

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

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international



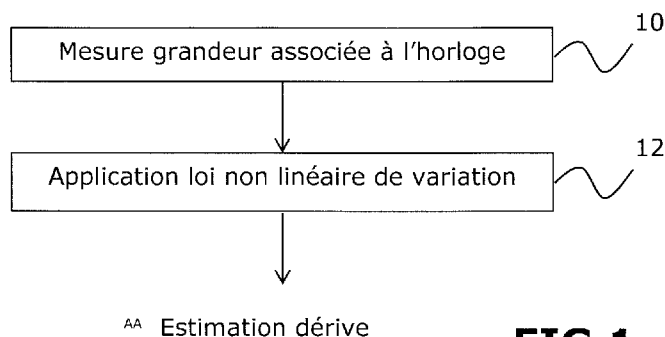
(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2020/002798 A1**

(43) Date de la publication internationale  
02 janvier 2020 (02.01.2020)

- (51) Classification internationale des brevets :  
G04G 3/02 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2019/051506
- (22) Date de dépôt international :  
19 juin 2019 (19.06.2019)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
1856008 29 juin 2018 (29.06.2018) FR
- (71) Déposant : SERCEL [FR/FR] ; 16 rue de Bel Air, 44470 CARQUEFOU (FR).
- (72) Inventeur : L'HER, Christophe ; c/o SERCEL, 16, Rue de Bel Air, 44470 CARQUEFOU (FR).
- (74) Mandataire : DUTREIX, Hugues et al. ; IPSILON, 3, rue Edouard Nignon, 44300 NANTES (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, 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, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM),

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR ESTIMATING THE DRIFT OF A CLOCK FOR DATING SEISMIC DATA SAMPLES

(54) Titre : PROCEDE ET SYSTEME D'ESTIMATION DE LA DERIVE D'UNE HORLOGE DE DATATION D'ECHANTILLONS DE DONNEES SISMOQUES



**FIG.1**

10 Measured quantity associated with the clock  
12 Application of non-linear law of variation  
AA Estimation of drift

(57) Abstract: The method for estimating the drift over time of a physical operating parameter of a clock for dating seismic data samples associated with a seismic data collection node involves measuring (10) at least one quantity associated with the clock, at predetermined instants or during predetermined time periods, and applying (12), to this quantity, a predetermined non-linear law of variation of this quantity that depends on the values collected during the measurement step (10), so as to obtain an estimation of the drift over time of the physical operating parameter.

(57) Abrégé : Pour estimer la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, on mesure (10) au moins une grandeur associée à l'horloge, à des instants prédéterminés ou pendant des périodes de temps prédéterminées et on applique (12) à cette grandeur une loi prédéterminée non linéaire de variation de cette grandeur qui dépend des valeurs recueillies lors de l'étape (10) de mesure, de façon à obtenir une estimation de la dérive dans le temps du paramètre physique de fonctionnement.

européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée:**

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

## **PROCEDE ET SYSTEME D'ESTIMATION DE LA DERIVE D'UNE HORLOGE DE DATATION D'ECHANTILLONS DE DONNEES SISMIQUES**

La présente invention se rapporte à un procédé et un système  
5 d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de  
fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données  
sismiques.

L'invention appartient au domaine de la prospection sismique, qu'elle  
soit marine ou terrestre, et s'applique notamment à la minimisation des  
10 erreurs de datation des échantillons de données sismiques recueillis.

Toute horloge présente au fil du temps un certain décalage dans le  
temps, qui s'exprime par exemple par une erreur de phase accumulée,  
communément appelée « dérive ». Cette dérive est due à divers facteurs, dont  
le vieillissement de l'horloge ou encore la température de l'environnement  
15 dans lequel elle se trouve.

Cette dérive affecte aussi bien les horloges du type comportant un  
oscillateur à quartz (oscillateurs compensés en température TCXO, en anglais  
« Temperature Controlled Crystal Oscillators », ou oscillateurs compensés à  
microcontrôleur MCXO, en anglais « Microcontroller Compensated Crystal  
20 Oscillators, ou encore oscillateurs à quartz thermostatés OCXO, en anglais  
« Oven Controlled Crystal Oscillators ») que les horloges du type atomique (au  
rubidium ou au césium).

Lorsque l'horloge est utilisée pour dater des événements tels que des  
réceptions d'échantillons de données sismiques, la dérive de l'horloge induit  
25 des erreurs dans la datation de ces échantillons.

Les méthodes actuelles de correction de la dérive de l'horloge se  
fondent généralement sur l'hypothèse que cette dérive est linéaire et  
appliquent donc des corrections elles aussi linéaires. C'est le cas par exemple  
dans le document de brevet US-A-9 417 359. Cela signifie que, si par exemple  
30 une erreur accumulée de phase de l'horloge de 30 ms a été mesurée au bout  
de 30 jours de fonctionnement, on considère que la dérive est de 1 ms par  
jour et on rectifie d'autant.

Néanmoins, cette façon de procéder n'est pas satisfaisante car on

constate en pratique que la dérive de l'horloge n'est pas linéaire.

L'invention a pour but de remédier à au moins un des inconvénients précités de l'art antérieur.

Dans ce but, la présente invention propose un procédé d'estimation de  
5 la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, notamment en mer avec un nœud adapté pour rester sur un fond marin, conforme à la revendication 1.

Il en résulte une erreur résiduelle de datation par l'horloge inférieure à  
10 l'erreur résiduelle obtenue lorsqu'on applique une correction linéaire à la dérive de l'horloge.

En outre, ce procédé peut être mis en œuvre, soit au sein même de l'équipement de collecte de données sismiques, soit dans un ordinateur séparé.

15 Par ailleurs, on peut estimer la dérive de l'horloge à tout moment à l'issue d'une campagne de collecte de données sismiques, voire même au cours de la campagne lorsque celle-ci a une durée particulièrement longue.

De plus, au cas où l'horloge est du type OCXO, ce procédé est robuste vis-à-vis du temps de chauffe du four de l'horloge.

20 Au surplus, ce procédé peut être appliqué indifféremment à tout type d'horloge, dont les horloges du type à quartz (dont TCXO, MCXO et OCXO) et les horloges du type atomique (dont celles au rubidium et celles au césium).

L'invention permet d'obtenir une estimation de bonne qualité de la dérive de l'horloge, ce qui permet d'appliquer une correction pertinente aux  
25 échantillons de données sismiques recueillis.

Des modes particuliers de réalisation sont énoncés dans les revendications dépendantes.

Dans le même but que celui indiqué plus haut, la présente invention propose en outre des procédés d'estimation de la dérive dans le temps d'un  
30 paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, notamment en mer avec un nœud adapté pour rester sur un fond marin, conforme aux revendications 9, 10 et 12.

Toujours dans le même but que celui indiqué plus haut, la présente invention propose également un système d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de  
5 données sismiques, conforme à la revendication 13.

Les avantages et caractéristiques particulières du système étant similaires à ceux des procédés, ils ne sont pas rappelés ici.

D'autres aspects et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après de modes particuliers de réalisation de  
10 l'invention, donnés à titre d'exemples nullement limitatifs, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- la figure 1 est un organigramme illustrant de façon générale des étapes d'un procédé d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de  
15 données sismiques ;

- la figure 2 est un organigramme illustrant des étapes du procédé de la figure 1 dans un premier mode particulier de réalisation où le paramètre physique de fonctionnement est la fréquence instantanée de l'horloge ;

- la figure 3 est un organigramme illustrant des étapes du procédé de  
20 la figure 1 dans un second mode particulier de réalisation où le paramètre physique de fonctionnement est la phase de l'horloge ;

- la figure 4 est un organigramme illustrant des étapes du procédé de la figure 1 dans un troisième mode particulier de réalisation incluant une mission simulée ; et

- la figure 5 est un graphique représentant l'erreur accumulée de phase en fonction du temps, dans le cas d'une correction d'ordre 2 et dans le cas d'une correction d'ordre 3.  
25

Dans toute la suite, on considère un nœud de collecte de données sismiques. Ces données sont collectées au moyen de divers capteurs  
30 sismiques, dont des capteurs de vitesse, des accéléromètres ou encore des hydrophones et/ou des géophones. A un nœud donné peuvent par exemple être associés trois géophones, ou un hydrophone et trois géophones, ou un hydrophone et trois accéléromètres, toute autre combinaison de capteurs

étant envisageable. En particulier, bien que la collecte des données puisse être réalisée à terre ou dans un puits, dans un mode particulier de réalisation, on s'intéressera à une collecte de données sismiques en mer, par un nœud qui est notamment apte à être posé au fond de l'eau pour une campagne sismique  
5 avant récupération.

Une horloge est associée à ce nœud afin de dater les échantillons de données sismiques reçus par le nœud.

Sachant que, par exemple lors d'une campagne de collecte de données sismiques en mer, le nœud peut rester au fond de la mer pendant plusieurs  
10 mois, l'horodatage des échantillons de données sismiques est assuré par une horloge haut de gamme, présentant une stabilité élevée.

Cette horloge peut être du type à oscillateur à quartz (par exemple TCXO, MCXO ou OCXO) ou du type atomique (par exemple au rubidium ou au césium). Elle est définie par un paramètre physique de fonctionnement, qui  
15 peut être par exemple sa phase par rapport à une horloge de référence, ou encore sa fréquence instantanée.

Comme expliqué en introduction, au fil du temps et après une synchronisation initiale, l'horloge subit une dérive qui se traduit au bout d'une durée prédéterminée par une erreur accumulée de phase ou une erreur  
20 accumulée de fréquence instantanée.

La figure 1 illustre le procédé d'estimation de cette dérive conforme à l'invention dans sa généralité.

Il comporte une étape 10 de mesure d'une grandeur physique associée à l'horloge. On mesure cette grandeur physique, soit à des instants  
25 prédéterminés, soit pendant des périodes de temps prédéterminées.

Cette étape 10 de mesure est suivie d'une étape 12 au cours de laquelle on applique à cette grandeur physique une loi prédéterminée non linéaire de variation et notamment une loi polynomiale d'ordre supérieur ou égal à 2. On obtient alors une estimation de l'erreur accumulée de phase de  
30 l'horloge, cette erreur étant représentative de la dérive de l'horloge.

On détaille ci-après deux modes particuliers de réalisation de ce procédé d'estimation, selon que la grandeur physique choisie est la fréquence instantanée et/ou la phase de l'horloge.

Dans un premier mode de réalisation où on utilise comme grandeurs physiques à mesurer la fréquence instantanée et la phase de l'horloge, le détail de l'étape de mesure 10 est illustré par la figure 2.

Cette étape de mesure est réalisée en deux phases : lors d'une  
5 première phase, qui se déroule avant déploiement du nœud pour une mission de collecte de données sismiques, on mesure lors d'une étape 100 la fréquence instantanée initiale  $f_i$  de l'horloge et on synchronise, lors d'une étape 102, un signal interne d'information temporelle du nœud par rapport à un signal d'information temporelle de référence.

10 Le signal interne d'information temporelle du nœud est produit par l'horloge. Elle fonctionne généralement à une fréquence de plusieurs MHz, par exemple 10 MHz et, par l'intermédiaire d'un diviseur de fréquence d'horloge, l'horloge fournit également un signal à une autre fréquence, de 1 Hz par exemple, qui est utilisé comme signal interne d'information temporelle ou PPS  
15 (impulsion par seconde, en anglais « Pulse Per Second ») interne.

Ce PPS interne permet à un microcontrôleur d'horodater les échantillons de données sismiques reçus par les capteurs sismiques et avec l'aide d'un convertisseur analogique-numérique. Les données sismiques reçues sont mémorisées dans une mémoire, qui peut par exemple être du type  
20 « flash ».

Lors de l'étape 102, on cale ce PPS interne sur un signal de référence ou PPS externe, qui peut par exemple être fourni par un système global de positionnement ou GPS (en anglais « Global Positioning System »), sachant que lorsque le nœud est sur un navire de prospection sismique, il est  
25 généralement connecté à un récepteur GPS.

Cette opération de synchronisation ou calage peut être réalisée via l'envoi d'un signal de réinitialisation par le microcontrôleur à l'horloge.

Après synchronisation, il n'y a plus de différence de phase entre les PPS interne et externe.

30 A l'issue de cette première phase, le nœud est déployé et la mission de collecte de données sismiques se déroule pendant un certain nombre de jours, de semaines, voire de mois, l'horloge fonctionnant en permanence pendant la mission.

Dans l'exemple d'une collecte de données sismiques en mer, comme le signal GPS est électromagnétique, il ne traverse pas la colonne d'eau. Il reste donc inaccessible pour l'horloge. Le signal GPS peut également être inaccessible lors d'une collecte de données sismiques à terre.

5 Au fil du temps, l'erreur de fréquence instantanée de l'horloge induit une erreur accumulée de phase entre le PPS interne et le PPS externe. En effet, l'électronique horodate les données sismiques au moyen d'un signal censé avoir une fréquence constante de 1 Hz dans l'exemple décrit ici, mais en pratique, ce n'est pas le cas, car l'instabilité en température et le  
10 vieillissement des oscillateurs à quartz (TCXO, MCXO ou OCXO) ainsi que des oscillateurs atomiques (rubidium ou césium) ne sont pas négligeables.

L'erreur de phase accumulée peut être mesurée lorsque le PPS externe est disponible, c'est-à-dire, dans l'exemple d'une mission en mer, lorsque le nœud est rapatrié à bord du navire de prospection sismique et reconnecté au  
15 récepteur GPS.

Ainsi, lors d'une seconde phase, qui se déroule à la fin de la mission de collecte de données sismiques, lors d'une étape 104, on mesure la fréquence instantanée finale  $f_f$  de l'horloge, ainsi que le déphasage final entre le PPS interne et le PPS externe.

20 En variante, cette seconde phase peut se dérouler à un instant prédéterminé au cours de la mission, auquel cas on mesure la fréquence instantanée de l'horloge à cet instant ainsi que le déphasage à cet instant entre le PPS interne et le PPS externe.

Lors de l'étape 12 d'application de la loi prédéterminée non linéaire de  
25 variation de la fréquence instantanée de l'horloge, on estime l'erreur finale de fréquence instantanée de l'horloge à partir des fréquences instantanées initiale  $f_i$  et finale  $f_f$  et du déphasage final.

Pour ce faire, conformément à l'invention, on formule l'hypothèse que la fréquence instantanée de l'horloge varie suivant une équation polynomiale  
30 d'ordre 2, d'où il s'ensuit que la phase de l'horloge varie suivant une équation polynomiale d'ordre 3 ; on pourrait prendre un ordre supérieur du polynôme.

Soit  $\varepsilon(t)$  l'erreur de fréquence instantanée de l'horloge en fonction du temps  $t$ . L'équation polynomiale d'ordre 2 s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_i + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2$$

où  $\varepsilon_i = \varepsilon(0)$  désigne l'erreur de fréquence initiale et  $\alpha$  et  $\beta$  désignent des coefficients prédéterminés.

L'erreur de phase accumulée est donnée par :

$$5 \quad \varphi(t) = \int \varepsilon(t) dt$$

L'erreur de phase accumulée est donc donnée par l'équation polynomiale d'ordre 3 suivante :

$$\varphi(t) = \varepsilon_i \cdot t + \alpha \cdot \frac{t^2}{2} + \beta \cdot \frac{t^3}{3}$$

10 Soit T l'instant de fin de la mission. L'erreur finale de fréquence instantanée et l'erreur finale de phase mesurées à l'instant T sont notées :

$$\varepsilon(T) = \varepsilon_f$$

$$\varphi(T) = \varphi_f$$

On peut alors calculer les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$ , étant donné qu'on dispose de deux équations à deux inconnues :

$$15 \quad \beta = \frac{\varphi_f - \frac{T}{2}(\varepsilon_f + \varepsilon_i)}{\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\right) \cdot T^3}$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_i - \beta \cdot T^2}{T}$$

Ces coefficients peuvent être calculés soit dans le nœud, soit en post-traitement, dans un calculateur séparé.

20 Ce mode de réalisation, pour lequel la dérive temporelle de l'horloge est décrite suivant une équation d'ordre 3, n'est possible que si le nœud dispose d'un moyen pour mesurer précisément la fréquence instantanée de son horloge.

25 Estimer la dérive temporelle de l'horloge suivant une équation cubique permet de réduire l'erreur maximum de datation des échantillons sismiques par rapport à une équation d'ordre 2 ou parabolique.

En effet, utiliser une équation d'ordre 2 s'appuie sur l'hypothèse que la fréquence évolue dans le temps de manière linéaire. Or le phénomène de vieillissement des horloges fait varier la fréquence selon une loi non linéaire.

Ainsi, comme le montre la figure 5, qui représente l'erreur accumulée

de phase (en secondes) en fonction du temps (en jours), l'erreur résiduelle de datation des échantillons sismiques a une forme de cloche lorsque la correction appliquée est d'ordre 2, avec le maximum d'erreur au milieu de la mission (courbe du haut sur la figure 5).

5 Ce phénomène est supprimé lorsqu'on utilise une équation cubique (courbe du bas sur la figure 5), ce qui minimise l'erreur maximum de datation.

En variante, au lieu d'une loi de variation de la fréquence fondée sur une équation polynomiale, on pourrait utiliser d'autres formes d'évolution, telles qu'une évolution logarithmique par exemple.

10 Avant déploiement du nœud, on peut réduire l'erreur de fréquence instantanée de l'horloge en effectuant une étape préliminaire de réglage de la fréquence de sortie de l'horloge de façon à réduire l'erreur de fréquence instantanée de l'horloge.

Cette étape peut être réalisée soit au moment de la fabrication de  
15 l'horloge, soit lors d'une maintenance de l'horloge. Les horloges du commerce disposent en effet d'une entrée permettant ce réglage. Cela permet de minimiser encore davantage l'erreur résiduelle de datation par l'horloge.

Pour prendre en compte les changements de température qui peuvent se produire notamment au début ou à la fin de la mission, en raison du  
20 déploiement ou du rapatriement du nœud et de l'électronique associée dans une eau froide par exemple dans le cas d'une mission en mer, on peut améliorer l'estimation de la dérive de l'horloge en introduisant un paramètre de température. En effet, la prise en compte de la température dans l'estimation de la dérive de l'horloge permet d'améliorer la précision de cette  
25 estimation.

A cet effet, avant déploiement du nœud pour une mission de collecte de données sismiques, on mesure l'évolution de la fréquence instantanée de l'horloge en fonction de la température de l'horloge. Puis pendant la mission, on mesure la température de l'horloge.

30 On introduit alors dans la loi de variation non linéaire de la fréquence instantanée de l'horloge un paramètre  $\varepsilon_{Temp}$  représentatif de l'erreur de fréquence instantanée d'horloge due au changement de température.

L'équation polynomiale d'ordre 3 donnant l'erreur de phase accumulée de l'horloge devient alors :

$$\varphi(t) = (\varepsilon_i + \varepsilon_{Temp}).t + \alpha \cdot \frac{t^2}{2} + \beta \cdot \frac{t^3}{3}$$

avec

$$\beta = \frac{\varphi_f - \frac{T}{2}(\varepsilon_f + \varepsilon_i)}{\left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\right) \cdot T^3}$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_i - \beta \cdot T^2 - 2 \cdot \varepsilon_{Temp}}{T}$$

La figure 3 illustre le déroulement du procédé conforme à l'invention dans un second mode de réalisation, où le paramètre physique de fonctionnement de l'horloge utilisé n'est pas la fréquence instantanée, mais la phase de l'horloge.

Dans ce mode de réalisation, l'étape 10 de mesure se déroule en deux temps.

Tout d'abord, avant déploiement du nœud pour une mission de collecte de données sismiques, on mesure lors d'une étape 200 la phase de l'horloge de façon continue pendant une période de temps prédéterminée  $\Delta T1$  de façon à connaître l'évolution de l'erreur accumulée de phase pendant cette période  $\Delta T1$ .

Puis à la fin de la mission, on mesure à nouveau, lors d'une étape 202, la phase de l'horloge, de façon continue pendant une période de temps prédéterminée  $\Delta T2$ , de façon à connaître l'évolution de l'erreur accumulée de phase pendant cette période  $\Delta T2$ .

Ensuite, lors d'une étape 204, on estime l'erreur accumulée de phase pendant la mission, c'est-à-dire entre les deux périodes  $\Delta T1$  et  $\Delta T2$ , en utilisant une méthode d'interpolation telle que par exemple la méthode des splines, une spline étant une fonction définie par morceaux par des polynômes. Cette méthode d'interpolation est connue en soi. Cet exemple n'est pas limitatif : on pourrait utiliser une autre méthode d'interpolation.

Ce mode de réalisation est avantageux en ce qu'il ne requiert pas de

mesurer la fréquence instantanée de l'horloge. Il peut donc être mis en œuvre par une électronique encore plus simple que dans le premier mode de réalisation.

Dans un troisième mode de réalisation, illustré par la figure 4, en amont de la mission, on mesure lors d'une étape 300 l'erreur accumulée de phase au cours d'une mission simulée de collecte de données sismiques, en production ou en maintenance, à différentes températures. Cela constitue une forme de calibration. La loi décrite plus haut est ensuite appliquée pour estimer l'erreur accumulée de phase pendant une mission réelle, lors d'une étape 302.

Le système d'estimation de la dérive dans le temps de l'horloge conforme à l'invention peut comporter un module électronique ou informatique, soit embarqué dans le nœud, soit déporté dans un calculateur ou ordinateur ou circuit électronique séparé, capable de mesurer l'erreur de fréquence et/ou de phase de l'horloge au début et à la fin de la mission, ce qui permet d'estimer l'erreur de phase accumulée suivant un polynôme d'ordre 3, tandis que les équipements classiques sont seulement capables de mesurer la dérive de phase et donc d'estimer l'erreur de phase accumulée suivant un polynôme d'ordre 1.

Plus particulièrement, le module précité est configuré pour réaliser les étapes décrites plus haut en lien avec les figures 1 à 4. Lorsque le module est embarqué dans le nœud, il peut consister en une unité distincte des unités fonctionnelles déjà présentes dans le nœud, telles que le microcontrôleur du nœud, ou bien il peut être intégré fonctionnellement à de telles unités. A titre d'exemple, le microcontrôleur du nœud est configuré pour réaliser en outre au moins certaines des étapes décrites plus haut en lien avec les figures 1 à 4.

**REVENDEICATIONS**

1. Procédé d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, dans lequel :
- 5 on mesure (10) au moins une grandeur associée à ladite horloge, à des instants prédéterminés ou pendant des périodes de temps prédéterminées ; et
- 10 on applique (12) à ladite grandeur une loi prédéterminée non linéaire de variation de ladite grandeur qui dépend des valeurs recueillies lors de ladite étape (10) de mesure, de façon à obtenir une estimation de la dérive dans le temps dudit paramètre physique,
- ledit procédé étant caractérisé en ce que lors de ladite étape (10) de mesure :
- 15 avant déploiement dudit nœud pour une mission de collecte de données sismiques, on mesure (100) la fréquence instantanée initiale de ladite horloge et on synchronise (102) un signal interne d'information temporelle dudit nœud par rapport à un signal d'information temporelle de référence ;
- 20 à un instant prédéterminé au cours de ladite mission, on mesure (104) la fréquence instantanée finale de ladite horloge et le déphasage entre ledit signal interne d'information temporelle dudit nœud et ledit signal d'information temporelle de référence ;
- 25 et lors de ladite étape (12) d'application de ladite loi, on estime l'erreur de fréquence instantanée de ladite horloge à partir desdites fréquences instantanées initiale et audit instant prédéterminé et dudit déphasage,
- 30 et en ce que suivant ladite loi prédéterminée, ladite fréquence instantanée varie suivant une équation polynomiale d'ordre supérieur ou égal à 2, de sorte que la phase de ladite horloge varie suivant une équation polynomiale d'ordre supérieur ou égal à 3.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que lors d'une étape préliminaire, on règle la fréquence de sortie de ladite horloge de façon à réduire l'erreur de fréquence instantanée de ladite horloge.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'on effectue ladite étape préliminaire pendant une phase de fabrication de ladite horloge.
4. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce qu'on effectue ladite étape préliminaire pendant une phase de maintenance de ladite horloge.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit signal d'information temporelle de référence est fourni par un système de localisation GPS.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que :  
avant déploiement dudit nœud pour une mission de collecte de données sismiques, on mesure en outre l'évolution de ladite grandeur en fonction de la température de ladite horloge ;  
pendant ladite mission, on mesure la température de ladite horloge ; et  
ladite loi prédéterminée prend en compte ladite température.
7. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit instant prédéterminé au cours de la mission correspond à la fin de la mission.
8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que suivant ladite loi prédéterminée, ladite fréquence instantanée varie suivant une équation polynomiale d'ordre 2, de sorte que la phase de ladite horloge varie suivant une équation polynomiale d'ordre 3.
9. Procédé d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, dans lequel :

on mesure (10) au moins une grandeur associée à ladite horloge, à des instants prédéterminés ou pendant des périodes de temps prédéterminées ; et

5 on applique (12) à ladite grandeur une loi prédéterminée non linéaire de variation de ladite grandeur qui dépend des valeurs recueillies lors de ladite étape (10) de mesure, de façon à obtenir une estimation de la dérive dans le temps dudit paramètre physique,

10 ledit procédé étant caractérisé en ce que lors de ladite étape (10) de mesure, on mesure (200, 202) la phase de ladite horloge pendant une première période de temps prédéterminée avant déploiement dudit nœud pour une mission de collecte de données sismiques et pendant une seconde période de temps prédéterminée à la fin de ladite mission et lors de ladite étape (12) d'application de ladite loi, on utilise (204) une méthode d'interpolation, de façon à obtenir une estimation de  
15 l'erreur accumulée de phase de ladite horloge et en ce que suivant ladite loi prédéterminée, la phase de ladite horloge varie suivant une équation polynomiale d'ordre supérieur ou égal à 3.

10. Procédé d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de  
20 données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, dans lequel :

on mesure (10) au moins une grandeur associée à ladite horloge, à des instants prédéterminés ou pendant des périodes de temps prédéterminées ; et

25 on applique (12) à ladite grandeur une loi prédéterminée non linéaire de variation de ladite grandeur qui dépend des valeurs recueillies lors de ladite étape (10) de mesure, de façon à obtenir une estimation de la dérive dans le temps dudit paramètre physique,

30 ledit procédé étant caractérisé en ce que lors de ladite étape (10) de mesure, on mesure (300) l'erreur accumulée de phase de ladite horloge pendant une période de temps correspondant à une mission simulée de

collecte de données sismiques et en ce que suivant ladite loi prédéterminée, la phase de ladite horloge varie suivant une équation polynomiale d'ordre supérieur ou égal à 3.

5 11. Procédé selon la revendication 9 ou 10, caractérisé en ce que la phase de ladite horloge varie suivant une équation polynomiale d'ordre 3.

12. Procédé d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, caractérisé en ce que :

10 on mesure (10) au moins une grandeur associée à ladite horloge, à des instants prédéterminés ou pendant des périodes de temps prédéterminées ; et

on mesure (300) l'erreur accumulée de phase de ladite horloge pendant une période de temps correspondant à une mission simulée de collecte  
15 de données sismiques.

13. Procédé selon la revendication 12, caractérisé en ce que :

avant déploiement dudit nœud pour une mission de collecte de données sismiques, on mesure en outre l'évolution de ladite grandeur en fonction de la température de ladite horloge ;

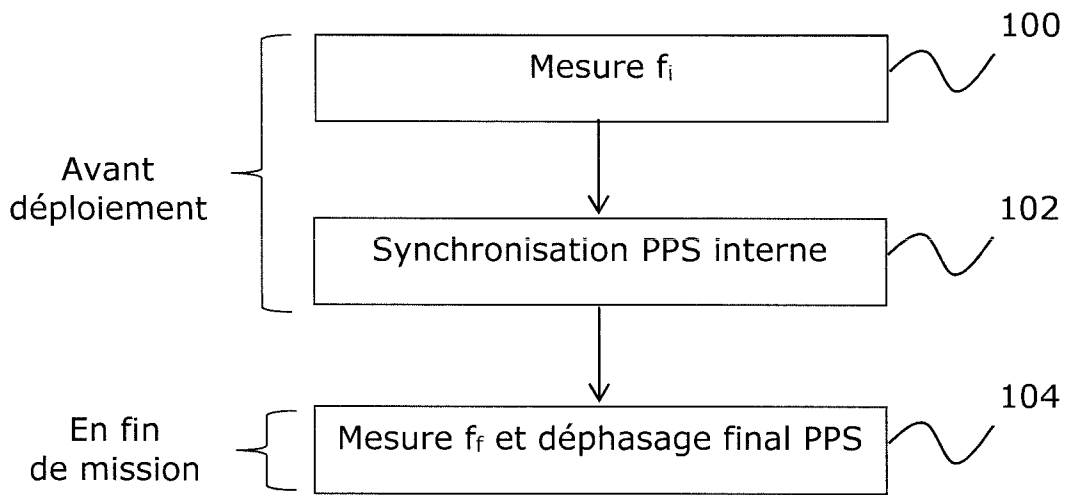
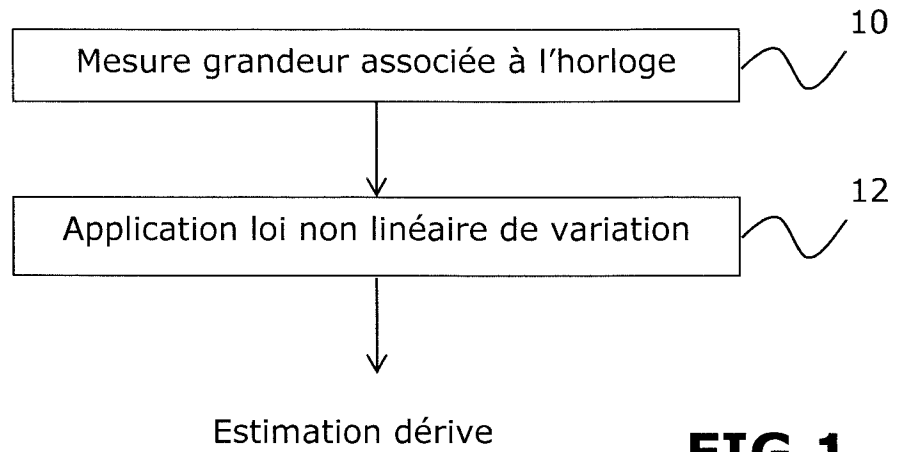
20 pendant ladite mission, on mesure la température de ladite horloge.

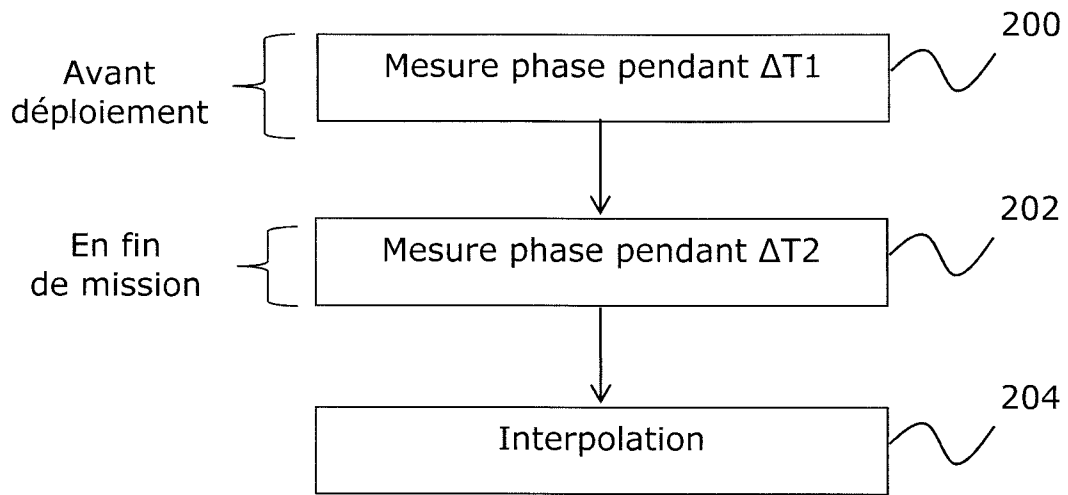
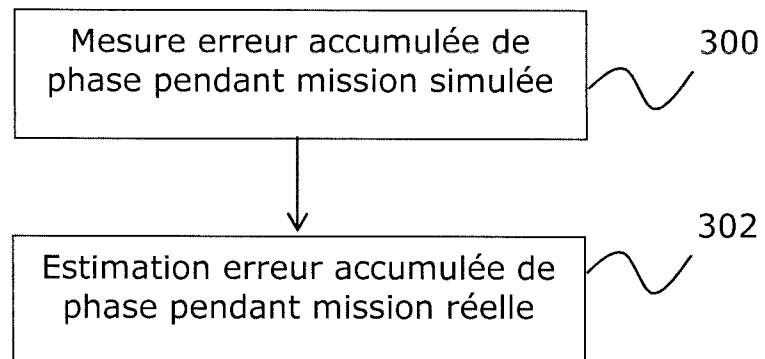
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit nœud est adapté à une utilisation sur fond marin.

25 15. Système d'estimation de la dérive dans le temps d'un paramètre physique de fonctionnement d'une horloge de datation d'échantillons de données sismiques associée à un nœud de collecte de données sismiques, caractérisé en ce qu'il comporte un module adapté à mettre en œuvre des étapes d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.

30

1/3



**2/3****FIG.3****FIG.4**

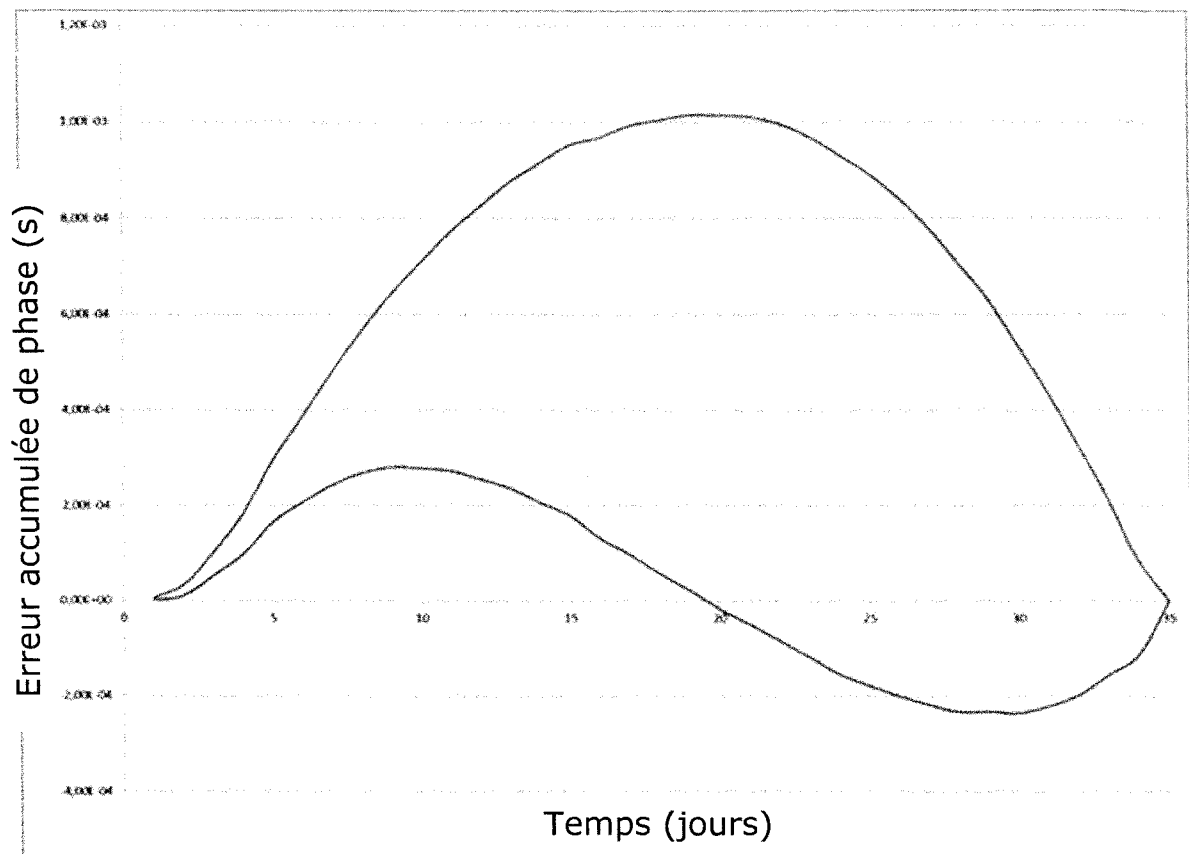


FIG.5

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/FR2019/051506**

| <b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b><br><i>G04G 3/02</i> (2006.01)i<br><br>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC   |  |   |
|--|--|---|
| <b>B. FIELDS SEARCHED</b><br><br>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)<br>G04G; G01V<br><br>Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched<br><br>Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)<br>EPO-Internal  |  |   |
| <b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>  |  |   |
| Category*  | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages   | Relevant to claim No.   |
| A  | EP 2525240 A2 (SONARDYNE INTERNAT LTD [GB]) 21 November 2012 (2012-11-21)<br>abstract<br>paragraph [0001] - paragraph [0009]<br>paragraph [0013] - paragraph [0019]<br>paragraph [0036]<br>paragraph [0048] - paragraph [0053]<br>paragraph [0072]<br>paragraph [0086] | 1-15  |
| A  | US 9417359 B2 (MAGSEIS AS [NO]) 16 August 2016 (2016-08-16)<br>cited in the application<br>abstract<br>column 2, line 25 - line 55<br>column 4, line 56 - column 6, line 55<br>column 8, line 54 - column 11, line 52<br>claims 1-4                                    | 1-15  |
| <input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.   |  |   |
| * Special categories of cited documents:<br>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance<br>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date<br>"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)<br>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means<br>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed<br>"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<br>"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<br>"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<br>"&" document member of the same patent family |  |   |
| Date of the actual completion of the international search<br><b>14 October 2019</b>  |  | Date of mailing of the international search report<br><b>05 November 2019</b> |
| Name and mailing address of the ISA/EP<br><b>European Patent Office<br/>p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk<br/>Netherlands</b><br>Telephone No. (+31-70)340-2040<br>Facsimile No. (+31-70)340-3016  |  | Authorized officer<br><b>Jacobs, Peter</b><br><br>Telephone No.               |

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

International application No.

**PCT/FR2019/051506**

| Patent document cited in search report |         |    | Publication date (day/month/year) | Patent family member(s) |              |    | Publication date (day/month/year) |
|--|---------|----|-----------------------------------|-------------------------|--------------|----|-----------------------------------|
| EP                                     | 2525240 | A2 | 21 November 2012                  | BR                      | 102012011782 | A2 | 21 March 2017                     |
|  |         |    |                                   | EP                      | 2525240      | A2 | 21 November 2012                  |
|  |         |    |                                   | GB                      | 2491103      | A  | 28 November 2012                  |
|  |         |    |                                   | SG                      | 185901       | A1 | 28 December 2012                  |
|  |         |    |                                   | US                      | 2012294112   | A1 | 22 November 2012                  |
| <hr/>                                  |         |    |                                   |                         |              |    |                                   |
| US                                     | 9417359 | B2 | 16 August 2016                    | AU                      | 2013303295   | A1 | 05 March 2015                     |
|  |         |    |                                   | BR                      | 112015003423 | A2 | 04 July 2017                      |
|  |         |    |                                   | CA                      | 2881821      | A1 | 20 February 2014                  |
|  |         |    |                                   | CN                      | 104903747    | A  | 09 September 2015                 |
|  |         |    |                                   | DK                      | 201500092    | A1 | 23 February 2015                  |
|  |         |    |                                   | EA                      | 201500222    | A1 | 30 October 2015                   |
|  |         |    |                                   | EP                      | 2888607      | A1 | 01 July 2015                      |
|  |         |    |                                   | GB                      | 2519477      | A  | 22 April 2015                     |
|  |         |    |                                   | MX                      | 345745       | B  | 14 February 2017                  |
|  |         |    |                                   | NO                      | 336544       | B1 | 21 September 2015                 |
|  |         |    |                                   | US                      | 2015219790   | A1 | 06 August 2015                    |
|  |         |    |                                   | WO                      | 2014027892   | A1 | 20 February 2014                  |
| <hr/>                                  |         |    |                                   |                         |              |    |                                   |

| <p>A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE<br/>                 INV. G04G3/02<br/>                 ADD.</p>  |  |   |
|---|--|---|
| <p>Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB</p>  |  |   |
| <p>B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE</p>  |  |   |
| <p>Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)<br/>                 G04G G01V</p>   |  |   |
| <p>Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche</p>  |  |   |
| <p>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)<br/>                 EPO-Internat</p>  |  |   |
| <p>C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS</p>   |  |   |
| Catégorie*  | Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents   | no. des revendications visées   |
| A   | EP 2 525 240 A2 (SONARDYNE INTERNAT LTD [GB]) 21 novembre 2012 (2012-11-21)<br>abrégé<br>alinéa [0001] - alinéa [0009]<br>alinéa [0013] - alinéa [0019]<br>alinéa [0036]<br>alinéa [0048] - alinéa [0053]<br>alinéa [0072]<br>alinéa [0086]  | 1-15  |
| A   | -----<br>US 9 417 359 B2 (MAGSEIS AS [NO])<br>16 août 2016 (2016-08-16)<br>cité dans la demande<br>abrégé<br>colonne 2, ligne 25 - ligne 55<br>colonne 4, ligne 56 - colonne 6, ligne 55<br>colonne 8, ligne 54 - colonne 11, ligne 52<br>revendications 1-4<br>-----  | 1-15  |
| <p><input type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents</p>  |  |   |
| <p><input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe</p>   |  |   |
| <p>* Catégories spéciales de documents cités:</p>   |  |   |
| <p>"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent</p> <p>"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date</p> <p>"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)</p> <p>"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens</p> <p>"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée</p> | <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"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</p> <p>"&amp;" document qui fait partie de la même famille de brevets</p> |   |
| <p>Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée</p> <p>14 octobre 2019</p>   |  | <p>Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale</p> <p>05/11/2019</p> |
| <p>Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale</p> <p>Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2<br/>                 NL - 2280 HV Rijswijk<br/>                 Tel. (+31-70) 340-2040,<br/>                 Fax: (+31-70) 340-3016</p>   |  | <p>Fonctionnaire autorisé</p> <p>Jacobs, Peter</p>  |

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2019/051506

| Document brevet cité<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |            |
|---|------------------------|---|------------------------|------------|
| EP 2525240                                      | A2                     | 21-11-2012                              | BR 102012011782 A2     | 21-03-2017 |
|   |                        |   | EP 2525240 A2          | 21-11-2012 |
|   |                        |   | GB 2491103 A           | 28-11-2012 |
|   |                        |   | SG 185901 A1           | 28-12-2012 |
|   |                        |   | US 2012294112 A1       | 22-11-2012 |
| -----   |                        |   |                        |            |
| US 9417359                                      | B2                     | 16-08-2016                              | AU 2013303295 A1       | 05-03-2015 |
|   |                        |   | BR 112015003423 A2     | 04-07-2017 |
|   |                        |   | CA 2881821 A1          | 20-02-2014 |
|   |                        |   | CN 104903747 A         | 09-09-2015 |
|   |                        |   | DK 201500092 A1        | 23-02-2015 |
|   |                        |   | EA 201500222 A1        | 30-10-2015 |
|   |                        |   | EP 2888607 A1          | 01-07-2015 |
|   |                        |   | GB 2519477 A           | 22-04-2015 |
|   |                        |   | MX 345745 B            | 14-02-2017 |
|   |                        |   | NO 336544 B1           | 21-09-2015 |
|   |                        |   | US 2015219790 A1       | 06-08-2015 |
|   |                        |   | WO 2014027892 A1       | 20-02-2014 |
|   |                        |   | -----                  |            |