_i h(x_i) > 0$, pour tous les points de l'ensemble d'apprentissage, c'est-à-dire l'hyperplan séparateur dans l'espace de redescription.

En utilisant la même procédure que dans le cas de séparation
20 linéaire précédent, le problème d'optimisation peut alors s'écrire de la façon suivante :

$$(21) \quad \begin{cases} \max \sum_i \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j} \alpha_i \alpha_j y_i y_j \varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j) \\ \alpha_i \geq 0 \text{ pour tout } i \\ \sum_i \alpha_i y_i = 0 \end{cases}$$

En introduisant une fonction Noyau (kernel) définie par $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)$, l'hyperplan séparateur dans le cas non linéaire a alors pour équation :

$$5 \quad (22) \quad g(x) = \sum_i \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b$$

L'utilisation d'une fonction Noyau permet de faire le passage vers le cas linéaire précédemment décrit. Il existe de nombreuses fonctions noyaux, comme par exemple des fonctions linéaires, polynomiales, Gaussienne, Laplacienne, etc.

10 D'autres méthodes de classification préalable peuvent être utilisées, comme par exemple une méthode utilisant des réseaux de neurones ou une méthode utilisant les k plus proches voisins.

Dans un mode de réalisation avantageux, une première étape optionnelle
101 de traitement préliminaire est réalisée avant la première étape principale
15 103, afin de prétraiter la grandeur S pour optimiser le procédé de détection de caractéristiques.

Un exemple de prétraitement consiste en la suppression de composantes de fréquences non significatives de la grandeur S, dans le cas où l'étape principale 103 utilise une décomposition en ondelettes, ce qui permet alors
20 d'optimiser cette décomposition, puisque seules les composantes significatives seront décomposées.

Pour ce faire, on peut utiliser un filtre dont la fréquence de coupure à appliquer est un seuillage. La valeur du seuil est, par exemple, déterminée

empiriquement à partir d'un retour d'expérience, de la connaissance du système ou de la bande de fréquence significative.

Dans un mode de réalisation particulièrement avantageux, une étape d'optimisation 104 est réalisée entre la première étape principale 103 et la deuxième étape principale 105 de détermination du défaut, afin de sélectionner certaines valeurs Val_i optimales parmi celles qui sont obtenues lors de l'étape 103.

En effet, l'utilisation directe des valeurs Val_i dans l'étape de détermination d'un défaut peut présenter des problèmes lorsque l'ensemble de valeurs caractéristiques Val_i générées lors de l'étape 103 est d'une part très grand, et d'autre part entaché de bruit ou de composantes indésirables.

De plus, les valeurs caractéristiques Val_i contiennent souvent des informations redondantes, et ne nécessitent donc pas toutes d'être traitées.

Aussi, afin d'optimiser le processus de détermination de l'étape 105, il est souhaitable de réduire autant que possible le nombre de valeurs Val_i à traiter, au cours d'une étape de sélection 104, afin de ne garder que les valeurs les plus pertinentes Val'_i , où $1 \leq i \leq m$ avec $m < n$, considérées comme étant les meilleures pour l'étape de détermination 105. Ceci contribue à améliorer la robustesse du diagnostic du dispositif électrochimique et à réduire le temps de calcul.

Pour cela, on peut utiliser une méthode de sélection de la meilleure base en ondelettes dans un mode particulier de réalisation. Cette méthode se base sur l'utilisation d'un critère pour sélectionner une base dite « meilleure base ».

Cette méthode comporte les deux étapes suivantes :

- Appliquer un critère choisi aux jeux de valeurs caractéristiques Val_i obtenus lors de la décomposition en ondelettes de l'étape 103.

- Trier les caractéristiques trouvées lors de l'étape précédente par ordre d'importance croissant ou décroissant, selon le critère choisi, afin d'écarter les valeurs caractéristiques Val_i estimées « non significatives ».

Les valeurs caractéristiques Val_i restantes seront alors utilisables lors de l'étape de détermination 105.

Une base optimale pour la détection, par exemple, est une base qui maximise la séparabilité entre les différentes informations fréquentielles et temporelles. Une base optimale pour la détermination est une base qui maximise la séparabilité, autrement dit la discrimination, entre les différentes classes de défauts.

Dans ce cadre, plusieurs critères peuvent être définis.

1) Dans un premier exemple, on utilise l' « entropie relative » (« Cross entropy » en anglais), qui constitue à effectuer une mesure de distance entre les distributions temporelles d'énergie de deux séquences x et y , selon l'équation suivante :

$$(23) \quad ER(x, y) = \sum_i p_i \log\left(\frac{p_i}{q_i}\right) \text{ où } p_i = \frac{|x_i|^2}{\|x\|} \text{ et } q_i = \frac{|y_i|^2}{\|y\|}$$

Cette valeur correspond à la divergence de Kullback entre les distributions x_i et y_i représentant deux classes différentes.

On peut alors définir un critère $D(x, y)$ à optimiser, tel que :

$$(24) \quad D(x, y) = ER(x, y) + ER(y, x).$$

Dans cet exemple, on représente tout d'abord chaque classe de l'ensemble d'apprentissage par un arbre où chaque nœud contient une séquence moyenne des carrés des coefficients des éléments de la classe.

Le critère défini ci-avant étant binaire, il est appliqué à toutes les classes deux à deux et le critère final est la somme des critères binaires résultants.

2) Dans un deuxième exemple, dans le but de maximiser la capacité des coefficients ou des paquets obtenus lors de l'étape 103 à séparer les différentes classes lors de l'étape 105, le critère ici consiste à maximiser l'« inertie interclasse », c'est-à-dire la variance entre les classes les plus

éloignées l'une de l'autre, tout en minimisant l'« inertie intra classe », c'est-à-dire la variance des classes les plus compactes possibles. Le critère peut donc consister à faire le rapport de l'inertie intra classe sur l'inertie totale. On peut aussi envisager de faire le rapport de l'inertie intra classe sur l'inertie interclasse.

5 Dans un exemple où l'on dispose de k classes C1, C2,...,Ck de défauts, de centres de gravité respectifs g1, g2,...,gk contenant respectivement n1, n2,...,nk éléments, on peut noter g le centre de gravité du nuage de points global.

L'inertie interclasses est alors définie par l'équation suivante :

10 (25)
$$I_{inter} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i \cdot d^2(g_i, g)$$

où d est une distance définie, par exemple une distance euclidienne.

L'inertie intra classe est de son côté définie par l'équation suivante :

(26)
$$I_{intra} = \frac{1}{n} \sum_{e \in G_i} d^2(g_i, e)$$

Quant à l'inertie totale, elle est définie par l'équation suivante :

15 (27)
$$I_{totale} = I_{intra} + I_{inter}$$

Le critère final R est donc donné, par exemple, par la relation suivante :

(28)
$$R = \frac{I_{intra}}{I_{intra} + I_{inter}}$$

20 Les classes qui vont être séparées sont préalablement définies. On peut donc soit discriminer toutes les classes de défauts simultanément, séparer les classes deux à deux ou encore séparer une classe donnée de toutes les autres.

Dans un autre mode de réalisation particulier, la réduction de dimensionnalité de l'étape 104 utilise une décomposition en Valeurs Singulières.

Pour mémoire, décomposer une matrice M de m lignes et de n colonnes en valeurs singulières revient à l'écrire sous la forme :

$$(29) \quad M = U \times \Sigma \times V$$

où Σ est une matrice diagonale contenant les valeurs singulières $\lambda_{i,i=1,\dots,m}$ de la matrice M , classées par exemple par ordre décroissant.

$$(30) \quad \Sigma = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ & 0 & & \ddots \\ & & & & \lambda_m \end{pmatrix}$$

Les deux autres matrices U et V contiennent les vecteurs singuliers (à droite et à gauche) correspondants aux valeurs singulières $\lambda_{i,i=1,\dots,m}$.

Les valeurs singulières sont interprétées comme reflétant le degré d'inertie ou de « représentativité » et les vecteurs singuliers sont les axes selon lesquels la variation des données de départ (matrice M) est la plus élevée. Lorsque les valeurs singulières sont classées par ordre décroissant, les dernières valeurs sont celles qui contiennent le moins de variation des données. Ainsi, la réduction de dimensionnalité basée sur le passage de m à p valeurs singulières ($p < n$) suppose négligeable l'information contenue dans les $m-p+1$ dernières valeurs singulières λ_i .

D'autres méthodes peuvent être envisagées pour effectuer la réduction de dimensionnalité, comme par exemple une analyse en composantes principales.

On se réfère enfin à la **figure 5** qui illustre un exemple de classification de défauts selon la présente invention, dans le cas non limitatif d'une pile à combustible.

Sur cette figure 5, un ensemble de valeurs caractéristiques sont représentées sur un graphique en fonction de deux paquets d'ondelettes distincts.

La position de ces valeurs caractéristiques est associée, par apprentissage, à des états de fonctionnement particulier de la pile à combustible à diagnostiquer.

Ainsi, un premier groupe de valeurs caractéristiques, situées au centre sur le graphique, définit une classe C_0 de valeurs caractéristiques correspondant à un état normal de fonctionnement de la pile à combustible.

Un deuxième groupe de valeurs caractéristiques, situées à gauche sur le graphique, définit une classe C_1 de valeurs caractéristiques correspondant à un état anormal de fonctionnement où la pile à combustible présente un défaut d'assèchement.

Enfin, un troisième groupe de valeurs caractéristiques, situées à droite sur le graphique, définit une classe C_2 de valeurs caractéristiques correspondant à un état anormal de fonctionnement où la pile à combustible présente un défaut de « noyage ».

Ces classes C_0 , C_1 , C_2 sont définies par apprentissage et mesure des valeurs caractéristiques sur des piles présentant les différents états incriminés. Les frontières de ces valeurs classes, par exemple définies par des éléments de détermination calculés comme ci-avant, sont mémorisées dans le module 205 et associées à des variables d'état D_0 , D_1 , D_2 représentatives respectivement d'un état normal, d'un état anormal avec défaut d'assèchement et d'un état anormal avec défaut de noyage.

Lorsqu'un nouveau diagnostic est effectué sur une pile à combustible de même type que celle utilisée dans la classification supervisée lors de l'apprentissage, les mêmes paquets d'ondelettes sont observés afin de situer la valeur caractéristique dans l'une ou l'autre des zones Z_0 à Z_2 . En fonction de la zone dans laquelle se situe la valeur caractéristique mesurée, une variable

d'état D_0 à D_2 sera générée par le module de détermination 205, indicative d'un état particulier.

On se réfère maintenant à la **figure 6**, sur laquelle est représenté schématiquement un dispositif de détection d'un défaut dans un dispositif électrochimique selon l'invention.

Sur cette figure, un dispositif électrochimique 200, du type de ceux indiqués précédemment, fournit une grandeur S au dispositif de détection 201.

Ce dispositif de détection 201 comporte un module de traitement 203 connecté à un module de détermination 205, lui-même connecté à un module d'interface 207.

Le module de traitement 203 est adapté pour effectuer la première étape principale 103 de transformation, ainsi que les éventuelles étapes optionnelles 101 et 104 de traitement préliminaire et de sélection de valeurs caractéristiques pertinentes Val_i' telles que décrites ci-avant.

Un tel module de traitement 203 peut consister en un processeur, un micro-processeur, ou tout autre composant, par exemple sur circuit intégré, capable d'effectuer des calculs sur des valeurs numériques ou de faire fonctionner un programme informatique à cet effet.

Lorsque la grandeur S à analyser est de nature analogique, le module de traitement 203 peut comprendre un convertisseur analogique/numérique afin de transformer la grandeur S en une valeur numérique permettant son traitement.

Le module de traitement 203, une fois qu'il a effectué l'étape principale 103 d'obtention d'une ou plusieurs valeur(s) Val_i , fournit celle(s)-ci au module de détermination de défaut 205. Dans le cas particulier où une étape optionnelle de sélection 104 est aussi effectuée par le module de traitement 203, ce sont les valeurs caractéristiques pertinentes Val_i' qui sont alors fournies au module de détermination de défaut 205.

Dans l'exemple de la figure 6, les valeurs Val_i sont indiquées comme étant fournies par plusieurs connexions en parallèle, mais une seule connexion

pourrait aussi bien être utilisée, auquel cas la transmission de ces valeurs s'effectue en série. Le premier mode de réalisation en parallèle permet un transfert plus rapide des valeurs, tandis que le second mode de réalisation en série permet de simplifier et de réduire le coût de la connectique entre les modules 203 et 205.

Le module de détermination 205 est adapté pour déterminer une ou plusieurs caractéristique(s) D_i du dispositif électrochimique à partir des valeurs Val_i reçues du module de traitement 205. Il peut comprendre à cet effet des moyens de classification dans lesquels sont classées les caractéristiques en fonction de ces valeurs.

De tels moyens de classification peuvent par exemple utiliser une méthode basée sur un réseau de neurones, ayant été entraîné pour classer les différents défauts sur la base de valeurs reçues en entrée, ou sur la logique floue.

Ces moyens de classification peuvent aussi utiliser des méthodes statistiques comme la détermination des k plus proches voisins, des machines à Vecteurs Supports ou l'analyse en Composantes Principales.

Ainsi, en réponse à un certain nombre de valeurs Val_i , le module de détermination 205 va fournir en sortie, grâce à ses moyens de classification, une ou plusieurs variables D_i indicatives d'une caractéristique du dispositif électrochimique, par exemple une caractéristique d'état normal (pour D_0) ou d'un ou plusieurs défauts.

Ces valeurs D_i sont alors reçues par un module d'interface 207 qui va indiquer, en fonction de la ou des variable(s) D_i reçues, l'état de fonctionnement du dispositif électrochimique à l'utilisateur du dispositif de détection 201 ou à un système de contrôle-commande situé en aval du dispositif de détection.

Ceci peut se faire sous la forme d'un affichage (ce qui permet de préciser le type d'état ou de défaut en fonction de la variable D_i), d'une alarme sonore ou de tout autre signal adapté pour informer l'utilisateur ou le système de régulation et de contrôle-commande situé en aval d'un état de fonctionnement normal ou anormal du dispositif électrochimique à diagnostiquer.

Bien entendu, l'invention n'est pas limitée aux exemples de réalisation ci-dessus décrits et représentés, à partir desquels on pourra prévoir d'autres modes et d'autres formes de réalisation, sans pour autant sortir du cadre de l'invention.

Revendications

1. Procédé de détection de défaut d'un dispositif électrochimique comprenant les étapes :

- réception d'une grandeur (S) dudit dispositif électrochimique,
- 5 - obtention (103) d'au moins une valeur caractéristique (Val_i) à partir d'au moins la grandeur (S) reçue dudit dispositif électrochimique, la valeur caractéristique (Val_i) étant obtenue à partir de la grandeur (S) reçue par une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes, une ondelette étant une fonction mathématique (ψ) oscillatoire localisée autour d'un
- 10 temps central et limitée dans le temps,
- détermination (105), par des moyens de classification de défauts dans lesquels sont classées des variables indicatives d'une caractéristique du dispositif électrochimique en fonction de valeurs caractéristiques (Val_i), d'au moins une variable (Di) indicative d'un défaut dudit dispositif électrochimique à
- 15 partir de ladite valeur caractéristique (Val_i) obtenue,
- fourniture d'un état de fonctionnement du dispositif électrochimique en fonction de l'au moins une variable (Di) indicative d'un défaut dudit dispositif électrochimique à un utilisateur ou à un système de contrôle-commande.

2. Procédé de détection de défaut selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite transformation en ondelettes est une transformation discrète en ondelettes dans laquelle la valeur caractéristique obtenue comporte au moins un coefficient d'ondelettes $S_{a,b}$ dépendant d'une variable d'échelle de valeur a et d'une variable de translation de valeur b.

3. Procédé de détection de défaut selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'une pluralité de valeurs caractéristiques est obtenue par la décomposition d'un ensemble de coefficients d'ondelettes $w_{j,p}$, présentant une variable de niveau d'échelle j de valeur inférieure à a, en une pluralité d'ensemble de coefficients d'ondelettes $w_{j+1,p}$.

4. Procédé de détection de défaut selon la revendication 3, dans lequel la variable d'échelle de valeur a vérifie $a=a_0^j$, où j est un niveau d'échelle et a_0 un paramètre d'échelle, caractérisé en ce que a ensembles de valeurs caractéristiques sont obtenues par la décomposition successive, pour chaque valeur j variant de 0 à un niveau de décomposition donné, de chaque ensemble de coefficients d'ondelettes $w_{j,p}$ en a_0 ensembles de coefficients d'ondelettes $w_{j+1,p}$.

5. Procédé de détection de défaut selon la revendication 4, caractérisé en ce que le niveau de décomposition donné correspond à un niveau M de décomposition maximale.

6. Procédé de détection de défaut selon l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que l'étape de détermination comporte une étape de comparaison de la valeur caractéristique par rapport à au moins un élément de détermination (H) séparant au moins une première classe de défaut (C_1) d'une deuxième classe de défaut (C_2).

7. Procédé de détection de défaut selon la revendication 6, caractérisé en ce que l'élément de détermination (H) est défini au moyen d'une classification préalable d'une pluralité de valeurs caractéristiques en une pluralité de classes de défauts (C_1, C_2).

8. Procédé de détection de défaut selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel, pour une pluralité de valeurs caractéristiques (Val_i), le procédé comprend, entre l'obtention (103) de ladite pluralité de valeurs caractéristiques et la détermination (105) du défaut, une étape de sélection (104) d'au moins une valeur pertinente (Val_i') parmi la pluralité de valeurs caractéristiques obtenues, la détermination du défaut s'effectuant à partir de ladite valeur pertinente (Val_i').

9. Procédé de détection de défaut selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce qu'il comprend une étape préliminaire de traitement (101) de la grandeur reçue du dispositif électrochimique.

10. Procédé de détection de défaut selon la revendication 9, caractérisé en ce que l'étape préliminaire de traitement comprend une étape

d'élimination d'au moins une composante de fréquence de la grandeur reçue du dispositif électrochimique.

11. Programme informatique, stocké dans une mémoire d'une unité centrale et/ou stocké sur un support mémoire destiné à coopérer avec un lecteur
5 de ladite unité centrale, caractérisé en ce qu'il comporte des instructions pour mettre en œuvre les étapes d'un procédé de détection de défauts selon l'une des revendications 1 à 10.

12. Dispositif de détection de défaut d'un dispositif électrochimique comportant :

10 - un module de traitement (203) adapté pour recevoir au moins une grandeur (S) dudit dispositif électrochimique et pour générer au moins une valeur caractéristique (Val_i) à partir de ladite grandeur (S) en effectuant une opération mathématique comprenant une transformation en ondelettes, une ondelette étant une fonction mathématique (ψ) oscillatoire localisée autour d'un
15 temps central et limitée dans le temps,

- un module de détermination (205) comprenant des moyens de classification de défauts dans lesquels sont classées des variables indicatives d'une caractéristique du dispositif électrochimique en fonction de valeurs caractéristiques (Val_i), les moyens de classification étant adaptés pour fournir au
20 moins une variable (D_i) indicative d'un défaut du dispositif électrochimique en réponse à la valeur caractéristique reçue du module de traitement , et

- un module d'interface (207) adapté pour indiquer, en fonction de l'au moins une variable (D_i) indicative d'un défaut du dispositif électrochimique, l'état de fonctionnement du dispositif électrochimique à un utilisateur ou à un système
25 de contrôle commande situé en aval du dispositif de détection.

13. Dispositif de détection de défaut selon la revendication 12, caractérisé en ce que les moyens de classification de défauts comportent un réseau de neurones.

14. Dispositif de détection de défaut selon l'une des revendications 12 ou 13, caractérisé en ce que ladite transformation en ondelettes comporte la décomposition de la grandeur (S) en une pluralité de coefficients d'ondelettes est une transformation discrète en coefficients d'ondelettes $S_{a,b}$ dépendant d'une variable d'échelle de valeur a et d'une variable de translation de valeur b.

1/3

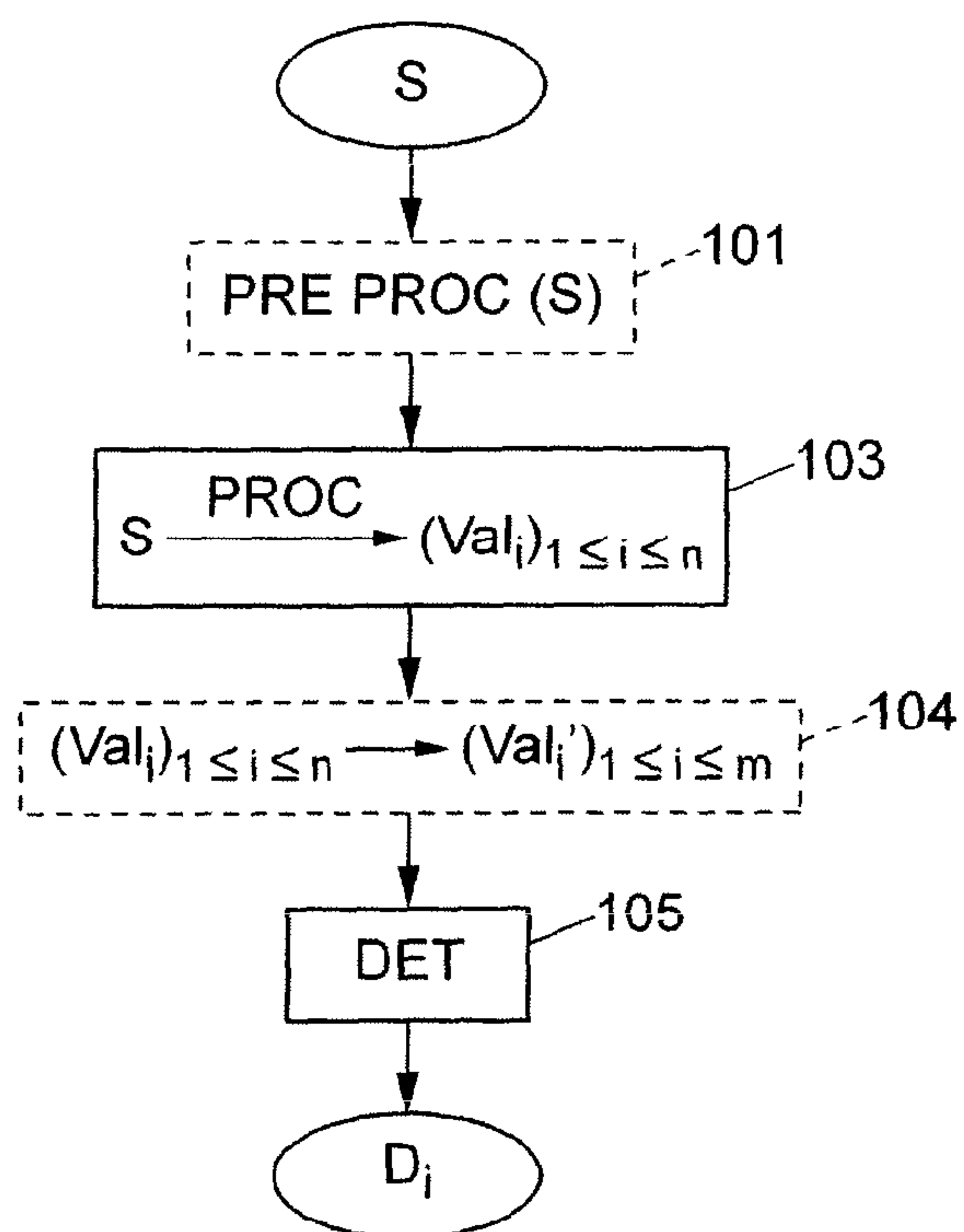


FIG. 1

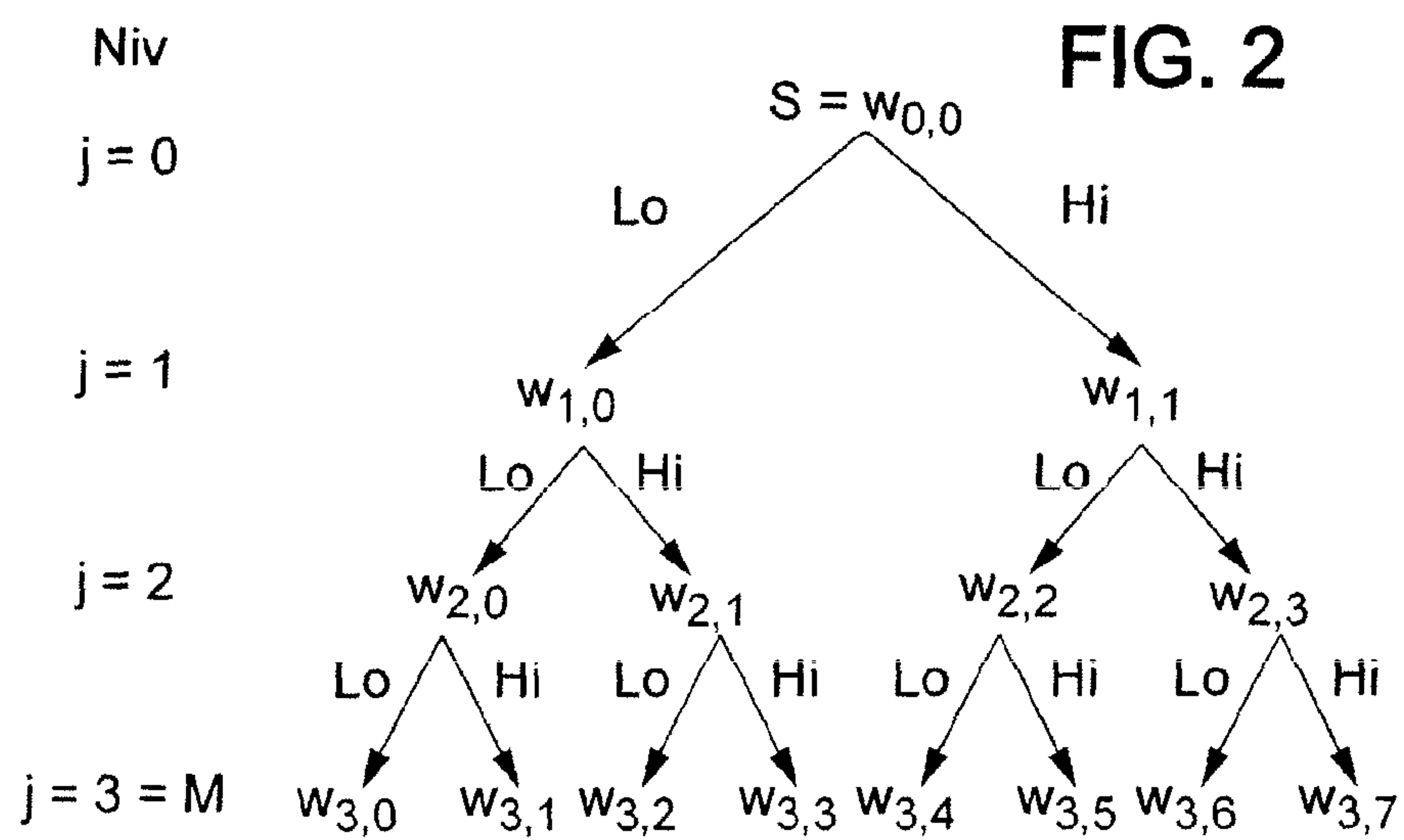
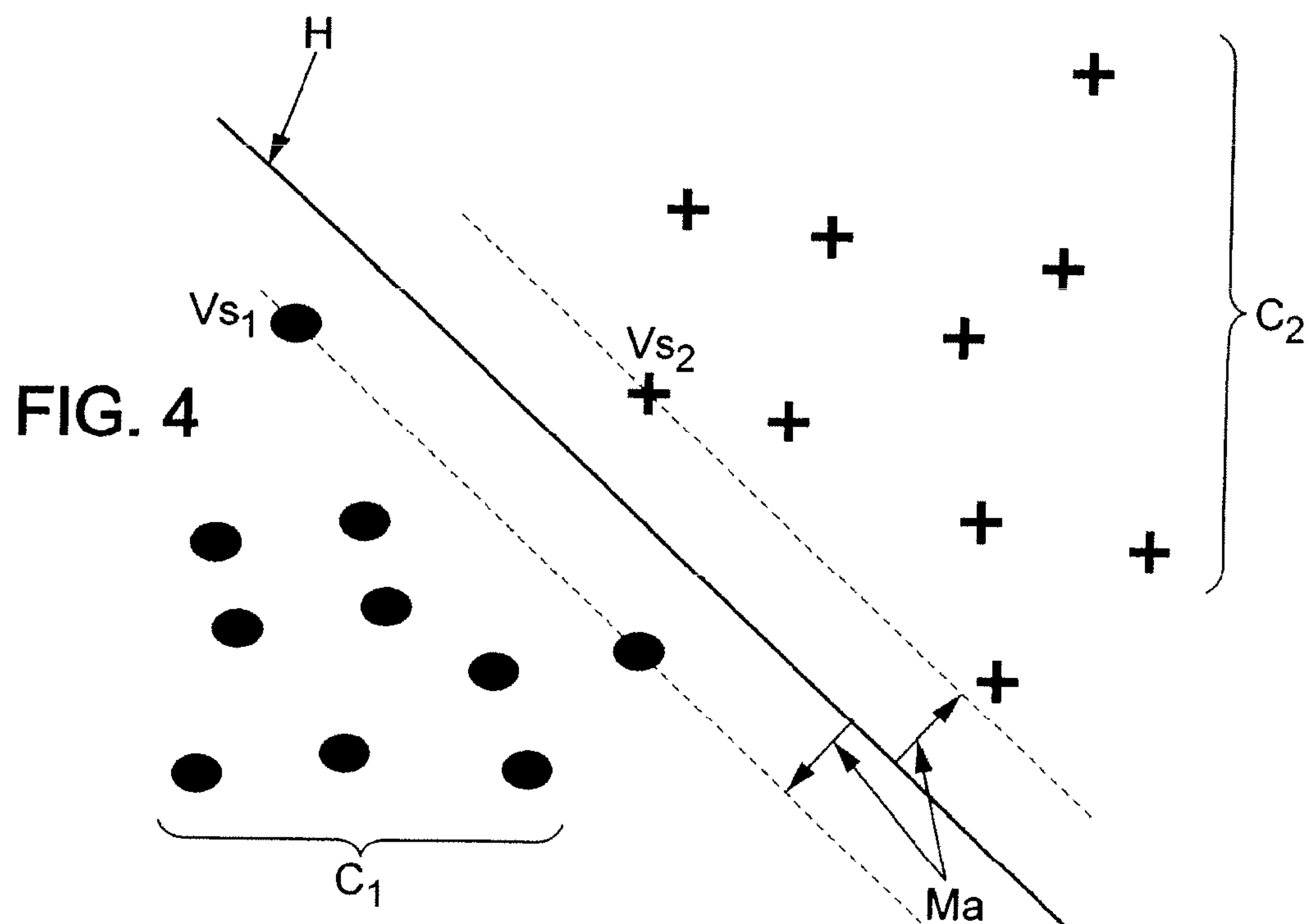
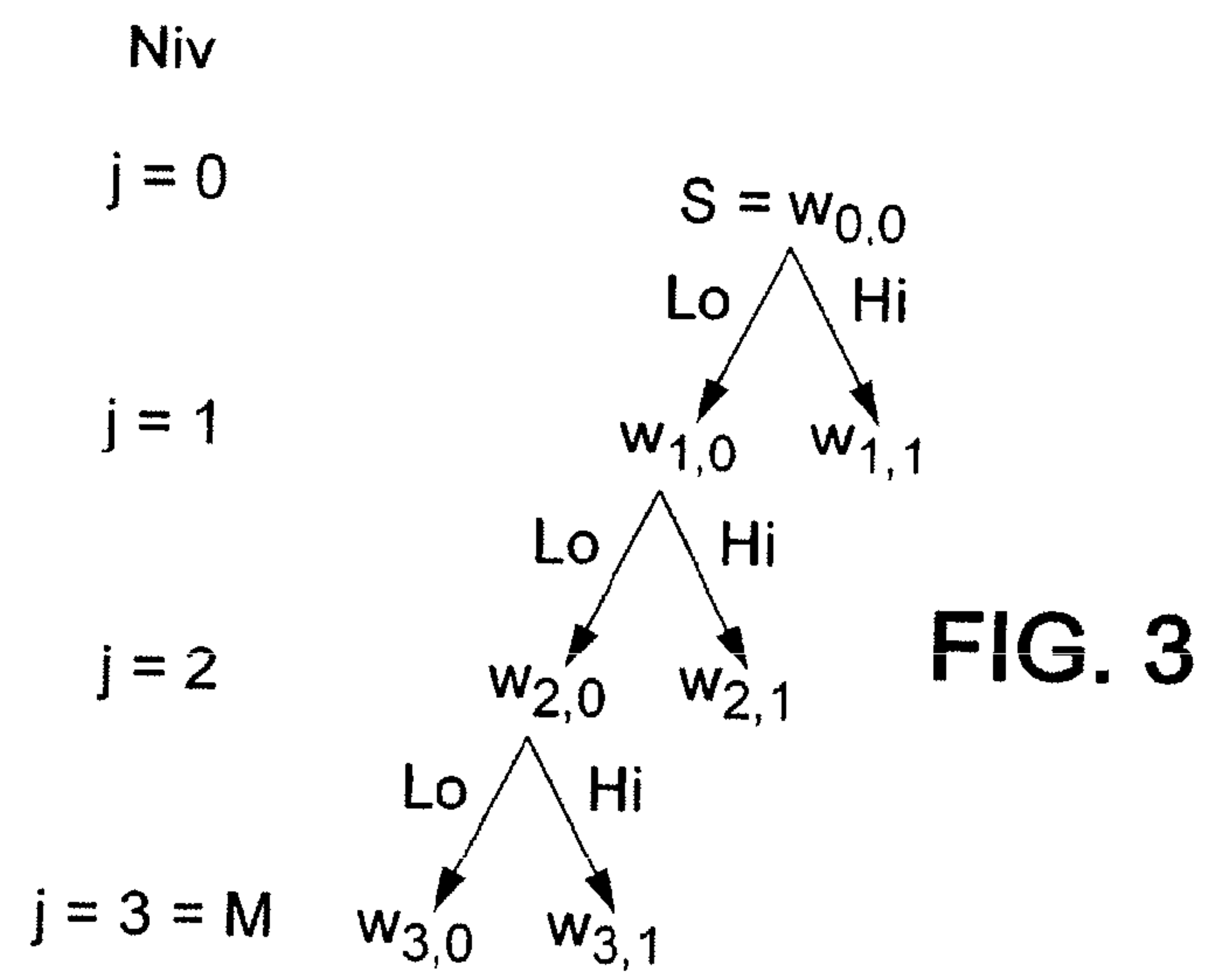


FIG. 2

2/3



3/3

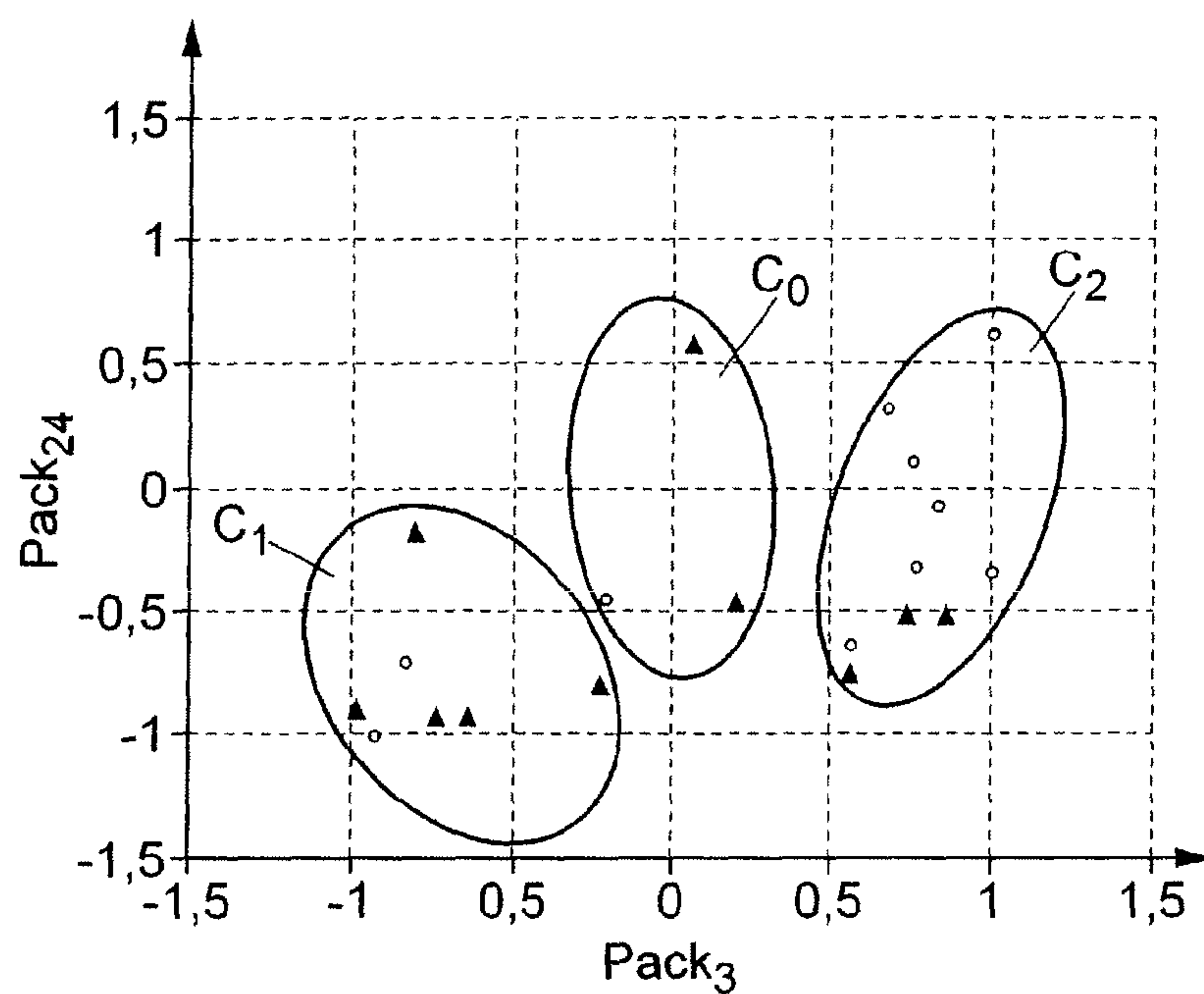


FIG. 5

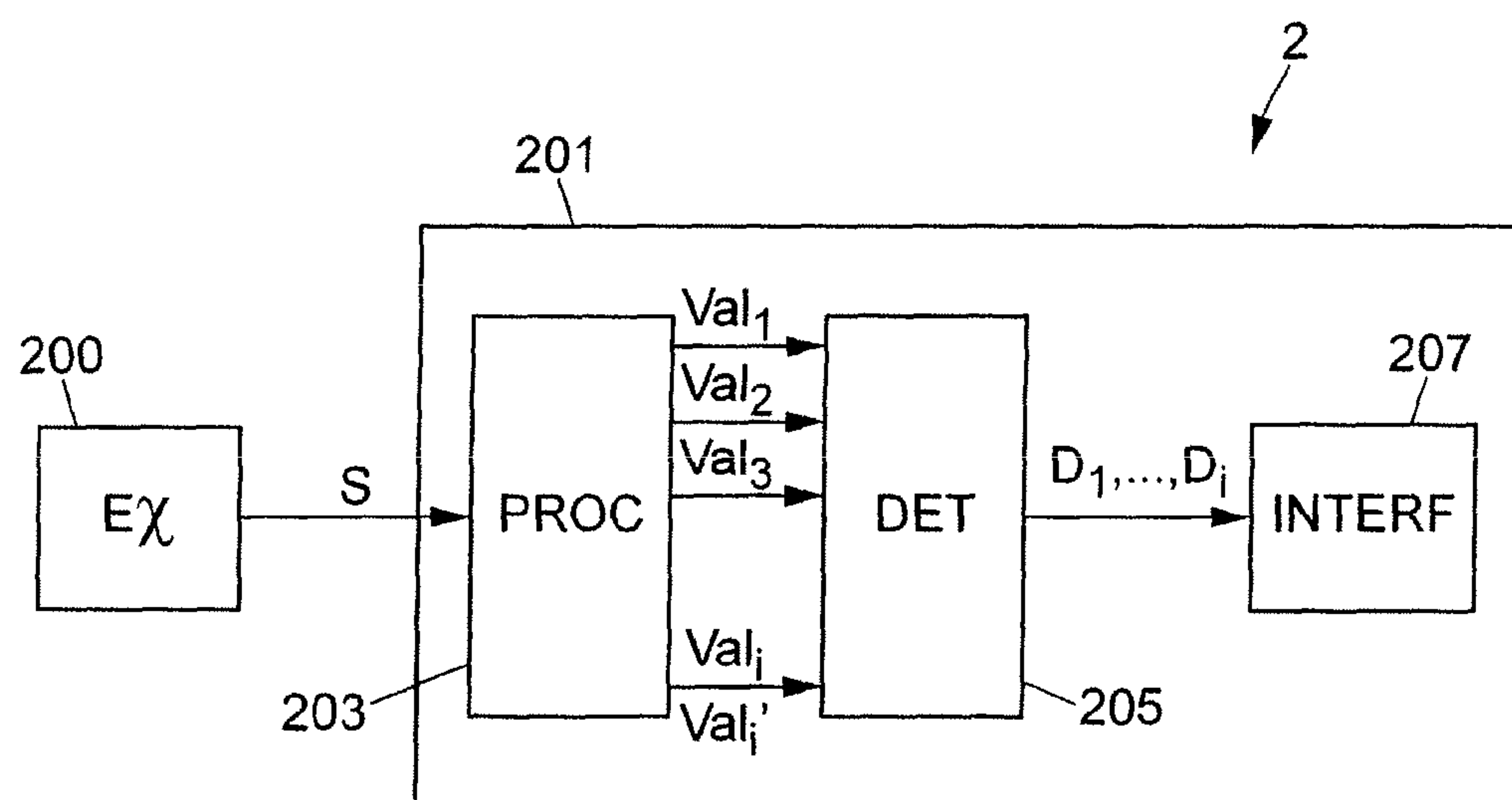


FIG. 6

