



(11) **EP 3 647 533 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:  
**06.05.2020 Bulletin 2020/19**

(51) Int Cl.:  
**E21D 9/00 (2006.01) E21B 34/10 (2006.01)**

(21) Numéro de dépôt: **19207267.6**

(22) Date de dépôt: **05.11.2019**

(84) Etats contractants désignés:  
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Etats d'extension désignés:  
**BA ME**  
Etats de validation désignés:  
**KH MA MD TN**

(72) Inventeurs:  
• **LORANT, Estelle**  
**91300 MASSY (FR)**  
• **MARIMOUTOU, Philippe**  
**13600 LA CIOTAT (FR)**  
• **JANICAUD, Nicolas**  
**92110 CLICHY (FR)**  
• **BRAUD, Nicolas**  
**92100 BOULOGNE BILLANCOURT (FR)**

(30) Priorité: **05.11.2018 FR 1860155**

(74) Mandataire: **Regimbeau**  
**20, rue de Chazelles**  
**75847 Paris Cedex 17 (FR)**

(71) Demandeur: **Bouygues Travaux Publics**  
**78280 Guyancourt (FR)**

(54) **OPTIMISATION DU FORAGE D'UN TUNNELIER EN FONCTION D'INTERACTIONS TERRAIN/MACHINE**

(57) L'invention concerne un procédé (S10) d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

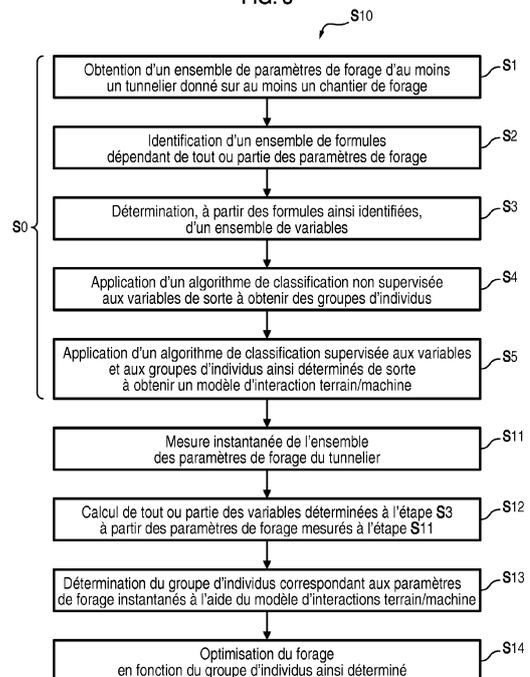
S0 : détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine,

S11 : mesure instantanée de l'ensemble des paramètres spécifiques de forage du tunnelier,

S13: détermination du groupe d'individus correspondant aux paramètres de forage mesurés à l'étape S11 à l'aide du modèle d'interactions terrain/machine,

S14 : optimisation des caractéristiques du tunnelier en fonction du groupe d'individus ainsi déterminé.

FIG. 3



**EP 3 647 533 A1**

**Description**DOMAINE DE L'INVENTION

**[0001]** L'invention concerne de manière générale le forage d'un tunnel, et plus particulièrement l'optimisation du forage par un tunnelier du type à pression de boue ou à densité variable en fonction de la nature du terrain en front de taille.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE

**[0002]** On connaît des machines de creusement de tunnels, appelées tunneliers, qui comportent une structure mobile de grandes dimensions consistant en une grande usine mobile à l'avant de laquelle est disposé un bouclier ayant une section compatible avec la future section en adéquation avec la forme définitive du tunnel (tunnel de section circulaire, bilobé, rectangulaire...)

**[0003]** La partie antérieure du bouclier qui vient en contact avec le front de taille pour réaliser la découpe de la formation géologique traversée par le tunnel comporte une tête de coupe supportant des outils de travail, notamment des molettes et couteaux, entraînée en rotation à une variable vitesse et couplée à une poussée que l'on adapte à la nature du terrain à creuser.

**[0004]** Il est connu du document WO 03/087537 un dispositif comprenant un détecteur d'usure, un détecteur de tours et un détecteur de charge placés sur le support de la molette. On connaît également d'autres publications (EP 1 098 066, US 5 330 292, EP 1 253 287, JP 11 270283, JP 09 228 778) qui placent des capteurs d'acquisition des données sur l'arbre de la molette ou sur l'arbre de la tête de coupe ou sur la tête de coupe.

**[0005]** Il a également été proposé dans le document FR 2 874 959 de placer directement sur chaque molette concernée un ou plusieurs capteurs choisis parmi les capteurs aptes à fournir des signaux représentatifs de la force de la pénétration de la molette dans le terrain, de l'état de rotation de la molette, de la position de la molette dans le terrain et de la température de la molette afin de fournir des informations plus précises sur la nature du terrain à creuser. Ce procédé s'avère très efficace dans la mesure où il s'affranchit des déformations de l'arbre ou du support de la molette, de la tête de coupe ou de l'arbre de la tête de coupe, lors de la mesure des différents paramètres de forage.

**[0006]** Quels que soient les procédés proposés, le pilote doit systématiquement déduire des valeurs mesurées par les différents capteurs les conditions imposées par le terrain traversé et ajuster différentes caractéristiques du tunnelier (vitesse d'avancement, couple, etc.) en fonction de ces valeurs. Cet ajustement doit cependant tenir compte du type de tunnelier utilisé, et nécessite donc un savoir-faire important de la part du pilote. De plus, la nature du terrain n'est généralement pas homogène, de sorte que les valeurs ainsi obtenues peuvent ne pas être représentatives de la nature réelle du terrain

en front de taille.

RESUME DE L'INVENTION

**[0007]** Un objectif de l'invention est donc de proposer un procédé d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou à densité variable, qui permette d'optimiser en temps réel des caractéristiques du tunnelier afin d'améliorer le forage sans risquer d'endommager le tunnelier, quelle que soit la nature du terrain en front de taille ou encore le type de tunnelier utilisé.

**[0008]** Pour cela, l'invention propose un procédé de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine lors d'un forage d'un terrain par un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- S1 : obtention d'un ensemble de paramètres caractéristiques d'un forage par au moins un tunnelier donné sur au moins un chantier de forage, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD,
- S2 : identification d'un ensemble de formules dépendant de tout ou partie des paramètres de forage,
- S3: détermination, à partir des formules ainsi identifiées, d'un ensemble de variables,
- S4 : application d'un algorithme de classification non supervisée aux variables de sorte à obtenir des groupes d'individus identifiés selon un critère prédéfini dudit algorithme,
- S5 : application d'un algorithme de classification supervisée aux variables et aux groupes d'individus ainsi déterminés de sorte à obtenir un modèle d'interaction terrain/machine reliant lesdites variables auxdits groupes.

**[0009]** Certaines caractéristiques préférées mais non limitatives du procédé de détermination d'un modèle d'interactions décrit ci-dessus sont les suivantes, prises individuellement ou en combinaison :

- la classification non supervisée comprend un algorithme de segmentation (clustering), par exemple un algorithme K-MEANS.
- la classification supervisée comprend un algorithme des forêts aléatoires (random forest).
- les variables dépendent de l'un au moins des paramètres de forage suivants : un couple d'une roue de coupe du tunnelier donné, une vitesse de rotation de la roue de coupe du tunnelier donné, une vitesse d'avancement du tunnelier donné, une force de contact du tunnelier donné, une surface de la roue de coupe du tunnelier donné, un rayon de la roue de coupe du tunnelier donné, une pression de confinement à l'axe du tunnelier donné.
- l'étape S4 de classification non supervisée détermine entre 8 et 10 groupes d'individus différents.

- chaque variable décrit une tranche de terrain, telle qu'un anneau donné posé par l'au moins un tunnelier donné, sur l'au moins un chantier de forage et dans lequel les groupes d'individus déterminés à l'étape S4 correspondent à des groupes de tranches de terrain, notamment des groupes d'anneaux posés par l'au moins un tunnelier donné sur l'au moins un chantier de forage.

**[0010]** Selon un deuxième aspect, l'invention propose également un procédé d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- S0 : détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine selon l'une des revendications 1 à 5,
- S11 : mesure instantanée de l'ensemble des paramètres spécifiques de forage du tunnelier,
- S13: détermination du groupe d'individus correspondant aux paramètres de forage mesurés à l'étape S11 à l'aide du modèle d'interactions terrain/machine,
- S14 : optimisation des caractéristiques du tunnelier en fonction du groupe d'individus ainsi déterminé.

**[0011]** Certaines caractéristiques préférées mais non limitatives du procédé d'optimisation décrit ci-dessus sont les suivantes, prises individuellement ou en combinaison :

- le procédé d'optimisation comprend en outre, préalablement à l'étape S13, une étape de calcul de tout ou partie des variables déterminées à l'étape S3 à partir des paramètres de forage mesurés à l'étape S11, et dans lequel, au cours de l'étape S13, le groupe d'individus est déterminé en appliquant le modèle d'interactions terrain/machine et aux variables ainsi déterminées et/ou
- lors du forage, le tunnelier pose successivement une pluralité d'anneaux, et les étapes S11 à S14 sont répétées lors de la pose de chaque anneau.

**[0012]** Selon un troisième aspect, l'invention propose également un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine lors d'un forage d'un terrain par un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD comme décrit ci-dessus et/ou d'un procédé d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD comme décrit ci-dessus.

**[0013]** Selon un quatrième aspect, l'invention propose un moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel un produit programme d'ordinateur comprend des instructions de code pour l'exécution d'un procédé de détermination d'un modèle d'interactions ter-

rain/machine lors d'un forage d'un terrain par un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD comme décrit ci-dessus et/ou d'un procédé d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD comme décrit ci-dessus.

#### BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

**[0014]** D'autres caractéristiques, buts et avantages de la présente invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée qui va suivre, et au regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs et sur lesquels :

15

La figure 1 est une vue en coupe partielle d'un exemple de réalisation d'un tunnelier conforme à un mode de réalisation de l'invention.

20

La figure 2 illustre de manière schématique un exemple de réalisation d'une unité de traitement adaptée pour exécuter le procédé d'optimisation selon l'invention, ainsi que les paramètres en entrée de ladite unité de traitement.

25

La figure 3 est organigramme illustrant les étapes d'un exemple de réalisation d'un procédé d'optimisation conforme à l'invention.

#### DESCRIPTION DETAILLEE D'UN MODE DE REALISATION

30

**[0015]** Afin d'optimiser des paramètres pour un tunnelier 1, notamment d'un tunnelier 1 de type à pression de boue ou à densité variable (variable density en anglais, VD), lors d'un forage, l'invention propose de déterminer préalablement un modèle d'interactions terrain/machine (procédé S0). L'optimisation des caractéristiques du tunnelier 1 est alors réalisée à partir de ce modèle d'interactions terrain/machine (procédé S10 d'optimisation), et non plus uniquement en fonction du type de terrain théorique en front de taille. Le procédé S10 part en effet du principe selon lequel des terrains de nature différente peuvent interagir de manière similaire avec la partie antérieure 3 du tunnelier 1 selon par exemple la profondeur où ces terrains se situent mais aussi selon l'état de la machine.

35

40

45

50

55

**[0016]** Le procédé S0 de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine et le procédé S10 d'optimisation peuvent être mis en œuvre par une unité de traitement 4 adaptée pour exécuter le ou les procédés S10, par exemple un ordinateur (pouvant être logé dans le tunnelier 1 ou distant et connecté par voie filaire audit tunnelier 1) ou un serveur distant disposant de moyens de traitement. Ainsi, l'unité de traitement 4 peut par exemple comprendre une mémoire 5 dans laquelle sont stockées les instructions de code pour l'exécution du ou des procédés et un calculateur 6 de type processeur, microprocesseur, microcontrôleur, etc., configuré pour exécuter lesdites instructions. Comme nous le verrons par la

suite, cette unité de traitement 4 reçoit en entrée des paramètres spécifiques de forage, qui peuvent comprendre des mesures obtenues par un ou plusieurs capteurs C1-C5 fixés sur le tunnelier 1 et donnant une information sur le forage (pression de confinement à l'axe du tunnelier 1, couple de la roue 2 de coupe du tunnelier 1, vitesse d'avancement du tunnelier 1), ou des caractéristiques T1-T3 qui peuvent être entrées directement dans l'unité de traitement 4 et qui caractérisent le tunnelier 1 en lui-même (rayon de la roue 2 de coupe du tunnelier 1, surface de la roue 2 de coupe du tunnelier 1, etc.) Les paramètres spécifiques sont donc soit issus de capteurs C1-C5 placés sur le tunnelier 1 et capables de mesurer une valeur instantanée du paramètre correspondant, soit liés au tunnelier 1 en lui-même et sont fixes (paramètres T1-T3 sur la figure 2).

**[0017]** Lors d'une première phase S0, le modèle d'interactions terrain/machine lors d'un forage d'un terrain par un tunnelier 1 est déterminé, de préférence dans le cas d'un tunnelier 1 du type à pression de boue ou VD.

**[0018]** A cet effet, au cours d'une première étape S1, un ensemble de paramètres spécifiques de forage par au moins un tunnelier 1 donné sur au moins un chantier de forage est obtenu.

**[0019]** Le procédé s'appliquant préférentiellement aux tunneliers du type à pression de boue ou VD, les paramètres de forage sont de préférence obtenus pour de tels tunneliers.

**[0020]** Dans une forme de réalisation, de tels paramètres spécifiques sont obtenus pour différents types de chantiers et dont la nature du terrain diffère, afin que le modèle d'interaction terrain/machine soit le plus complet possible et puisse ensuite être appliqué à tout type de chantier. Dans une forme de réalisation, ces paramètres spécifiques peuvent avoir été pré-enregistrés dans une base de données regroupant l'ensemble de ces paramètres spécifiques mesurés pour différents chantiers de forage. Lors de l'étape S1, les paramètres spécifiques sont alors obtenus en interrogeant ladite base de données.

**[0021]** Les paramètres de forage peuvent notamment comprendre tout ou partie des paramètres spécifiques suivants : des paramètres machines relevés par des capteurs C1-C4 de l'unité de traitement 4 du tunnelier 1 sur le chantier concerné, des caractéristiques reflétant des profils en long géologique, des mesures obtenues par des capteurs C1-C5 lors d'essais in situ, des mesures obtenues par des capteurs C1-C5 lors d'essais laboratoires, des capteurs C1-C5 placés sur des molettes instrumentées du tunnelier 1, des caractéristiques issues de rapports fournis par une station de traitement de boues du tunnelier 1, des caractéristiques obtenues par analyse de risque de creusement, des mesures de tassement en surface obtenus par des capteurs dédiés, des mesures effectuées lors de la maintenance des molettes et couteaux sur la roue 2 de coupe, des mesures déterminant l'état d'usure des molettes et couteaux sur la roue 2 de coupe, des caractéristiques reflétant la configuration du tunnelier 1 (rayon de la roue 2 de coupe, surface de

la roue 2 de coupe, etc.).

**[0022]** Plus précisément, au cours de l'étape S1, tout ou partie des paramètres suivants peuvent être obtenus, pour chaque chantier et chaque tunnelier 1 examiné : un couple de la roue 2 de coupe du tunnelier 1 examiné, une vitesse de rotation de la roue 2 de coupe du tunnelier 1 examiné, une vitesse d'avancement du tunnelier 1 examiné, une surface de la roue 2 de coupe du tunnelier 1 examiné, un rayon de la roue 2 de coupe du tunnelier 1 examiné, une pression de confinement à l'axe du tunnelier 1 examiné. Le couple est par exemple calculé à partir des mesures obtenues par plusieurs capteurs C1 mesurant le couple, par exemple à l'aide de convertisseurs de fréquence de chacun des moteurs, placés sur chacun des moteurs principaux de l'entraînement principal. La vitesse de rotation de la roue 2 de coupe est par exemple mesurée à l'aide d'un capteur C2 du type codeur angulaire, qui peut être à lecture optique, placé sur le joint tournant de la roue 2 de coupe. La vitesse de d'avancement du tunnelier 1 peut être calculée à partir des mesures obtenues par plusieurs capteurs C3 d'élongation de vérins, par exemple des capteurs C2 de position à câble placés sur les différents vérins du tunnelier, puis dérivée du temps pour obtenir la vitesse. Un tel calcul est réalisé en temps réel par l'unité de traitement 4. La force de contact est par exemple calculée à partir des mesures obtenues par plusieurs capteurs en fonction de la configuration du tunnelier, notamment en fonction de ses articulations et peut par exemple être mesurée à l'aide de capteurs C4 du type capteurs de pression placés sur les vérins hydrauliques de la tête de coupe, sur les vérins des articulations et sur les vérins de poussée des anneaux. La pression de confinement à l'axe est par exemple mesurée à l'aide d'un capteur C5 du type capteur de pression, placé dans la chambre de confinement au plus près de l'axe de rotation de la roue de coupe.

**[0023]** Ces paramètres spécifiques sont obtenus pour l'ensemble des anneaux posés par le tunnelier 1 concerné sur le chantier.

**[0024]** Le cas échéant, une étape de tri des paramètres de forage peut également être réalisée, afin de ne pas tenir compte des valeurs aberrantes lors de la suite des étapes du procédé S0. Pour cela, les valeurs hors limite des différents capteurs C1-C5 utilisés pour obtenir ces paramètres sont écartées.

**[0025]** Au cours d'une deuxième étape S2, un ensemble de formules dépendant de tout ou partie des paramètres de forage sont identifiées.

**[0026]** Les formules peuvent notamment comprendre ou être établies à partir de formules métiers utilisant tout ou partie des paramètres de forage afin de créer des combinaisons ayant un grand pouvoir statistique et qui sont susceptibles d'être interprétées sur le terrain. Les formules métier utilisées lors de cette étape peuvent être connues et correspondre par exemple à des formules d'énergie spécifiques d'excavation du milieu des forages et de l'adimensionnement désiré afin de pouvoir généraliser les données ainsi obtenues à l'ensemble des

chantiers. Le cas échéant, ces formules métier peuvent être ajustées de sorte à augmenter leur pouvoir statistique.

**[0027]** Dans une forme de réalisation, chaque formule métier peut être une combinaison de tout ou partie des paramètres de forage suivants : le couple de la roue 2 de coupe, la vitesse de rotation de la roue 2 de coupe, la vitesse d'avancement du tunnelier 1, la surface de la roue 2 de coupe, le rayon de la roue 2 de coupe, la pression de confinement à l'axe.

**[0028]** Optionnellement, les formules ainsi identifiées peuvent être adimensionnées en fonction du type de tunnelier 1 utilisé afin que le modèle soit applicable à tout type de tunnelier 1 et que les valeurs soient comparables les unes aux autres. A cet effet, les formules sont chacune divisées par le diamètre du tunnelier 1 utilisé sur le chantier concerné.

**[0029]** Dans un mode de réalisation, les formules métier suivantes peuvent par exemple être établies :

- l'énergie de rotation  $SEE_{rot}$ , qui dépend du couple  $C$ , de la surface  $S$  et de la vitesse de rotation  $\omega$  de la roue 2 de coupe ainsi que de la vitesse d'avancement  $v$  du tunnelier 1.
- l'indice d'énergie de translation  $SEE_{trans}$ , qui dépend de la vitesse de rotation  $\omega$  et de la surface  $S$  de la roue 2 de coupe ainsi que de la force de contact (ou contact force en anglais)  $F$  (c'est-à-dire la force de contact entre la partie antérieure 3 du bouclier et le front de taille).
- le coefficient de frottement  $f$ , qui dépend du couple  $C$  et du rayon  $R$  de la roue 2 de coupe ainsi que de la contact force  $F$ .

**[0030]** Par exemple, l'énergie en rotation  $SEE_{rot}$  (en  $J/m^3$ ) peut être déterminée comme suit :

$$SEE_{rot} = (C * \omega) / (v * S)$$

**[0031]** L'indice d'énergie de translation  $SEE_{trans}$  (en  $J/m^3/m*s^{-1}$ ) peut être déterminée comme suit :

$$SEE_{trans} = F / (v * S)$$

où  $F$  est la force contact (en kN)

**[0032]** Le coefficient de frottement  $f$  (sans dimension) peut être déterminé comme suit :

$$f = 3/2 * C / (F * R)$$

**[0033]** Au cours d'une troisième étape, un ensemble de variables peuvent alors être déterminées à partir des formules ainsi identifiées. Pour cela, les formules sont calculées en utilisant la valeur des paramètres de forage obtenus à l'étape S1. Le cas échéant, ces formules peu-

vent éventuellement être transformées de sorte à augmenter leur pouvoir statistique et/ou réduire la quantité d'informations traitées.

**[0034]** Par exemple, les variables peuvent être obtenues en déterminant, sur un anneau complet, la moyenne des formules appliquées aux paramètres de forage, leur maximum et/ou leur écart-type. En d'autres termes, les variables sont agrégées à l'échelle de l'anneau, par le calcul de la moyenne, du maximum et/ou de l'écart-type pour l'ensemble des formules.

**[0035]** Par exemple, dans le cas où les formules identifiées à l'étape S2 comprennent l'énergie en rotation  $SEE_{rot}$ , l'indice d'énergie en translation  $SEE_{trans}$  et le frottement  $f$ , les variables peuvent être calculées en déterminant, pour chaque formule, la moyenne de la formule sur un anneau complet, et en déterminant en outre le maximum du frottement et son écart type pour chaque anneau complet. On obtient donc cinq variables en tout, correspondant respectivement à la moyenne de l'énergie en rotation sur un anneau, la moyenne de l'indice d'énergie en translation sur un anneau, et la moyenne, le maximum et l'écart-type du frottement par anneau.

**[0036]** On notera qu'une analyse en composantes principales (ACP) appliquée à ces cinq variables permet d'obtenir trois axes principaux suivant lesquels sont réparties les variables et présentant une variance de 99%. Cela confirme donc que l'information est résumée de manière effective par ces trois axes, qui permettent à la fois d'obtenir une opposition des variables et des formules qui fournissent une interprétation métier claire.

**[0037]** En particulier, le premier axe oppose le coefficient de frottement aux énergies en rotation et en translation. En particulier, lorsque les individus (c'est-à-dire les anneaux sur lesquels les variables ont été calculées) se situent dans les positifs de cet axe, cela implique qu'il y a beaucoup de frottements pour peu d'énergie dépensée. Ce phénomène se traduit au sens métier par l'effet de colmatage de la roue 2 de coupe (par exemple l'effet de colmatage d'un terrain très argileux). A contrario, lorsque les individus se situent dans les négatifs de cet axe, ils ne subissent pas cet effet de colmatage. Ce premier axe reflète donc le colmatage de la machine par le terrain.

**[0038]** Le deuxième axe repose principalement sur les énergies en rotation et translation. Si les individus se situent dans les positifs de cet axe, cela implique une dépense d'énergie importante pour avancer et excaver le terrain, ce qui se traduit au sens métier par une dureté du terrain importante face à la roue 2 de coupe (comme c'est le cas pour la roche granitique). A contrario, lorsque les individus se situent dans les négatifs de cet axe, le terrain est plutôt meuble de sorte que peu d'énergie est nécessaire pour avancer. Ce deuxième axe reflète donc la dureté du terrain.

**[0039]** Le troisième axe repose sur une friction forte mais stable en association avec l'énergie en rotation et en opposition avec l'énergie en translation. Si les individus se situent dans les positifs de cet axe, cela implique qu'il y a un frottement important et une forte consomma-

tion de l'énergie en rotation, ce qui se traduit au sens métier par de l'hétérogénéité des terrains face à la roue 2 de coupe (comme c'est le cas par exemple pour une phase polyolithologique telle qu'un terrain comprenant des lentilles d'argile ou des blocs de roche au sein d'un autre type de terrain - qui sera identifié à l'aide des autres axes). A contrario, lorsque les individus se situent dans les négatifs de cet axe, cela se traduit par des à-coups. Ce troisième axe reflète donc l'homogénéité du terrain.

**[0040]** Ces axes présentent donc chacun un sens métier permettant leur interprétation et facilitant ainsi l'application d'un algorithme de classification non supervisée aux variables pour obtenir un ensemble de groupes d'individus (étape S4) et d'un algorithme de classification supervisée aux groupes d'individus et ces variables afin d'obtenir le modèle d'interactions terrain/machine (étape S5).

**[0041]** Plus précisément, au cours d'une quatrième étape S4, on détermine donc une classification non supervisée des anneaux décrits par ces variables de sorte à obtenir un ensemble de groupes d'anneaux (ou groupes d'individus) selon un critère prédéfini de l'algorithme.

**[0042]** Cette étape de classification non supervisée a pour objectif d'identifier, dans le jeu des cinq variables appliquées à l'ensemble des anneaux complets, un ou plusieurs groupes homogènes qui respectent le critère prédéfini.

**[0043]** La classification non supervisée peut notamment comprendre un algorithme de segmentation (clustering), par exemple un algorithme K-MEANS. Ceci n'est cependant pas limitatif, d'autres algorithmes de classification non supervisée pouvant être mis en œuvre sans sortir de la portée de la présente demande, tels que, à titre d'exemples non limitatifs, un algorithme de classification ascendante hiérarchique ou encore un algorithme de DBSCAN (acronyme anglais de Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, pour partitionnement basé sur la densité).

**[0044]** De manière connue en soi, l'algorithme K-MEANS se base sur l'initialisation aléatoire de K points devenant des K-centres de gravités, puis réalise l'attribution des points aux groupes d'individus par rapport à leur distance (minimale) aux k-centres. L'algorithme recalcule ensuite la position du k-centre de gravité dès qu'un nouveau point est attribué au groupe. Il s'agit donc d'un algorithme itératif qui s'arrête en fonction d'un critère prédéfini pouvant comprendre notamment un nombre d'itérations limite, une stabilisation des k-centres de gravités, une attribution de l'ensemble des points à un groupe, etc.

**[0045]** Lors de la mise en œuvre de cette étape, des calculs de coefficients tels que le coefficient de silhouette peuvent donner un nombre de groupes d'individus optimal, correspondant à des groupes d'individus homogènes et bien distants des uns des autres, en fonction des variables obtenues lors de la troisième étape S3 du procédé S0 et des paramètres de forage obtenus à l'étape S1. Ce nombre de groupes d'individus peut, le cas

échéant, être modifié afin d'obtenir un degré de précision et d'affinage plus adapté pour l'application métier du procédé S0, et notamment le besoin de détailler certaines interactions terrain/machine en vue d'optimiser le forage par le tunnelier 1.

**[0046]** Typiquement, pour les paramètres de forage identifiés par la Demanderesse et les cinq variables décrites ci-dessus, l'algorithme K-MEANS permet de segmenter les variables en six groupes d'individus optimaux. La Demanderesse a toutefois augmenté le nombre de groupes d'individus à dix afin d'obtenir un affinage plus précis des différents groupes d'individus.

**[0047]** Afin de permettre une interprétation métier de ces groupes d'individus, ceux-ci ont été placés sur les trois axes identifiés préalablement par l'ACP (colmatage/dureté/homogénéité). Il ressort que trois des groupes d'individus représentent trois niveaux de dureté qui peuvent correspondre par exemple à du béton, du granite plus ou moins décomposé, galets, etc. Par ailleurs, quatre des groupes d'individus représentent quatre niveaux intermédiaires entre la dureté et le colmatage qui peuvent correspondre par exemple à des terrains de type sable, alluvion, sablo-argileux, granite très décomposé. Enfin, trois des groupes d'individus représentent trois niveaux de colmatage qui peuvent correspondre par exemple à différents types de terrain argileux.

**[0048]** Au cours d'une cinquième étape S5, un algorithme de classification supervisée est appliqué aux variables et aux groupes d'individus déterminés à l'étape S4.

**[0049]** Cette étape S5 de classification supervisée a pour objectif d'obtenir le modèle d'interaction terrain/machine reliant lesdites variables auxdits groupes d'individus.

**[0050]** La classification supervisée peut notamment comprendre un algorithme des forêts aléatoires (random forest). Ceci n'est cependant pas limitatif, d'autres algorithmes de classification supervisée pouvant être mis en œuvre sans sortir de la portée de la présente demande, tels que, à titre d'exemples non limitatifs, un arbre de décision, une machine à vecteur de support ou encore une méthode des k-plus proches voisins.

**[0051]** De manière connue en soi, l'algorithme random forest utilise un ensemble d'arbres de décisions auxquels n'est fournie qu'une vision parcellaire du problème (un échantillon pris aléatoirement tant en termes d'individus que de variables), ceci afin de prédire la classification. Chaque arbre va ainsi classer l'individu dans l'un des groupes d'individus déterminés à l'étape S4 en fonction de l'information qu'on lui aura fournie. Le random forest fait ensuite le compte des décisions de chaque arbre et attribue le groupe d'individus qui aura reçu le plus de votes à l'individu (l'anneau). L'algorithme permet ainsi d'obtenir un modèle reliant les variables aux groupes d'individus déterminés à l'étape S4 et traduisant ainsi les interactions terrain/machine possibles lors d'un forage par un tunnelier 1.

**[0052]** Grâce au procédé S0, on a ainsi déterminé un

modèle d'interaction terrain/machine reliant les variables aux groupes d'individus. Ce modèle est adimensionné et peut donc être appliqué à tout tunnelier 1, quel que soit sa taille ou son type (à pression de boue ou VD), mais également à tout chantier, dans la mesure où l'ensemble des interactions en fonction de la nature des terrains ont de préférence été rencontrées dans les chantiers à partir desquels les paramètres de forage ont été obtenus.

**[0053]** On notera que le procédé S0 permet de déterminer les interactions terrain/machine, et non le type de terrain rencontré par la partie antérieure 3 du bouclier. Deux terrains de natures différentes peuvent ainsi générer substantiellement la même interaction terrain/machine et appartenir au même groupe d'individus. Et c'est bien cette interaction qui est déterminée par le procédé S0 et qui est pertinente pour optimiser le forage, et non la nature de chaque terrain.

**[0054]** Au cours d'une deuxième phase, correspondant au forage d'un tunnel par un tunnelier 1, notamment de type à pression de boue ou VD, des caractéristiques du tunnelier 1 peuvent alors être optimisées (étape S10) en appliquant le modèle d'interaction terrain/machine ainsi déterminé.

**[0055]** On notera que cette optimisation S10 est de préférence réalisée pour chaque anneau posé par le tunnelier 1.

**[0056]** Pour cela, au cours d'une première étape S11, les paramètres spécifiques de forage sont obtenus instantanément, pour chaque anneau. Les paramètres spécifiques comprennent les paramètres de forages nécessaires à l'établissement des variables identifiées à l'étape S2, et peuvent être soit entrés directement dans l'unité de traitement 4, soit mesurés instantanément par des capteurs C1-C5 du tunnelier 1.

**[0057]** Afin que les données soient comparables, l'étalement des différents capteurs C1-C5 utilisés est réalisé de manière similaire entre les capteurs utilisés pour l'obtention des paramètres de forage à l'étape S1 et les capteurs utilisés pour la mesure instantanée desdits paramètres de forage à l'étape S11.

**[0058]** Au cours d'une deuxième étape S12, les variables qui ont été identifiées à l'étape S3 sont calculées pour chaque anneau. Ainsi, dans l'exemple détaillé ci-dessus, pour chaque anneau, on calcule la moyenne de l'énergie en rotation sur l'anneau, la moyenne de l'indice d'énergie en translation sur l'anneau, et la moyenne, le maximum et l'écart-type du frottement pour l'anneau, soit cinq variables au total.

**[0059]** Ceci n'est cependant pas limitatif, les variables pouvant être calculées pour des tranches de terrain, qui peuvent par exemple mesurer quelques centimètres de long, en lieu et place desdits anneaux. Dans ce qui suit, pas souci de simplification, l'invention sera détaillée dans le cas où les variables sont calculées par anneau, bien que cela ne soit pas limitatif.

**[0060]** Au cours d'une troisième étape S13, le modèle d'interactions terrain/machine est appliqué aux paramè-

tres de forage de sorte à déterminer le groupe d'individus correspondant aux paramètres de forage instantanés qui ont été mesurés pour cet anneau. Plus précisément, pendant l'étape S13, les variables déterminées à l'étape S12 sont calculées pour chaque anneau, le modèle d'interactions terrain/machine étant appliqué auxdites variables.

**[0061]** Dans le cas où les variables sont calculées par tranche de terrain, le modèle d'interaction terrain/machine est bien entendu appliqué auxdites tranches de terrain.

**[0062]** On en déduit alors le groupe d'individus correspondant aux paramètres de forage instantanés du tunnelier pour cet anneau. Il est alors possible de déterminer si des caractéristiques du tunnelier 1 peuvent être modifiées, compte-tenu du groupe d'individus, afin d'optimiser le forage du tunnel.

**[0063]** Les caractéristiques du tunnelier 1 pouvant être modifiées en fonction des groupes d'individus comprennent notamment la vitesse d'avancement du tunnelier 1, la contact force, la vitesse de rotation de la roue 2 de coupe du tunnelier 1 et le couple de la roue 2 de coupe du tunnelier 1. Dans le cas d'espèce, ces caractéristiques correspondent sensiblement aux paramètres spécifiques mesurés par les différents capteurs C1-C5. Il ne s'agit ici que d'un exemple, les caractéristiques optimisées sur le tunnelier 1 pouvant être différentes des paramètres spécifiques utilisés dans le modèle d'interaction terrain/machine.

**[0064]** La modification des caractéristiques du tunnelier 1 peut être faite manuellement, par l'opérateur du tunnelier 1.

**[0065]** Pour cela, dans une forme de réalisation, des statistiques regroupant, pour chaque groupe d'individus identifié, des informations relatives aux caractéristiques du tunnelier 1, peuvent être réalisées. Ces statistiques peuvent par exemple comprendre une moyenne, un minimum, un maximum et/ou une valeur optimale de chacune de ces caractéristiques du tunnelier 1 au sein de chaque groupe. Par exemple, à chaque groupe d'individus peuvent être associés une moyenne, un minimum, un maximum et/ou une valeur optimale de la vitesse d'avancement du tunnelier 1, de la contact force, de la vitesse de rotation de la roue 2 de coupe du tunnelier 1 et /ou du couple de la roue 2 de coupe du tunnelier 1.

**[0066]** Ces statistiques peuvent alors être communiquées en temps réel à l'opérateur afin de l'assister dans sa prise de décision et éventuellement dans la modification de l'une ou de plusieurs de ces caractéristiques du tunnelier 1.

**[0067]** En variante, ces informations peuvent être utilisées afin d'automatiser ladite prise de décision.

**[0068]** On notera que l'invention concerne également un produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution du procédé de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine ou du procédé d'optimisation de caractéristiques pour un tunnelier 1 conforme à l'invention, ainsi que des moyens de stockage lisibles par un équipement informatique (par

exemple un disque dur du ordinateur 6) sur lequel on trouve ce produit programme d'ordinateur.

## Revendications

1. Procédé (S0) de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine lors d'un forage d'un terrain par un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- S1 : obtention d'un ensemble de paramètres caractéristiques d'un forage par au moins un tunnelier donné sur au moins un chantier de forage, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD,
- S2 : identification d'un ensemble de formules dépendant de tout ou partie des paramètres de forage,
- S3 : détermination, à partir des formules ainsi identifiées, d'un ensemble de variables,
- S4 : application d'un algorithme de classification non supervisée aux variables de sorte à obtenir des groupes d'individus identifiés selon un critère prédéfini dudit algorithme,
- S5 : application d'un algorithme de classification supervisée aux variables et aux groupes d'individus ainsi déterminés de sorte à obtenir un modèle d'interaction terrain/machine reliant lesdites variables auxdits groupes.

2. Procédé (S0) selon la revendication 1, dans lequel la classification non supervisée comprend un algorithme de segmentation (clustering), par exemple un algorithme K-MEANS.

3. Procédé (S0) selon l'une des revendications 1 ou 2, dans lequel la classification supervisée comprend un algorithme des forêts aléatoires (random forest).

4. Procédé (S0) selon l'une des revendications 1 à 3, dans lequel les variables dépendent de l'un au moins des paramètres de forage suivants : un couple d'une roue de coupe du tunnelier donné, une vitesse de rotation de la roue de coupe du tunnelier donné, une vitesse d'avancement du tunnelier donné, une force de contact du tunnelier donné, une surface de la roue de coupe du tunnelier donné, un rayon de la roue de coupe du tunnelier donné, une pression de confinement à l'axe du tunnelier donné.

5. Procédé (S0) selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel l'étape S4 de classification non supervisée détermine entre 8 et 10 groupes d'individus différents.

6. Procédé (S0) selon l'une des revendications 1 à 5,

dans lequel chaque variable décrit une tranche de terrain, telle qu'un anneau donné posé par l'au moins un tunnelier donné, sur l'au moins un chantier de forage et dans lequel les groupes d'individus déterminés à l'étape S4 correspondent à des groupes de tranches de terrain, notamment des groupes d'anneaux posés par l'au moins un tunnelier donné sur l'au moins un chantier de forage.

7. Procédé (S10) d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- S0 : détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine selon l'une des revendications 1 à 5,
- S11 : mesure instantanée de l'ensemble des paramètres spécifiques de forage du tunnelier,
- S13 : détermination du groupe d'individus correspondant aux paramètres de forage mesurés à l'étape S11 à l'aide du modèle d'interactions terrain/machine,
- S14 : optimisation des caractéristiques du tunnelier en fonction du groupe d'individus ainsi déterminé.

8. Procédé (S10) selon la revendication 7, comprenant en outre, préalablement à l'étape S13, une étape (S12) de calcul de tout ou partie des variables déterminées à l'étape S3 à partir des paramètres de forage mesurés à l'étape S11, et dans lequel, au cours de l'étape S13, le groupe d'individus est déterminé en appliquant le modèle d'interactions terrain/machine et aux variables ainsi déterminées.

9. Procédé (S10) selon l'une des revendications 7 ou 8, dans lequel, lors du forage, le tunnelier pose successivement une pluralité d'anneaux, et les étapes S11 à S14 sont réitérées lors de la pose de chaque anneau.

10. Produit programme d'ordinateur comprenant des instructions de code pour l'exécution d'un procédé (S0) de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine lors d'un forage d'un terrain par un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, selon l'une des revendications 1 à 6 et/ou d'un procédé (S10) d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, selon l'une des revendications 7 à 9.

11. Moyen de stockage lisible par un équipement informatique sur lequel un produit programme d'ordinateur comprend des instructions de code pour l'exécution d'un procédé (S0) de détermination d'un modèle d'interactions terrain/machine lors d'un forage

d'un terrain par un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, selon l'une des revendications 1 à 6 et/ou d'un procédé (S10) d'optimisation de caractéristiques d'un tunnelier, notamment d'un tunnelier de type à pression de boue ou VD, selon l'une des revendications 7 à 9.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG. 1

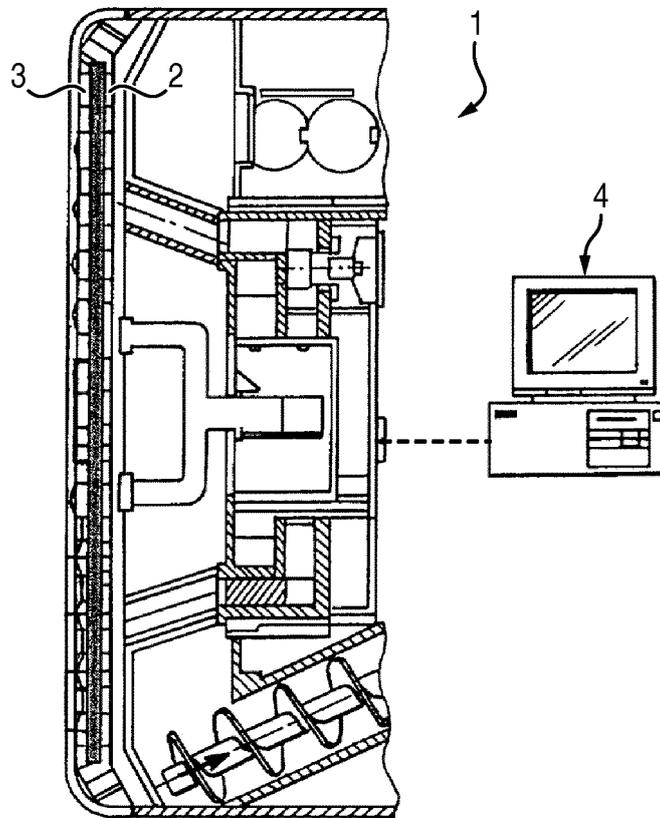


FIG. 2

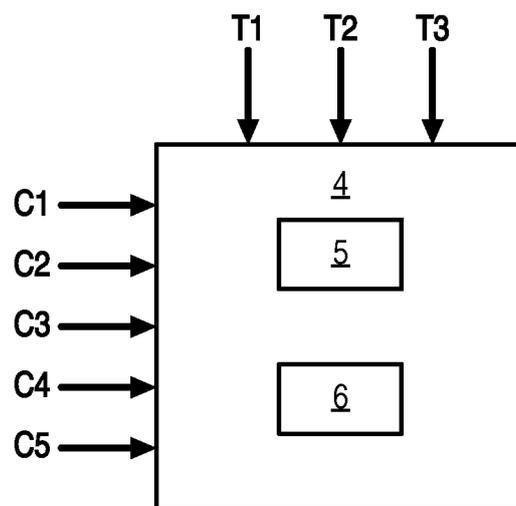
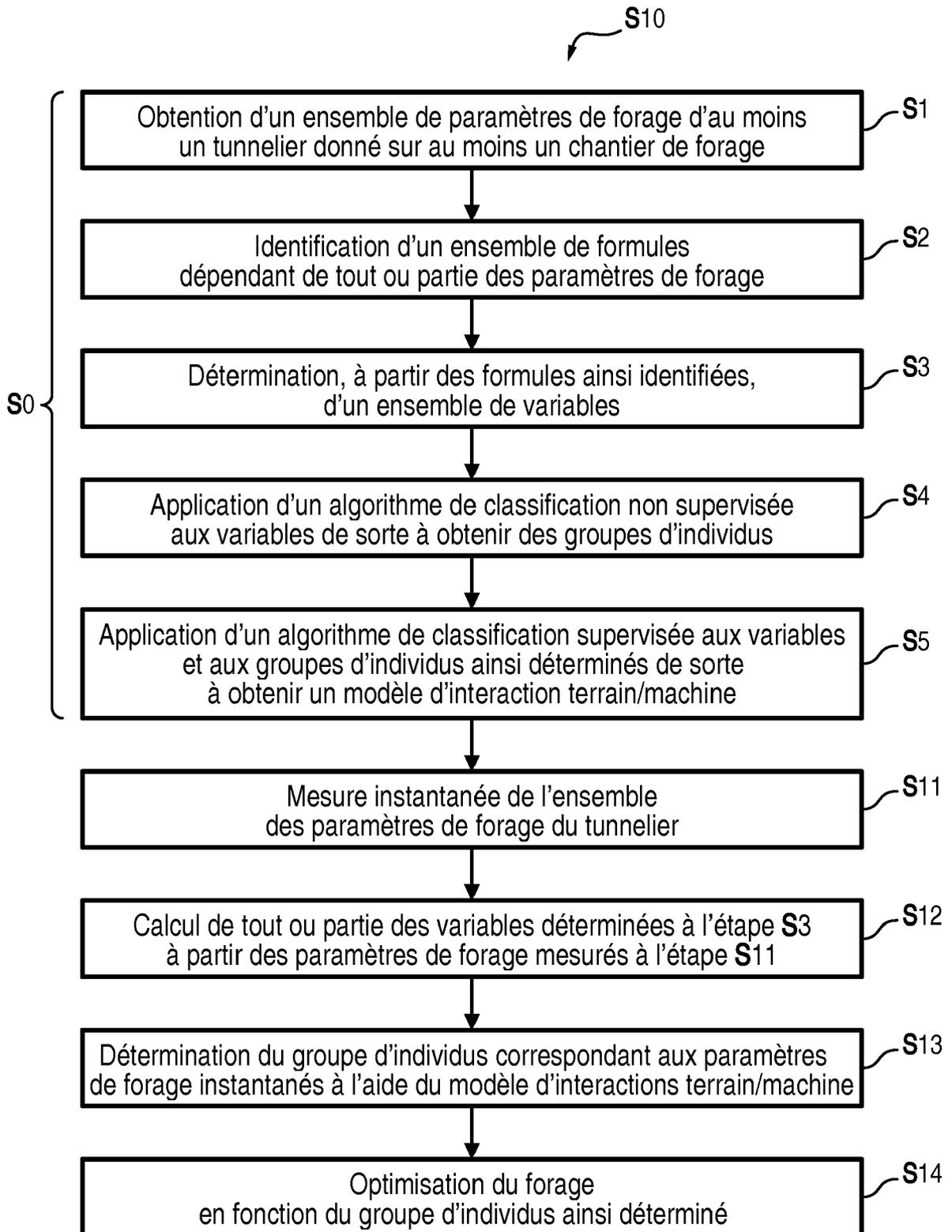


FIG. 3





RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande  
EP 19 20 7267

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
A	CN 107 577 862 A (CHINA RAILWAY ENGINEERING EQUIPMENT GROUP CO LTD) 12 janvier 2018 (2018-01-12) * le document en entier * -----	1-11	INV. E21D9/00 E21B34/10
A	KR 2018 0116922 A (UNIV INHA RES & BUSINESS FOUND [KR]) 26 octobre 2018 (2018-10-26) * le document en entier * -----	1-11	
A	LAU S C ET AL: "Applying radial basis function neural networks to estimate next-cycle production rates in tunnelling construction", TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHING, NEW YORK, NY, US, vol. 25, no. 4, 16 mars 2010 (2010-03-16), pages 357-365, XP027035521, ISSN: 0886-7798 [extrait le 2010-03-16] * le document en entier * -----	1-11	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)  E21D E21B
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche <b>La Haye</b>		Date d'achèvement de la recherche <b>18 mars 2020</b>	Examineur <b>Jucker, Chava</b>
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES 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 antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons ..... & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 03.02 (P04C02)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE  
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO.**

EP 19 20 7267

5 La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.  
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du  
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

18-03-2020

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
CN 107577862 A	12-01-2018	CN 107577862 A WO 2019042483 A2	12-01-2018 07-03-2019
-----	-----	-----	-----
KR 20180116922 A	26-10-2018	AUCUN	
-----	-----	-----	-----

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82

**RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION**

*Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.*

**Documents brevets cités dans la description**

- WO 03087537 A [0004]
- EP 1098066 A [0004]
- US 5330292 A [0004]
- EP 1253287 A [0004]
- JP 11270283 A [0004]
- JP 09228778 B [0004]
- FR 2874959 [0005]