

Procédé et système de mesure de résistivité du sous-sol

DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention est relative à un système de mesure de caractéristiques électriques du sous-sol autour d'un forage, et à un procédé de caractérisation du sous-sol utilisant un tel dispositif de mesure.

ETAT DE LA TECHNIQUE

La présente invention est particulièrement relative à un procédé et un dispositif de mesure de la résistivité électrique du sous-sol, dans lesquels on injecte un courant électrique dans le sous-sol et on mesure (simultanément) des différences de potentiel électrique dans le sous-sol qui résultent de l'injection de courant.

On utilise généralement à cet effet des quadruplets d'électrodes enfouies dans un forage et formant des quadripôles. Selon les positions respectives des deux électrodes du quadripôle servant à injecter le courant et des deux électrodes servant à mesurer une différence de potentiel, la méthode de mesure correspondante est généralement qualifiée de méthode Wenner, Schlumberger, ou dipôle-dipôle, notamment.

L'invention concerne notamment un dispositif de mesure de caractéristiques électriques du sous-sol qui comporte un appareil de sondage équipé de plusieurs électrodes placées au contact du sous-sol, un module d'alimentation pour l'injection dans le sous-sol d'un courant électrique, par l'intermédiaire d'une paire d'électrodes de l'appareil de sondage, et une unité d'acquisition, de traitement, et de télécommunication de données de mesure résultant de mesures de tension électrique entre une autre paire d'électrodes de l'appareil de sondage.

Le brevet EP1923725 décrit un tel dispositif de mesure dans lequel les électrodes sont solidarisées à un support tubulaire d'électrodes qui s'étend à l'intérieur d'un forage creusé dans le sol.

Afin de pouvoir scruter successivement les électrodes et de pouvoir raccorder les électrodes aux bornes/potentiels de mesure ou d'injection de courant souhaité(e)s, il est prévu dans les brevets EP1923725 et US2005078011 quatre interrupteurs adressables situés à proximité de – et reliés à – chaque électrode, qui servent à sélectionner la fonction souhaitée pour l'électrode considérée.

Dans le brevet EP1923725, ces interrupteurs adressables sont reliés à l'unité d'acquisition et de traitement de données par un bus d'adressage qui sert à transmettre des commandes d'état des interrupteurs adressables, afin d'obtenir successivement les connexions électriques (liaisons équipotentielle entre les électrodes et le module d'alimentation d'une part et l'unité d'acquisition d'autre part) correspondant aux mesures souhaitées.

Il s'est avéré que le fonctionnement correct de ces dispositifs ne peut être assuré que lorsque le nombre d'interrupteurs adressables est limité à quelques dizaines d'unités. Il en résulte que le nombre d'électrodes utilisables est très limité.

Cet inconvénient est accru lorsque l'on utilise plusieurs voltmètres pour mesurer les différences de potentiels, comme décrit dans le brevet US2005078011.

Il s'est avéré par ailleurs que le bon fonctionnement de ces dispositifs ne peut être assuré que lorsque les électrodes et les interrupteurs adressables qui leur sont associés sont situés à une faible distance de l'appareil de mesure de tension (différence de potentiels).

Le document WO2011/158103 décrit un dispositif transportable de mesure de la résistivité qui comporte un module de mesure par électrode, les modules de mesure de tension étant reliés par des câbles à un générateur de courant d'injection, et qui comporte un module de commande centralisée servant à gérer et enregistrer les mesures de tension obtenues.

Chaque module de mesure comporte une unité - ou chaîne - de mesure comportant un amplificateur, un convertisseur analogique digital (CAD), et un microcontrôleur.

Chaque module de mesure comporte en outre une unité de stockage de données de mesure de tension, un dispositif de commutation, un dispositif de communication à distance servant à recevoir des commandes ou à transmettre des données de mesure à une unité distante, qui sont raccordés au microcontrôleur.

Le dispositif de commutation est commandé par le microcontrôleur et sert à relier l'électrode associée au module de mesure, soit à un des câbles connectés au générateur de courant, soit à l'amplificateur d'entrée de la chaîne de mesure, soit à une jonction de référence.

La transmission des données de mesure depuis les microcontrôleurs jusqu'au module de commande centralisée s'effectue par un circuit de transmission incluant un ou plusieurs câbles, ou par transmission sans fil.

Les modules de mesure sont raccordés aux câbles par des connecteurs débrochables et comportent des moyens de localisation automatique par mesure de la résistance des câbles et/ou de positionnement par satellite de type GPS.

Ce dispositif n'est pas adapté pour être installé à demeure dans un forage et pour réaliser des mesures pendant une longue durée.

Le document US2005/264295 décrit un dispositif de mesure de la résistivité du sous-sol au travers d'un conduit conducteur équipant un forage, à l'aide d'un appareil suspendu à un câble et déplaçable dans le conduit, et d'électrodes de retour placées au contact du conduit ou engagées dans le sol autour du forage.

L'appareil mobile comporte une électrode d'injection et des électrodes de mesure de tension, ainsi qu'une unité de commande et de traitement servant à commander l'injection de courant et à gérer les données de mesure de tension délivrées par des convertisseurs CAD respectivement associés aux électrodes de mesure de tension.

Ce dispositif n'est pas non plus adapté pour être installé à demeure dans un forage et pour réaliser des mesures pendant une longue durée.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Un objectif de l'invention est de proposer un dispositif de mesure de résistivité du sous-sol en continu, un système de caractérisation du sous-sol incluant ce dispositif, et un procédé de caractérisation du sous-sol utilisant ce dispositif, qui soi(en)t amélioré(s) et/ou qui remédie(nt), en partie au moins, aux lacunes ou inconvénients des procédés, dispositifs, et systèmes connus de caractérisation du sous-sol à partir de mesures de tension électriques résultant de l'injection de courant dans le sous-sol.

Selon un aspect de l'invention, il est proposé un dispositif de mesure de résistivité du sous-sol qui comporte :

- un support d'électrodes s'étendant sur la hauteur du forage et supportant plusieurs dizaines d'électrodes E1 à E3 mises au contact du sous-sol et réparties le long du support ;

- une unité UAT de traitement et de télécommunication agencée pour traiter et transmettre à distance des données de mesure résultant de mesures de tension électrique entre une paire d'électrodes E1 à E3 du support ;

- un module d'alimentation pour l'injection dans le sous-sol d'un courant électrique par l'intermédiaire d'une paire d'électrodes (E1 à E3) ;

- un sélecteur S de fonction associé à chaque électrode pour la relier soit au module d'alimentation, soit à des moyens de mesure de tension ;

- des moyens de commande d'état des sélecteurs de fonction, qui coopèrent avec l'unité UAT de traitement et de télécommunication de données de mesure ;

le dispositif de mesure comporte en outre, pour chaque électrode, une unité AD de conversion d'une tension (analogique) en donnée (numérique) de mesure qui est reliée à une borne du sélecteur S de

fonction, et une unité P, CS de communication et de commande reliée au sélecteur S de fonction, à l'unité AD de conversion, et à un bus B de transport de données de mesure relié à l'unité UAT de traitement et de télécommunication ; et l'unité P, CS de communication et de commande associée à chaque électrode est agencée (programmée) pour commander le sélecteur S de fonction et l'unité AD de conversion, et pour transmettre des données de mesure de tension délivrées par l'unité AD de conversion, à l'unité UAT de traitement et de télécommunication, par l'intermédiaire du bus B de transport de données de mesure.

Les moyens de commande d'état des sélecteurs peuvent être reliés ou incorporés à l'unité UAT de traitement.

En particulier, la commande d'état des sélecteurs est de préférence réalisée par l'unité P, CS de communication et de commande, en fonction d'instructions envoyées par l'unité UAT, par l'intermédiaire du bus.

Le bus B de transport de données est alors agencé et utilisé pour transporter des données de commande d'état des sélecteurs de fonction respectivement associés aux électrodes, depuis l'unité UAT de traitement et de télécommunication, jusqu'aux unités P, CS de communication et de commande associées aux électrodes, et ces données de commande sont utilisées par chaque unité P, CS de communication et de commande pour commander l'état du sélecteur de fonction de l'électrode correspondante.

Selon un mode préféré de réalisation, le dispositif de mesure comporte, pour chaque électrode, un microcontrôleur (μ C) comportant l'unité AD de conversion analogique/numérique et l'unité P, CS de communication et de commande.

Il résulte de l'invention que le dispositif de mesure peut comporter autant d'électrodes que de microcontrôleurs (et/ou que d'unités P, CS de communication et de commande) avec lesquels le bus servant au transport de données de mesure et généralement de données de commande d'état, peut communiquer.

En pratique, le dispositif de mesure peut ainsi comporter une ou plusieurs centaines d'électrodes – et autant de microcontrôleurs -.

Il en résulte également que les mesures de tension sont réalisées et converties en données numériques au plus près des sélecteurs de fonction associés aux électrodes, ce qui réduit ou empêche la dégradation de ces mesures.

L'invention permet en outre de mesurer, sensiblement simultanément, par plus de deux électrodes, les potentiels électriques induits par une injection de courant dans le sous-sol.

L'invention permet en particulier de mesurer, pour chaque injection de courant, les potentiels électriques induits et les différences de potentiel correspondantes, dans toutes les électrodes liées au support d'électrodes autres que les électrodes servant à injecter le courant dans le sous-sol.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de mesure comporte, pour chaque électrode, un filtre inséré entre la borne de mesure de tension du sélecteur de fonction, et l'unité AD de conversion analogique/numérique, en particulier un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure peut être de l'ordre de 1 à 10 Hertz environ. Ceci permet d'améliorer la qualité des mesures de tension effectuées, en éliminant de la tension mesurée, une ou plusieurs composante(s) parasites.

Selon un mode de réalisation, le dispositif de mesure comporte, pour chaque électrode, un amplificateur inséré entre la borne de mesure de tension du sélecteur de fonction, et l'unité AD de conversion analogique/numérique, en particulier entre ledit filtre et l'unité AD de conversion. Ceci permet également d'améliorer la qualité des mesures de tension effectuées, en adaptant la tension appliquée en entrée du convertisseur analogique-numérique, à la dynamique de ce convertisseur.

A cet effet, en outre, des données de calibration peuvent être enregistrées dans une mémoire incorporée ou associée à l'unité de

traitement UAT, afin de corriger ou compenser les données de mesure de tension respectivement délivrées par les convertisseurs correspondants, en fonction des caractéristiques de sensibilité et/ou linéarité propres à chaque « chaîne de mesure », c'est-à-dire propres à chaque convertisseur – et le cas échéant au filtre et à l'amplificateur - qui est (sont) associé(s) à chacune des électrodes.

L'invention permet de disposer dans le forage, en particulier sur le support d'électrodes, les microcontrôleurs et les sélecteurs de fonction des électrodes, ainsi que, le cas échéant, les filtres et amplificateurs. Alternativement, ces composants peuvent être disposés en surface, à proximité du forage.

Selon un autre aspect de l'invention, il est proposé un système de mesure de résistivité du sous-sol qui comporte un dispositif selon l'invention et un serveur distant agencé, en particulier programmé, pour communiquer avec l'unité UAT de traitement et de télécommunication du dispositif de mesure.

Le serveur peut être un ordinateur capable d'échanger des données avec l'unité UAT, par l'intermédiaire d'un réseau de télécommunication.

Le serveur est généralement agencé, en particulier programmé, pour provoquer la transmission par l'unité UAT de traitement et de télécommunication, à destination du serveur, de données de mesure de tension enregistrées dans une mémoire reliée ou intégrée à l'unité UAT de traitement et de télécommunication.

Le serveur peut en outre être agencé, en particulier programmé, pour transmettre à l'unité UAT de traitement et de télécommunication, des données de configuration de mesure de tension, et/ou pour déterminer la conductivité d'un fluide poral contenu dans une région du sous-sol entourant le forage contenant le support d'électrodes du dispositif de mesure, en fonction des données de résistivité et/ou de tension électrique qui sont transmises au serveur par l'unité UAT de traitement et de télécommunication.

L'unité UAT de traitement et de télécommunication est de préférence agencée pour modifier, de manière indépendante et autonome, l'acquisition des mesures de résistivité en fonction de mesures de tension déjà effectuées, en fonction de données de mesure de paramètres de l'environnement du dispositif, et/ou en fonction des données de configuration de mesure de tension.

Selon un autre aspect, il est proposé un procédé de mesure de caractéristiques du sous-sol dans lequel on utilise un dispositif ou un système de mesure selon l'invention.

Le dispositif de mesure selon l'invention peut être installé sur un site pour fonctionner de façon permanente et autonome, en continu, sans nécessiter d'interventions sur le site.

D'autres aspects, caractéristiques, et avantages de l'invention apparaissent dans la description suivante qui se réfère aux figures annexées et illustre, sans aucun caractère limitatif, des modes préférés de réalisation de l'invention.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

La figure 1 est un schéma illustrant les principaux composants d'un dispositif de mesure selon l'invention ainsi que leurs interconnexions, selon un mode de réalisation.

La figure 2 est un schéma illustrant plus en détail le microcontrôleur associé à chacune des électrodes d'un dispositif de mesure selon l'invention.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

Sauf indication explicite ou implicite contraire, des éléments ou organes – structurellement ou fonctionnellement – identiques ou similaires sont désignés par des repères identiques sur les différentes figures.

Les mesures délivrées par un dispositif selon l'invention peuvent être basées sur la méthode d'investigation électrique suivante: deux électrodes sont choisies pour injecter le courant dans le sous-sol, et deux autres électrodes disposées à proximité des précédentes, servent à

mesurer la tension générée/induite dans le sous-sol qui est fonction de la résistivité du milieu, et plus particulièrement du fluide contenu dans la roche.

Une telle méthode permet notamment une détection des variations de conductivité de l'eau des aquifères. Dans les roches et les sols superficiels saturés, la détection de variation de conductivité électrique dépend directement de la connaissance de l'état initial du système, tant d'un point de vue géologique (variabilité spatiale du milieu), hydrogéologique (conductivité électrique du fluide poral) que pétrophysique (porosité, connectivité porale).

Une caractérisation pétrophysique du milieu naturel à partir de diagraphies et de carottes permet de soustraire aux résultats de mesure électrique l'ensemble des contributions généralement invariantes à haute fréquence temporelle, et permet ainsi de calibrer le système de mesure basé sur ces méthodes.

L'invention facilite le suivi dynamique de la conductivité de l'eau, la mesure par investigation électrique de la résistivité du milieu, et notamment la conductivité de l'eau qui augmente avec la salinité.

En effet, la résistivité dépend de la conductivité surfacique (C_s) généralement associée à la présence d'argiles, de la structure topologique de la porosité, du degré de saturation du milieu poreux, et de la conductivité du fluide poral en fonction de la salinité et de la température.

Dans un mode de réalisation d'un procédé de mesure selon l'invention, on convertit automatiquement des données de résistivité électrique transmises à un serveur par un dispositif de mesure, en données de conductivité du fluide poral présent dans le sous sol, autour du support d'électrodes du dispositif de mesure.

Par référence aux figures 1 et 2, le dispositif 10 de mesure de caractéristiques du sous-sol comporte une pluralité d'électrodes E1 à E3, sensiblement identiques, solidaires d'un support SU commun, partiellement représenté, qui s'étend sur toute la hauteur d'un puits ou

forage pratiqué dans le sol, par exemple un forage vertical s'étendant sur une profondeur de plusieurs dizaines ou centaines de mètres.

Le support SU peut-être un support tubulaire réalisé dans un matériau électriquement isolant, sur la surface extérieure duquel peuvent être serties des électrodes de forme annulaire.

Alternativement, le support SU peut être essentiellement constitué par un faisceau de conducteurs isolés, une extrémité de chaque conducteur étant relié à une électrode.

Le dispositif 10 comporte en outre des cartes de mesure CM1 à CM3 identiques et en nombre égal à celui des électrodes.

Chaque carte de mesure est reliée à une (seule) électrode par un conducteur 11 formant une liaison équipotentielle.

Chaque carte de mesure est également reliée à un câble 14 par deux conducteurs 12, 13, ainsi qu'à un câble 17 d'alimentation par deux conducteurs 15, 16.

Le câble 14 comporte deux conducteurs respectivement reliés aux bornes positive et négative d'une source de courant AL1 conçue pour délivrer un courant électrique à injecter dans le sous-sol.

Le câble 17 comporte deux conducteurs respectivement reliés aux bornes positive et négative d'une seconde source de courant AL2 conçue pour alimenter les composants des cartes de mesure.

Le dispositif 10 comporte également un bus B qui peut être un bus série de type RS485, qui sert au transport de données de mesure délivrées par les cartes CM1 à CM3, et au transport de commandes destinées aux processeurs P des microcontrôleurs μ C des cartes CM1 à CM3.

Le dispositif de mesure comporte aussi une unité électronique UAT de traitement et de télécommunication qui peut être essentiellement constituée par un ordinateur industriel de type PC équipé d'un – ou relié à un – émetteur récepteur d'ondes radio, de sorte que l'unité UAT peut transmettre à distance des données, notamment des données de mesure résultant de mesures de tension électrique entre des paires d'électrodes

du support SU, et peut recevoir des données de commande, notamment des données prévues pour modifier son fonctionnement.

L'unité UAT sert notamment à commander et contrôler le fonctionnement des modules d'alimentation AL1, AL2, ainsi que du bus B auquel l'unité UAT est reliée par l'intermédiaire d'une interface de bus IB.

Chacune des cartes de mesure CM1 à CM3 comporte un sélecteur S de fonction servant à relier l'électrode associée à la carte considérée, soit à l'un des conducteurs du câble 14 de transport du courant d'injection, soit à l'entrée d'une chaîne de mesure de tension.

Chaque sélecteur S peut être essentiellement constitué par un commutateur à trois positions assurant la commutation entre les trois positions fonctionnelles illustrées figure 1, sur laquelle :

- le sélecteur S de la carte de mesure CM1 assure une liaison équipotentielle entre les conducteurs 11 et 12, afin de relier l'électrode E1 à la borne positive de l'alimentation d'injection AL1 ;
- le sélecteur S de la carte de mesure CM2 assure une liaison équipotentielle entre les conducteurs 11 et 13, afin de relier l'électrode E2 à la borne négative de l'alimentation d'injection AL1 ;
- le sélecteur S de la carte de mesure CM3 assure une liaison équipotentielle entre le conducteur 11 et une borne (repérée 18 figure 2) d'entrée d'une chaîne de mesure de tension, afin de relier l'électrode E3 à cette chaîne de mesure.

Pour ne pas nuire à la clarté de la figure 1, seules trois électrodes et leurs cartes de mesure associées ont été représentées.

En pratique, pour chaque mesure de résistivité, on utilise au moins une quatrième électrode et une quatrième carte de mesure pour laquelle le sélecteur S de fonction sera commandé pour présenter le même état de commutation que celui représenté pour la carte CM3. La mesure de résistivité du sous-sol est alors basée sur la différence entre les tensions respectivement mesurées par les convertisseurs AD de la carte CM3 et de cette quatrième carte de mesure.

Chacune des cartes de mesure CM1 à CM3 comporte en outre un microcontrôleur μC servant d'une part à piloter le sélecteur de fonction S de la carte de mesure dont il fait partie, d'autre part à mesurer la tension entre la borne 18 de mesure du sélecteur S et un conducteur 19 reliant les cartes de mesure et servant d'équipotentielle commune de référence pour les mesures de tension.

Chaque microcontrôleur μC est relié au bus B par une liaison 20, afin d'une part de recevoir des commandes d'état du sélecteur S, d'autre part d'adresser à l'unité UAT le résultat de mesure de tension effectuée.

Chaque microcontrôleur μC comporte un processeur P ainsi qu'une mémoire M, un convertisseur analogique numérique AD, et un port CS de commande de sélecteur, qui sont reliés au processeur P.

Chaque port de commande CS est relié au sélecteur S par une liaison représentée par un trait interrompu.

Chaque convertisseur AD est relié à la borne 18 de mesure du sélecteur S par l'intermédiaire d'un filtre F et d'un amplificateur A connectés en série entre cette borne 18 et une entrée du convertisseur AD.

Pour commander la position du sélecteur S d'une carte de mesure en fonction d'une commande d'état transmise à la carte considérée par le bus B, le processeur P de la carte transmet un signal de commutation au sélecteur S par l'intermédiaire du port CS du microcontrôleur.

Lorsque cette commande d'état a pour but de placer le commutateur du sélecteur S dans l'état de commutation illustré pour la carte CM3 figure 1 et servant à effectuer une mesure de tension, le processeur P transmet en outre un signal de commande au convertisseur AD afin que ce dernier effectue une mesure et une conversion de la tension présente à ses bornes d'entrée, puis commande la mémorisation des données résultant de cette conversion, dans la mémoire M.

L'acquisition des mesures électriques peut être effectuée par l'unité UAT, selon des paramètres de mesure stockés dans un fichier de

configuration initiale, dans une mémoire de l'UAT, et qui déterminent le fonctionnement du dispositif de mesure.

Les paramètres de mesure peuvent comprendre la tension, l'intensité, et la forme du courant d'injection délivré par l'alimentation AL1, le nombre d'électrodes utilisées, le nombre de mesures à effectuer successivement, un seuil de détection (de mesure de tension).

Le fichier de configuration peut être modifié par l'unité UAT en fonction de données de modification de configuration de mesure transmises à l'UAT par un serveur distant (non représenté).

Le fichier de configuration peut être modifié par l'unité UAT en fonction de résultats de mesures de tension (et/ou de résistivité) déjà effectuées.

En particulier, l'unité UAT peut être programmée pour provoquer périodiquement, pour chaque quadripôle de mesure : une première injection de courant, suivie de la collecte des paramètres (courant et tension d'injection notamment) mesurés pour cette injection, ainsi que des tensions mesurées par les deux électrodes du quadripôle utilisées pour mesurer les tensions induites par l'injection.

L'unité UAT peut être programmée pour ajuster la puissance d'injection pour des mesures ultérieures, en fonction des résultats de mesure pour cette première injection afin notamment d'optimiser l'amplitude des tensions induites mesurées en fonction de la dynamique de mesure des convertisseurs AD des cartes CM1 à CM3, et/ou en fonction du bruit ambiant.

Ceci peut également permettre d'éviter la saturation des convertisseurs AD. A cet effet, chaque processeur P peut être programmé pour détecter une telle saturation et pour transmettre dans ce cas une donnée correspondante à l'UAT, par l'intermédiaire du bus B.

L'unité UAT peut être programmée pour adapter les commandes d'état des sélecteurs de fonction associés aux électrodes, en fonction de données de commande de méthode de mesure (dipôle-dipôle, Wenner, Schlumberger...) transmises à l'UAT par le serveur, afin de déterminer la

méthode de mesure la mieux adaptée aux caractéristiques du sous-sol et aux mesures électriques.

L'unité UAT de traitement et de télécommunication est agencée pour modifier l'acquisition des mesures de résistivité en fonction de données de mesure de paramètres de l'environnement du dispositif.

En particulier, l'unité UAT peut être programmée pour augmenter – ou au contraire diminuer – la fréquence d'acquisition des mesures ou l'intensité du courant injecté dans le sol, en fonction de la quantité d'énergie électrique disponible dans des batteries – et/ou délivrée par des capteurs solaires ou une autre source d'énergie - servant à alimenter le dispositif de mesure. A cet effet, le dispositif de mesure peut comporter un capteur adapté qui est relié à l'unité UAT.

De même, lorsqu'une mesure de tension inférieure à une amplitude correspondant au bruit ambiant (préalablement enregistré) est détectée par le processeur P d'une des cartes de mesure lors de l'injection, ce processeur peut être programmé pour transmettre alors une information en ce sens à l'unité UAT qui peut alors commander une augmentation de la puissance électrique à injecter dans le sous-sol, afin d'obtenir ensuite une lecture supérieure au bruit tout en évitant la saturation (dans les limites de puissance de l'alimentation d'injection).

L'unité UAT est programmée pour piloter les cartes de mesures en leur adressant des commandes par l'intermédiaire du bus B, notamment pour paramétrer (fonctionnaliser) les cartes en injection de courant ou en mesure de tension.

Ainsi, par la commande de l'état de commutation du commutateur du sélecteur S, chaque électrode d'un quadripôle peut être affectée à l'une des quatre fonctions suivantes : injection positive (+), injection négative (-), mesure positive (+), mesure négative (-).

A cet effet, chaque carte/microcontrôleur est identifié(e) sur le bus B par un numéro unique, par exemple codé sur 6 bits, et chaque processeur P est programmé pour décoder des instructions de paramétrage de la carte de mesure dont il fait partie, par exemple codées

sur 2 bits de poids fort, qui lui sont adressées par l'UAT et transmises par le bus.

Trois instructions destinées à la commande du sélecteur de fonction peuvent par exemple être codées de la façon suivante :

00 : lecture de tension par le convertisseur AD de la carte, par rapport à la référence de tension, et mise en mémoire tampon (M),

01 : (« injection - ») fermeture d'un relais du sélecteur S pour relier l'électrode à la borne négative (-) de l'alimentation d'injection AL1,

10 : (« injection + ») fermeture d'un relais du sélecteur S pour relier l'électrode à la borne positive (+) de l'alimentation d'injection AL1.

Dans cette hypothèse, l'envoi par l'unité UAT du code « 10000011 » sur le bus B permet de commander l'état de commutation du sélecteur de fonction de la carte de mesure numéro 3 (« 000011 »), pour que l'électrode reliée à cette carte soit affectée à la fonction « injection + ».

Pour chaque carte CM1 à CM3 servant à effectuer une mesure de tension, la donnée de mesure délivrée par le convertisseur AD de la carte est stockée de manière temporaire dans la mémoire de la carte, jusqu'à ce que le processeur P de la carte détecte une instruction de lecture de mesure et transmette cette donnée à l'unité UAT par l'intermédiaire du bus.

Pour réaliser une acquisition, l'unité UAT peut par exemple envoyer sur le bus B la séquence d'instructions suivante:

1 : placer le sélecteur S de la carte CM1 dans l'état correspondant à la fonction « injection + » ;

2 : placer le sélecteur S de la carte CM2 dans l'état correspondant à la fonction « injection - » ;

3 : placer les sélecteurs S des autres cartes de mesure qui sont raccordées au bus B, dans l'état correspondant à la mesure de tension ;

4 : lecture des mémoires M de tout ou partie des autres cartes de mesure.

L'unité UAT peut être programmée pour corriger les données de mesure de tension délivrées par les convertisseurs des cartes de mesure

et transmises par le bus, à l'aide de données de calibration préalablement enregistrées dans une mémoire de l'unité UAT.

L'unité UAT peut également être programmée pour réaliser des calculs de moyennes et d'écart type des mesures transmises par le bus, pour enregistrer les résultats de mesure, et pour transmettre ces résultats à un serveur distant, notamment en réponse à une demande effectuée par le serveur.

L'invention procure un système de mesure de la résistivité du sous-sol autour d'un forage réalisé à cet effet, qui permet d'obtenir, de façon simple et autonome, pendant une durée qui peut être de plusieurs années, l'obtention de données de résistivité et d'autres caractéristiques du sous-sol liées à la résistivité.

Revendications

1 – Système de mesure de résistivité du sous-sol autour d'un forage, qui comporte :

i) un dispositif (10) de mesure de résistivité comportant :

- un support (SU) d'électrodes s'étendant sur la hauteur du forage et supportant plusieurs dizaines d'électrodes (E1 à E3) mises au contact du sous-sol,

- un module d'alimentation pour l'injection dans le sous-sol d'un courant électrique par l'intermédiaire d'une paire d'électrodes (E1 à E3),

- une unité (UAT) de traitement et de télécommunication agencée pour transmettre à distance des données de mesure résultant de mesures de tension électrique entre des paires d'électrodes (E1 à E3) du support,

- un sélecteur (S) de fonction associé à chaque électrode pour la relier soit au module d'alimentation, soit à des moyens de mesure de tension,

- des moyens de commande d'état des sélecteurs de fonctions qui sont reliés ou intégrés à l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication,

- un bus (B) de transport de données de mesure relié à l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication,

et, pour chaque électrode, un microcontrôleur (μ C) comportant une unité (AD) de conversion analogique-numérique reliée à une borne du sélecteur (S) de fonction et faisant partie des moyens de mesure de tension, et une unité (P, CS) de communication et de commande reliée au sélecteur (S) de fonction, à l'unité (AD) de conversion, et au bus (B) de transport de données de mesure; l'unité (P, CS) de communication et de commande associée à chaque électrode étant agencée pour commander le sélecteur (S) de fonction et l'unité (AD) de

conversion et pour transmettre des données de mesure de tension délivrées par l'unité (AD) de conversion, à l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication, par l'intermédiaire du bus (B) de transport de données de mesure ; et

ii) un serveur distant agencé pour communiquer avec l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication du dispositif (10) de mesure de résistivité et pour transmettre à l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication, des données de configuration de mesure de tension,

l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication étant agencée pour modifier l'acquisition des mesures de résistivité en fonction de mesures de tension déjà effectuées, et en fonction des données de configuration de mesure de tension.

2 – Système selon la revendication 1 dans lequel l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication est agencée pour modifier l'acquisition des mesures de résistivité en fonction de données de mesure de paramètres de l'environnement du dispositif.

3 – Système selon la revendication 1 ou 2 dans lequel le bus (B) de transport de données est agencé et utilisé pour transporter des données de commande d'état des sélecteurs de fonction respectivement associés aux électrodes, depuis l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication, jusqu'aux unités (P, CS) de communication et de commande associées aux électrodes, et ces données de commande sont utilisées par chaque unité (P, CS) de communication et de commande pour commander l'état du sélecteur de fonction de l'électrode correspondante.

4 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 3 qui comporte, pour chaque électrode, un filtre (F) inséré entre une borne de mesure de tension du sélecteur de fonction et l'unité (AD) de conversion analogique/numérique, en particulier un filtre passe-bas.

5 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4 qui comporte, pour chaque électrode, un amplificateur (A) inséré entre une

borne de mesure de tension du sélecteur de fonction et l'unité (AD) de conversion analogique/numérique, en particulier entre ledit filtre (F) et l'unité (AD) de conversion.

6 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 5 dans lequel des données de calibration sont enregistrées dans une mémoire de l'unité (UAT), afin de corriger ou compenser les données de mesure de tension respectivement délivrées par les convertisseurs (AD), en fonction des caractéristiques de sensibilité et/ou linéarité propres au convertisseur associé à chacune des électrodes.

7 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel les microcontrôleurs et les sélecteurs de fonction des électrodes sont disposés dans le forage, en particulier sur le support (SU) d'électrodes.

8 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel les microcontrôleurs et les sélecteurs de fonction des électrodes sont disposés en surface, à proximité du forage.

9 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 dans lequel le serveur est agencé pour provoquer la transmission par l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication, à destination du serveur, de données de mesure de tension enregistrées dans une mémoire reliée ou intégrée à l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication.

10 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 dans lequel Le support SU est un support tubulaire réalisé dans un matériau électriquement isolant, sur la surface extérieure duquel sont serties des électrodes de forme annulaire.

11 – Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 dans lequel le serveur est agencé pour déterminer la conductivité d'un fluide poral contenu dans une région du sous-sol entourant le forage contenant le support d'électrodes du dispositif de mesure, en fonction des données de résistivité et/ou de tension électrique qui sont transmises au serveur par l'unité (UAT) de traitement et de télécommunication.

12 - Procédé de mesure de caractéristiques du sous-sol autour d'un forage dans lequel on utilise un système selon l'une quelconque des revendications 1 à 11.