

Conception d'une foreuse-carotteuse pour l'exploration de la zone critique

Mikaël Fauchoux¹, Gilles Dutin², David Aoustin³, Chantal Leroyer⁴, Christophe Petton⁵,

Nataline Simon⁵, Christian Walter²

Résumé. Les observations du sol et du sous-sol dans les domaines de l'hydrogéologie, des sciences du sol et de l'archéologie sont indispensables pour apporter de nouvelles connaissances. Ces observations sont réalisées par des prélèvements manuels de sol à la tarière ou par la mise en place de forages. Le nombre croissant et les difficultés de mise en œuvre de ces observations ont conduit trois laboratoires de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR) à collaborer pour concevoir, acquérir et mutualiser un outil motorisé de type foreuse-carotteuse permettant de faciliter la réalisation de leurs observations. Cet article a pour objectif de présenter la conception de l'outil puis de décrire les différentes fonctionnalités et utilisations illustrées par trois exemples de réalisation. Après huit années d'utilisation, cet équipement mutualisé au sein de l'OSUR permet de répondre aux besoins des chercheurs. Il diminue la pénibilité d'exécution des observations, améliore la rapidité et apporte une certaine autonomie aux laboratoires vis à vis d'entreprises extérieures.

Mots clés : forage, carottage, sol, sous-sol, zone critique, foreuse, carotteuse

Introduction

L'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR) rassemble plusieurs laboratoires de recherche en environnement qui effectuent de nombreuses observations pour l'exploration de la zone critique. Cette zone désigne la mince pellicule superficielle de la Terre à l'interface entre la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère (**Figure 1**).



Figure 1. La zone critique (schéma SOERE RBV) http://portailrbv.sedoo.fr/?locale=fr#CMSConsultPlace:HUMANITY_CRITICAL_ZONE

¹ INRA, UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, 35000 Rennes, France

² Agrocampus Ouest, UMR Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, 35000 Rennes, France

³ CNRS, UMR UMR 6566 CReAAH, 35000 Rennes, France

⁴ Ministère de la Culture, UMR 6566 CReAAH, 35000 Rennes, France

⁵ CNRS - Université Rennes 1, UMR 6118 Géosciences Rennes, 35000 Rennes, France

mikael.fauchoux@inra.fr

L'exploration de ces trois compartiments implique la réalisation de prélèvements sur le terrain, dont le nombre et la densité sont en augmentation constante sur des superficies de plus en plus grandes. En effet, des observations de plus en plus nombreuses sont nécessaires aux chercheurs pour la construction et l'optimisation de modèles numériques qui permettent de répondre aux enjeux de production agricole et aux enjeux environnementaux. Par ailleurs, en recherche archéologique de nombreuses observations sont indispensables pour appréhender les environnements dans lesquels se sont implantés les sites archéologiques.

Or, la réalisation de ces prélèvements pour explorer la partie lithosphère-hydrosphère est parfois limitée par des difficultés techniques et un coût important de mise en œuvre. Par exemple, dans le domaine de l'étude des sols, la réalisation de prélèvements manuels à la tarière est contraignante en termes de pénibilité et de temps d'exécution. Dans le domaine de l'étude du fonctionnement des nappes superficielles, des forages peu profonds (<10 m) permettent d'échantillonner l'eau souterraine. Néanmoins, la réalisation de ces forages par des entreprises extérieures est lourde en termes d'organisation et de coût.

Au sein du Service de Soutien aux Systèmes d'Observation (S3O) de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR), il a été décidé de concevoir un outil motorisé pour alléger les travaux d'échantillonnage de sol, acquérir une plus grande autonomie pour la réalisation de forages peu profonds et partager ainsi l'expertise acquise sur ce type de réalisations. Après la rédaction d'un cahier des charges et en collaboration avec un constructeur, un véhicule 4X4 léger a été équipé d'un outil combinant une foreuse et une carotteuse. La carotteuse permet d'effectuer des échantillonnages de sol jusqu'à 10 m de profondeur sous forme de carotte. La foreuse est composée d'une tarière hélicoïdale de diamètre 114 mm pour effectuer des forages dans des matériaux meubles jusqu'à 10,5 m de profondeur. Grâce au véhicule, il est possible de se déplacer rapidement d'un point de carottage/forage à l'autre dans un paysage agricole.

Cet article présente dans un premier temps le cahier des charges préalable à la conception de l'outil puis une description générale de l'ensemble du véhicule outillé qui a été réalisé. Par la suite, la fonction carottage, la fonction forage et les modifications effectuées après 3 ans pour sa mise en sécurité sont décrites. Pour finir, quelques exemples d'utilisations dans le cadre de programmes de recherche illustrent l'intérêt, les avantages et les limites de ce matériel pour une structure fédérative de recherche telle que l'OSUR.

Le cahier des charges

Le cahier des charges a été établi par les trois laboratoires rennais qui ont financé le projet (UMR Géosciences Rennes, UMR CReAAH ⁶ et l'UMR SAS ⁷). Plusieurs réunions entre techniciens et chercheurs des trois UMR ont été nécessaires pour rédiger une première version du cahier des charges contenant les différents besoins et les contraintes liées à un matériel déjà existant (un porteur Kawasaki® de type Mule). Cette première version du cahier des charges, nous a permis de prendre contact avec trois fournisseurs pour obtenir des informations techniques très précises et échanger sur la faisabilité du projet notamment la possibilité d'installer un marteau et une tête de rotation sur un seul mât. Ces informations ont été mises à profit lors de nouvelles réunions entre les trois UMR et un cahier des charges plus précis et techniquement réalisable a été rédigé. Cette deuxième version a donné lieu un appel d'offre CNRS déposé en novembre 2008. Par la suite, une convention entre les trois UMR a été rédigée et signée afin de statuer sur la co-propiété, le stockage, le fonctionnement et la maintenance du matériel.

Les différents besoins

Les thématiques de recherche des trois laboratoires de l'OSUR impliqués dans le projet de foreuse-carotteuse sont multidisciplinaires et nécessitent des observations paléo-environnementales autour des sites archéologiques, pédologiques et hydrogéologiques. Ces observations sont réalisées à partir de prélèvements manuels ou d'équipements installés de manière pérenne sur site. Afin de restituer les environnements dans lesquels se sont implantés les sites archéologiques fouillés par l'UMR CReAAH, des sondages et des carottages de 1 à 15 m de profondeur sont réalisés. Les premiers sont destinés à appréhender la nature et la géométrie des dépôts tandis que les seconds visent l'extraction de sédiments destinés à des analyses

⁶ Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire

⁷ Sol, Agro et hydrosystème, Spatialisation

sédimentologiques, palynologiques⁸ et à des datations radiocarbones. Les sondages peuvent être réalisés avec une tarière hélicoïdale et les carottages avec une sonde palynologique de type GYK (**Figure 2**).



Figure 2. Carottages palynologiques manuels avec la sonde GYK. a) extraction de la carotte sur le terrain ;
b) carotte de sédiment dans le carottier GYK (photos : C. Leroyer).

L'étude des sols est une thématique portée par l'UMR SAS. Pour décrire et caractériser les propriétés morphologiques, physiques et chimiques des sols, de nombreux carottages et prélèvements de sol sont réalisés manuellement à la tarière ou à partir de fosses pédologiques. L'étude des nappes superficielles menée par les UMR Géosciences Rennes et SAS nécessite des forages plus ou moins profonds (de 2 à quelques dizaines de mètres) avec un diamètre minimum de 100 mm pour pouvoir y installer différents capteurs (niveau, température, conductivité électrique).

Le but du projet est de mécaniser ces différentes opérations afin de diminuer les contraintes physiques des prélèvements et des sondages de sol, et d'améliorer la vitesse d'exécution et la quantité des observations réalisées par les équipes de recherche de l'OSUR.

La solution technique retenue

Précédemment au projet, l'UMR SAS avait acquis un véhicule léger 4X4 de marque Kawasaki® (**Figure 3**). Ce véhicule non homologué à la circulation routière est équipé d'un accélérateur à main, d'une benne et d'un système hydraulique composé d'une pompe avec les caractéristiques suivantes : pression max 315 bars ; débit normal : 40 L/mm ; tarage 150 bars.



Figure 3. Porteur 4X4 Kawasaki® de type Mule (photo : plaquette constructeur Kawasaki).

⁸ Étude du pollen et des spores présentes dans le sédiment.

À partir de la définition des besoins et de ce matériel existant, le choix s'est porté sur le remplacement de la benne du porteur par un système de forage/carottage branché sur la pompe hydraulique. Un cahier des charges pour effectuer ce remplacement a été rédigé puis envoyé à trois fournisseurs différents. Le système de carottage devait permettre de prélever en percussion des échantillons de sol jusqu'à 2 m de profondeur avec une gouge de 100 mm de diamètre. De même le système de forage devait pouvoir fonctionner en rotation avec une tarière hélicoïdale de 100 mm de diamètre pour percer des forages jusqu'à 4 m de profondeur. L'entreprise Sedidril (Guainville, 27) a été sélectionnée pour répondre à ce cahier des charges. L'outil de type Sedidril 80 est dénommé foreuse-carotteuse dans la suite du document.

Description et utilisation

Description générale

La foreuse-carotteuse a été installée et fixée sur le porteur 4x4 Mule (Figure 4), et le circuit hydraulique de la Sedidril 80 connecté à la pompe du porteur. Quatre béquilles de stabilisation ont été fixées sur le châssis du porteur pour éviter le basculement pendant l'utilisation de l'outil. L'ensemble atteint une masse total d'environ 1200 kg.



Figure 4. Foreuse-carotteuse Sedidril 80 installée sur le porteur Mule (photo : entreprise Sedidril).

La foreuse-carotteuse est équipée d'un mât de 2,2 m de longueur sur lequel se déplace un chariot entraîné par un moteur et une chaîne. La course utile du chariot est de 1,75 m. Sur le chariot deux outils sont fixés et peuvent être interchangeables : un marteau hydraulique pour effectuer des carottages de sol et une tête rotative pour effectuer des forages ou des sondages avec des tarières hélicoïdales (Figure 5). Ces deux outils sont commandés par un pupitre de commande placé sur le côté droit du véhicule (Figure 6).

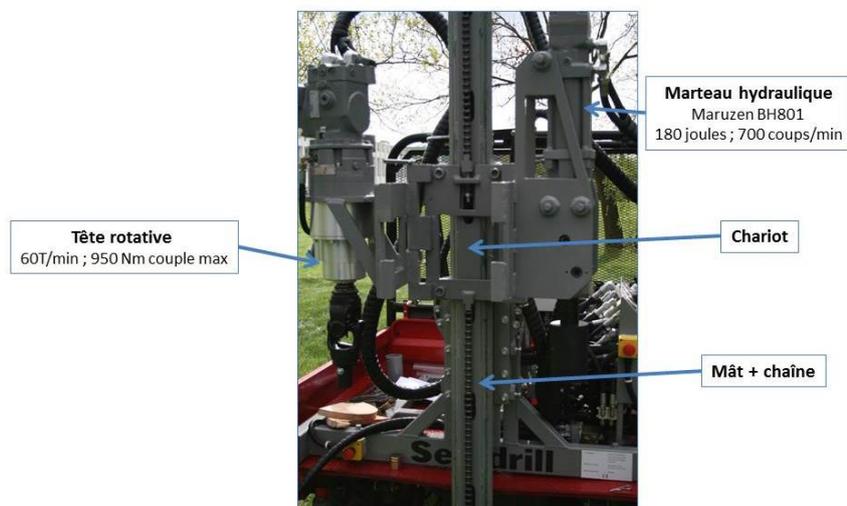


Figure 5. Les deux outils de la foreuse-carotteuse, le marteau hydraulique (utilisé pour le carottage) et la tête rotative (utilisée pour le forage) (photo : M. Fauchaux).

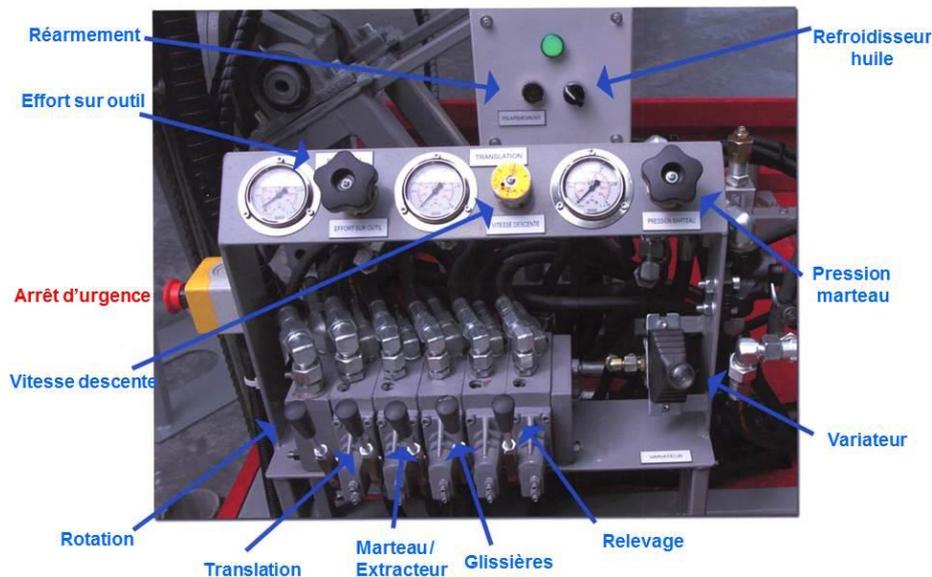


Figure 6. Le pupitre de commande (photo : M. Fauchoux).

Utilisation en mode carottage

Le marteau hydraulique est utilisé uniquement en mode carottage pour exercer en continu des percussions répétitives sur un carottier afin de prélever des cylindres de sol non remanié. Deux carottiers sont disponibles :

- un carottier échantillonneur avec chemises en PVC transparent fournies par le fabricant (diamètre interne 76 mm, diamètre externe 91 mm, longueur 1 m) ;
- un carottier échantillonneur avec chemises fabriquées par les techniciens de l'UMR SAS à partir de tuyau PVC du commerce (diamètre interne 80 mm, diamètre externe 90 mm, longueur 1 m).

Des tiges d'acier de diamètre 32 mm et de 1 m de longueur peuvent s'intercaler entre le marteau et le carottier pour effectuer un échantillonnage de sol plus profond. Dix tiges sont disponibles, permettant un échantillonnage de sol jusqu'à 11 m de profondeur. Une fois le carottier enfoncé dans le sol, il y a deux possibilités pour le retirer. Dans un premier temps en remontant le chariot, dans ce cas c'est le couple du moteur entraînant la chaîne qui est mis à contribution. Dans certaines situations, il arrive que le couple maximum exercé par le moteur du chariot ne soit pas suffisant pour extraire le carottier. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser l'extracteur hydraulique qui est un vérin avec blocage à bille pouvant exercer une force de 3,5T (Figure 7).

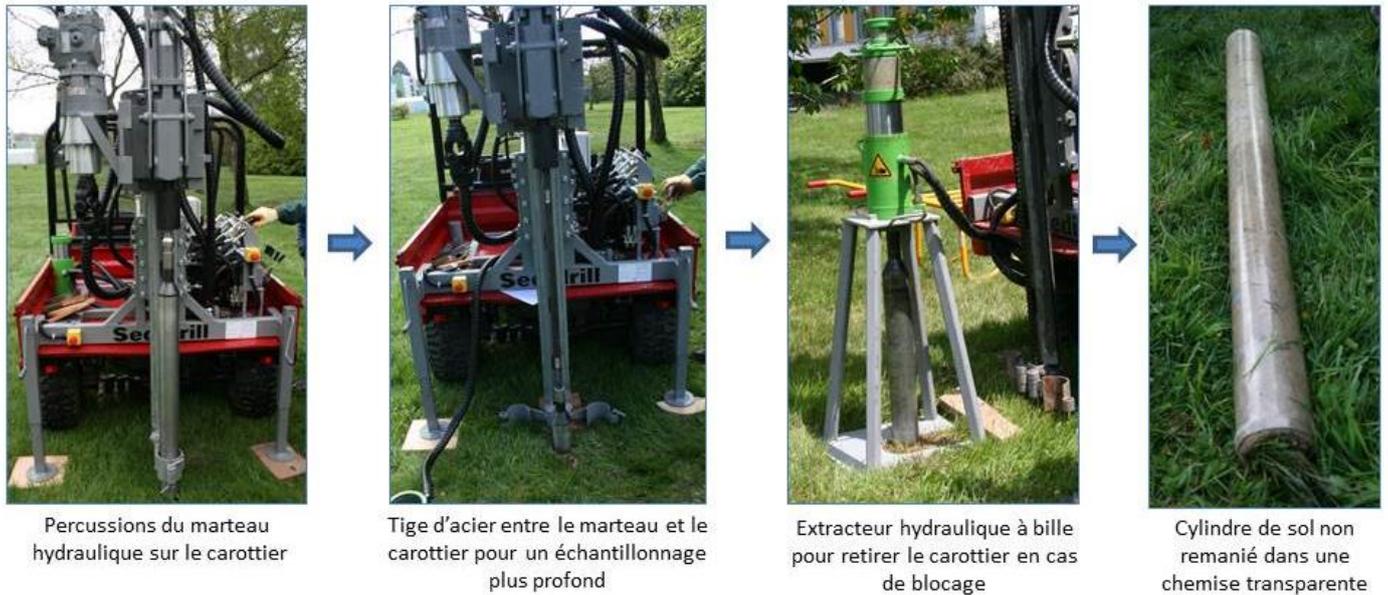


Figure 7. Les différentes étapes du carottage (photos : G. Dutin).

Utilisation en mode forage

En mode forage, la tête rotative est positionnée sur le chariot à la place du marteau hydraulique. Une première tarière hélicoïdale équipée d'une tête de forage est fixée sur le cardan de la tête rotative (**Figure 8**). Pour continuer le forage plus en profondeur, des rallonges de 1,5 m de longueur peuvent être intercalées entre le cardan et la première tarière. Deux types de tarière sont disponibles :

- 7 tarières hélicoïdales diamètre 102 mm, longueur 1,5 m,
- 2 tarières hélicoïdales diamètre 54 mm, longueur 1,5 m.

Ce type de tarière permet de forer dans un matériau non consolidé comme une altérite. Dès que la tarière rencontre une roche dure non altérée, le forage est bloqué.

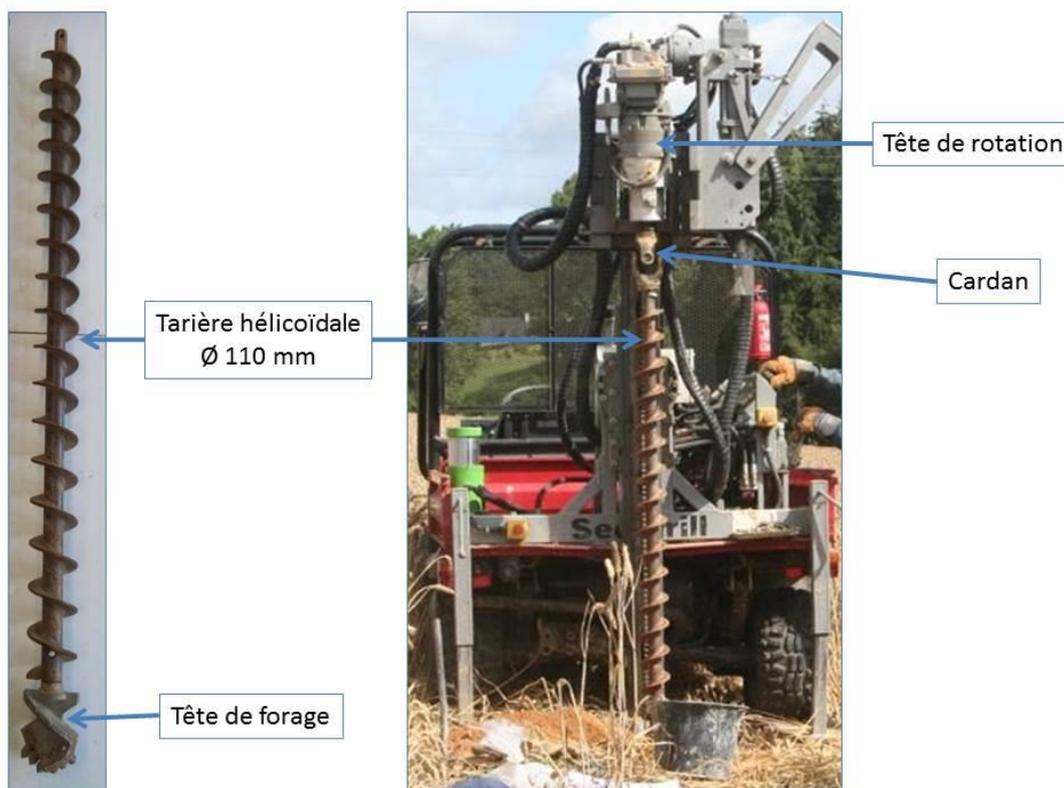


Figure 8. Tarière hélicoïdale pour le forage (photo : UMR Géosciences Rennes).

Le mode forage de la foreuse-carotteuse est utilisé par des équipes de recherche en archéologie pour effectuer des sondages, mais aussi en hydrologie pour poser des piézomètres. Un piézomètre est un tube permettant depuis la surface du sol d'accéder à l'eau de nappe phréatique, afin d'en mesurer la hauteur et, dans nos cas d'étude, de recueillir l'eau pour analyser sa composition chimique. Dans notre cas, avec la foreuse-carotteuse, il est possible d'installer des piézomètres de 100 mm de diamètre et de 10,5 m maximum de profondeur et d'accéder ainsi à des nappes dites superficielles. De manière générale, lorsque le matériau à forer n'est pas consolidé, le piézomètre est tubé depuis son sommet jusqu'à la base pour éviter que le forage ne se comble avec l'érosion des parois. La base du tube est crépinée et l'espace entre le forage et le tubage est comblé par un massif filtrant au niveau de la crépine puis par de l'argile gonflante comme la bentonite (**Figure 9**). La bentonite est imperméable et permet d'isoler hydrauliquement la crépine de la surface du sol. Le dernier mètre avant la surface du sol est complété par du ciment. Le cutting, nom donné au matériau évacué lors du forage, peut être utilisé pour combler l'espace entre le forage et le tubage. Dans ce cas, le cutting sera placé entre la bentonite et le ciment. Une fois le piézomètre mis en place, il est possible de mesurer les variations de niveau de la nappe (le niveau piézométrique) au cours de l'année et d'échantillonner l'eau de la nappe pour des mesures hydrochimiques.

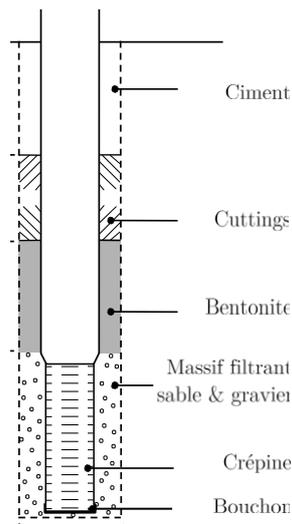


Figure 9. Schéma d'un piézomètre (thèse M. Rouxel, 2010).

Sécurité et protections

La foreuse-carotteuse est une machine dont l'utilisation peut comporter des risques importants pour les opérateurs. Pour faire face à ces risques, elle est équipée de plusieurs éléments de sécurité. Deux boîtiers d'arrêt d'urgence de type arrêt coup de poing sont positionnés de chaque côté de la machine. Une fois actionnés, ils stoppent immédiatement tout mouvement en arrêtant la pompe hydraulique. Leur réarmement ne peut s'effectuer que si tous les leviers de commande sont en position neutre. De plus, une trousse de secours et un extincteur sont à demeure sur la machine. Des EPI (équipements de protections individuelles) tels qu'un casque, des gants, des protections auditives et des chaussures de sécurité doivent être portés par les opérateurs. Le travail isolé est à proscrire et les opérateurs doivent disposer d'un téléphone mobile.

En 2012, la réglementation concernant la mise en conformité des machines de forage a évolué. Le ministère du Travail s'appuyant sur la brochure de l'INRS ED 6111 a imposé trois mises en conformité des machines en service :

1. les machines munies d'un cardan doivent être équipées d'un protecteur fixe,
2. protection des éléments mobiles concourant au travail,
3. les interventions sur les éléments en rotation doivent pouvoir être effectuées lorsque la machine est à l'arrêt.

Suite à cette nouvelle réglementation, différents travaux de mise en conformité ont été réalisés par l'entreprise Sedidrill. Les crantages sur les leviers commandant la rotation, la montée-descente et le marteau ont été supprimés afin d'obliger l'opérateur à une action maintenue. Le cardan a été équipé d'une chemise de protection et une cage amovible interdisant l'accès aux éléments mobiles pendant les phases de forage a été installée (Figure 10). En cas d'ouverture de la cage, un contacteur stoppe la fonction rotation.

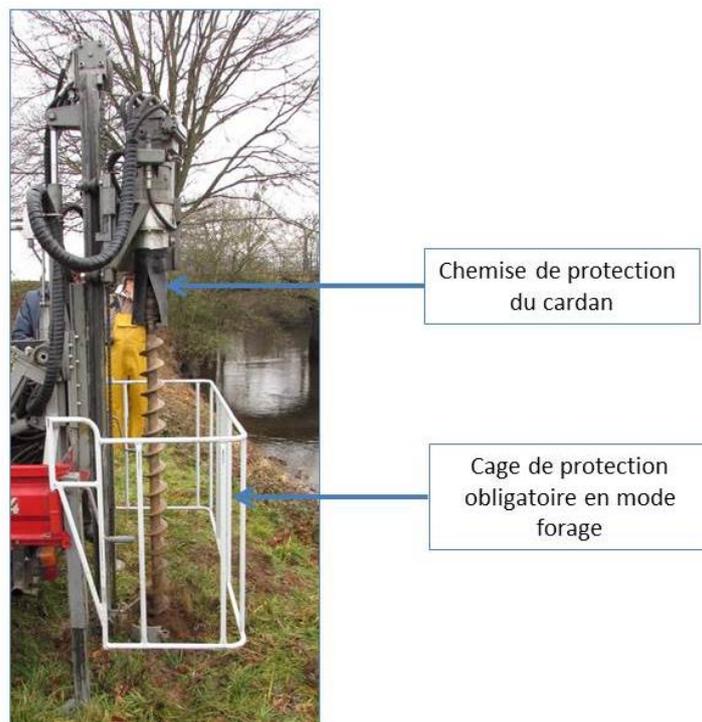


Figure 10. Éléments de sécurité ajoutés pour la mise en conformité (photo : M. Fauchoux).

De plus, suite à l'évolution de la réglementation, sept agents de l'OSUR ont suivi une formation d'une journée (0,5 jour de théorie + 0,5 jour de pratique) intitulée « conducteurs expérimentés foreuse catégorie 2 ». L'objectif de cette formation est d'être capable d'appliquer les règles de sécurité liées à la fonction de conducteur d'engins de chantier de type « foreuse » tant sur le plan théorique que pratique.

Exemples de réalisation

Carottage

En octobre 2016, un stage de terrain avec des étudiants avait pour objectif de cartographier les sols du site de la Prévalaye, un domaine de 80 ha appartenant à la ville de Rennes au sein duquel celle-ci veut réintroduire des formes d'agriculture péri-urbaine. Plusieurs caractéristiques du site rendaient l'observation des sols à la tarière manuelle classique pratiquement impossible : (i) des sols secs en raison de pluies automnales tardives ; (ii) la présence à faible profondeur de lits de cailloux de quartz caractéristiques des terrasses fluviatiles très fréquentes sur le domaine d'étude. L'utilisation de la foreuse-carotteuse a permis de forer 20 sondages jusqu'à 1 m de profondeur et 4 autres sondages jusqu'à 2 m de profondeur sur une période de 4 jours. Pour permettre la description des sondages directement sur le terrain, les chemises transparentes insérées dans le carottier ont été remplacées par des tubes en PVC de même diamètre coupés en deux dans le sens de la longueur. Une fois extraite, la carotte de sol non remaniée peut être observée directement en séparant simplement les deux parties du tube (**Figure 11**). Par rapport à un carottage manuel classique, l'observation du sol est facilitée par un diamètre de carotte plus large (8 cm contre 5 cm), l'absence de mélange de l'échantillon et son caractère intact qui permet d'apprécier la structure du sol et les traits pédologiques. Les difficultés techniques éventuelles de forage tiennent à des cailloux de quartz qui se bloquent dans les chemises en PVC et rendent leur extraction du carottier difficile.

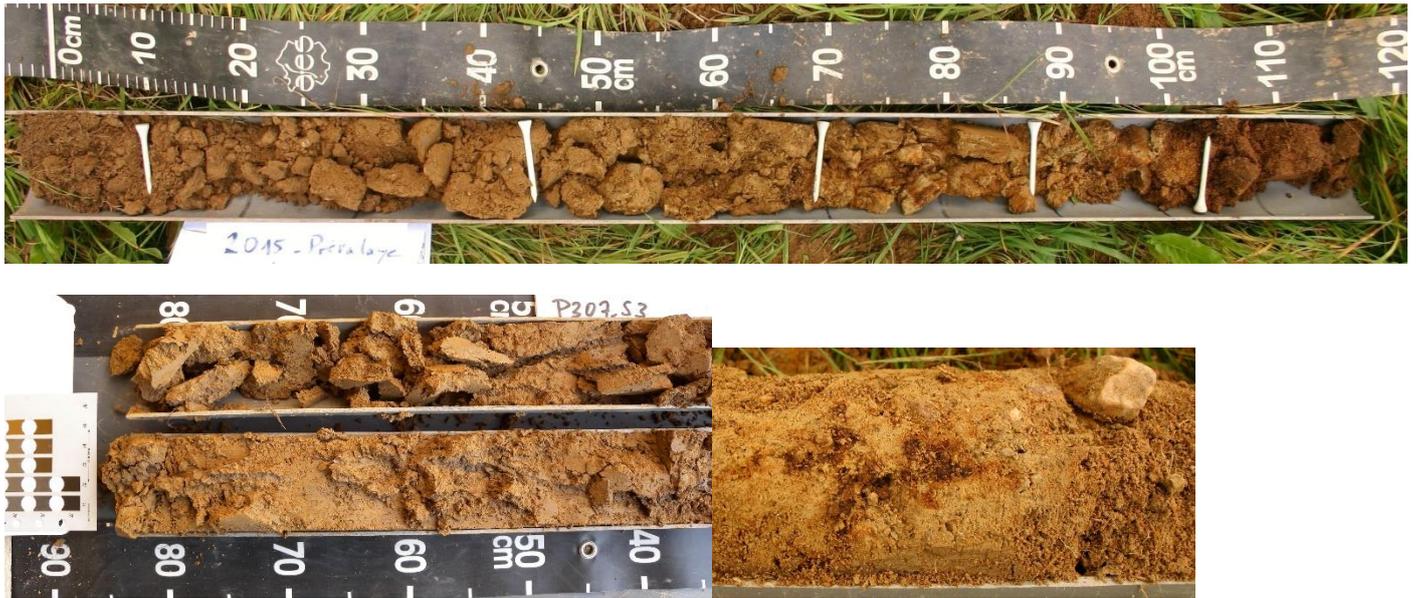


Figure 11. Carottage pour l'observation in situ des sols du domaine de la Préalaye (Rennes, 35) (photo : C. Walter).

Forage

En janvier 2017, une collaboration entre l'UMR SAS et l'UMR Géosciences Rennes dans le cadre d'une étude sur les échanges entre la nappe et la rivière (thèse de N. Simon, débutée en 2016) a donné lieu à la mise en place de trois piézomètres au bord du fleuve La Sélune (Manche, 50). Les piézomètres ont été placés perpendiculairement au lit du fleuve. Leur mise en œuvre avec la foreuse-carotteuse a nécessité une journée de travail sur le terrain. Les trois forages dont la profondeur est d'environ 3 m sont équipés d'un tube crépiné à la base de 63 mm de diamètre (**Figure 12**). L'espace entre le forage et le tube est isolé hydrauliquement avec de la bentonite. La progression des forages a été bloquée à 3 m de profondeur par des blocs de roche dure correspondant à l'ancien lit du fleuve. Cependant, lors des forages l'eau de la nappe est apparue entre 2 et 3 m de profondeur. Les piézomètres ont été équipés de capteurs automatiques de niveau et permettent de suivre l'évolution de la composition de la nappe en différents traceurs chimiques afin d'estimer et de caractériser les flux d'eau entre le fleuve et la nappe. Dans cet exemple, l'utilisation de la foreuse-carotteuse montre que cet outil est adapté à la mise en place rapide de piézomètres peu profonds pour l'étude et l'observation des nappes superficielles.



Figure 12. Mise en place de trois piézomètres sur le site du programme Sélune (photo : M. Fauchoux).

Sondage palynologique

La fouille du site du Paléolithique final de "La Fosse" à Villiers-Charlemagne (53) a été accompagnée en 2009 d'une campagne de sondages et d'un carottage dans le lit majeur de la Mayenne, sur la rive opposée au site. L'objectif de cette opération était de connaître la géométrie des dépôts et de trouver des unités sédimentaires contemporaines de l'occupation afin de renseigner, par la palynologie⁹, la végétation présente autour du site durant le Paléolithique final (Aoustin, 2010). Un transect de 12 sondages à la tarière hélicoïdale a été réalisé avec la foreuse-carotteuse sur la rive convexe de la Mayenne. Les sondages étaient espacés les uns des autres de 10 m. Implantés sur la pente, les six premiers sondages montrent un sol (limon brun ocre) de 10 à 30 cm d'épaisseur, reposant sur la terrasse Pléistocène (Fy). À partir de la rupture de pente (sondages 7 à 12), les limons bruns deviennent légèrement argileux (Figure 13). Ils s'épaississent dans le sondage 9 car le toit de la terrasse, qui était situé auparavant à une profondeur relativement constante montre un décrochement d'environ 120 cm ; il va atteindre une profondeur de 361 cm dans le sondage 12. Une couche d'argile brun foncée, atteignant une épaisseur d'environ 100 cm, s'intercale alors entre la nappe grossière et le sol de surface (limon argileux brun ocre). Le carottage a été implanté entre les sondages 11 et 12. Il a été réalisé avec le marteau hydraulique à percussion de la foreuse-carotteuse. Il s'est arrêté sur un niveau de sable à graviers et galets centimétriques à 298 cm de profondeur. Cette longueur ne correspond pas à la profondeur réelle du toit du niveau de sable à graviers car le sédiment a subi une compaction lors du prélèvement, du fait de la méthode de carottage par percussion.

⁹ Étude du contenu sporo-pollinique (Reille, 1990).

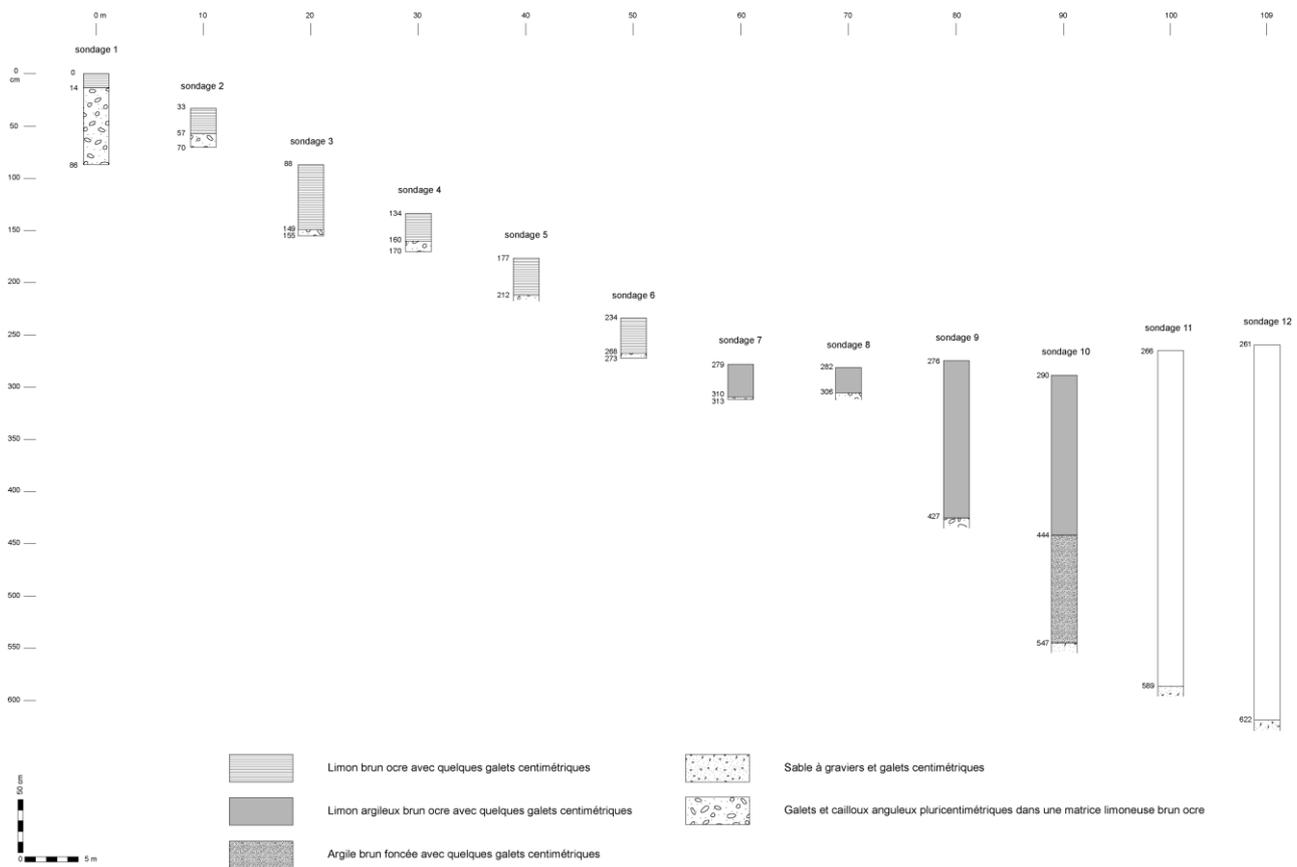


Figure 13. Logs sédimentaires du transect de sondages à la tarière hélicoïdale réalisé sur la rive convexe de la Mayenne.

Conclusion

Le projet de foreuse-carotteuse a été le fruit d'une collaboration entre trois unités de recherche de l'OSUR. Cet outil répond aux différents besoins et contraintes pour l'observation et l'instrumentation du sol et du sous-sol. Il est devenu un équipement mutualisé au sein du S3O (Service de Soutien aux Systèmes d'Observation) de l'OSUR. La foreuse-carotteuse est un outil léger, maniable et facilement déplaçable pour des campagnes de caractérisation de sol ou la mise en place de piézomètres peu profonds. Elle permet de diminuer la pénibilité des prélèvements manuels de sol à la tarière en augmentant la vitesse d'exécution. La mise en place de piézomètres pour des activités de recherche est une opération délicate et grâce à la foreuse-carotteuse les équipes de l'OSUR peuvent effectuer le nombre de forages nécessaires à leur recherche de manière autonome, sans faire appel à des entreprises extérieures et avec un coût financier moindre. Les limitations de cet outil sont la difficulté des forages dans des matériaux géologiques non altérés et la non homologation du porteur Mule à la circulation routière, ce qui oblige à le transporter sur un plateau remorque. Lorsque le porteur Mule arrivera en fin vie, la foreuse-carotteuse pourra être transférée sur un autre véhicule de type 4X4 pick-up.

Remerciements

Nous remercions Rachel Boutrou, Houda Braham, Ophélie Fovet, Blandine Lemerrier, Dominique Montagu-Ledoux et Virginie Parnaudeau pour leur aide à la rédaction du document. Nous remercions aussi vivement Stéphane Ruy et Frank Tison (INRA UMR EMMAH) qui ont été sollicités par le Cahier des Techniques de l'INRA pour relire l'article.

Références bibliographiques

Aoustin D (2010) "La Fosse", Villiers-Charlemagne (Mayenne). Analyse palynologique des sédiments prélevés sur le site archéologique et des sédiments issus du carottage réalisé dans la vallée de la Mayenne. Rapport d'analyses, 11 p.

Institut national de recherche et de sécurité (INRS, 2012) Machine de forage en service, sécurisation de la zone de travail.

REILLE M (1990) Leçons de palynologie et d'analyse pollinique, Paris, CNRS, 206 p.

Rouxel M (2010) Étude des mécanismes hydrologiques du transport de solutés dans les aquifères superficiels des bassins versants sur socle. Thèse Agrocampus Ouest.

Simon N (en cours) Quantification des échanges nappe-rivière par des méthodes actives de mesures distribuées de la température par fibre optique. Thèse Université de Rennes 1 (en cours).