

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 17.11.15.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 19.05.17 Bulletin 17/20.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : KIETTA Société par actions simplifiée
— FR.

⑦2 Inventeur(s) : HAUMONTE LUC.

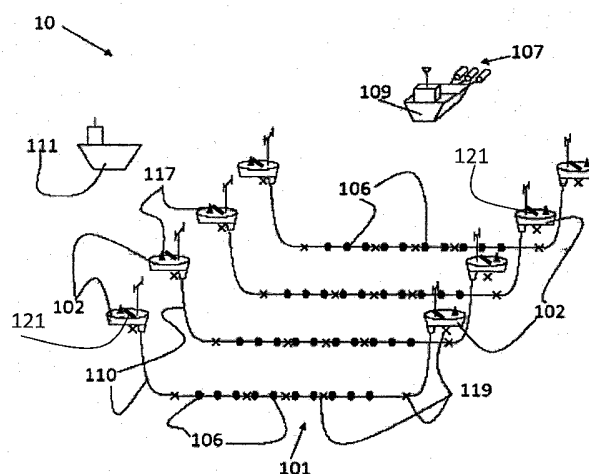
⑦3 Titulaire(s) : KIETTA Société par actions simplifiée.

⑦4 Mandataire(s) : BANDPAY & GREUTER.

⑤4 CONTROLE DE LA PROFONDEUR D'UN CÂBLE SISMIQUE.

⑤7 L'invention concerne notamment un procédé pour contrôler la profondeur d'un câble sismique qui a des ballasts espacés le long de sa longueur assurant une flottabilité neutre pour le câble sismique, le câble sismique étant adapté pour l'acquisition de données entre deux eaux, chaque extrémité du câble sismique étant reliée à un navire autonome de surface respectif qui exerce une tension sur le câble par un câble d'arrivée respectif qui a une flottabilité négative, le procédé comprenant, par rapport à une profondeur cible, la variation de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée et/ou de la tension exercée sur le câble par chaque navire autonome de surface respectif.

Ceci offre une solution améliorée pour la prospection sismique en milieu aquatique.



CONTROLE DE LA PROFONDEUR D'UN CABLE SISMIQUE

DOMAINE DE L'INVENTION

- 5 La présente invention concerne le domaine de la prospection sismique en milieu aquatique (marin ou lacustre).

ARRIERE-PLAN

- 10 La prospection sismique en milieu aquatique est réalisée de manière classique en plaçant un ensemble de câbles sismiques parallèles submergés qui portent une pluralité de capteurs (hydrophones ou combinaisons d'hydrophones et de géophones) espacés le long du câble, l'ensemble de câbles étant tracté par un navire sismique. Une source capable de créer une onde acoustique dans le milieu, généralement sous forme d'un ensemble de canons à air, est tractée par le navire sismique à une distance
15 des câbles sismiques. L'onde ainsi formée se propage vers le fond de l'eau, puis sur le sous-sol sous-jacent, ce qui cause des réflexions au niveau des interfaces entre les couches géologiques qui forment le sous-sol qui sont recueillies par lesdits capteurs submergés. Toutes ces informations sont ensuite traitées pour produire une image en trois dimensions (3D) des différentes couches géologiques du sous-sol qui est
20 généralement utilisée pour déterminer la présence de réservoirs d'hydrocarbures.

- Le document FR2940838A1 divulgue une technique de prospection sismique dans laquelle un ensemble de câbles sismiques parallèles submergés, de flottabilité neutre, est positionné entre deux eaux et chaque câble est relié à chacune de ses deux
25 extrémités par des câbles d'arrivée à des navires autonomes d'enregistrement respectifs (ci-dessous "ARV"), parfois appelés "drones", et est soumis à une tension exercée à ses extrémités par les ARV si bien que les câbles peuvent être maintenus en position stationnaire ou quasi stationnaire pendant l'acquisition des signaux sismiques. Différents aspects liés à cette technique ont été divulgués dans les
30 documents FR2945356A1, FR2961317A1 et FR2990028A1.

- La technique divulguée dans le document FR2940838A1 permet, en plus d'autres avantages présentés dans ce document, une grande flexibilité pour le positionnement des câbles sismiques lorsque l'on compare avec le procédé classique dans lequel la
35 totalité des câbles est tractée par un navire sismique ; elle permet, en particulier, aux

câbles d'être positionnés à une profondeur d'eau qui est beaucoup plus grande que la profondeur de l'ordre de 5 à 15 mètres qui est une contrainte du procédé classique mentionné ci-dessus.

- 5 L'objet de la présente invention est un procédé pour le contrôle précis de la profondeur des câbles dans la plage de niveaux de profondeur, ladite plage étant rendue possible par la technique divulguée dans le document FR2940838A1.

RESUME DE L'INVENTION

- 10 C'est pourquoi, il est prévu un procédé pour contrôler la profondeur d'un câble sismique qui a des ballasts espacés le long de sa longueur assurant une flottabilité neutre pour le câble sismique, le câble sismique étant adapté pour l'acquisition de données entre deux eaux, chaque extrémité du câble sismique étant reliée à un navire autonome de surface qui exerce une tension sur le câble par l'intermédiaire d'un câble
15 d'arrivée respectif qui a une flottabilité négative, le procédé comprenant, par rapport à une profondeur cible, le fait de faire varier la longueur déployée de chaque câble d'arrivée et/ou la tension exercée sur le câble par chaque navire autonome de surface respectif.

- 20 Il est de plus prévu un programme d'ordinateur qui comprend des instructions pour réaliser ce procédé. Le programme d'ordinateur peut être enregistré (et est effectivement enregistré) sur un support de stockage de données.

- Il est de de plus prévu un navire autonome adapté pour être relié à un câble sismique
25 et pour contrôler la profondeur du câble sismique selon le procédé.

Il est de plus prévu un système qui comprend deux navires de ce type et un câble sismique.

- 30 Il est de plus prévu une flotte comprenant un ou plusieurs systèmes de ce type et un navire principal distant en communication avec le ou plusieurs systèmes et configuré pour communiquer une profondeur cible respective au système ou à plusieurs systèmes.

Il est de plus prévu un système pour contrôler la profondeur d'un câble sismique qui a des ballasts espacés le long de sa longueur assurant une flottabilité neutre pour le câble sismique, le câble sismique étant adapté pour l'acquisition de données entre deux eaux, chaque extrémité du câble sismique étant reliée à un navire autonome de surface qui exerce une tension sur le câble par l'intermédiaire d'un câble d'arrivée respectif qui a une flottabilité négative, le procédé comprenant un treuil placé sur chaque navire pour relier le câble d'arrivée respectif au navire, ledit treuil étant utilisable pour faire varier la longueur du câble d'arrivée respectif entre le treuil et l'extrémité respective du câble sismique.

10

BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

Des formes de réalisation de l'invention vont maintenant être décrites au moyen d'exemples à caractère non limitatif et en faisant référence aux dessins joints.

15 La figure 1 montre une vue en perspective d'un système d'acquisition de données sismiques.

La figure 2 montre une représentation schématique d'un exemple d'unité de contrôle.

20 La figure 3 montre un organigramme d'un exemple du procédé et les figures 4 à 14 illustrent le procédé.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

25 Le procédé pour contrôler la profondeur d'un câble sismique peut être intégré à un processus global de prospection sismique avec un système d'acquisition de données sismiques qui comprend un ensemble de câbles sismiques (au moins un ou deux ou moins quatre), chacun étant configuré pour l'acquisition de données.

30 Pendant toute la durée du processus, le système est déployé en milieu aquatique (c'est-à-dire marin ou lacustre) et pour l'acquisition de données une ou plusieurs sources sismiques qui peuvent être des sources impulsives (par exemple sous forme d'un ensemble de canons à air ou de vibreurs marins, tractés par un véhicule ou bateau respectif) créent périodiquement ou en continu une onde dans le milieu aquatique dont la ou les réflexions au niveau des interfaces entre les couches

géologiques en dessous du fond de la mer sont recueillies par les capteurs sismiques portés par les câbles du système (par exemple comme il est décrit dans le document FR2990028A1). Les données ainsi acquises peuvent ensuite être traitées pour produire une image 3D du réservoir. Pendant toute la durée du processus, les câbles de l'ensemble considéré sont maintenus entre deux eaux de manière appropriée à une profondeur supérieure à 5 mètres et qui peut atteindre 300 mètres ou plus. La profondeur est déterminée de manière à respecter l'ensemble des exigences relatives à la qualité des données spécifiques concernant la zone à prospector. Une valeur type peut être de l'ordre de 100 mètres ou entre 100 et 200 mètres. Chaque câble comprend des capteurs sismiques (de manière appropriée de type hydrophone ou éventuellement géophone) espacés le long du câble. Pendant toute la durée du processus, les câbles sont arrangés en étant alignés latéralement (l'un par rapport à l'autre) de manière à former un ensemble horizontal à deux dimensions de capteurs et à fournir une couverture adéquate de la zone à prospector. Les câbles peuvent être maintenus parallèles l'un à l'autre (par exemple, autant que possible par rapport aux autres contraintes).

De plus, n'importe quelle combinaison d'au moins l'un des câbles du système (par exemple tous les câbles du système) peut également respecter n'importe quelle ou une combinaison des exigences suivantes.

Le système permet aux câbles d'être maintenus pendant l'acquisition de manière stationnaire ou pseudo-stationnaire soit par rapport au milieu aquatique, soit par rapport au fond de l'eau (c'est-à-dire par rapport à la référence terrestre). Ceci peut être réalisé selon le document FR2940838A1. En maintenant une position stationnaire ou pseudo-stationnaire, le mouvement du câble peut aussi être restreint par une valeur de courbure de parcours maximale dans l'eau, comme il est décrit dans le document FR2940838A1. Ceci permet des contraintes mécaniques et d'énergie relativement faibles.

Pour réaliser un tel positionnement, les deux extrémités du câble sont reliées aux navires de surface respectifs (par exemple aux ARV mentionnés plus haut) par des câbles d'arrivée respectifs. Les ARV sont adaptés pour contrôler la position du câble en exerçant une tension à ses extrémités par l'intermédiaire des câbles d'arrivée. Dans

un tel contexte, les deux ARV permettent une compensation rapide du courant à n'importe quel moment, même en cas de courants changeant rapidement. De plus, en raison des vitesses en jeu (pour des courants marins habituels), les ARV peuvent être relativement petits en termes de dimensions et/ou de capacités mécaniques (par rapport aux navires sismiques classiques). Les ARV peuvent, par exemple, avoir une longueur inférieure à 20 mètres ou à 12 mètres (par exemple d'environ 8 mètres), une largeur inférieure à 15 mètres ou à 10 mètres (par exemple d'environ 6 mètres) et une hauteur - en excluant un mât - inférieure à 12 mètres ou à 8 mètres (par exemple d'environ 4,5 mètres) et chaque ARV est adapté mécaniquement pour tirer le câble à n'importe quelle vitesse jusqu'à une vitesse maximale prédéfinie - par rapport à l'eau qui peut être égale à 5 nœuds (environ 9,26 km/h). Comme indiqué ci-dessus, le système permet aux câbles sismiques d'être maintenus en position stationnaire ou quasi-stationnaire, ce qui implique une vitesse de l'ordre de 0 à 2 nœuds par rapport au milieu aquatique mais ceci permet également aux câbles d'être déplacés à de plus grandes vitesses, comme il est approprié pour des déplacements entre stations d'acquisition ou pour le transit vers une zone à prospector ou pour respecter des exigences opérationnelles spécifiques. Les câbles sismiques peuvent avoir une longueur supérieure à 1 km ou supérieure à 4 km, par exemple d'environ 8 km. Les câbles sismiques ont un poids (dans l'air) de généralement environ 2700 kg/km et ont une flottabilité neutre dans l'eau, comme il a été mentionné plus haut. Les câbles d'arrivée ont un poids (dans l'air) de généralement environ 3300 kg/km et ont une flottabilité négative dans l'eau.

Des ballasts de flottaison variables sont installés à des intervalles le long du câble sismique de, par exemple, 250 mètres. Les ballasts peuvent être comme il est décrit dans le document FR2945356A1. Les ballasts peuvent être configurés pour assurer qu'à n'importe quel moment l'erreur de flottabilité du câble (c'est-à-dire le rapport entre le poids optimal du câble pour obtenir une flottabilité zéro et le poids réel du câble) soit substantiellement toujours inférieure à, par exemple, 1%.

La figure 1 montre une vue en perspective d'un exemple 10 d'un tel système d'acquisition de données sismiques marines. Le système 10 comprend un ensemble 101 de câbles sismiques parallèles 110, chacun en conformité avec les explications ci-dessus, en formant ainsi un réseau de câbles flottants pour acquérir des signaux

sismiques (récepteurs) et une source sismique 107 tractée par un bateau source 109 (c'est-à-dire un navire de tir pour générer une source sismique). Dans l'exemple qui est illustré, chaque câble 110 est relié à ses extrémités à des ARV indépendants 102 appropriés pour déplacer le câble 110 et pour le maintenir sous tension, le câble étant
5 relié à l'ARV par l'intermédiaire d'un treuil 121 et qui incorporent une telle unité de contrôle. Les ARV 102 positionnent ainsi des câbles de réception et contrôlent la géométrie du réseau. L'unité de contrôle est un système qui comprend un processeur couplé à une mémoire vive et qui met en œuvre un programme qui comprend des instructions pour contrôler la vitesse du câble 110. L'ensemble 101 de câbles 110 est
10 équipé d'une pluralité de capteurs/récepteurs 106 (de manière appropriée des combinaisons d'hydrophones et de géophones) capables de recueillir lesdites ondes réfléchies. Un tel câble 110 peut être appelé un "câble sismique". Les câbles 110 évoluent dans une station d'acquisition adaptée pour prospecter une partie de la zone sus-mentionnée du sous-sol. La source sismique 107 est déclenchée. Les récepteurs
15 106 sont utilisés pour capter les ondes réfléchies. Il est ensuite possible de faire fonctionner les ARV 102 pour déplacer les câbles 110 vers une autre station de mesure adaptée pour prospecter une autre partie de la zone sus-mentionnée et pour déplacer également la source sismique 107 et ainsi de suite. Les câbles 110 ont une flottabilité neutre et sont submergés à une profondeur (c'est-à-dire la distance par
20 rapport à la surface de l'eau, laquelle surface n'est pas représentée sur la figure), comme il a été défini ci-dessus. Chacun des câbles 110 est équipé de manière appropriée d'éléments qui forment des ballasts 119 conçus pour maintenir le câble 110 au poids souhaité dans l'eau de manière à avoir une flottabilité neutre. Les ballasts 119 permettent aux câbles 110 d'être maintenus à une profondeur substantiellement
25 constante et de la faire varier de manière contrôlée. Chacun des câbles 110 est également équipé, à leurs deux extrémités, d'ARV de surface 102 dans l'exemple, capables de déplacer les câbles 110 et de maintenir chaque câble 110 sous tension. Le navire principal 111 coordonne l'ensemble des opérations et communique avec les ARV 102 par l'intermédiaire de l'antenne 117 prévue sur un ARV 102.

30 Le positionnement des câbles, la source et/ou la commande des ballasts et/ou la source peuvent être réalisés de manière automatique ou semi-automatique (par exemple en impliquant dans une certaine mesure des spécialistes humains à terre ou à bord, par exemple le véhicule tractant la source ou n'importe quel navire proche) par

l'intermédiaire d'un ou de plusieurs programmes d'ordinateur intégrés à une ou plusieurs unités de contrôle qui peuvent recevoir des signaux de et/ou émettre des signaux vers n'importe quel élément du système auquel une telle unité de contrôle est couplée (par exemple par liaison radio pour des communications de surface et par connexion câblée physique - par exemple électrique - pour des communications sous-marines). Une ou de telles unités de commande peuvent être intégrées à n'importe quel véhicule (par exemple au véhicule qui tracte la source ou à n'importe quel véhicule proche) et/ou aux ARV, et/ou à n'importe quel autre élément de n'importe quel câble pour lequel le contrôle est nécessaire.

10

La figure 2 montre un exemple d'une telle unité de contrôle incorporée comme système informatique standard. L'unité de contrôle de l'exemple comprend une unité centrale (CPU) 1010 reliée à un bus de communication interne 1000, une mémoire vive (RAM) 1070 également reliée au BUS. Un contrôleur de dispositif de stockage de masse 1020 gère des accès à un dispositif de mémoire de masse tel qu'un disque dur 1030. Les dispositifs de mémoire de masse appropriés pour des instructions de programme d'ordinateur et des données tangibles comprennent toutes les formes de mémoire non volatile, y compris, à titre d'exemple, les dispositifs de mémoire à semi-conducteurs tels qu'EPROM, EEPROM et les dispositifs à mémoire flash, les disques magnétiques tels que les disques durs internes et les disques magnéto-optiques amovibles et les disques CD-ROM 1040. N'importe lequel des dispositifs ci-dessus peut être complété par ou incorporé dans des ASIC spécialement conçus (circuits intégrés spécifiques aux applications). Un adaptateur de communication 1050 gère les accès à un système de communication 1060 (par exemple à un système de communication radio).

25

Le programme d'ordinateur peut comprendre des instructions qui peuvent être exécutées par un ordinateur, les instructions comprenant des moyens pour faire en sorte que la source, les câbles sismiques et/ou tout autre composant du système de prospection sismique exécute n'importe lequel des procédés décrits ici. Le programme peut être enregistré sur n'importe quel support de stockage de données, y compris la mémoire du système. Le programme peut, par exemple, être mis en œuvre dans un circuit électronique numérique ou dans du matériel informatique, un micrologiciel, un logiciel ou une combinaison de ceux-ci. Le programme peut être mis en œuvre en tant qu'appareil, par exemple un produit incorporé de manière tangible à un dispositif de

30

stockage lisible par machine pour l'exécution par un processeur programmable. Les étapes de procédé peuvent être réalisées par un processeur programmable qui exécute un programme d'instructions pour effectuer des fonctions du procédé en agissant sur des données d'entrée et en générant une sortie. Le processeur peut donc

5 être programmable et couplé pour recevoir des données et des instructions de, et pour transmettre des données et des instructions à un système de stockage de données, à au moins un dispositif d'entrée et au moins un dispositif de sortie. Le programme d'application peut être mis en œuvre dans un langage de programmation procédural ou orienté objet de haut niveau ou dans un langage assembleur ou un langage

10 machine si souhaité. Dans tous les cas, le langage peut être un langage compilé ou interprété. Le programme peut être un programme d'installation complet ou un programme d'actualisation. L'application du programme sur l'unité de contrôle débouche, dans tous les cas, sur des instructions pour réaliser les étapes du procédé.

15 La figure 3 montre un exemple d'un procédé qui peut être mis en œuvre dans ce contexte pour contrôler la profondeur d'un câble sismique qui a des ballasts espacés le long de sa longueur assurant une flottabilité neutre pour le câble sismique, le câble sismique étant adapté pour l'acquisition de données entre deux eaux, chaque extrémité du câble sismique étant reliée à un navire autonome de surface respectif

20 (les ARV comme décrits plus haut étant pris en considération dans la description qui suit). Le procédé comprend la variation S30 (c'est-à-dire le changement ou la modification, par exemple l'augmentation et/ou la réduction), de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée par rapport à une profondeur cible et/ou de la tension exercée sur le câble par chaque navire autonome de surface respectif. En d'autres

25 termes, pour attendre "au mieux" une profondeur cible (c'est-à-dire pour minimiser la déviation du câble sismique de la profondeur cible, par exemple en respectant une contrainte, par exemple mécanique et/ou d'énergie), le procédé de l'exemple comprend l'action sur différents paramètres, y compris la variation en même temps de la longueur déployée de n'importe lequel ou des deux câbles d'arrivée, ou la variation

30 en même temps de la tension exercée par n'importe lequel ou par les deux ARV sur le câble (par l'intermédiaire des câbles d'arrivée) ou de n'importe quelle combinaison de ces éléments. C'est pourquoi, dans quelques exemples de situations, le procédé peut comprendre des phases où on fait varier les deux longueurs de câble d'arrivée en même temps (pas nécessairement de manière similaire) et/ou des phases où les

deux ARV exercent une tension sur le câble - par exemple on fait varier les deux tensions éventuellement en même temps (à nouveau pas nécessairement de manière similaire) et/ou des phases où on fait varier la tension aux deux extrémités et la longueur déployée aux deux extrémités toutes en même temps. Ceci peut être mis en œuvre par l'intermédiaire de l'exécution (par exemple continue) d'une boucle de contrôle comme il est montré sur la figure 3. Le procédé peut être utilisé pour un positionnement dynamique du câble sismique à une profondeur cible, par exemple pendant que le câble sismique est en train d'acquérir des mesures (comme il a été décrit plus haut). Le contrôle amélioré de la profondeur procuré par le procédé améliore ainsi l'acquisition de données.

Dans le procédé, chaque extrémité du câble sismique est reliée à un ARV de surface respectif qui exerce une tension sur le câble à travers (c'est-à-dire par/par l'intermédiaire de/avec) un câble d'arrivée respectif. Les câbles d'arrivée sont simplement des câbles qui sont suffisamment forts sur le plan mécanique et qui sont adaptés pour relier le câble sismique respectivement aux deux ARV de telle manière que les deux ARV et le câble sismique puissent former un système unitaire. Maintenant, les câbles d'arrivée ont une flottabilité négative (de telle manière qu'ils sont lourds et qu'ils coulent dans l'eau) et fonctionnent en tant que dépresseurs pour le câble sismique. Les ARV de surface sont adaptés pour flotter sur la surface. L'eau/l'air d'interface est donc utile pour le procédé parce que le poids du câble d'arrivée est supporté par la flottaison de l'ARV (composante verticale de la force). Les câbles d'arrivée peuvent ne pas intégrer de ballast (ou seulement à leur extrémité où ils sont reliés au câble sismique). C'est pourquoi, les câbles d'arrivée sont utilisés comme dépresseurs pour faire en sorte que les extrémités du câble sismique atteignent n'importe quelle profondeur et contrôlent ainsi leur profondeur d'une manière relativement rapide, efficace, sûre et simple (comparée par exemple à une solution avec ballasts seuls et/ou à une solution de déplacement de poids). En outre, les câbles d'arrivée réalisent cette fonction aux deux extrémités du câble sismique. C'est pourquoi, même lors d'une utilisation stationnaire, la profondeur est relativement précise (par rapport à la profondeur cible) aux deux extrémités. Egalement, par les câbles d'arrivée les deux ARV exercent une tension sur le câble sismique à n'importe quel moment (les câbles d'arrivée ayant une rigidité adaptée dans ce but). De cette manière, le procédé peut assurer un contrôle de la profondeur, non seulement pour

les extrémités du câble sismique mais aussi le long du câble. En fonctionnement, la tension peut coopérer avec la variation de longueur, par exemple de manière à minimiser (c'est-à-dire, cette expression englobant n'importe quel processus de minimisation, y compris le simple respect de la contrainte de seuil d'erreur) une erreur

5 de profondeur globale le long du câble sismique (c'est-à-dire une erreur de profondeur calculée le long du câble sismique telle que l'erreur de la somme des carrés mentionnée plus bas, à la différence d'une erreur de profondeur calculée simplement aux extrémités du câble sismique). La tension peut ainsi être une fonction de la

10 Par exemple, la tension dans le câble sismique est toujours supérieure à 100 kgf, par exemple d'environ 300 kgf. Pour atteindre une telle valeur, le navire de queue exerce une tension opposée à la direction du navire de tête.

Le procédé a pour but le contrôle de la profondeur, ce qui signifie que le procédé

15 concerne le fait d'atteindre une profondeur cible pour le câble sismique. La profondeur cible peut être n'importe quelle valeur de profondeur prédéfinie pour l'acquisition de données sismiques à réaliser et entre 0 et 300 mètres (par exemple toute valeur supérieure à 5 mètres ou 20 mètres et/ou inférieure à 300 mètres). La valeur de la

20 La valeur de la profondeur cible peut être une valeur scalaire (par exemple la même valeur est ciblée pour tout le câble sismique) ou une valeur qui varie spatialement telle qu'un vecteur de valeurs associées aux différentes positions du câble sismique (par exemple si - au moins parfois - différentes valeurs cibles sont considérées pour différentes parties ou différents points du câble sismique, par exemple lorsque le câble

25 ou une partie du câble est inclinée). En effet, le câble sismique n'a pas nécessairement une seule définition de profondeur. La profondeur peut être vue comme un vecteur de profondeur le long du câble sismique ou une moyenne d'un tel vecteur ou encore comme une paire de valeurs de profondeur prévues pour les extrémités du câble sismique. La valeur de profondeur cible est n'importe quelle valeur de profondeur

30 souhaitée prévue pour le câble sismique, par exemple pour obtenir une acquisition et une qualité souhaitée de données et elle peut être fournie de n'importe quelle manière. La valeur cible peut être fournie par une unité de contrôle centrale qui communique avec les différents câbles sismiques de tout le système (telle que le navire principal mentionné plus haut) et la valeur cible fournie pour chaque câble sismique peut être

différente des autres de telle manière que le procédé de la figure 3 peut être mis en œuvre de manière indépendante pour les différents câbles sismiques de l'ensemble de câbles.

- 5 Le procédé est mis en œuvre dans l'eau, par exemple dans le cas où les courants marins peuvent varier dans le temps. Les dimensions en jeu peuvent également influencer la stabilité du système. Aussi n'importe quelle profondeur cible est-elle particulièrement difficile à atteindre dans le contexte stationnaire ou pseudo-stationnaire. Une difficulté technique pour contrôler la profondeur est en fait liée au fait
- 10 que le système peut avoir à être stationnaire ou pseudo-stationnaire dans le plan horizontal à deux dimensions et statique dans le plan vertical. Comme il a été expliqué plus haut, le câble sismique inclut des ballasts commandés à distance le long du câble. La fonction primaire de tels ballasts est de contrôler la profondeur du câble sismique (auquel il est fait référence ci-dessous comme étant "MSC" comme dans Midwater
- 15 Stationary Cable (= câble stationnaire entre deux eaux) lorsque les têtes du câble d'arrivée sont à la profondeur correcte. En effet, les ballasts peuvent tout d'abord réaliser une correction statique de la flottabilité globalement non neutre initialement du câble sismique (par exemple le câble sismique étant conçu pour être de flottabilité neutre dans de l'eau douce mais étant ensuite pourvu de poids pour l'utilisation en eau
- 20 salée, auquel cas la flottabilité n'est pas intrinsèquement parfaitement neutre de façon générale). Mais le ballast peut également réaliser une correction dynamique de variations locales de flottabilité du câble sismique. En particulier, les ballasts compensent les variations de densité de l'eau (par exemple à cause de la température, de la salinité et/ou de variations de courant) de manière à maintenir le câble sismique
- 25 comme étant à flottabilité aussi neutre que possible. Cependant, les ballasts ne sont pas conçus mécaniquement pour compenser le poids des câbles d'arrivée, ce que le procédé réalise en effet en variant la longueur déployée de ces câbles d'arrivée (en contrôlant ainsi la profondeur des extrémités du câble sismique, la profondeur le long du câble étant contrôlée par les ballasts et la tension). Aussi, dans certaines situations,
- 30 la profondeur peut-elle varier, ceci étant dû à l'environnement, et les ballasts peuvent ne pas être assez rapides ou réactifs pour la corriger de manière à obtenir une profondeur contrôlée précise, typiquement à +/- 1 mètre par rapport à la profondeur cible. Dans une telle situation, le procédé peut aussi comprendre la variation dynamique (par exemple en continu, par exemple en temps réel) de la longueur

déployée de chaque câble d'arrivée par rapport à la profondeur cible et/ou l'adaptation de la tension en conséquence pour minimiser l'erreur globale.

C'est pourquoi, le procédé de la figure 3 propose, par exemple, de varier en continu S30 (lorsque le câble sismique est déployé entre deux eaux et/ou lorsque l'acquisition de données sismiques est réalisée), la longueur déployée de chaque câble d'arrivée par rapport à la profondeur cible et/ou à la tension exercée sur le câble (par exemple éventuellement à une vitesse qui varie). La variation S30 peut être réalisée de manière dynamique - c'est-à-dire "continuellement" ou "en continu" - pour la longueur du câble d'arrivée et/ou la tension. Par "de manière dynamique" ou "en continu", on entend que pendant toute la durée d'un positionnement, par exemple pendant toute la durée d'une séquence d'acquisition à une station de mesure donnée (par exemple stationnaire ou pseudo-stationnaire), la variation de la longueur déployée et/ou de la tension peut être réalisée (et observée) plus qu'une seule fois (par exemple plusieurs ou de nombreuses fois). Pour ceci, la variation peut être sans arrêt ou alternativement la variation S30 peut être réalisée dans des étapes consécutives (lesquelles étapes peuvent être régulières ou irrégulières, de l'ordre de plusieurs secondes, plusieurs minutes, plusieurs heures et/ou encore plusieurs jours). Les considérations se rapportant à ceci sont cependant des détails de mise en œuvre. Par exemple, la profondeur actuelle du câble sismique peut être contrôlée plusieurs fois (par exemple par l'intermédiaire de capteurs dédiés, comme il sera expliqué plus loin) et elle peut en fait être corrigée en variant la longueur déployée du câble d'arrivée relié à l'ARV de tête et/ou du câble d'arrivée relié à l'ARV de queue et/ou la tension exercée. C'est pourquoi, les câbles d'arrivée ont une longueur variable (par exemple la variation de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée peut être réalisée par un treuil arrangé sur chacun des ARV) et ceci permet de contrôler une traction potentielle vers le haut ou un déplacement vers le bas de chaque extrémité du câble sismique en dévidant ou en enroulant de la longueur de câble d'arrivée. Ceci procure une manière de contrôler la profondeur de manière rapide/réactive dans de nombreuses circonstances, y compris lorsque la vitesse du câble sismique par rapport à l'eau est très basse. Les câbles d'arrivée ont une longueur plus grande que la profondeur maximale à laquelle le câble doit être positionné, par exemple 400 mètres si la profondeur maximale est de 300 mètres.

Une telle variation (par exemple continue) S30 de la (des) longueur(s) déployée(s) (c'est-à-dire dévidées) de câble d'arrivée et/ou de la tension peut être réalisée en coopération avec un processus de contrôle des ballasts (par exemple en variant la flottabilité des ballasts). Cependant, pendant toute une séquence d'acquisition, notamment pour une valeur de profondeur cible donnée (constante dans le temps), chaque flottabilité de ballast peut être maintenue constante de telle manière que de légères modifications de la profondeur (par exemple dues à des changements de courants et/ou à de l'instabilité due aux dimensions en jeu) sont empêchées et/ou corrigées (c'est-à-dire compensées) par la variation S30.

Aussi la variation de la longueur déployée de câble d'arrivée est-elle réalisée en coopération avec le processus consistant à exercer une tension sur le câble sismique par les ARV, laquelle tension peut également varier en tant que résultat de S30. C'est pourquoi, les exigences et/ou les contraintes de tension peuvent être prises en compte (de quelque manière que ce soit) lorsque l'on effectue S30. Par exemple, au cas où chaque ARV est équipé d'un treuil qui enroule ou dévide son câble d'arrivée respectif, dans certaines situations (par exemple lorsqu'il n'y a pas de courant ou un courant faible), les deux treuils peuvent toujours exercer une force minimale (qui tend à enrouler le câble d'arrivée), une telle force minimale dépendant des caractéristiques géométriques et/ou mécaniques du câble sismique et/ou de la force exercée par l'autre treuil si bien qu'une tension supérieure à une valeur minimale prédéfinie est toujours exercée sur le câble sismique. Ceci peut également être atteint en bloquant les treuils, auquel cas les treuils se contentent de transmettre les tensions exercées par les ARV au câble sismique par l'intermédiaire des câbles d'arrivée. D'une certaine manière, on peut dire que les treuils peuvent exercer une force sur le câble d'arrivée en coopérant pour exercer une tension dans le câble sismique, même à des moments où la longueur du câble d'arrivée ne varie pas. En d'autres termes, le même système treuil + câble d'arrivée est utilisé synergiquement pour à la fois exercer une tension dans le câble sismique et pour contrôler sa profondeur. Inversement et de manière similaire, la force exercée par chaque treuil peut être sujette à une valeur maximale. La variation S30 peut être limitée par une telle tension minimale et/ou maximale prédéfinie à exercer dans le câble sismique et les treuils peuvent être contrôlés en conséquence, et dans un exemple en fonction de la valeur du courant marin (et de la force de tension exercée par le simple courant marin).

La variation S30 peut être effectuée à différentes vitesses. En d'autres termes, la vitesse peut varier. En particulier, si la variation de la longueur dévidée du câble d'arrivée est effectuée par l'intermédiaire d'un treuil, lorsque le procédé vise à dévider de la longueur ou à enrouler de la longueur, habituellement la vitesse de rotation du treuil augmente et/ou diminue progressivement pendant tout le processus. Ceci empêche des changements brutaux et une fatigue mécanique. Ceci s'applique également aux ARV lorsqu'ils utilisent une vitesse/une traction pour exercer une tension.

On notera que les deux câbles d'arrivée ont une longueur dévidée variable de telle manière que, même au cas où il y a un courant (par exemple, même faible) et le câble sismique est maintenu stationnaire ou pseudo-stationnaire par rapport au fond de la mer, non seulement la longueur du câble d'arrivée de tête peut varier mais encore la longueur du câble d'arrivée de queue peut varier. C'est pourquoi, si le courant varie, le système peut s'adapter de manière rapide/réactive et le contrôle de la profondeur est précis de manière plus réactive sur toute la longueur du câble sismique. Ceci est également vrai pour les ARV qui exercent une tension.

En fait, la variation de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée et/ou de la tension exercée sur le câble par chaque ARV respectif peut même être effectuée de manière indépendante pour chaque câble d'arrivée (respectivement à chaque extrémité). En d'autres termes, par exemple le processus qui contrôle une longueur de câble d'arrivée déployée (c'est-à-dire dévidée) peut être indépendant (d'un point de vue de traitement des données) du processus qui contrôle l'autre longueur de câble d'arrivée déployée. Ceci signifie notamment que les longueurs déployées peuvent être différentes à un moment (et elles sont en général différentes) de telle manière qu'à certains points les longueurs déployées peuvent être différentes et/ou à certains moments la longueur dévidée ou la longueur enroulée (par rapport à la longueur courante) et/ou la vitesse de déploiement peut être différente pour les deux câbles d'arrivée (plus ou moins de longueur est dévidée pour un câble d'arrivée par rapport à l'autre, avec même, dans certaines situations, aucune variation pour un câble d'arrivée et une variation non nulle pour l'autre). Ceci permet un contrôle particulièrement précis de la profondeur, notamment dans le contexte stationnaire ou pseudo-stationnaire.

La variation de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée et/ou de la tension exercée sur le câble par chaque ARV respectif peut généralement être effectuée de n'importe quelle manière. Dans un exemple automatisé, une telle variation est effectuée par une boucle de contrôle qui prend, comme données d'entrée, une mesure de la profondeur du câble sismique. En d'autres termes, à la place de s'appuyer sur des analyses pour calculer la longueur déployée théorie des câbles d'arrivée pour la profondeur cible, le procédé peut s'appuyer sur une mesure de la profondeur (c'est-à-dire n'importe quelle mesure afférente à la profondeur du câble sismique, et donc à la profondeur cible) et varier de manière itérative (par exemple dynamique ou essentiellement dynamique) la longueur déployée des deux câbles d'arrivée et/ou la tension exercée sur le câble par chaque ARV respectif pour effectuer une correction de la profondeur. Il peut en fait y avoir un algorithme de ce type qui fonctionne par ARV respectif, indépendamment l'un de l'autre. En d'autres termes, il peut y avoir un programme d'ordinateur différent ou une instance de programme d'ordinateur différente par ARV, et par exemple chaque ARV peut avoir son propre programme d'ordinateur. Ceux-ci rendent le contrôle de la profondeur précis étant donné que ceci permet d'absorber, de manière simple et robuste, des changements de l'environnement (par exemple des changements de courants marins et/ou de densité de la mer). Ceci peut également être le cas pour la tension exercée sur le câble qui peut être déterminée par l'intermédiaire d'une boucle de contrôle similaire. De telles boucles de contrôle peuvent être entrelacées.

La boucle de contrôle peut recevoir des signaux (de capteurs) et/ou émettre des signaux (pour commander la variation S30) de manière ininterrompue ou périodique (par exemple, le schéma de commande étant éventuellement le même ou étant différent pour une (des) sorte(s) respective(s) de signal reçu et/ou de signal émis). La boucle de contrôle peut mettre en œuvre des filtres sur les données reçues si une réception est ininterrompue (par exemple, de manière à réduire le bruit). Si une période est considérée, la période peut être constante ou peut varier et elle peut être entre 10 secondes et 20 minutes, généralement d'environ 1 minute (par exemple entre 45 secondes et 75 secondes). La période peut notamment être distincte (au-delà de 10%) de la fréquence des vagues environnantes (par exemple, qui peuvent être mesurées

de quelque manière que ce soit). Ceci réduit la fatigue du système (notamment des treuils qui, sinon, pourraient être trop utilisés).

Typiquement, la mesure de la profondeur du câble sismique peut être un ensemble de
 5 valeurs de profondeur définies par l'intermédiaire de capteurs arrangés le long du
 câble sismique. De tels capteurs sont, par exemple, des capteurs de pression de l'eau
 (qui fournissent indirectement des mesures de profondeur) qui sont liés
 respectivement aux ballasts, comme il est divulgué dans le document mentionné plus
 haut FR2945356A1. C'est pourquoi, plutôt que seulement un capteur, on peut
 10 considérer d'utiliser au moins deux capteurs (par exemple un à chaque extrémité du
 câble sismique), ou même plus, par exemple tout le long du câble sismique, par
 exemple à intervalles réguliers. Dans un exemple, des capteurs de pression (qui ne
 sont pas montrés sur les dessins) sont prévus pour chaque section de câble entre
 deux ballasts consécutifs, de manière appropriée à mi-distance de chaque section de
 15 câble. Ceci donne une valeur précise et complète de la profondeur. De manière
 remarquable, ceci fournit des moyens pour interpoler la forme en chaînette d'une
 section entre deux ballasts, la forme en chaînette étant due à l'équilibrage imparfait du
 câble à flottabilité neutre. Dans un exemple, la profondeur cible est une seule valeur
 à obtenir par tous les capteurs de profondeur (c'est-à-dire il est prévu que le câble soit
 20 aussi horizontal que possible) et la boucle de contrôle effectue la variation S30 selon
 une erreur globale calculée pour tous les capteurs de profondeur (par exemple une
 erreur selon la méthode des moindres carrés).

De manière similaire, les données d'entrée de la boucle de contrôle peuvent
 25 comprendre des mesures de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée (à la
 place d'avoir la boucle de contrôle qui s'appuie sur une valeur théorique). Ceci donne
 des résultats précis. En particulier, la boucle de contrôle peut contrôler chaque treuil
 respectif (angle total de rotation et/ou vitesse de rotation) de manière à contrôler la
 longueur déployée du câble d'arrivée dans le temps. Aussi le câble sismique peut-il
 30 comprendre des capteurs de positionnement tels que des capteurs acoustiques
 (utilisés notamment pour le positionnement stationnaire du câble sismique) dont les
 données sorties peuvent également être entrées dans la boucle de contrôle, par
 exemple pour créer une redondance de données.

Dans un exemple, le principe du procédé consiste ainsi à avoir un treuil motorisé intégré dans chaque ARV pour déployer plus ou moins de câble (d'arrivée) et un mécanisme de contrôle pour déployer la longueur correcte du câble (d'arrivée) pour atteindre la profondeur cible. Comme il a été mentionné plus haut, étant donné les exigences du contexte d'utilisation, la profondeur cible de l'ARV de queue pourrait être différente de la profondeur cible de l'ARV de tête. C'est pourquoi, le système est, dans un exemple, extrêmement flexible et adaptable.

Le principe physique peut être facilement compris en simplifiant le problème. Soit D la profondeur de la tête de câble (sismique), L la longueur du câble d'arrivée et Th la tension horizontale dans le câble sismique à la tête du câble d'arrivée, comme il est représenté sur la figure 4. En supposant que le câble d'arrivée soit rectiligne dans l'eau, nous pouvons écrire $\sin \theta = D/L$. En écrivant l'équilibre au point de tête du câble, nous obtenons : $\tan \theta = Tv / Th$, où Tv est la force verticale exercée vers le bas à la tête du câble. Tv est en fait le poids de la tête du câble dans l'eau, désigné par W . Ainsi, la longueur du câble d'arrivée L qui doit être à la profondeur D est obtenue par :

$$L = D / \sin (\arctan (Tv / Th)) = D * (Th/W) / \sqrt{1+(Th/W)^2}$$

Si le poids de la tête du câble est négligeable, comparé à la tension, la longueur est simplement approchée par $L = D * Th/w$. Ainsi, manifestement, la longueur peut être fixée pour avoir la profondeur correcte.

Il est important de noter que la longueur du câble d'arrivée dépend de la tension en ligne dans le câble (Th). Dans notre cas, la tension en ligne à l'ARV de tête dépend de la vitesse par rapport à l'eau à cause de la force de traînée hydrodynamique le long du câble. Ceci signifie dans le cas où le MSC est stationnaire ou pseudo-stationnaire que la tension en ligne dépend, entre autres, du courant marin. En effet, la force hydrodynamique F le long du MSC à la vitesse v (par rapport à l'eau) peut être calculée comme étant :

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot (\epsilon_f \cdot L_{MSC} \cdot \pi \cdot D_{MSC} + c_d \cdot S_p)$$

où :

- Le premier terme dans la parenthèse correspond à la force de friction en ligne :
 - ϵ_f est le coefficient de friction du câble,

- L_{MSC} est la longueur du MSC,
- D_{MSC} est le diamètre du câble du MSC.
- Le second terme dans la parenthèse correspond à la force de pression transversale :

- 5
- C_d est le coefficient de traînée de pression transversale,
 - S_{tp} est la zone projetée créant la force de pression transversale,
 - ρ est la densité de l'eau,
 - v est la vitesse de l'eau du MSC.

10 Il est intéressant d'ajouter que, pour une même profondeur cible, la longueur du câble d'arrivée pour l'ARV de tête est différente de la longueur du câble d'arrivée de l'ARV de queue en présence de courant (ou de vitesse par rapport à l'eau) parce que la tension en ligne est différente à la queue et à la tête. La longueur du câble à l'ARV de queue ne dépend pas du courant dans ce cadre théorique simplifié.

15

En réalité, le problème est un peu plus complexe et nous devons considérer deux points supplémentaires :

- la force hydrodynamique sur le câble d'arrivée lui-même,
- le poids du câble d'arrivée qui est lourd dans l'eau.

20

Ainsi, le câble d'arrivée a une forme de chaînette, comme il est représenté sur la figure 5, qui montre un profil de profondeur d'un câble d'arrivée lourd et le courant marin. Au cas où l'on ne considère pas les forces hydrodynamiques sur le câble d'arrivée (par exemple, dans le cas où il n'y a pas de courant), la forme du câble d'arrivée est obtenue par l'équation de chaînette simple :

25

$$y = (\cosh(\mu \cdot x) - 1) / \mu$$

où :

- $\mu = m_L / T_h$
- m_L est la masse linéaire du câble d'arrivée dans l'eau
- T_h est la tension horizontale côté ARV
- $\cosh$ est la fonction cosinus hyperbolique
- y et x sont les coordonnées de la courbe d'arrivée dans un plan cartésien (x, y) .

30

Dans le cas général où l'on doit considérer les deux forces sur le câble d'arrivée et le poids du câble d'arrivée, l'équation différentielle à résoudre est pour T :

$$\frac{dT}{ds} + G = 0$$

5 où

- s est la longueur de l'arc le long du câble
- $T=T(s)$ est le vecteur de tension locale
- $G=G(s)$ est le vecteur de force totale locale (c'est-à-dire la somme du poids et des forces externes).

10

Au cas où le poids du câble d'arrivée peut être négligé comparé aux forces externes sur le câble d'arrivée, les forces externes sont perpendiculaires à la direction verticale et uniformes le long du câble, l'équation peut être résolue de manière analytique. La forme du câble d'arrivée est alors une parabole (formule du pont suspendu) :

15

$$y = \mu/2 \cdot x^2$$

En règle générale, dans le cas réel, l'équation est plus complexe à résoudre mais le principe physique est le même : la profondeur est ajustée en contrôlant la longueur du câble d'arrivée. Plus la profondeur cible est profonde et plus la tension est élevée, plus le câble d'arrivée est long.

20

Les différences avec le cas simpliste sont :

- si le câble d'arrivée est lourd dans l'eau, le dévidage de davantage de câble ajoute du poids dans l'eau.
- la force hydrodynamique à l'ARV de queue varie avec le courant et donc la longueur varie avec le courant.
- la composante horizontale de la force hydrodynamique sur le câble d'arrivée a un effet différent à l'ARV de tête et à l'ARV de queue : elle soulève le câble d'arrivée de tête vers le haut tandis qu'elle pousse le câble d'arrivée de queue vers le bas.
- la force varie le long du câble d'arrivée parce que le courant n'est pas le même en surface et en profondeur (en intensité et/ou en direction).

30

Ce dernier point indique que le problème de contrôle de la profondeur est en fait un problème à trois dimensions étant donné que la courbe du câble d'arrivée n'est pas nécessairement contenue dans un plan vertical. Il convient de noter que la forme de chaînette a l'avantage que la forme du câble est plus souple et l'angle à la jonction de la tête de câble est plus doux (meilleur pour le bruit).

Des études ont été effectuées pour valider ces principes.

- Des simulations ont été faites pour dériver la forme du MSC et la forme du câble d'arrivée pour différentes vitesses de l'eau. La figure 6 présente, par exemple, une simulation de la tension du MSC et du profil de la profondeur pour différentes vitesses de l'eau.
- Des simulations ont été faites pour prouver que le concept d'enrouler ou de dévider du câble pour ajuster la profondeur peut être mis en œuvre de manière réaliste compte tenu des valeurs de courant réel à travers le monde et de la capacité de vitesse du treuil. Par exemple, la figure 7 montre des résultats de simulation (profondeur et erreur de profondeur) en présence de courants. La figure 8 montre des résultats de simulation (longueur du câble d'arrivée et longueur dévidée et enroulée) en présence de courants et la figure 9 montre des résultats de simulation (activation du treuil et durée du dévidage) en présence de courants.

Comme il a été expliqué plus haut, dans la pratique une solution possible est de contrôler chaque treuil par une commande automatique et une boucle de commande (c'est-à-dire un algorithme). L'algorithme reçoit le point déterminé de la profondeur d'un contrôleur.

L'algorithme peut typiquement utiliser les valeurs suivantes (comme mentionné plus haut pour quelques unes d'entre elles) comme valeurs d'entrée (associées à / fournies par) : capteurs de profondeur, capteurs de vitesse de l'eau, capteurs de longueur dévidée, capteurs de vitesse de treuil, commutateurs de fin de course de treuil, tension mécanique dans le MSC, tension mécanique dans le treuil, mesures de courant, prévisions de courant et/ou densité de la mer ($T^{\circ}\text{C}$, salinité, pression). Cependant, il convient de noter que les variations de la densité de la mer peuvent être absorbées par les ballasts sans avoir nécessairement à mesurer de telles valeurs. Quelques unes

des entrées (telles que les commutateurs de fin de course, la longueur dévidée ou la tension mécanique dans le treuil) peuvent être utilisées comme entrées pour un mécanisme de sécurité pour arrêter le treuil en cas d'urgence. Quelques autres entrées (vitesse de l'eau, tension mécanique) peuvent être utilisées pour accorder et adapter les paramètres de l'algorithme (par exemple, les coefficients d'un PID).

C'est pourquoi, l'algorithme peut traiter une pluralité de données brutes des capteurs pour estimer quelques entrées plus stables et plus précises qui doivent être utilisées par l'algorithme. Par exemple :

- 10 • des filtres ou d'autres moyens de traitement peuvent être utilisés pour supprimer les mesures bruitées.
- la tension peut être dérivée en utilisant un ajustement linéaire avec des mesures de tension disponibles (comme il est montré sur la figure 10 qui représente l'ajustement linéaire pour des estimations de tension mécanique dans le MSC).
- 15 • on peut obtenir un retour sur la profondeur d'un système de positionnement qui utilise des entrées multiples (fusion des données).

Lorsque les données d'entrée de la boucle de contrôle contiennent en plus des mesures de la vitesse de chaque treuil, l'état des commutateurs de fin de course du treuil et/ou des mesures de la tension mécanique dans chaque treuil, ceci augmente la sécurité. Lorsque les données d'entrée de la boucle de contrôle contiennent en plus des mesures de courant, des prévisions de courant et/ou des valeurs relatives à la densité de la mer (telles que capteurs de vitesse de l'eau, mesures de courant, prévisions de courant, densité de la mer, température, salinité et pression), ceci permet une anticipation par la boucle de contrôle et donc un contrôle ou une correction plus rapide de la profondeur. Lorsque les données d'entrée de la boucle de contrôle contiennent en plus des mesures de la tension mécanique dans le câble sismique, ceci permet une synergie entre l'exercice de la tension sur le câble sismique par les deux ARV et le contrôle de la profondeur.

Dans un exemple, l'objectif de l'algorithme est (par exemple lié à) la minimisation de l'erreur de profondeur le long du câble :

$$E_t \left[\sum_i (td_i - ad_i)^2 \right]$$

où E_t est ce que l'on attend dans le temps, td_i est la profondeur cible à l'endroit i et ad_i est la profondeur réelle à l'endroit i . L'utilisation d'une erreur des moindres carrés dans la boucle de contrôle permet un contrôle globalement précis de la profondeur.

Dans un exemple, l'algorithme produit les sorties suivantes pour contrôler les actionneurs du treuil : longueur à dévider ou à enrrouler, vitesse de treuillage, force de treuillage à utiliser et/ou tension.

Dans le cas d'un câble équilibré de manière non parfaite dans l'eau (lorsque la flottabilité neutre n'est pas parfaitement atteinte), l'augmentation de la tension tend à aplanir la ligne et à diminuer l'erreur de profondeur totale.

La structure générale d'un exemple de l'algorithme est illustrée sur la figure 11 :

- Un bloc d'estimation d'entrée est utilisé pour générer des entrées stables.
- Un algorithme d'optimisation contrôle le treuil pour minimiser l'erreur entre la profondeur cible et la profondeur réelle. L'optimisation peut être généralement de type PID et contrôler la vitesse du treuil pour assurer une transition sans à-coups.
- Un bloc de supervision surveille le comportement global du système et éventuellement fournit des données traitées à utiliser par l'algorithme d'optimisation.

Nous allons maintenant discuter d'exemples de géométries qui peuvent être mises en œuvre.

Un exemple de MSC est représenté sur la figure 12. Le MSC de l'exemple (par exemple d'une longueur classique de 8 kilomètres) est relié à des ARV 102 par l'intermédiaire de câbles d'arrivée $L1$ et se compose de :

- deux câbles d'arrivée $L1$ de 400 m (généralement plus longs que 100 ou 200 m et/ou plus courts que 800 ou 600 m) terminés par une tête de câble (une de chaque côté),

- deux sections d'extension S pour absorber les chocs et les vibrations venant de la surface de la mer (une de chaque côté),
 - deux sections acoustiques Ac équipés de boussoles et d'unités acoustiques (une de chaque côté),
- 5
- d'un câble sismique 110 fait de sections actives de 250 m de long comprenant des récepteurs sismiques, chacun comprenant un hydrophone et un géophone à trois axes tous les 25 m (de manière générale tous les x mètres avec x fixe ou variant et supérieur à 5 ou 15 m et/ou inférieur à 100 ou 35 m),
 - d'équipements auxiliaires installés sur le câble (accessoires) :
- 10
- ballasts de câble B tous les 250 m (de manière générale tous les y mètres avec y fixe ou variant et supérieur à 100 ou 200 et/ou inférieur à 500 ou 300 m) entre chaque section active As ,
 - unités de positionnement acoustiques, capteurs de profondeur 121 et boussole tous les 250 m (de manière générale tous les z mètres avec z fixe ou variant et supérieur à 100 ou 200 et/ou inférieur à 500 ou 300 m) au
- 15
- milieu de chaque section active (pour localiser avec précision les capteurs).

Dans l'exemple, des profondimètres sont présents dans les têtes de câble, dans chaque ballast et au milieu des sections actives et des sections acoustiques. Des

20

mesureurs de tension sont présents dans les têtes de câble et dans les ballasts. Des sections d'extension et des sections acoustiques peuvent ou peuvent ne pas être utilisées - selon le type de déploiement choisi.

Des exemples de caractéristiques de câble d'arrivée qui peuvent être mises en œuvre

25

comprennent :

- diamètre extérieur : supérieur à 10 mm et/ou inférieur à 50 mm (par ex. 30 mm),
 - poids dans l'air : supérieur à 1 kg/m et/ou inférieur à 5 kg/m (par ex. 3 kg/m),
 - poids dans l'eau : supérieur à 0,5 kg/m et/ou inférieur à 4 kg/m (par ex. 2 kg/m).
- 30
- Des exemples de caractéristiques de section sismique qui peuvent être mises en œuvre comprennent :
- diamètre extérieur : supérieur à 20 mm et/ou inférieur à 100 mm (par ex. 60 mm),
 - poids dans l'air : supérieur à 1 kg/m et/ou inférieur à 5 kg/m (par ex. 3 kg/m),
 - poids dans l'eau : sensiblement 0 kg/m (poids nominal).

Des exemples de fonctionnalités du système de contrôle de la profondeur qui peuvent être mises en œuvre comprennent n'importe quel élément suivant ou une combinaison des éléments suivants :

- 5 • le positionnement des câbles récepteurs à une profondeur d'immersion souhaitée. Par défaut, la profondeur souhaitée est constante le long du câble, constante dans le temps et tous les câbles ont la même valeur cible. Pour des besoins spécifiques, la profondeur d'immersion cible pourrait varier le long d'un câble (profil d'immersion), pourrait être différente d'un câble à l'autre et peut
10 varier dans le temps.
- le maintien de la profondeur d'immersion/du profil aussi proche que possible des valeurs cibles (en contrecarrant le courant moyen).
- l'amenée des câbles à la surface pour des opérations spécifiques (remplacement de section, défaut de composant).
- 15 • contrôle de chaque câble de manière individuelle, en particulier pendant la procédure de mise à l'eau et de récupération, les déplacements entre les stations d'acquisition, les transits vers et à partir de la zone à prospector. Le contrôle de la profondeur du câble peut être effectué en mode manuel ou automatique.
- vérification du statut du système de contrôle de la profondeur en comparant la
20 profondeur réelle du câble à la profondeur souhaitée et en générant des alarmes en cas de statut anormal.

Un exemple de l'équipement du système de contrôle de la profondeur des câbles d'arrivée peut comprendre n'importe quel élément suivant ou une combinaison des
25 éléments suivants :

- des treuils mécaniques pour enrouler ou dévider des câbles d'arrivée.
- des systèmes de contrôle de la profondeur des câbles d'arrivée qui contrôlent la profondeur des extrémités des câbles d'arrivée. Le système comprend des
30 capteurs de profondeur, des capteurs de mesure de courant (ADCP), des capteurs de vitesse (GPS), des capteurs de la vitesse des treuils, des capteurs de la longueur dévidée.
- un contrôleur de la profondeur des câbles d'arrivée à bord de chaque drone capable d'actionner le treuil.

- un contrôleur de la profondeur des câbles d'arrivée à bord du navire principal pour contrôler les contrôleurs locaux à bord des ARV.
- des stations de travail sur ordinateur à bord du navire principal avec un écran de contrôle pour superviser la profondeur de tous les MSC.

5

L'algorithme automatique peut en fait être mis en œuvre dans le contrôleur à bord de l'ARV et/ou à bord du navire principal (système distribué). Les contrôleurs peuvent avoir un mode manuel pour contrôler manuellement les actionneurs. Le contrôleur peut avoir un mode d'urgence pour amener le câble à la surface. L'architecture du contrôleur peut donc comprendre un système central à bord du navire principal avec des unités délocalisées dans l'ARV : une partie de l'intelligence située dans l'ARV.

10

15

Lorsque la boucle de contrôle est commandée par un processeur à bord d'au moins un ARV (par exemple un processeur qui commande une boucle de contrôle à bord de chaque ARV et qui contrôle le treuil respectif de l'ARV), la variation S30 peut être effectuée de manière plus réactive (contrôle rapide de la rétroaction). En effet, les capteurs du câble sismique (par exemple les capteurs de profondeur) peuvent envoyer des informations plus rapidement à l'ARV (qu'au navire principal), par exemple par l'intermédiaire de connexions/câbles électriques et le processeur peut contrôler le treuil plus rapidement, par exemple par l'intermédiaire de connexions/câbles électriques. Ceci évite relativement la lenteur relative des communications radio.

20

25

Dans des exemples, la vitesse du courant (w / R) peut être obtenue en soustrayant la vitesse (obtenue avec des mesures ADCP) de l'eau du drone (d / R) de la vitesse absolue du drone (d / W) :

$$\vec{V}_{w/R} = \vec{V}_{d/R} - \vec{V}_{d/w}$$

30

Dans des exemples, la vitesse absolue de l'ARV est obtenue par GPS, loch Doppler ou interface avec le système de navigation (système fusionnant des données et différents capteurs pour positionner précisément le câble).

Etant donné que les ARV peuvent dévider ou enrôler des longueurs variables de câble d'arrivée, les drones peuvent être conçus d'une manière spécifique et, dans un

exemple de la manière décrite par la demande de brevet intitulée (au moins lors du dépôt) "Water surface drone" et déposée dans le même pays, par la même personne et à la même date que la demande de brevet la plus ancienne dont la priorité est revendiquée par la présente demande de brevet, le cas échéant, ou qu'autrement la présente demande de brevet.

Les figures 13 et 14 illustrent l'efficacité du procédé, notamment pour ce qui est de la tension exercée sur le câble pour minimiser une erreur globale le long du câble. L'erreur globale de profondeur le long du câble peut être exprimée par l'intermédiaire de l'équation d'une chaînette. La courbe a une forme de cosinus hyperbolique. Si ρ désigne la densité linéaire du câble dans l'eau et T la traction horizontale des navires, l'équation de courbe est $y = (\cosh(\mu \cdot x) - 1) / \mu$ avec $\mu = \rho / T$. Les figures 13 et 14 montrent des formes du câble pour différents niveaux d'erreur de flottabilité pour une longueur de respectivement 8 km (fig. 13) et 250 (fig. 14), la première correspondant, par exemple à toute la longueur du câble et la dernière correspondant, par exemple, à la longueur locale du câble autour d'un ballast défectueux. Les figures correspondent à un câble de 60 mm de diamètre et à une densité de la mer de 1025 kg/m³. L'erreur de flottabilité représente la différence entre le poids optimal pour avoir une flottabilité neutre et le vrai poids. Après des calculs, on peut directement obtenir la valeur d'affaissement : $h = \{\sqrt{1 + L^2 \cdot \mu^2} - 1\} / \mu$ avec L qui est la moitié de la longueur du câble le tableau ci-dessous donne des valeurs d'affaissement pour différentes tensions et pour une longueur de 8 km et une de 250 m. Le résultat montre l'efficacité de l'exercice d'une tension sur le câble.

valeur sag / erreur de flottabilité	10,00%	5,00%	1,00%	0,80%	0,50%	0,10%
8 km et T=100 kgf	3669,80 m	3368,99 m	2630,95m	1832,10 m	1075,45m	231,08 m
8 km et T=300 kgf	3096,62 m	2433,71 m	1365,53m	745,95 m	382,88 m	77,25 m
8 km et T=1000 kgf	1832,10 m	1075,45 m	457,63 m	231,08 m	115,83 m	23,18 m
250 m et T=100 kgf	21,94 m	11,23 m	4,52 m	2,26 m	1,13 m	0,23 m
250 m et T=300 kgf	7,52 m	3,77 m	1,51 m	0,75 m	0,38 m	0,08 m
250 m et T=1000 kgf	2,26 m	1,13 m	0,45 m	0,23 m	0,11 m	0,02 m

REVENDEICATIONS

1. Procédé pour contrôler la profondeur d'un câble sismique qui a des ballasts
5 espacés le long de sa longueur assurant une flottabilité neutre pour le câble
sismique, le câble sismique étant adapté pour l'acquisition de données entre
deux eaux, chaque extrémité du câble sismique étant reliée à un navire
autonome de surface respectif qui exerce une tension sur le câble par
l'intermédiaire d'un câble d'arrivée respectif qui a une flottabilité négative, le
10 procédé comprenant, par rapport à une profondeur cible, le fait de faire varier la
longueur déployée de chaque câble d'arrivée et/ou de la tension exercée sur le
câble par chaque navire autonome de surface respectif.
2. Procédé selon la revendication 1 dans lequel la tension minimise une erreur
15 globale relative à la profondeur cible le long du câble.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2 dans lequel la variation de la longueur
déployée de chaque câble d'arrivée est réalisée de manière indépendante pour
chaque câble d'arrivée.
- 20 4. Procédé selon la revendication 1, 2 ou 3 dans lequel la variation de la longueur
déployée de chaque câble d'arrivée et/ou de la tension exercée sur le câble par
chaque navire autonome de surface respectif est réalisée par l'intermédiaire
d'une boucle de contrôle qui prend comme entrées des données, y compris une
25 mesure de la profondeur du câble sismique.
5. Procédé selon la revendication 4 dans lequel la mesure de la profondeur du câble
sismique est un ensemble de valeurs de profondeur déterminé par des capteurs
arrangés le long du câble sismique.
- 30 6. Procédé selon la revendication 5 dans lequel les capteurs comprennent des
capteurs de pression liés aux ballasts et/ou des capteurs de pression prévus à
mi-distance pour chaque section de câble entre deux ballasts consécutifs.

7. Procédé selon la revendication 4, 5 ou 6 dans lequel les données d'entrée de la boucle de contrôle comprennent de plus des mesures de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée.
- 5 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 7 dans lequel la variation de la longueur déployée de chaque câble d'arrivée et/ou de la tension exercée sur le câble par chaque navire autonome de surface respectif est réalisée par un treuil respectif arrangé sur le navire d'enregistrement autonome respectif et la boucle de contrôle contrôle chaque treuil respectif.
- 10 9. Procédé selon la revendication 8 dans lequel les données d'entrée de la boucle de contrôle comprennent de plus des mesures de la vitesse de chaque treuil, l'état des commutateurs de fin de course du treuil et/ou des mesures de la tension mécanique dans chaque treuil.
- 15 10. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 9 dans lequel les données d'entrée de la boucle de contrôle comprennent de plus des mesures de courant, des prévisions de courant et/ou des valeurs relatives à la densité de la mer.
- 20 11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 10 dans lequel les données d'entrée de la boucle de contrôle comprennent de plus des mesures de la tension mécanique dans le câble sismique.
- 25 12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 11 dans lequel la boucle de contrôle est commandée par un processeur à bord d'au moins un navire d'enregistrement autonome.
- 30 13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 12 dans lequel la profondeur cible est reçue par un navire principal distant.
14. Programme d'ordinateur comprenant des instructions pour réaliser le procédé de l'une quelconque des revendications 1 à 13 lorsque ledit programme est exécuté sur un ordinateur.

15. Navire autonome adapté pour être lié à un câble sismique et pour contrôler la profondeur du câble sismique selon le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 13.

5

16. Système comprenant deux navires selon la revendication 15 et un câble sismique.

10

17. Flotte comprenant un ou plusieurs systèmes selon la revendication 16 et un navire principal distant en communication avec le ou plusieurs systèmes et configuré pour émettre une profondeur cible respective au système ou aux systèmes.

15

18. Système pour contrôler la profondeur d'un câble sismique qui a des ballasts espacés le long de sa longueur assurant une flottabilité neutre pour le câble sismique, le câble sismique étant adapté pour l'acquisition de données entre deux eaux, chaque extrémité du câble sismique étant reliée à un navire autonome de surface respectif qui exerce une tension sur le câble par un câble d'arrivée respectif qui a une flottabilité négative, le système comprenant un treuil arrangé sur chaque navire pour relier le câble d'arrivée respectif au navire, ledit treuil étant utilisable pour faire varier la longueur du câble d'arrivée respectif entre le treuil et l'extrémité respective du câble sismique.

20

25

19. Système selon la revendication 18 comprenant de plus des capteurs de pression prévus à mi-distance pour chaque section de câble entre deux ballasts consécutifs.

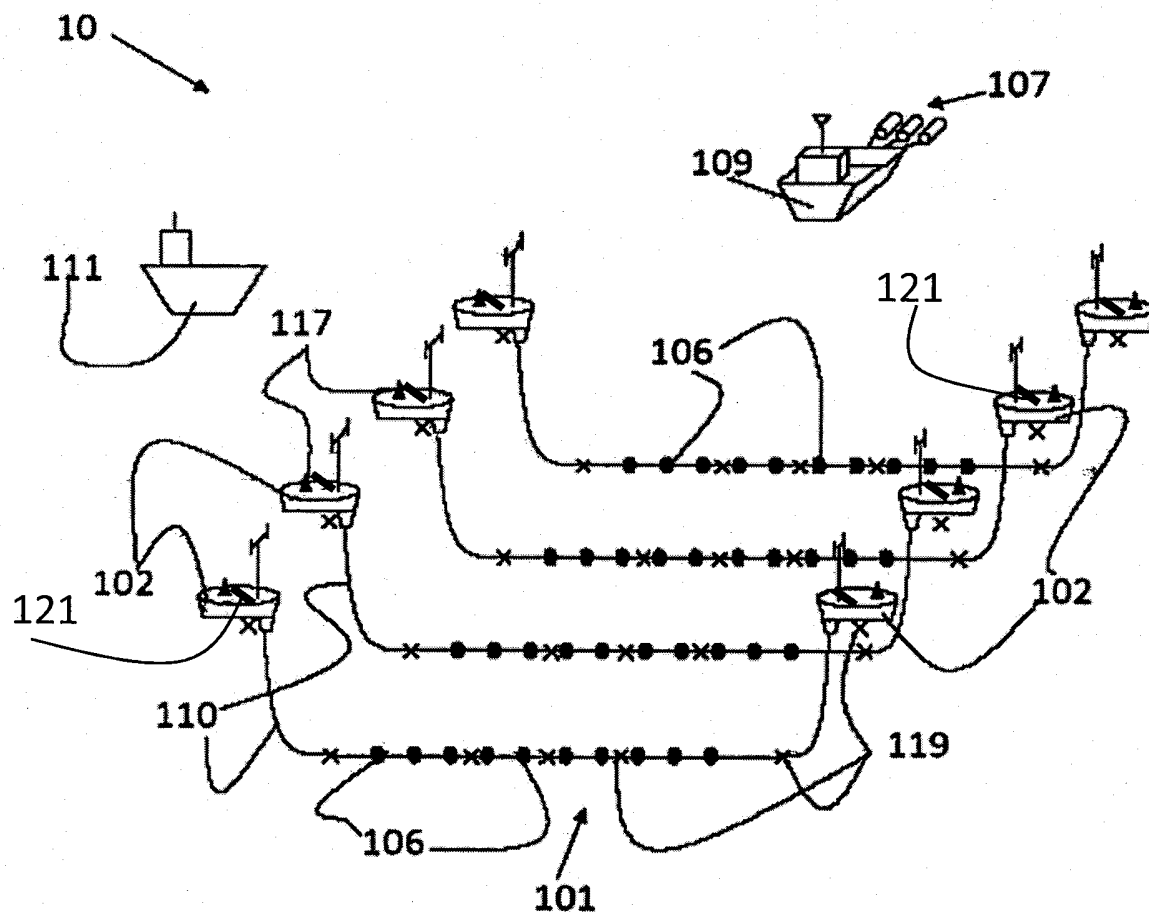


FIG. 1

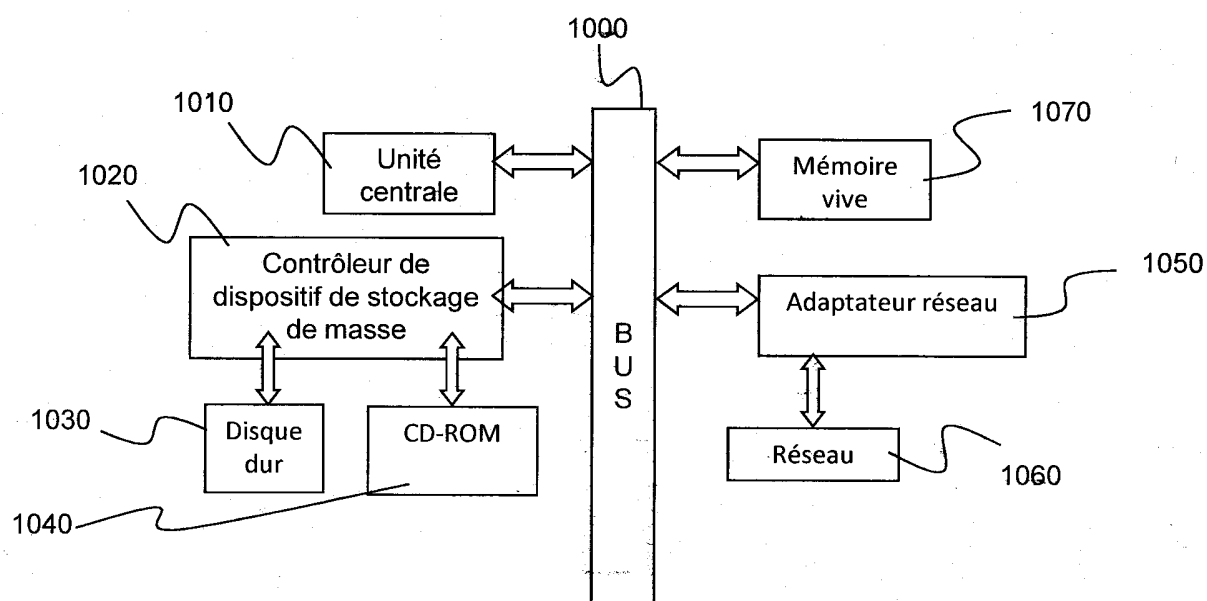
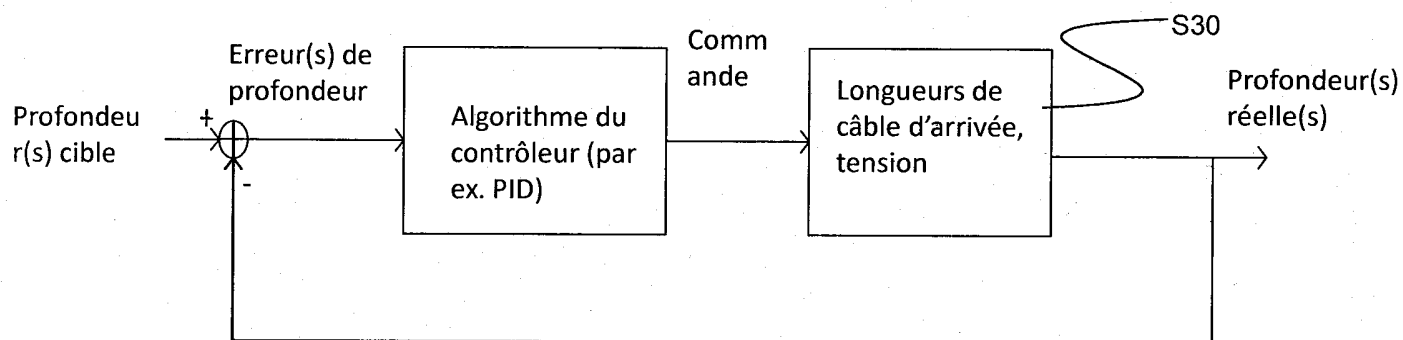
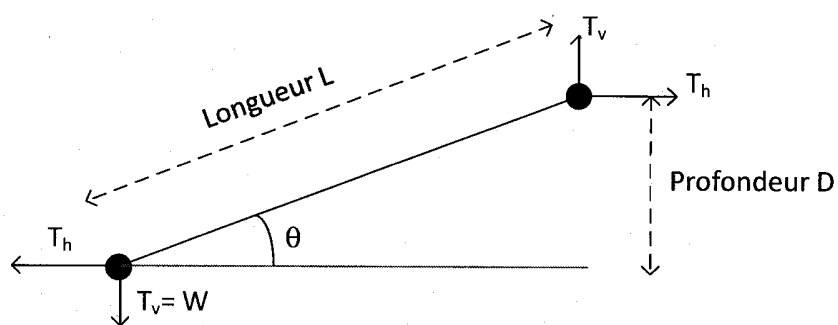
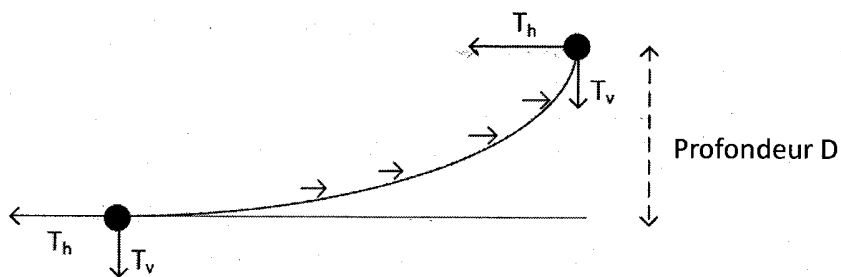
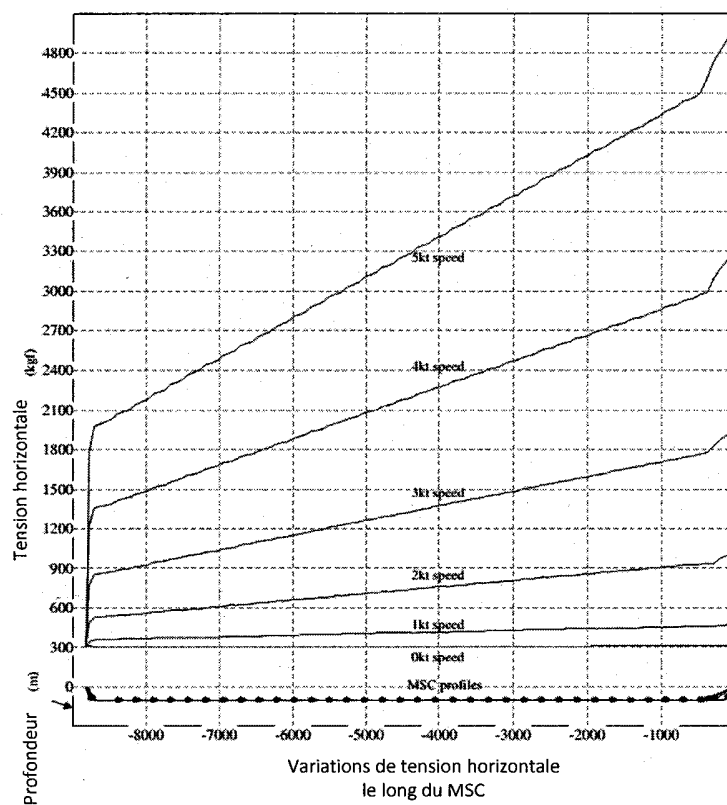
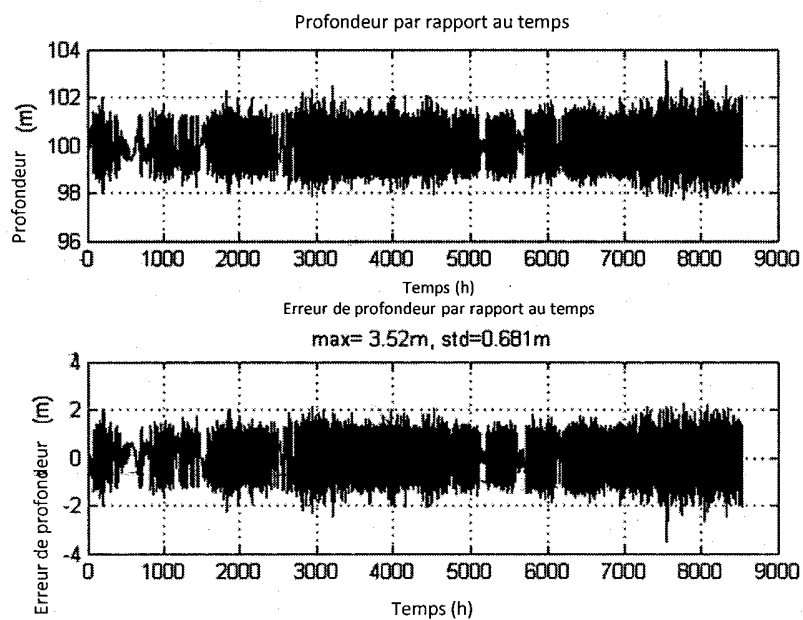


FIG. 2

FIG. 3FIG. 4FIG. 5

3 / 7

**FIG. 6****FIG. 7**

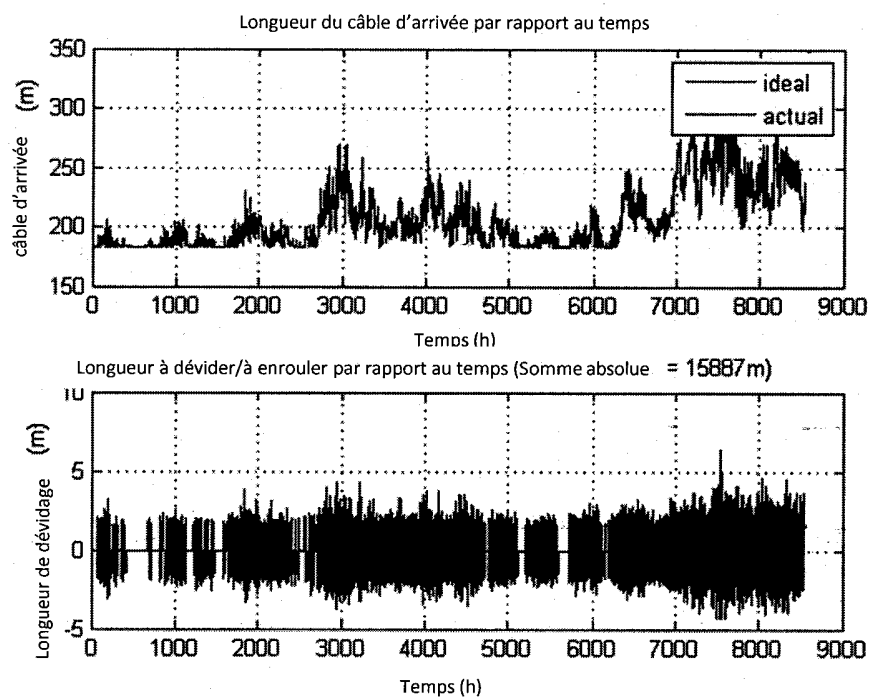


FIG. 8

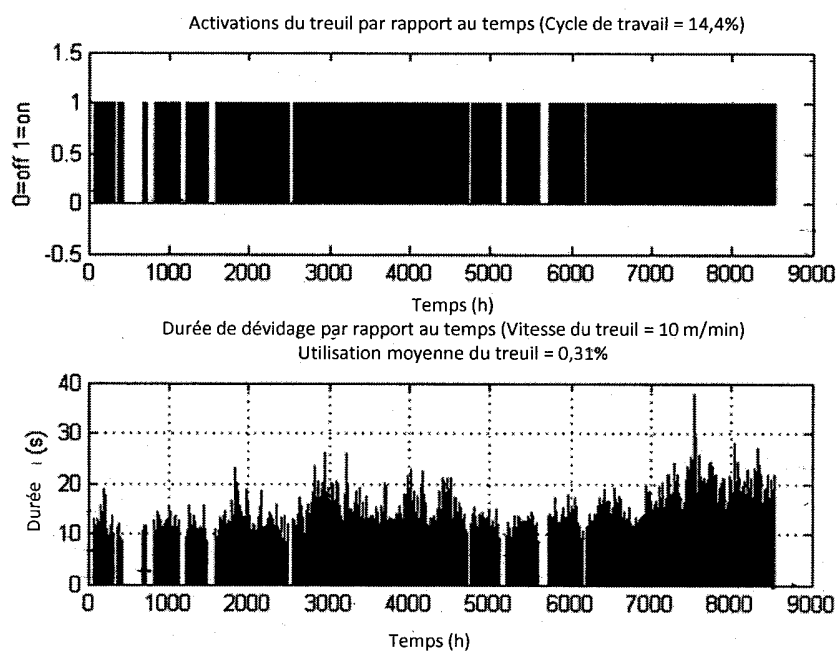
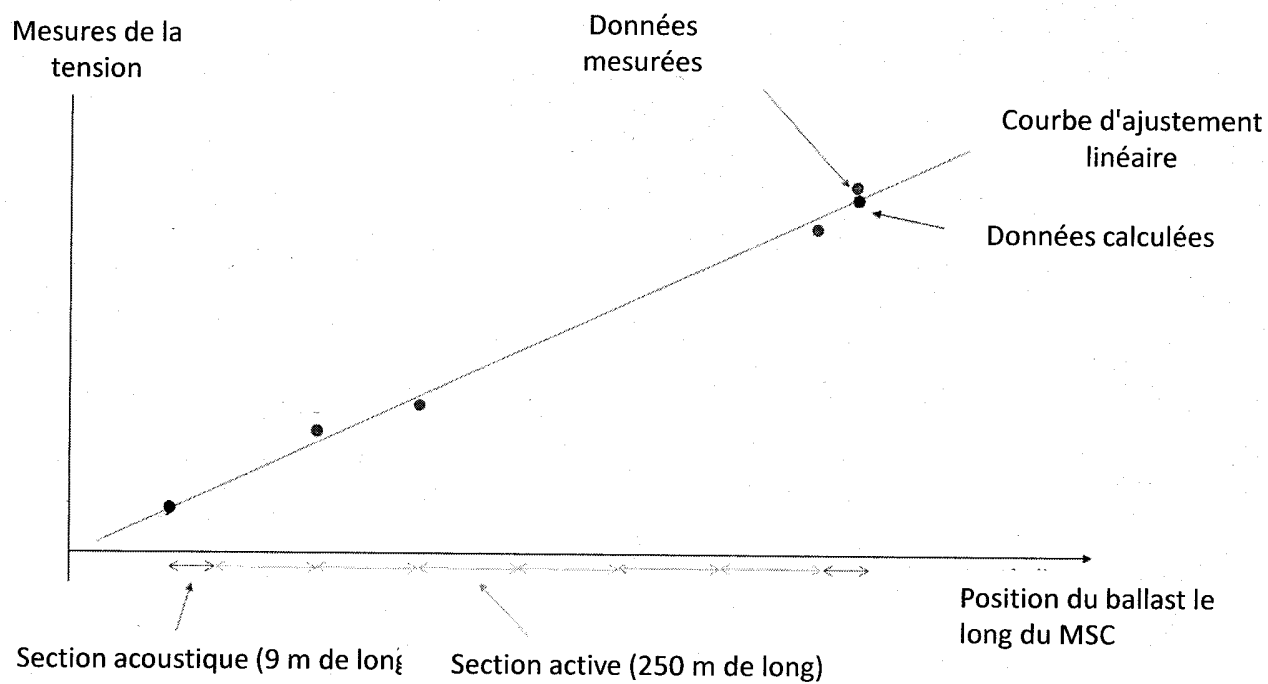
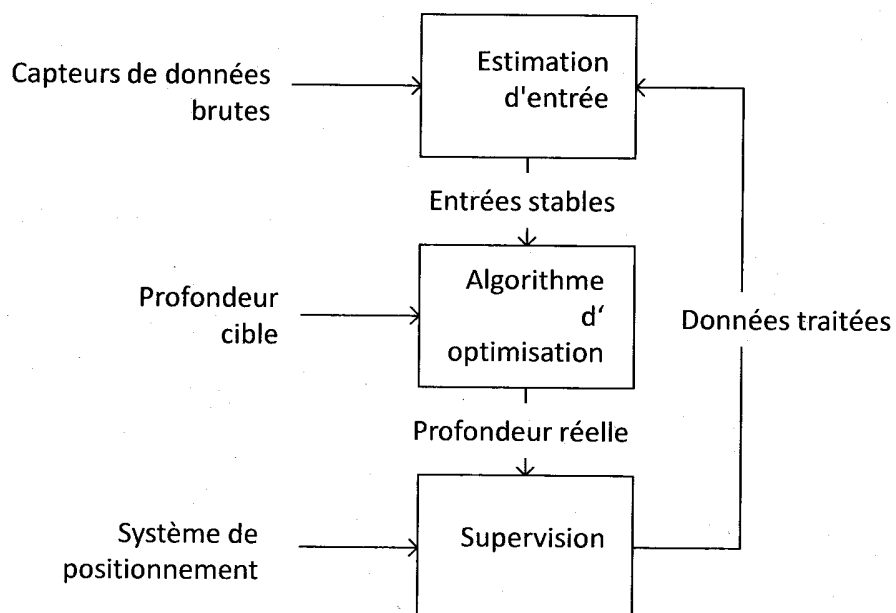
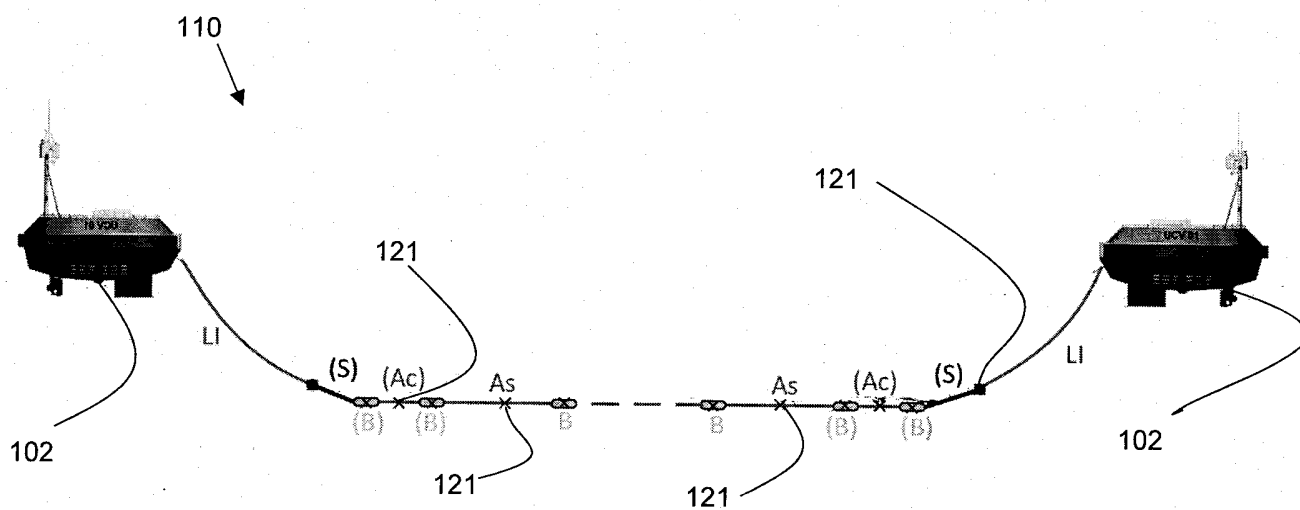
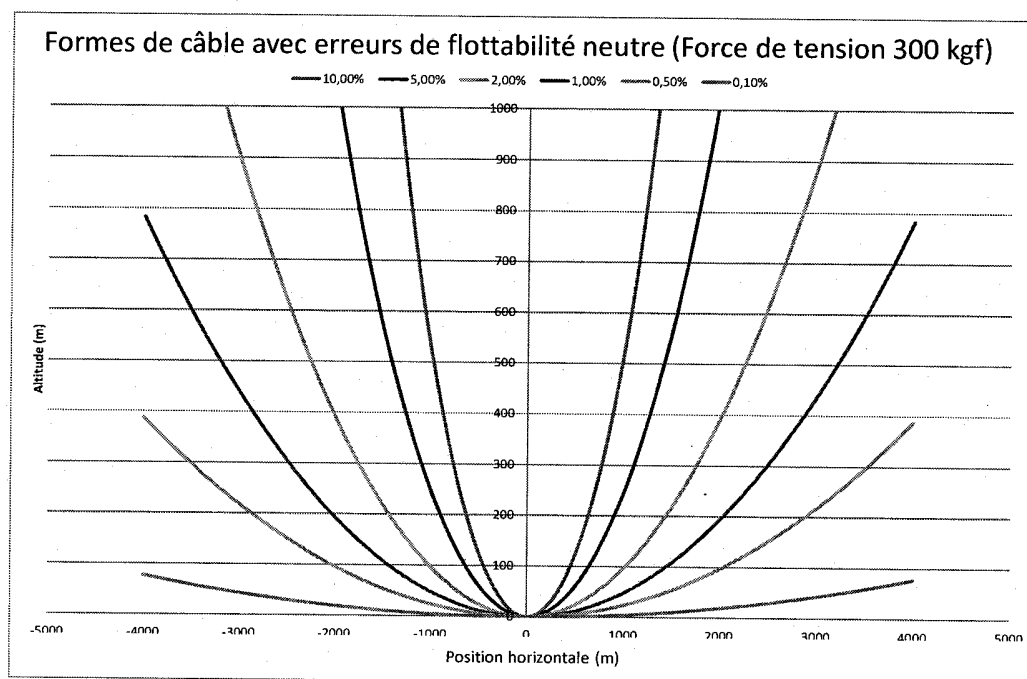
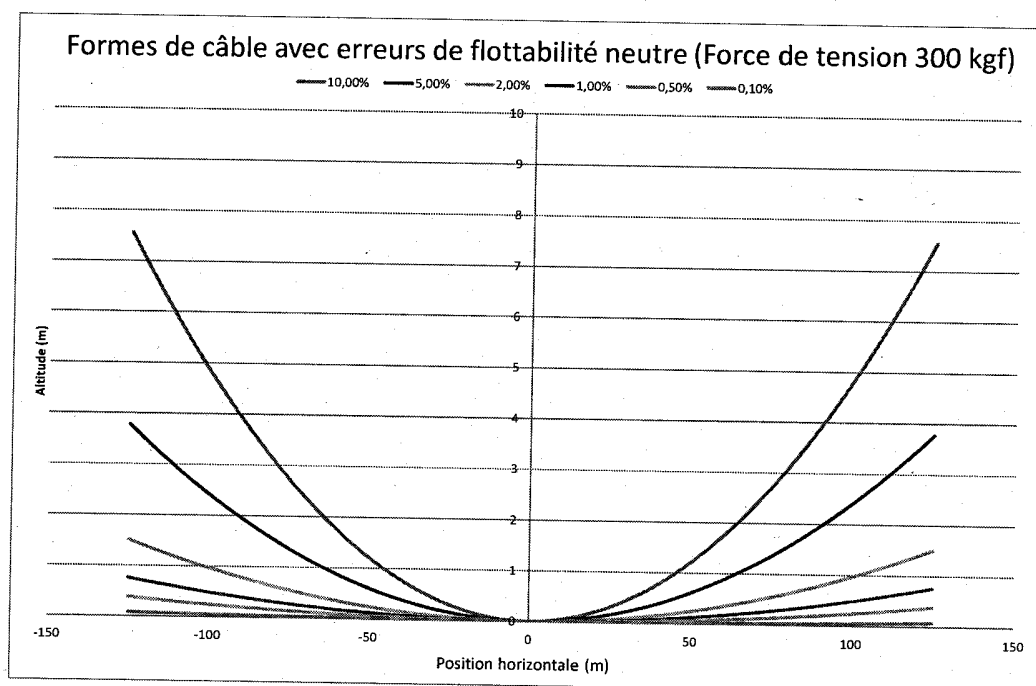


FIG. 9

**FIG. 10****FIG. 11**

FIG. 12FIG. 13

FIG. 14



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 824876
FR 1561077

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X,D	US 2011/283797 A1 (MANIN MICHEL [FR]) 24 novembre 2011 (2011-11-24)	14	G01V1/38
Y	* figures 1-4 *	1-13,	
A	* alinéas [0021] - [0026], [0041] - [0046], [0055] - [0064], [0078] - [0082] * * alinéas [0087] - [0097], [0100], [0107], [0118], [0138] *	15-17 18,19	
X	US 2015/016218 A1 (WELKER KENNETH [NO] ET AL) 15 janvier 2015 (2015-01-15)	14,18,19	
Y	* figures 1-2 *	1-13,	
	* alinéas [0035], [0045], [0046], [0050] - [0054], [0059] - [0062], [0080], [0082], [0087] * * alinéas [0092], [0096] - [0108], [0113], [0114], [0117], [0119] - [0124], [0126] - [0136] * * alinéas [0163] - [0167], [0168] - [0176], [0188], [0189], [0214], [0274], [0275] *	15-17	

X	US 2012/224453 A1 (WU ZHAOHONG [US]) 6 septembre 2012 (2012-09-06)	14,18	G01V
Y	* figures 14,15 *	1-3,13,	
A	* alinéas [0050], [0051], [0053], [0054] *	15-17 4-12,19	

X	US 2014/204708 A1 (MUIJZERT EVERHARD [GB] ET AL) 24 juillet 2014 (2014-07-24)	14,18	
Y	* figures 4,5,9-10 *	1,3,13,	
A	* alinéas [0008], [0010], [0012], [0028], [0053] - [0055], [0066], [0067] *	15-17 2,4-12	

Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
3 octobre 2016		Sartoni, Giovanni	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1561077 FA 824876**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **03-10-2016**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2011283797 A1	24-11-2011	AR 075121 A1	09-03-2011
		AU 2009334456 A1	18-08-2011
		BR PI0924100 A2	26-07-2016
		CA 2748906 A1	08-07-2010
		CN 102272632 A	07-12-2011
		EG 26330 A	13-08-2013
		EP 2384450 A1	09-11-2011
		FR 2940838 A1	09-07-2010
		GB 2479501 A	12-10-2011
		RU 2011131741 A	10-02-2013
		TW 201027112 A	16-07-2010
		US 2011283797 A1	24-11-2011
		WO 2010076646 A1	08-07-2010
		ZA 201104892 B	28-03-2012
US 2015016218 A1	15-01-2015	AU 2004317795 A1	13-10-2005
		AU 2008212003 A1	25-09-2008
		AU 2009202642 A1	23-07-2009
		BR PI0418590 A	31-07-2007
		CN 1947032 A	11-04-2007
		EP 1735641 A1	27-12-2006
		EP 2280294 A2	02-02-2011
		EP 2793059 A2	22-10-2014
		NO 338091 B1	25-07-2016
		US 2009141587 A1	04-06-2009
		US 2015016218 A1	15-01-2015
		WO 2005096018 A1	13-10-2005
US 2012224453 A1	06-09-2012	AU 2012201130 A1	20-09-2012
		GB 2488652 A	05-09-2012
		US 2012224453 A1	06-09-2012
US 2014204708 A1	24-07-2014	US 2014204708 A1	24-07-2014
		WO 2014116776 A1	31-07-2014