

(19)



(11)

EP 2 631 367 A2

(12)

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:
28.08.2013 Bulletin 2013/35

(51) Int Cl.:
E02D 5/36 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **13151329.3**

(22) Date de dépôt: **15.01.2013**

(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

(72) Inventeurs:
• **Deremble, Nathanaël**
92500 Rueil Malmaison (FR)
• **Aubert, Laurent**
92500 Rueil Malmaison (FR)
• **Lebreton, Marie**
92500 Rueil Malmaison (FR)

(30) Priorité: **30.01.2012 FR 1250843**

(71) Demandeur: **Soletanche Freyssinet**
92500 Rueil Malmaison (FR)

(74) Mandataire: **Balesta, Pierre et al**
Cabinet Beau de Loménie
158, rue de l'Université
75340 Paris Cedex 07 (FR)

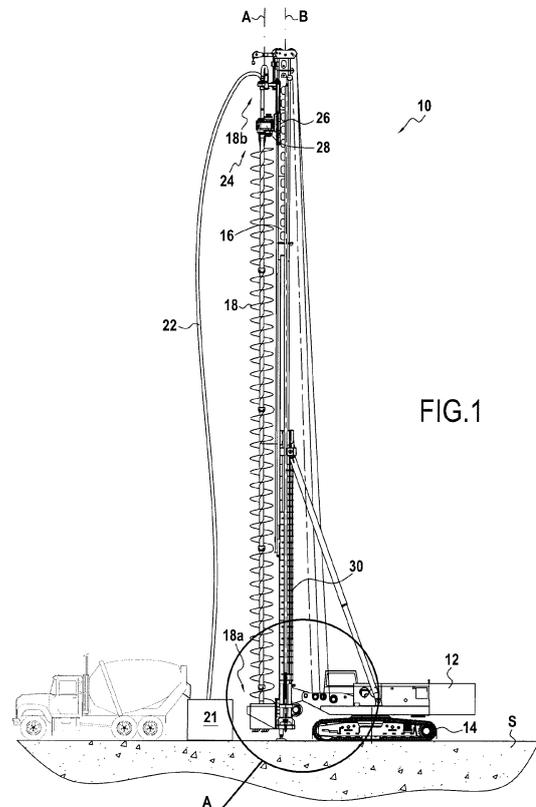
(54) **Machine de forage pour la réalisation de pieux comprenant une sonde pénétrométrique**

(57) L'invention concerne une machine de forage (10) pour réaliser dans un sol (S) un pieu (100), comportant :

- un porteur (12) muni d'un mât (16);
- un outil de forage (18);
- des moyens pour injecter dans le sol du béton depuis ladite extrémité inférieure de l'outil de forage;
- des moyens (24) pour déplacer l'outil de forage par rapport au mât;

L'invention se caractérise par le fait que la machine comporte en outre :

- une sonde pénétrométrique (30) destinée à être introduite dans le sol avec l'outil de forage;
- un dispositif d'actionnement pour déplacer la sonde pénétrométrique dans le sol, ce dispositif d'actionnement étant fixé à la machine ;
- des moyens de calcul (30) d'une capacité portante courante et pour déterminer la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité courante prédéterminée.



EP 2 631 367 A2

Description

Arrière-plan de l'invention

[0001] La présente invention a trait au domaine de la réalisation de pieux de fondations dans un sol, par exemple dans le cadre de la réalisation d'un ouvrage public ou privé, tel un bâtiment ou un ouvrage d'art.

[0002] De manière connue, on entend par pieu une fondation profonde et élancée qui supporte une structure en reportant les charges de la structure sur des couches de sol de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol.

[0003] On distingue traditionnellement deux types de pieux : les pieux mis en oeuvre avec refoulement du sol, ainsi que les pieux réalisés par excavation du sol, tel par exemple les pieux forés à l'aide d'une tarière creuse. Le principe de fabrication de ces pieux forés consiste à visser dans le sol une tarière à axe creux sur une longueur totale égale à la longueur du pieu à réaliser, puis à l'extraire du sol sans dévisser tout en injectant du béton par l'axe creux de la tarière.

[0004] Le document FR 2 566 813 décrit une machine et un procédé pour la réalisation d'un tel pieu.

[0005] Pour autant, le dimensionnement du pieu que l'on souhaite réaliser présente certaines difficultés, qui résultent généralement du caractère anisotrope et hétérogène de la texture géologique. Habituellement, le dimensionnement des pieux est réalisé à l'aide de campagnes de sondages au cours desquelles on réalise plusieurs mesures dans le sol localisées de manière aléatoire sur la surface du terrain à bâtir. A l'aide de ces mesures, on modélise la nature du sol avant de dimensionner les pieux.

[0006] Cependant, ces campagnes de sondage ne permettent pas d'obtenir des résultats statistiquement fiables du fait du nombre limité de mesures effectuées. Le géotechnicien procède le plus souvent par simplification ou modélisation, en évaluant la nature du terrain avec une grande prudence dans la mesure où il n'est pas exclu que le terrain puisse présenter localement des caractéristiques mécaniques nettement inférieures à celles déterminées à l'aide des sondages. Par exemple, il est tout à fait possible de rencontrer une zone argileuse compressible au sein d'une couche d'alluvions compacte.

[0007] Cette dispersion des propriétés des sols oblige les opérateurs à utiliser des coefficients de sécurité élevés dès lors que le nombre de mesures réalisées lors de la campagne de sondage n'est généralement pas suffisant pour modéliser correctement la nature du terrain.

[0008] L'utilisation des coefficients de sécurité élevés a pour effet de surdimensionner la longueur ou le diamètre de l'ensemble des pieux sans pour autant être certain que cela soit suffisant dans le cas particulier où un pieu se trouverait ancré au dessus d'une lentille de faible résistance.. Le surcoût engendré ainsi que la subsistance d'un aléa pourraient être évités si l'on pouvait mieux connaître la structure du sol au droit de chaque pieu.

Objet et résumé de l'invention

[0009] Un but de la présente invention est de remédier à cet inconvénient en proposant une machine de forage et un procédé de forage permettant de réaliser un pieu ayant la longueur nécessaire et suffisante pour atteindre la capacité portante recherchée.

[0010] Pour atteindre son but, l'invention porte sur une machine de forage pour réaliser dans un sol un pieu ayant une capacité portante prédéterminée, ladite machine comportant :

- un porteur muni d'un mât longitudinal ;
- un outil de forage parallèle au mât, s'étendant selon un premier axe longitudinal, et ayant une extrémité inférieure ;
- des moyens pour injecter dans le sol un fluide du type béton depuis ladite extrémité inférieure de l'outil de forage ;
- des moyens pour déplacer l'outil de forage par rapport au mât selon la direction longitudinale du mât ;

la machine de forage comportant en outre :

- au moins une sonde pénétrométrique destinée à être introduite dans le sol avec l'outil de forage, ladite sonde pénétrométrique s'étendant selon un second axe longitudinal parallèle au premier axe longitudinal du mât ;
- au moins un dispositif d'actionnement pour déplacer la sonde pénétrométrique dans le sol en translation selon le second axe longitudinal, ce dispositif d'actionnement étant fixé à la machine ;
- des moyens de calcul (50) connectés à la sonde pénétrométrique (30) pour déterminer la profondeur (L) où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée.

[0011] Ainsi, la machine de forage selon l'invention permet de réaliser, pour chacun des pieux, un sondage au droit de la zone où sera réalisé ledit pieu. Ce sondage permet de déterminer les caractéristiques locales du sol, et par voie de conséquence, permet de dimensionner la taille du pieu en fonction des caractéristiques déterminées. Par suite, le pieu est fabriqué de manière optimale en ayant une connaissance précise de la structure du sol qu'il traverse, et non plus à partir de moyennes issues de plusieurs mesures réalisées le plus souvent aléatoirement dans le sol. La sonde pénétrométrique détermine la profondeur à laquelle le pieu de capacité portante prédéterminée doit être réalisée. Par capacité portante prédéterminée, on entend la charge prédéterminée que le pieu doit reprendre.

[0012] De préférence, pour chaque pieu, il est réalisé un sondage au droit du pieu. Autrement dit, on réalise préférentiellement autant de sondages que de pieux, chaque sondage étant réalisé avant la fabrication du pieu. Selon une variante, on réalise un sondage au droit

d'un groupe de pieux, pour chaque groupe de pieux. Par groupe de pieux, on entend un ensemble de pieux fondant un unique massif de fondation.

[0013] Cette façon de procéder permet d'utiliser les données géotechniques telles quelles sans application d'un quelconque coefficient réducteur. Par conséquent, l'invention permet d'éviter de surdimensionner inutilement les pieux, en les dimensionnant de manière optimale par rapport à la nature du sol. Cela est particulièrement avantageux lorsque le pieu doit être construit dans un sol très hétérogène.

[0014] Un autre intérêt réside dans le fait que le sondage réalisé avant la fabrication du pieu tient compte de la modification éventuelle des caractéristiques du sol résultant de la fabrication des pieux précédents. Par conséquent, cette modification éventuelle des caractéristiques du sol du fait de la présence d'autres pieux est également prise en compte dans le dimensionnement du pieu, ce qui n'est pas possible avec la méthodologie antérieure.

[0015] Conformément à l'invention, l'outil de forage et la sonde pénétrométrique sont fixés sur une même machine, ce qui permet de fabriquer le pieu en même temps que, ou juste après l'opération de sondage.

[0016] Un autre intérêt de la machine selon l'invention expliqué plus haut est que l'on évite de surdimensionner les pieux. Par conséquent, l'invention permet de réduire la quantité de fluide de type béton à utiliser. Les pieux sont donc réalisés plus rapidement, et à un coût inférieur.

[0017] De préférence, mais non exclusivement, le second axe longitudinal est distinct du premier axe longitudinal. Les premier et second axes longitudinaux pourraient toutefois être confondus.

[0018] Selon l'invention, l'opérateur est informé lorsque la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée est atteinte, afin qu'il puisse arrêter le déplacement de l'outil.

[0019] Avantagusement, la machine selon l'invention comporte en outre des moyens pour arrêter le déplacement de l'outil de forage dans le sol à la profondeur (L) où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée.

[0020] Ces moyens permettent d'arrêter le déplacement de l'outil de forage de manière automatique.

[0021] Avantagusement, la distance entre le premier axe longitudinal et le second axe longitudinal est inférieure à 5 mètres, grâce à quoi le sondage est réalisé à grande proximité de la zone où sera exécuté le pieu.

[0022] De préférence, la sonde pénétrométrique comporte un capteur de pression permettant de mesurer la résistance qu'oppose le sol à l'avancée de la sonde.

[0023] Encore de préférence, la sonde pénétrométrique comporte un capteur de frottements.

[0024] De préférence, mais non nécessairement, la sonde pénétrométrique comporte en outre un inclinomètre permettant de contrôler la verticalité de la descente de la sonde.

[0025] De préférence, mais non nécessairement, la sonde pénétrométrique comporte un outre un capteur de pression interstitielle permettant de mesurer la pression interstitielle à la pointe située à l'extrémité inférieure de la sonde.

[0026] De préférence, le porteur est un véhicule mobile, de préférence de type à chenilles. Encore de préférence, mais non nécessairement, la sonde pénétrométrique est disposée sur un bord latéral du mât.

[0027] De préférence, mais pas nécessairement, l'outil de forage est une tarière creuse de type de celle décrite dans FR 2 566 813. Selon une variante, l'outil est un outil de type à refoulement dans lequel le pieu est réalisé sans extraction des déblais.

[0028] De préférence, le dispositif d'actionnement pour déplacer la sonde pénétrométrique est distinct des moyens pour déplacer l'outil de forage par rapport au mât. Autrement dit, le déplacement de la sonde pénétrométrique est indépendant de l'avancée de l'outil de forage.

[0029] Avantagusement, le dispositif d'actionnement est configuré pour introduire la sonde pénétrométrique dans le sol à une vitesse constante prédéterminée, en avance par rapport à l'outil de forage.

[0030] De préférence, la vitesse constante prédéterminée de la sonde est comprise entre un et dix centimètres par seconde, de préférence deux centimètres par seconde.

[0031] Avantagusement, la sonde pénétrométrique est située à l'extrémité inférieure d'une tige s'étendant dans un tube de guidage.

[0032] De préférence, le dispositif d'actionnement pour déplacer la sonde dans le sol permet l'introduction de la sonde dans le sol, mais aussi sa remontée.

[0033] Avantagusement, le dispositif d'actionnement est fixé au mât, de préférence à son extrémité inférieure.

[0034] De préférence, le dispositif d'actionnement est muni d'au moins un vérin, de préférence deux, fixés au mât, qui sont reliés à un dispositif de couplage permettant de solidariser les bras ou les corps des vérins à la tige de la sonde pénétrométrique. Le dispositif de couplage présente une position verrouillée dans laquelle les bras ou les corps des vérins sont solidarisés à la tige de la sonde de manière à permettre le déplacement vertical de la tige par rapport au mât, vers le haut ou vers le bas, par actionnement du ou des vérins, selon une longueur correspondant sensiblement à la longueur du bras du vérin.

[0035] Le dispositif de couplage présente en outre une position déverrouillée dans laquelle la tige de la sonde est désolidarisée du ou des vérins, ce qui permet de déplacer le dispositif de couplage par rapport à la tige après que le bras est arrivé en fin de course. On comprend donc que par un mouvement de va-et-vient, le ou les vérins permettent de déplacer la sonde pénétrométrique par rapport au mât selon le second axe longitudinal.

[0036] Avantagusement, le dispositif d'actionnement est configuré pour que, lors de la descente de la sonde

pénétrométrique et de l'outil de forage dans le sol, la profondeur de la sonde pénétrométrique est supérieure à celle de l'outil de forage. En d'autres termes, la sonde pénétrométrique est introduite dans le sol avant l'outil de forage tout en ayant une certaine avance par rapport à l'outil de forage, et ce afin de pouvoir calculer la capacité portante du sol au niveau de l'extrémité inférieure de l'outil de forage.

[0037] De préférence, mais non nécessairement, la machine comporte en outre des moyens pour nettoyer la tige lors de sa remontée, afin d'enlever les fragments de sol qui sont restés collés à la tige de la sonde.

[0038] Selon une variante avantageuse, la machine selon l'invention comporte deux sondes pénétrométriques disposées de part et d'autre du mât. Un intérêt est d'améliorer encore la reconnaissance des caractéristiques du sol au droit du pieu que l'on souhaite réaliser. Les deux sondes pénétrométriques peuvent être introduites en même temps dans le sol, l'une pouvant être en avance par rapport à l'autre.

[0039] Avantageusement, la sonde pénétrométrique comporte en outre, mais non nécessairement, des moyens de contrôle pour contrôler la structure du pieu formé dans le sol.

[0040] Selon l'invention, la structure du pieu est avantageusement contrôlée au moment du bétonnage, de préférence lors de la remontée de la sonde.

[0041] Pour ce faire, les moyens de contrôle comportent de préférence un générateur d'ondes disposé dans la sonde pénétrométrique, tandis que l'outil de forage est préférentiellement muni d'un géophone. Les ondes émises se réfléchissent sur les différentes interfaces du sol et sont enregistrées par le géophone. Par traitement mathématique basé sur la vitesse de propagation des ondes et sur la nature du fluide injecté, on reconstitue la géométrie réelle du pieu.

[0042] Avantageusement, la machine comporte en outre un système de visualisation en temps réel de la capacité portante courante en fonction de la profondeur de forage.

[0043] L'opérateur peut donc visualiser en temps réel la capacité portante courante du pieu.

[0044] Avantageusement, la machine selon l'invention comporte en outre des moyens pour mesurer des paramètres de forage, et des moyens pour comparer les paramètres de forage aux données fournies par la sonde pénétrométrique.

[0045] Les paramètres de forage comprennent notamment le couple exercé sur l'outil de forage et la vitesse de descente de l'outil de forage, dans le sol, mesures dont l'analyse permet d'apprécier la compacité d'un sol.

[0046] La comparaison permet ainsi de s'assurer que les données fournies par la sonde pénétrométrique sont cohérentes avec les données de forage, et ce afin d'améliorer la fiabilité de l'opération de dimensionnement du pieu.

[0047] De préférence, le système de visualisation permet en outre d'afficher simultanément sur un même gra-

phique et en fonction de la profondeur : des paramètres d'injection du fluide de type béton, par exemple la pression d'injection, les paramètres de forage, les données de mesure de la sonde pénétrométrique, ainsi que la capacité portante courante.

[0048] L'invention porte en outre sur un procédé de réalisation dans un sol d'un pieu ayant une capacité portante prédéterminée, comportant :

- 10 • une étape d'insertion dans le sol d'une sonde pénétrométrique;
- une étape de réalisation d'un forage dans un sol en faisant pénétrer dans le sol, à côté de la sonde pénétrométrique, un outil de forage, la sonde pénétrométrique étant introduite en avance par rapport à l'outil de forage;
- 15 • une étape de calcul d'une capacité portante courante à l'aide de la sonde pénétrométrique;
- une étape de détermination de la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée;
- 20 • une étape d'injection dans le sol d'un fluide de type béton depuis une extrémité inférieure de l'outil de forage ;
- 25 • une étape de remontée de l'outil de forage tout en injectant ledit fluide ;
- une étape de remontée de la sonde pénétrométrique.

30 **[0049]** Ce procédé présente les avantages mentionnés ci-dessus lors de la description de la machine. En particulier, le procédé selon l'invention permet une reconnaissance initiale des caractéristiques locales du sol où doit être réalisé le pieu grâce à la sonde pénétrométrique, et un dimensionnement optimal du pieu à partir des données de mesures fournies par la sonde pénétrométrique.

35 **[0050]** Le procédé selon l'invention permet de réaliser aisément un sondage au droit de chaque pieu ou chaque groupe de pieux avant la fabrication dudit pieu ou groupe de pieux.

40 **[0051]** Comme on l'a déjà mentionné ci-dessus, la sonde pénétrométrique est avantageusement introduite dans le sol à une vitesse constante prédéterminée, par exemple à une vitesse d'environ deux centimètres par seconde.

45 **[0052]** Avantageusement, le procédé comporte en outre une étape d'arrêt du déplacement de l'outil de forage à la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité courante prédéterminée.

50 **[0053]** Cette étape d'arrêt est avantageusement réalisée de manière automatique.

55 **[0054]** De manière avantageuse, mais non exclusivement, l'étape d'insertion de la sonde pénétrométrique et l'étape de réalisation du forage sont réalisées en même temps, la sonde pénétrométrique étant préférentiellement introduite dans le sol un peu avant l'outil de forage.

[0055] Avantageusement, l'outil de forage est introduit dans le sol après que la sonde pénétrométrique a pénétré dans le sol d'au moins 1,5 m.

[0056] Selon une autre variante, l'outil de forage est introduit dans le sol après que la sonde pénétrométrique a déterminé la profondeur à laquelle la capacité portante prédéterminée est atteinte.

[0057] En d'autres termes, selon cette autre variante de l'invention, on réalise tout d'abord le sondage avant de réaliser le forage. Dans ce cas, on réalise le forage de préférence moins de 24 heures après avoir réalisé le sondage.

[0058] Avantageusement, on réalise une étape de contrôle de la structure du pieu lors de l'étape de remontée de la sonde pénétrométrique.

[0059] On profite ainsi de la remontée de la sonde pénétrométrique pour contrôler la structure du pieu, c'est-à-dire notamment sa géométrie. L'étape de contrôle peut avoir lieu pendant l'étape d'injection de fluide de type béton, c'est-à-dire pendant l'étape de bétonnage, ou bien après que le l'outil de forage est sorti de terre à l'issue de l'étape de bétonnage.

[0060] Avantageusement, on détermine des paramètres de forage au cours de l'étape de réalisation du forage, on compare les paramètres de forage aux données fournies par la sonde pénétrométrique, et on affiche les paramètres de forage ensemble avec les données fournies par la sonde pénétrométrique.

[0061] De manière préférentielle, mais non nécessairement, le procédé selon l'invention est mis en oeuvre à l'aide d'une machine de forage selon l'invention. Dans une autre variante, le procédé selon l'invention est mis en oeuvre à l'aide d'une machine de sondage et d'une machine de forage et bétonnage, ces deux machines étant distinctes l'une de l'autre.

[0062] De préférence, mais pas nécessairement, une cage d'armature est insérée dans le volume de fluide de type béton contenu dans le forage, avant la remontée de la sonde, afin que cette dernière puisse réaliser un contrôle du pieu armé.

Breve description des dessins

[0063] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit de deux modes de réalisation de l'invention donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 représente une machine de forage selon l'invention dans laquelle l'outil de forage est constituée d'une tarière creuse, l'outil de forage et la sonde pénétrométrique étant en position remontée ;
- la figure 1A est une vue de détail de l'extrémité inférieure du mât ;
- les figures 1B à 1D illustrent le principe de fonctionnement du dispositif d'actionnement permettant de déplacer la sonde pénétrométrique ;
- la figure 2 représente la machine de forage de la

figure 1 en vue de dessus ;

- la figure 3 illustre les étapes de forage et d'introduction de la sonde pénétrométrique dans le sol conformément au procédé selon l'invention, à l'aide de la machine de la figure 1 ;
- la figure 4 illustre l'étape d'arrêt du déplacement de l'outil de forage, la profondeur de forage du pieu de charge de portance prédéterminée ayant été atteinte ;
- la figure 5 illustre l'étape de bétonnage du pieu et de remontée de la sonde pénétrométrique, un contrôle du pieu étant réalisé lors de la remontée de la sonde ;
- la figure 6 représente le pieu réalisé dans le sol, l'outil de forage et la sonde pénétrométrique étant en position remontée ; et
- la figure 7 illustre les différentes courbes que l'opérateur peut visualiser au cours de la réalisation du pieu.

Description détaillée de l'invention

[0064] Sur la figure 1, on a représenté une machine de forage 10 selon l'invention qui permet de réaliser dans un sol S un pieu 100 ayant une capacité portante prédéterminée Cp. La machine de forage 10 comporte un porteur 12 monté sur chenille 14 qui est muni d'un mât longitudinal 16.

[0065] La machine 10 comporte en outre un outil de forage 18 qui est parallèle au mât 16 et s'étend selon un premier axe longitudinal A. L'outil de forage 18 comporte une extrémité inférieure 18a. Dans cet exemple, l'outil de forage comporte une portion formant tarière. Cette machine comporte en outre des moyens 20 pour injecter dans le sol S un fluide du type béton depuis l'extrémité inférieure 18a de l'outil de forage 18. Dans cet exemple, les moyens pour injecter dans le sol un fluide du type béton comprennent un tube plongeur 20 s'étendant longitudinalement à l'intérieur de l'outil de forage 18, ainsi qu'une conduite 22 pour amener le fluide du type béton depuis un réservoir de béton 21 vers l'extrémité supérieure 18b de l'outil de forage 18. De manière connue, l'extrémité supérieure 18b de l'outil de forage comporte une entrée pour recevoir le fluide du type béton, et l'amener vers l'extrémité inférieure du tube plongeur. Le moyen pour injecter dans le sol le fluide du type béton est décrit plus en détail dans le document FR 2 566 813.

[0066] La machine de forage 10 comporte en outre des moyens 24 pour déplacer l'outil de forage 18 par rapport au mât 16 selon la direction longitudinale du mât. De manière connue, ces moyens 24 pour déplacer l'outil de forage 18 par rapport au mât 16 comportent un chariot 26 mobile selon la direction longitudinale du mât, ainsi qu'une tête de rotation hydraulique 28 montée sur ledit chariot. La tête de rotation hydraulique 28 est destinée à mettre en rotation l'outil de forage 18.

[0067] Conformément à l'invention, la machine de forage 10 comporte en outre au moins une sonde pénétrométrique 30. Dans cet exemple, la sonde pénétromé-

trique **30** est située à l'extrémité inférieure d'une tige **32** qui est montée coulissante à l'intérieur d'un tube de guidage **34**. Comme on le constate en se référant à la figure **1**, la tige s'étend selon une longueur supérieure à la moitié de la longueur du mât et plus précisément selon une longueur sensiblement égale à celle de l'outil de forage **18**. La sonde pénétrométrique **20** s'étend selon un second axe longitudinal **B** qui est parallèle au premier axe longitudinal **A** de l'outil de forage. Comme on le verra plus en détail ci-dessous, la sonde pénétrométrique **30** est ici destinée à être introduite dans le sol **S** en même temps que l'outil de forage **18**. En outre, le premier axe longitudinal **A** est distinct du second axe longitudinal **B**. On constate également sur la figure **2** que la sonde pénétrométrique est disposée sur un bord latéral **16c** du mât.

[0068] Pour permettre le déplacement de la sonde pénétrométrique dans le sol, à savoir son introduction dans le sol ou bien sa remontée, il est prévu au moins un dispositif d'actionnement **40** pour déplacer la sonde pénétrométrique **30** en translation selon le second axe longitudinal **B**. En référence aux figures **1B** à **1C**, on constate que le dispositif d'actionnement **40** est fixé au mât, de préférence à l'extrémité inférieure **16a** du mât. Dans cet exemple, le dispositif d'actionnement **40** comporte une paire de vérins **42** munie de corps **44** et de bras **45** fixés à l'extrémité inférieure du mât. Les corps **44** qui sont reliés à un dispositif de couplage **46** destiné à solidariser la tige **32** de la sonde pénétrométrique **30** avec les corps **44** des vérins **42**. Ce dispositif de couplage **46** permet également de désolidariser la tige **32** de la sonde pénétrométrique **30** des bras **45** des vérins afin de permettre le déplacement du dispositif de couplage **46** par rapport à la tige de la sonde pénétrométrique.

[0069] On comprend donc que pour faire descendre la sonde pénétrométrique dans le sol, on déverrouille le dispositif de couplage **46**, on actionne les vérins **42** de manière à faire sortir les bras **45**, ce qui provoque la montée des corps **44** par rapport à la tige **32**, on verrouille le dispositif de couplage **46** et on actionne les vérins de manière à rétracter les bras **45** dans les corps **44** des vérins **42**, ce qui permet de faire descendre la sonde pénétrométrique de la longueur des bras **45**. On déverrouille ensuite le dispositif de couplage **46** avant de déployer les bras **44** pour faire monter le dispositif de couplage et pour à nouveau verrouiller le dispositif de couplage **46**. Ce mouvement de va-et-vient permet de faire descendre régulièrement la sonde pénétrométrique dans le sol. De préférence, la vitesse de déplacement de la sonde pénétrométrique est une vitesse constante prédéterminée sensiblement égale à 2 cm/s.

[0070] La sonde pénétrométrique est par ailleurs connectée à des moyens de calcul **50** qui permettent de calculer une capacité portante courante du sol, à l'aide de formules mathématiques connues par ailleurs.

[0071] Pour ce faire, la sonde pénétrométrique enregistre en continu la résistance de pointe grâce au capteur de pression disposé en pointe de la sonde, et de la ré-

sistance au frottement latéral local grâce à un capteur de frottements appartenant à la sonde. Les signaux des capteurs de pression sont transmis en tant que signaux analogiques amplifiés via un câble **51** au moyen de calcul **50**. Ils sont alors convertis en signaux numériques via un système d'acquisition. La capacité portante courante est donc calculée à partir des mesures de pression réalisées en pointe de la sonde pénétrométrique et des mesures de frottement également réalisées par la sonde pénétrométrique.

[0072] Ces moyens de calcul **50** sont également prévus pour déterminer la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée. Des moyens non représentés ici permettent d'informer l'opérateur que de la valeur de ladite profondeur. Le cas échéant, il est informé que l'outil a atteint, ou est sur le point d'atteindre, ladite profondeur.

[0073] Dans cet exemple, la machine comporte en outre des moyens pour commander l'arrêt du déplacement de l'outil de forage **18** dans le sol **S** à la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée. Cette capacité portante prédéterminée peut être comprise entre une dizaine de tonnes et plusieurs centaines de tonnes.

[0074] En se référant à nouveau à la figure **1**, on constate que la distance entre le premier axe longitudinal **A** et le second axe longitudinal **B** est inférieure à 3 m. De préférence, cette longueur est au moins égale à 1 m. L'intérêt est de pouvoir réaliser le sondage au plus près du pieu. Conformément à l'invention, le dispositif d'actionnement **40** est configuré pour introduire la sonde pénétrométrique **30** dans le sol **S** à une vitesse constante prédéterminée **V₀**, en avance par rapport à l'outil de forage. De préférence, l'outil de forage **18** est introduit dans le sol **S** après que la sonde pénétrométrique **30** a pénétré dans le sol **S** d'au moins 1,5 m afin de ne pas interférer la mesure pénétrométrique.

[0075] Par ailleurs, le dispositif d'actionnement **40** est configuré pour que, lors de la descente de la sonde pénétrométrique **30** et de l'outil de forage **18** dans le sol **S**, la profondeur de la sonde pénétrométrique soit supérieure à celle de l'outil de forage. En l'espèce, on prévoit que la sonde pénétrométrique **30** soit disposée à environ 1,5 m en dessous de l'extrémité inférieure de l'outil de forage **18**.

[0076] Selon une variante, non représentée ici, la machine comporte deux sondes pénétrométriques disposées de part et d'autre du mât **16**. Par exemple, les deux sondes pénétrométriques sont symétriques par rapport à un plan **P** vertical passant par l'axe **A** de l'outil de forage **18**.

[0077] La sonde pénétrométrique comporte en outre des moyens de contrôle **60** pour contrôler la structure du pieu formé dans le sol. Ces moyens de contrôle **60** comprennent un générateur d'onde **60** disposé dans la sonde pénétrométrique, un géophone **62**. Les données reçues par le géophone permettent de déterminer la structure et la géométrie du pieu en formation.

[0078] Afin de permettre à un opérateur de contrôler le bon déroulement des opérations, la machine selon l'invention comporte en outre un système de visualisation **70** en temps réel de la capacité portante courante Q_p en fonction de la profondeur de forage p . Des exemples de graphique seront décrits plus en détail ci-dessous.

[0079] La machine de forage **10** comporte en outre des moyens pour mesurer des paramètres de forage, par exemple la vitesse V de pénétration de l'outil de forage **18** dans le sol et le couple appliqué à l'outil de forage. Lesdits moyens comportent un capteur de vitesse et un capteur de couple montés sur le chariot mobile **24**. La machine **10** comporte en outre des moyens pour comparer les paramètres de forage aux données fournies par la sonde pénétrométrique **30** afin de contrôler la cohérence des données de mesures fournies. Ces moyens sont constitués d'un calculateur qui peut être identique ou distinct du moyen de calcul **50** décrit précédemment. Le résultat de la comparaison peut être affiché sur le système de visualisation **70** précité.

[0080] A l'aide des figures **3** à **6**, on va maintenant décrire un exemple de mise en oeuvre du procédé de réalisation dans un sol S d'un pieu **100** ayant une capacité portante prédéterminée C_p conforme à la présente invention. Dans cet exemple, le procédé est mis en oeuvre à l'aide de la machine de forage **10** précédemment décrite. Cet exemple n'est pas limitatif, ce procédé pouvant être mis en oeuvre à l'aide d'une machine différente ou bien encore à l'aide d'une machine de forage et d'une machine de sondage distinctes l'une de l'autre.

[0081] Le procédé selon l'invention comporte tout d'abord une étape d'insertion dans le sol S de la sonde pénétrométrique **30** afin de mesurer les caractéristiques du sol et de mesurer la capacité portante courante du sol.

[0082] Si par exemple le pieu **100** que l'on souhaite réaliser présente une capacité portante prédéterminée de 300 tonnes, c'est-à-dire qu'il doit reprendre une charge égale à 300 tonnes, et que l'on souhaite réaliser un pieu **100** ayant un diamètre de 70 cm, la sonde pénétrométrique va permettre de déterminer la longueur du pieu qui est nécessaire et suffisante pour que ce dernier présente une charge portante sensiblement égale à 300 tonnes.

[0083] Selon l'invention, le procédé comporte en outre une étape de réalisation d'un forage dans le sol S en faisant pénétrer dans le sol, à côté de la sonde pénétrométrique **30**, l'outil de forage **18**. Comme on le constate sur la figure **3**, la sonde pénétrométrique **30** est, dans cet exemple, introduite en avance dans le sol par rapport à l'outil de forage **18**. La raison en est que la sonde fournit une valeur de capacité courante du sol pour une profondeur légèrement inférieure à la profondeur atteinte par la pointe de la sonde. Autrement dit, pour pouvoir fournir la valeur de capacité portante courante du sol à la profondeur P , la sonde doit être enfoncée jusqu'à la profondeur $P+X$. Cette technologie est bien connue par ailleurs. Dans cet exemple, la longueur d'avance X est environ égale à 1,5 m.

[0084] En d'autres termes, l'insertion de la sonde pénétrométrique **30** dans le sol est réalisée préalablement à l'introduction de l'outil de forage **18** dans le sol, puis la sonde et l'outil de forage s'enfoncent simultanément dans le sol, généralement à des vitesses différentes. Dans cet exemple, l'outil de forage **18** est introduit dans le sol après que la sonde pénétrométrique **30** a pénétré d'une longueur d'environ 2 m dans le sol S .

[0085] La sonde pénétrométrique **30** est introduite dans le sol S à une vitesse constante prédéterminée qui est égale dans cet exemple à 2 cm/s. La vitesse de déplacement vertical de l'outil de forage quant à elle n'est pas constante car elle dépend de la nature du sol rencontré à l'extrémité inférieure de l'outil de forage **18**. On comprend en effet que l'outil de forage aura tendance à descendre plus vite dans une portion de sol qui est plus tendre que dans une autre portion de sol plus compacte. Quoi qu'il en soit, la vitesse de la sonde pénétrométrique reste constante. On s'assure également que la sonde pénétrométrique **30** présente une longueur d'avance au moins égale à la longueur minimale X précitée.

[0086] On comprend donc que dans l'exemple illustré ici, l'étape d'insertion de la sonde pénétrométrique **30** et l'étape de réalisation du forage sont réalisées en même temps.

[0087] Au cours de la descente de la sonde pénétrométrique **30**, on réalise une étape de calcul de la capacité portante courante C du sol. Les méthodes de calcul pour déterminer la capacité portante courante du sol sont bien connues par ailleurs. On pourra notamment se référer à la norme NF P 94-262. Dans cet exemple, la capacité portante courante est calculée à partir des valeurs de mesure de pression en pointe **30a** de la sonde pénétrométrique **30** et du coefficient de frottement. La capacité portante courante tient également compte du diamètre D du pieu **100** que l'on souhaite réaliser.

[0088] Dans cet exemple, le sol S présente une couche supérieure $S1$ ayant une hauteur $H1$ qui est plus tendre qu'une couche inférieure $S2$ située en-dessous de la couche supérieure $S1$.

[0089] Selon l'invention, le déplacement de l'outil de forage **18** est arrêté à la profondeur où la capacité portante courante calculée C correspond au moins à la capacité portante prédéterminée C_p du pieu **100**. En se référant à la figure **4**, on comprend que la sonde pénétrométrique **30** a permis de déterminer que la charge de portance prédéterminée est atteinte pour une longueur de pieu égale à L .

[0090] Dans cet exemple, on constate que la sonde pénétrométrique s'étend jusqu'à une profondeur égale à $L + X$ où X est égal à 1,5 m.

[0091] Selon une variante non représentée ici, l'outil de forage **18** pourrait être introduit dans le sol S après que la sonde pénétrométrique **30** a détecté que la profondeur à laquelle la capacité portante courante est au moins égale à la capacité portante prédéterminée est atteinte. En d'autres termes, l'étape de forage débute après la fin de l'étape de sondage.

[0092] Selon l'invention, après l'étape de forage, on remonte l'outil de forage tout en injectant dans le sol un fluide de type béton depuis l'extrémité inférieure **18a** de l'outil de forage **18**. Dans cet exemple, l'injection du fluide de type béton est réalisée grâce à un tube plongeur **20** muni d'ouvertures. Concomitamment à la remontée de l'outil de forage **18**, on réalise une étape de remontée de la sonde pénétrométrique **30** à l'aide du dispositif d'actionnement **40** précité.

[0093] Au cours de l'étape de remontée de la sonde pénétrométrique **30**, on réalise une étape de contrôle de la structure du pieu **100** en cours de formation. Pour ce faire, on envoie des ondes depuis la sonde vers le pieu en formation afin d'en déterminer la géométrie à l'aide des ondes réfléchies.

[0094] Pendant l'étape de réalisation du forage, on détermine des paramètres de forage, tels que la vitesse de descente **V** de l'outil de forage **18** et le couple **K** appliqué à l'outil de forage **18**. Ces paramètres de forage sont comparés en temps réel avec les données fournies par la sonde pénétrométrique. On affiche ensuite les paramètres de forage ensemble avec les données fournies par la sonde pénétrométrique sur le système de visualisation **70**. Cette comparaison permet de vérifier en temps réel que les mesures effectuées par la sonde pénétrométrique (la pression en pointe et les frottements) sont cohérentes avec les paramètres de forage. Sur la figure **7**, on a représenté les graphiques affichés sur le système de visualisation **70**. Le graphique **G1** illustre la compacité **Q_p** mesurée à la pointe de la sonde pénétrométrique **30** en fonction de la profondeur **p**. On constate sur ce graphique que la valeur de compacité **Q_p** augmente sensiblement lorsque l'outil de forage pénètre dans la couche inférieure **S2** compacte située à une profondeur **H1**.

[0095] Le graphique **G2** représente la capacité portante courante **C** en fonction de la profondeur **p**. On constate que cette capacité portante courante augmente avec la profondeur et que la capacité portante prédéterminée **C_p** du pieu est atteinte pour un pieu présentant une longueur **L**. Le graphique **G4** illustre quant à lui des paramètres de forage mesurés lors de l'étape de réalisation du forage. Il s'agit notamment du couple de rotation et de la vitesse de déplacement de l'outil de forage. Le graphique **G3** illustre les paramètres mesurés lors de l'étape de bétonnage, à la remontée de l'outil. Il s'agit notamment de la pression de bétonnage et d'un « profil » du pieu, à savoir le rapport volume réel sur volume théorique de béton, calculé par tranche unitaire de pieu. La visualisation de l'ensemble de ces graphiques permet à l'opérateur de contrôler en temps réel l'opération de sondage et d'exécution du pieu. L'ensemble des données de la figure 7 constitue une « fiche d'identité et de contrôle qualité » du pieu.

Revendications

1. Machine de forage (10) pour réaliser dans un sol (S)

un pieu (100) ayant une capacité portante prédéterminée (C_p), ladite machine comportant :

- un porteur (12) muni d'un mât (16) longitudinal ;
- un outil de forage (18) parallèle au mât, s'étendant selon un premier axe longitudinal (A), et ayant une extrémité inférieure (18a) ;
- des moyens (20) pour injecter dans le sol un fluide du type béton depuis ladite extrémité inférieure de l'outil de forage ;
- des moyens (24) pour déplacer l'outil de forage par rapport au mât selon la direction longitudinale du mât ;

caractérisée en ce qu'elle comporte en outre :

- au moins une sonde pénétrométrique (30) destinée à être introduite dans le sol avec l'outil de forage, ladite sonde pénétrométrique s'étendant selon un second axe longitudinal (B) parallèle au premier axe longitudinal du mât ;
- au moins un dispositif d'actionnement (40) pour déplacer la sonde pénétrométrique dans le sol en translation selon le second axe longitudinal, ce dispositif d'actionnement étant fixé à la machine ; et
- des moyens de calcul (50) connectés à la sonde pénétrométrique (30) pour déterminer la profondeur (L) où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée.

2. Machine de forage selon la revendication 1, **caractérisée en ce qu'elle** comporte en outre des moyens pour arrêter le déplacement de l'outil de forage dans le sol à la profondeur (L) où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée.

3. Machine de forage selon la revendication 1 ou 2, **caractérisée en ce que** la distance entre le premier axe longitudinal (A) et le second axe longitudinal (B) est inférieure à 5 mètres.

4. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, **caractérisée en ce que** le dispositif d'actionnement (40) est configuré pour introduire la sonde pénétrométrique dans le sol à une vitesse constante prédéterminée (V_0), de préférence en avance par rapport à l'outil de forage.

5. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, **caractérisée en ce que** la sonde pénétrométrique (30) est située à l'extrémité inférieure d'une tige (32) s'étendant dans un tube de guidage (34).

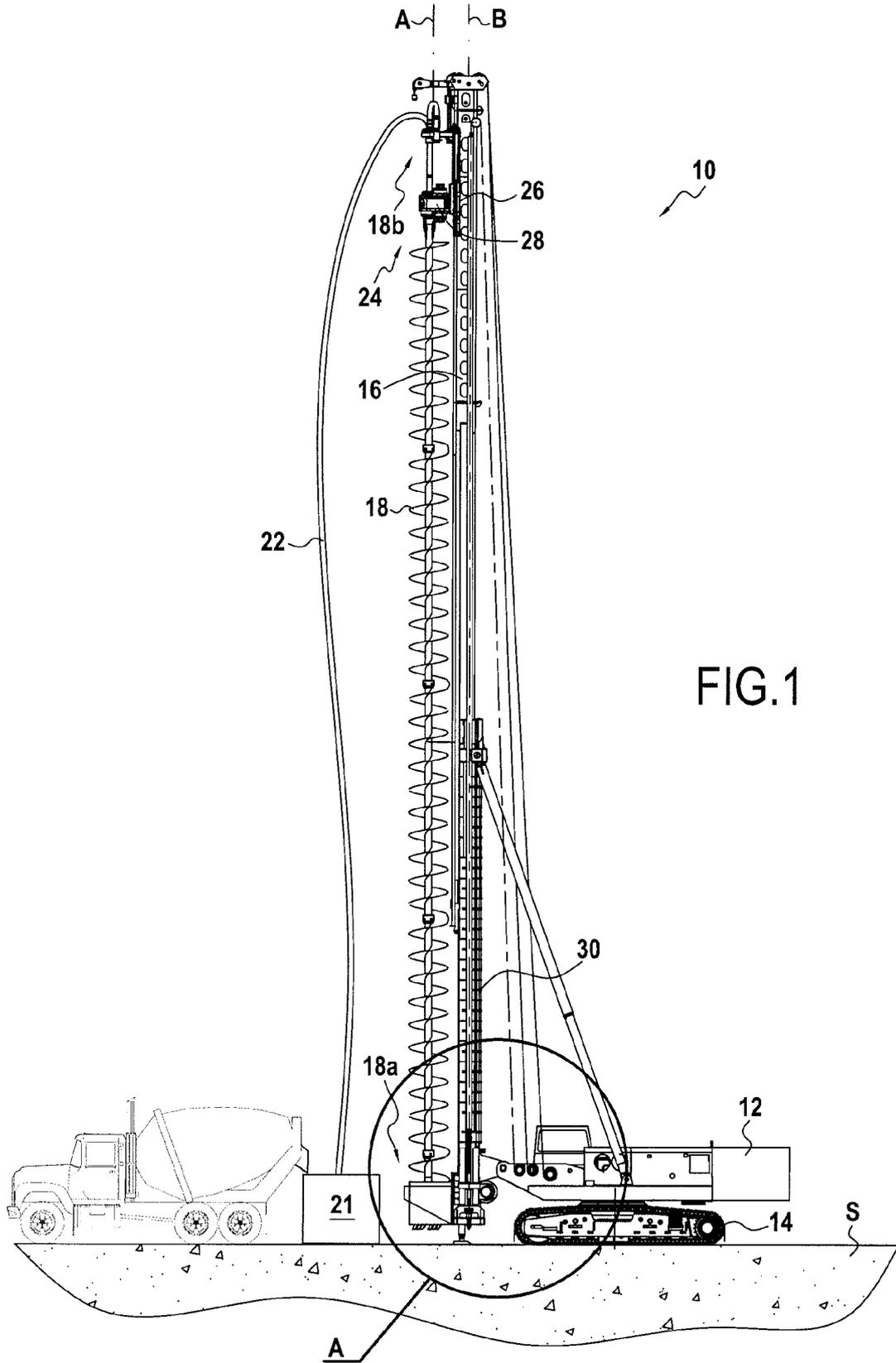
6. Machine de forage selon l'une quelconque des re-

vendications 1 à 5, **caractérisée en ce que** le dispositif d'actionnement (40) est fixé à une extrémité inférieure (16a) du mât (16).

7. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, **caractérisée en ce que** le dispositif d'actionnement (40) est configuré pour que, lors de la descente de la sonde pénétrométrique (30) et de l'outil de forage (18) dans le sol, la profondeur de la sonde pénétrométrique soit supérieure à celle de l'outil de forage. 5
8. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, **caractérisée en ce qu'elle** comporte deux sondes pénétrométriques disposées de part et d'autre du mât (16). 10
9. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **caractérisée en ce que** la sonde pénétrométrique (30) comporte en outre des moyens de contrôle (60, 62) pour contrôler la structure du pieu formé dans le sol, ou en cours de formation. 20
10. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, **caractérisée en ce qu'elle** comporte en outre un système de visualisation (70) en temps réel de la capacité portante courante en fonction de la profondeur de forage. 25
11. Machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, **caractérisée en ce qu'elle** comporte en outre des moyens pour mesurer des paramètres de forage, et des moyens (50) pour comparer les paramètres de forage aux données fournies par la sonde pénétrométrique. 30
12. Procédé de réalisation dans un sol d'un pieu ayant une capacité portante prédéterminée, comportant : 35
 - une étape d'insertion dans le sol d'une sonde pénétrométrique;
 - une étape de réalisation d'un forage dans un sol en faisant pénétrer un outil de forage dans le sol, à côté de la sonde pénétrométrique, la sonde pénétrométrique étant introduite en avance par rapport à l'outil de forage;
 - une étape de calcul d'une capacité portante courante à l'aide de la sonde pénétrométrique;
 - une étape de détermination de la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité portante prédéterminée;
 - une étape d'injection dans le sol d'un fluide de type béton depuis une extrémité inférieure de l'outil de forage ; 40
 - une étape de remontée de l'outil de forage tout en injectant ledit fluide ; 45
 - une étape de remontée de la sonde péné-

métrique.

13. Procédé selon la revendication 12, **caractérisé en ce qu'il** comporte en outre une étape d'arrêt du déplacement de l'outil de forage à la profondeur où la capacité portante courante correspond au moins à la capacité courante prédéterminée. 5
14. Procédé selon la revendication 12 ou 13, dans laquelle l'étape d'insertion de la sonde pénétrométrique et l'étape de réalisation du forage sont réalisées en même temps. 10
15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 14, dans lequel on réalise une étape de contrôle de la structure du pieu lors de l'étape de remontée de la sonde pénétrométrique. 15
16. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 15, dans lequel la sonde pénétrométrique est introduite dans le sol à une vitesse constante prédéterminée. 20
17. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 16, dans lequel l'outil de forage est introduit dans le sol après que la sonde pénétrométrique a pénétré dans le sol d'au moins 1,5 m. 25
18. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 17, dans lequel l'outil de forage est introduit dans le sol après que la sonde pénétrométrique a détecté que la capacité portante prédéterminée est atteinte. 30
19. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 18, dans lequel on détermine des paramètres de forage au cours de l'étape de réalisation du forage, on compare les paramètres de forage aux données fournies par la sonde pénétrométrique, et on affiche les paramètres de forage ensemble avec les données fournies par la sonde pénétrométrique. 35
20. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 à 19, dans lequel on utilise une machine de forage selon l'une quelconque des revendications 1 à 11. 40



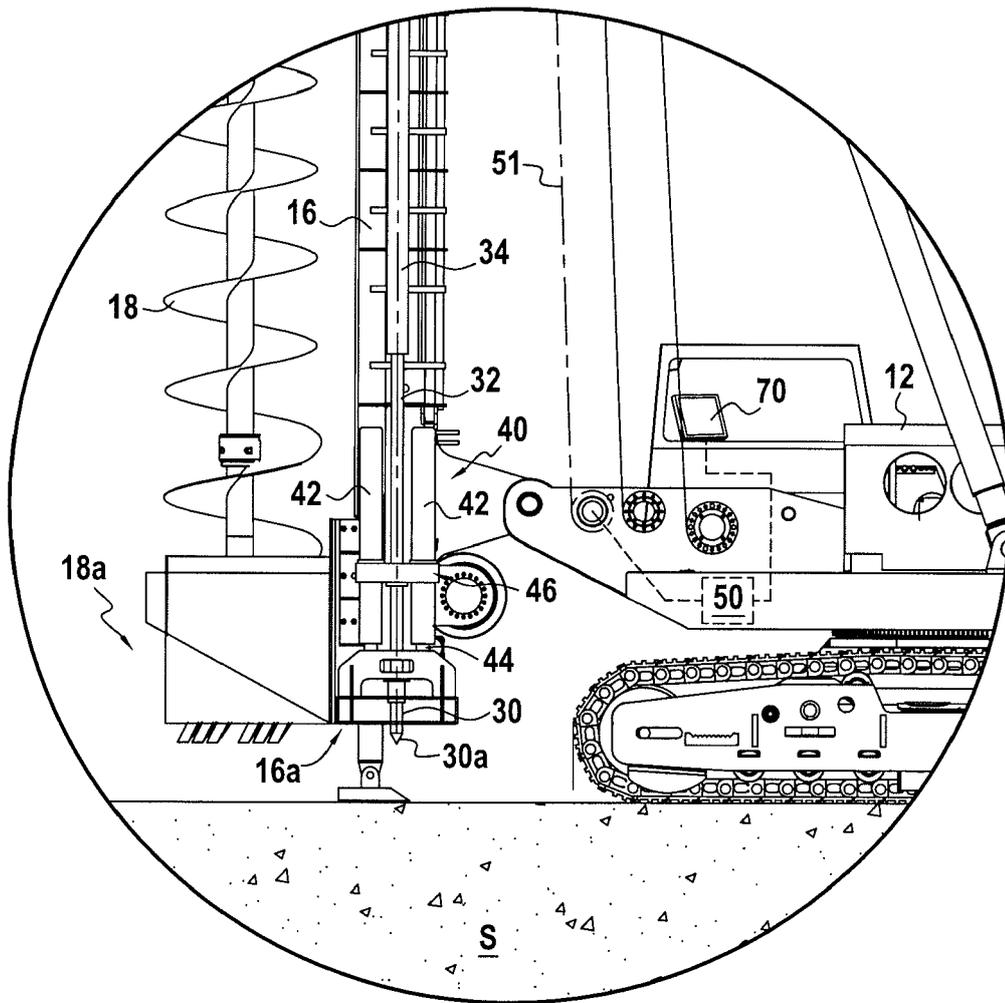


FIG.1A

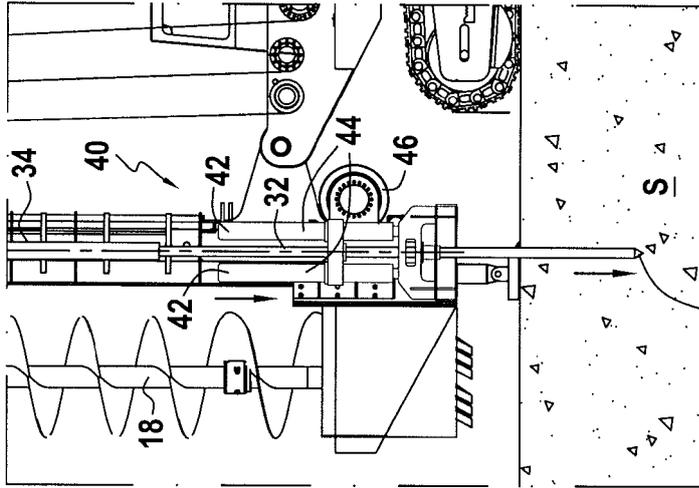


FIG. 1B

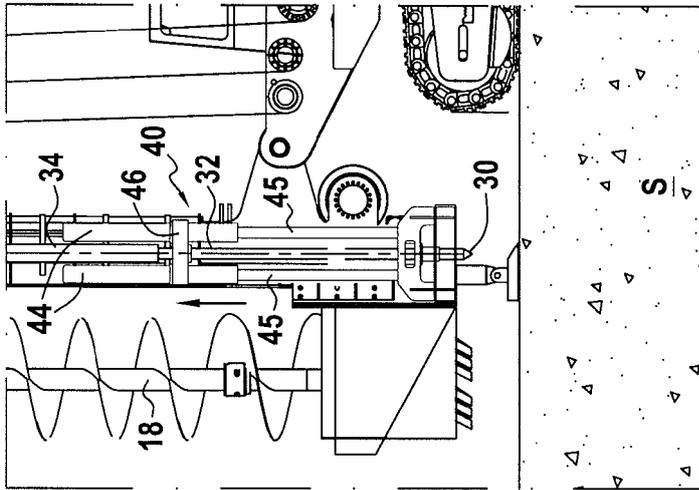


FIG. 1C

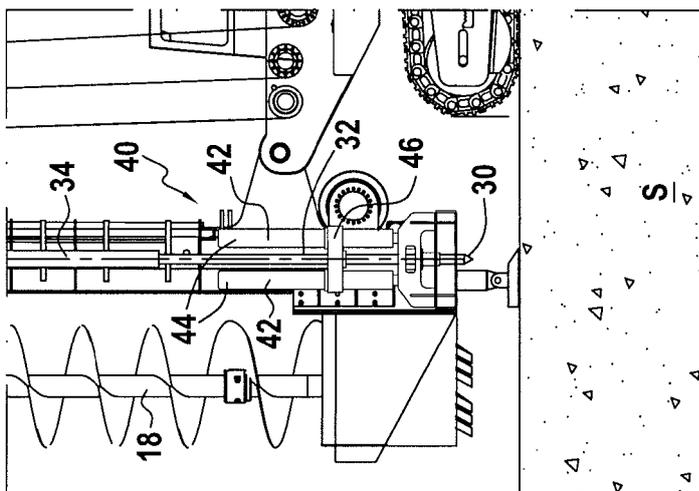
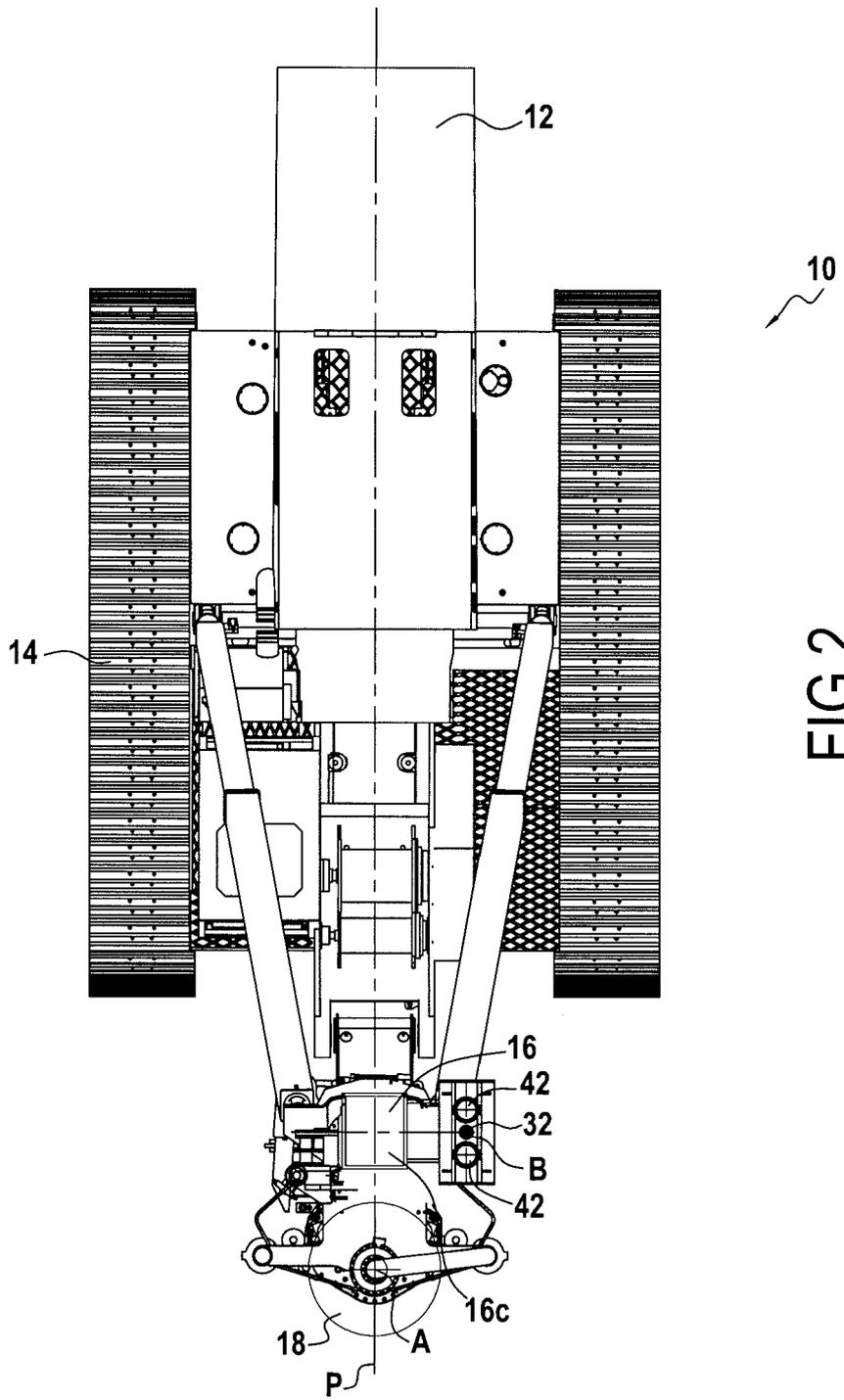


FIG. 1D



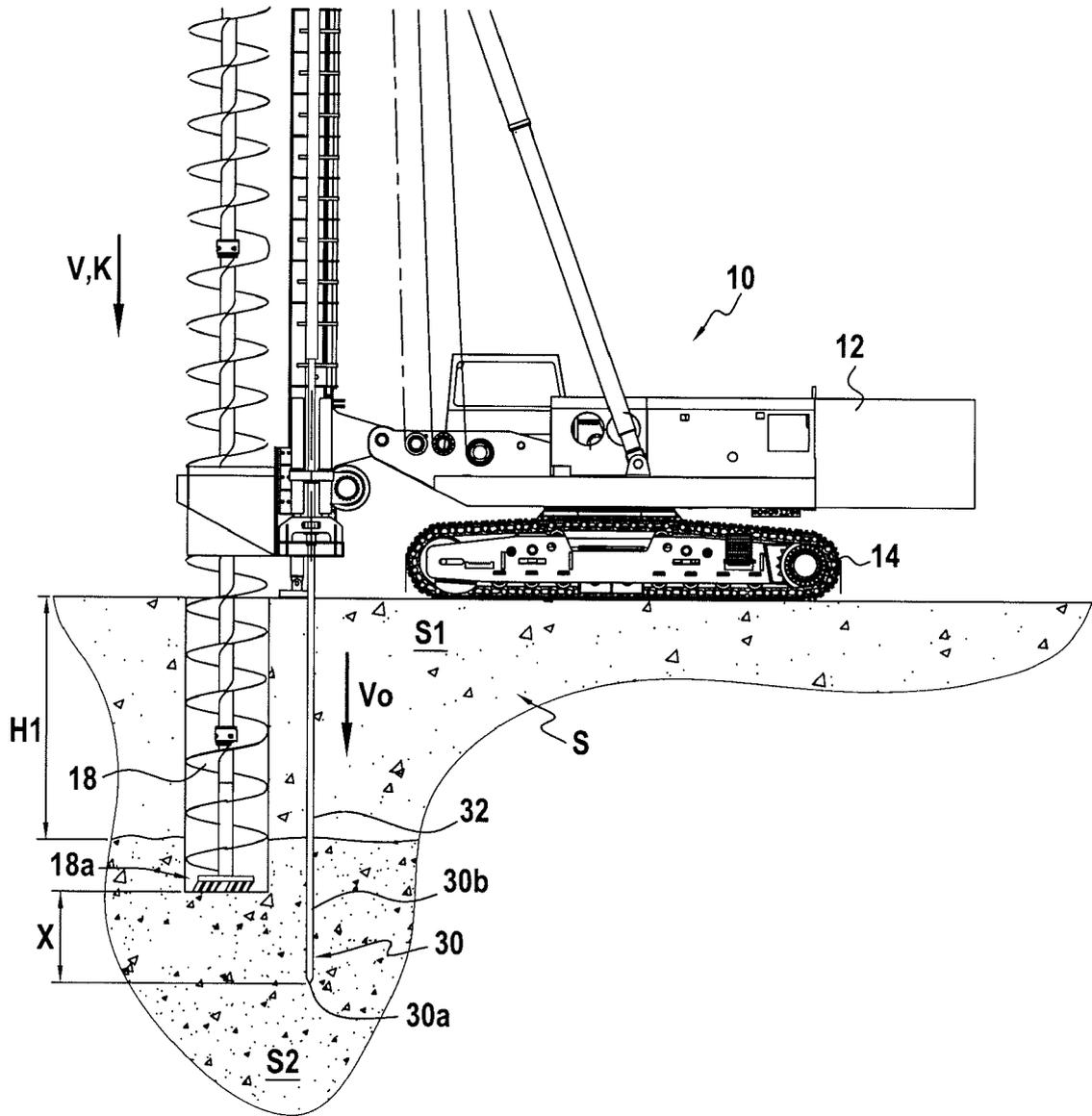


FIG.3

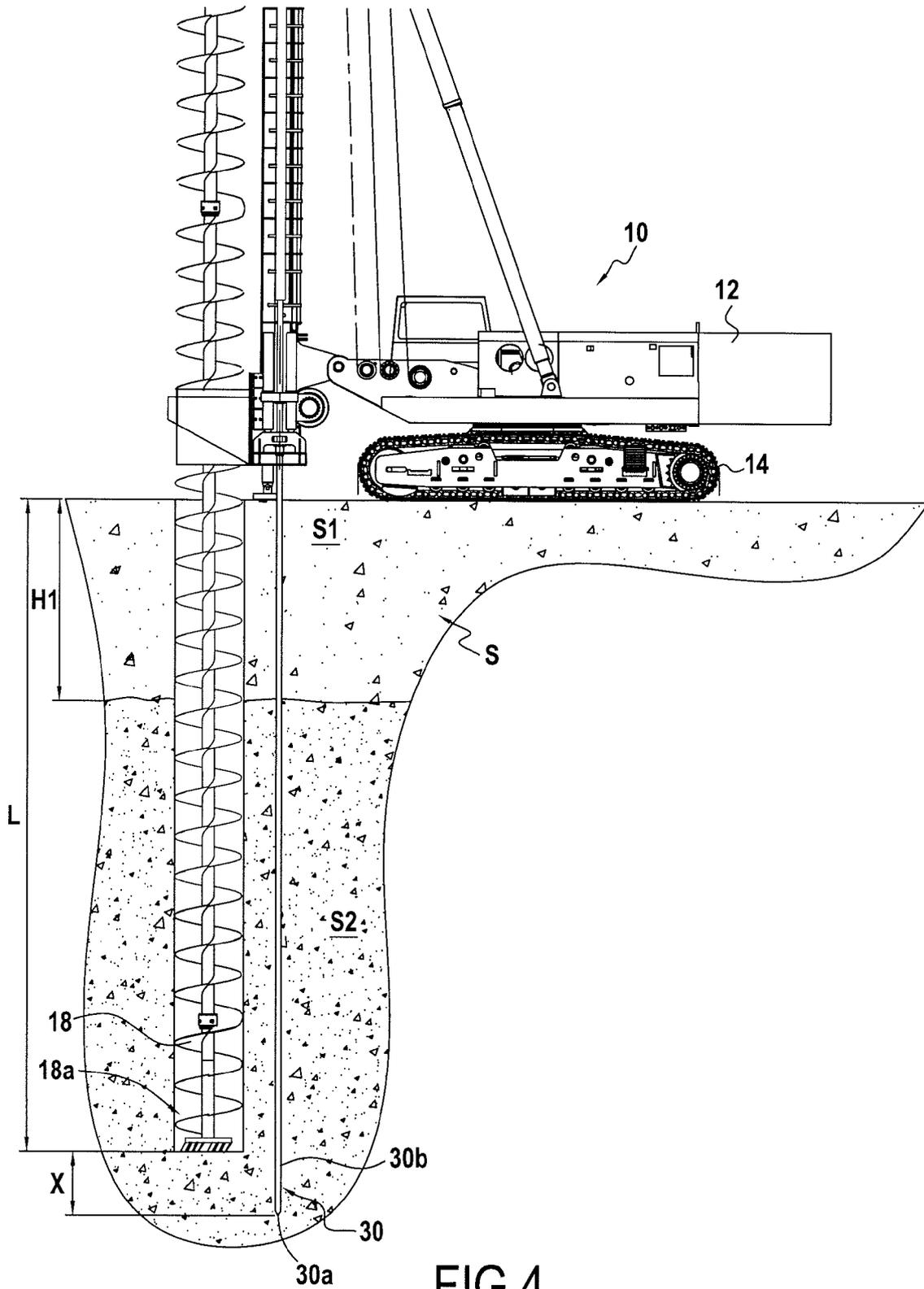


FIG.4

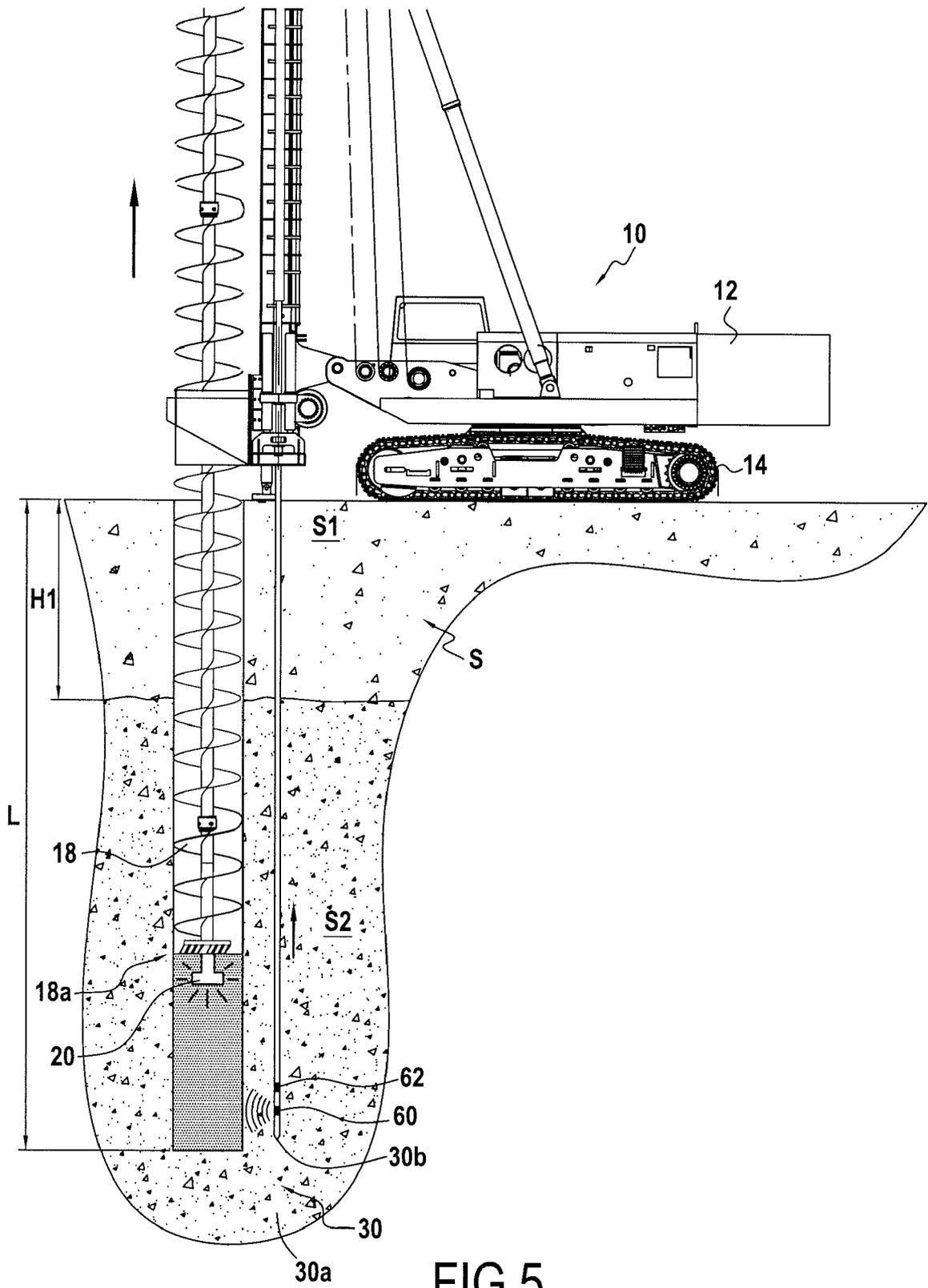


FIG.5

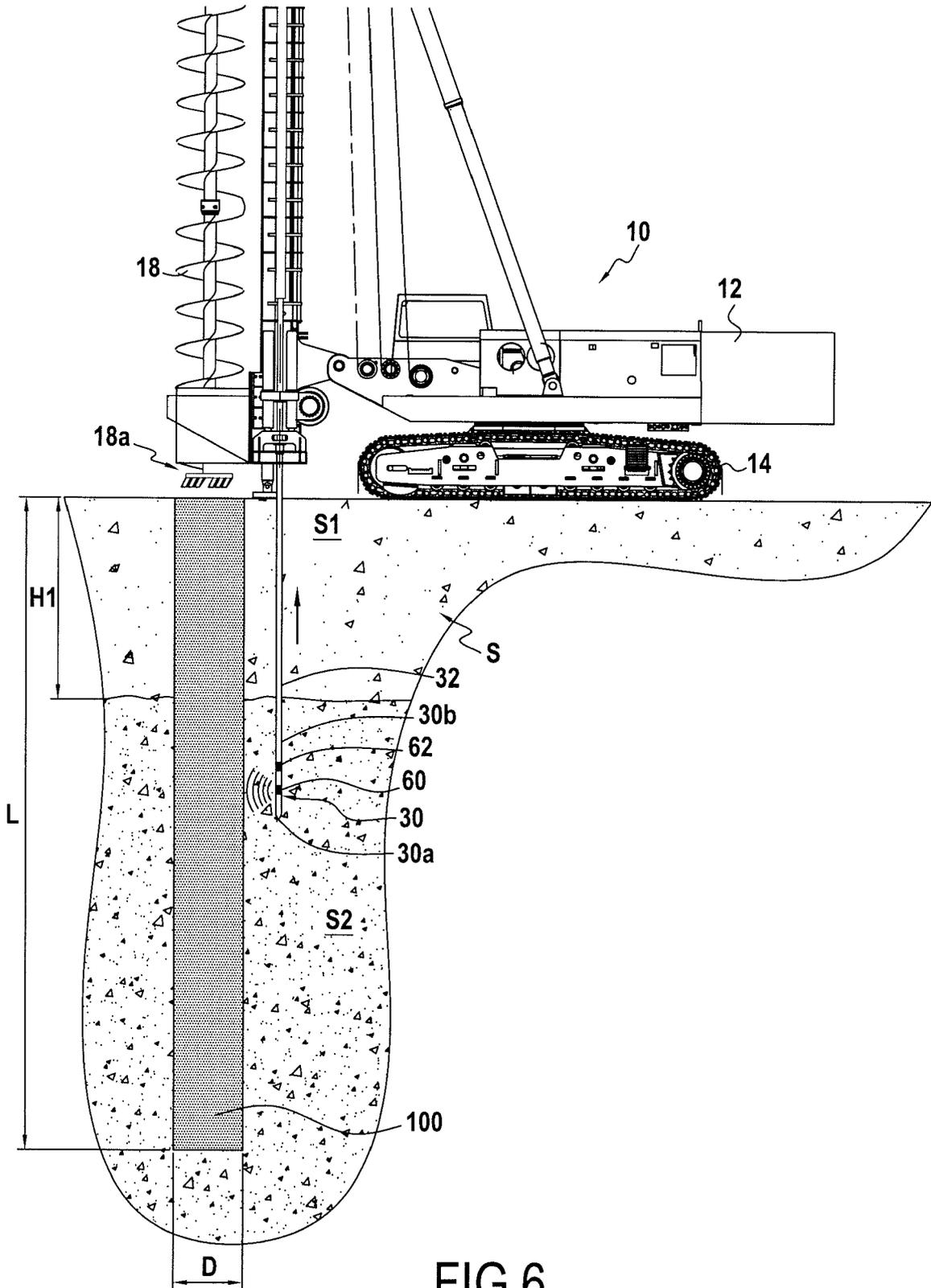


FIG.6

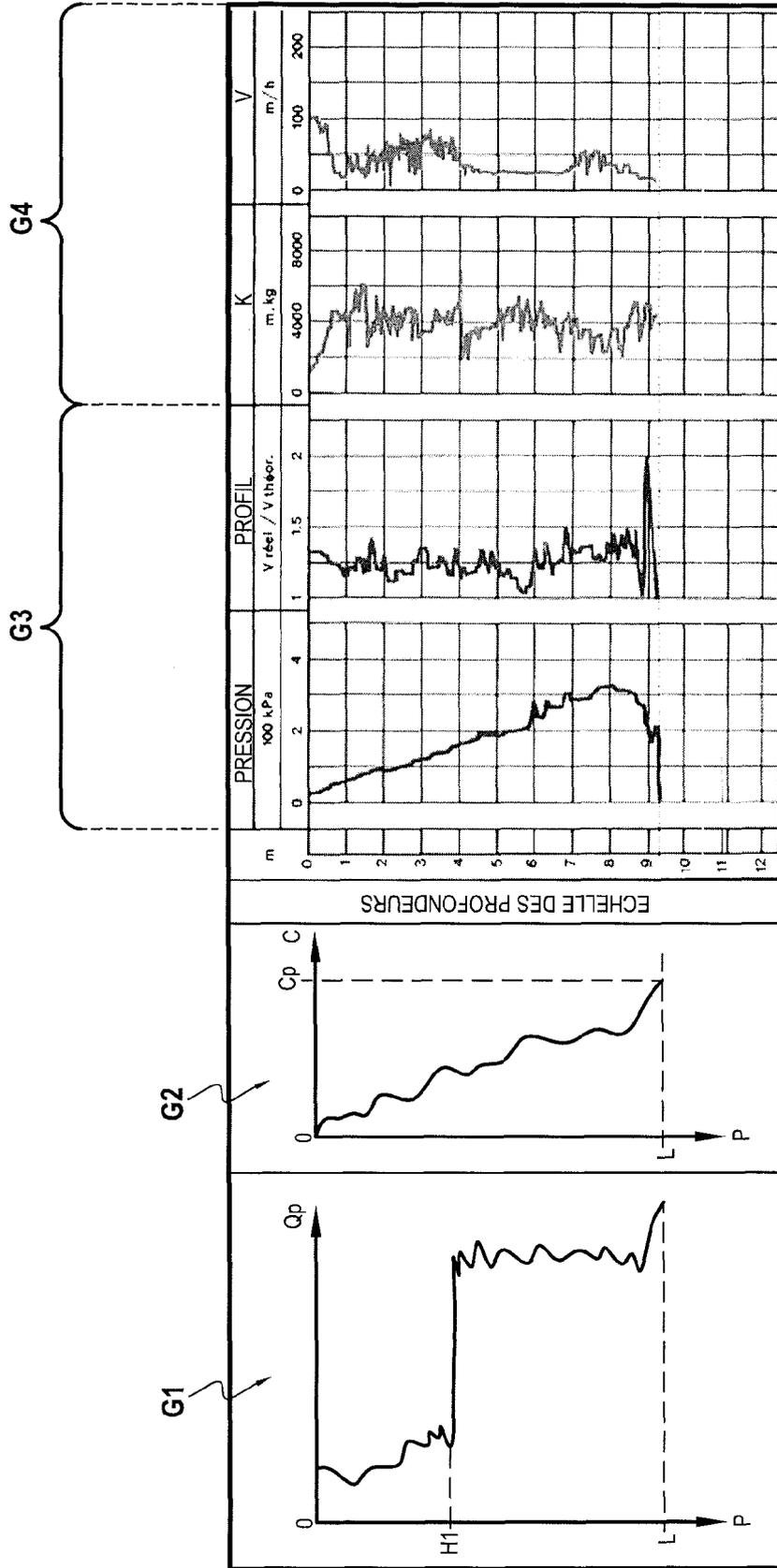


FIG.7

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

- FR 2566813 [0004] [0027] [0065]