

Université Constantine 1
Département de Géologie

COURS & TD
DE

FORAGES D'EAU: PROCÉDÉS ET MESURES,
UE0661

Destiné aux
Etudiants de 3^e année licence géologie-appliquée
Option Hydrogéologie

Réalisé par
Boukaoud El Hachemi

Table des matières

I INTRODUCTION	5
II-1 REFERENCES bibliographiques	5
I-2 TYPES DE FORAGE ET COÛT DE REALISATION	5
I-2-A) Les sondages d'exploration	6
I-2-A-1) Etapes à suivre	6
I-2-B) Les forages d'exploitation.....	6
I-3 COÛT DE FORAGE	6
II LES TECHNIQUES DE FORAGE	7
II-1 La technique Rotary	7
II-2 Technique Rotary en circulation inverse	10
II-2-1 Principe.....	10
II-3 La technique de carottage	10
II-3 -1 Principes	10
II-3 -2 Carottage par fonçage ou poinçonnage.....	11
II-3 -2-1 Principe.....	11
II-3 -3 Carottage rotatif	12
II-3 -3-1 Principe.....	12
II-4 La technique de Battage	15
II-4-1 Principe	15
II-5 La technique marteau fond de trou (MFT)	16
II-5-1 Principe	16
II-6 Technique de Forage par havage	17
II-6-1 Principes	17
II-7 Technique Forage dirigé et horizontaux ou subhorizontaux	18
II-7-1 Principe	18
II-8 Technique forage par tarière	18
II-8-1) Principe.....	18
II-9 Choix d'une méthode de forasson	19
II-10 Les fluides de forage	19
II-10-1 Boue à la bentonite	19
II-10-2 Boue polymère	20
II-10-3 La Mousse.....	20
II-11 Les paramètres de la forasson (fluide et poussée-rotation)	20
II-12 TD/ Calcule de certains paramètres de forage	21

II-12 -1 calcul de la poussée et de la vitesse de rotation en rotary et MFT :	21
II-12-2 Vitesse de rotation	22
II-12-3 Calcul de la vitesse ascensionnelle du fluide.....	23
II-12-4 Calcul de la densité de la boue	23
II-12-5 Calcule de l'alourdissement et l'allègement de la boue.....	23
II-12-6 calcule des fosses à boue	24
II-13 Le tubage.....	25
III Le chantier de forage.....	26
III-1 Contrôle de la rectitude et de la verticalité	26
III-2 Échantillons de forage	26
IV Le développement.....	27
V La crépine.....	27
V-1) longueur et position des crépines	27
V-2) En Nappe captive.....	28
V-3) En nappe libre en terrain homogène	28
V-4) différents types de crépines	28
V-5) paramètres de crépinage	28
V-5-1) Ouverture des fentes de crépines.....	28
V-5-2) TD/ Coefficient d'ouverture des crépines.....	29
V-5-3) Vitesse de pénétration de l'eau dans la crépine	29
V-5-4) Diamètres de tubes et crépines	30
VI Le Massif filtrant (gravier additionnel, massif de gravier).....	30
VII La cimentation.....	30
VII-1 TD/ Préparation du lait de ciment	30
VII-2 Mise en place.....	31
VII Capot du forage	31
VIII Rôle de l'ingénieur géologue.....	31
VIII-1 Rangement des carottes	32
VIII-2 Description Logging de la carotte.....	32
VIII-3 TD/ Évaluation du taux de récupération	33
VIII-4 RQD: Rock quality designation	33
VIII-5 LE SUIVI D'UN FORAGE	34

Table des illustrations

Figure 1: de gauche à droite : Trepan (Trilame et tricône) et tige (portant un filetage mal et femelle pour les raccorder les uns avec les autres, la première tige est raccorder à un Trilame).....	8
Figure 3: Principe de fonctionnement « Rotary ».....	8
Figure 4: Les éléments d'un forage rotary mis en fonction.....	9
Figure 5: Machine et carotte de forage.....	11
Figure 6: Forage par fonçage.....	11
Figure 7: Forage par fonçage.....	11
Figure 8: Exemple des carottiers avec et sans étui.....	12
Figure 9: Couronnes de gauche à droite : imprégnées (diamants synthétiques + matrice) ; à diamants synthétiques individuels ; à carbure de tungstène.....	13
Figure 10: Principe de fonctionnement des carottiers rotatifs.....	13
Figure 11: Carottier à câble.....	14
Figure 12: à gauche, Battage au câble « technique Pennsylvanienne » à droite, Battage à tige « technique canadienne ».....	16
Figure 13: Le principe de fonctionnement du forage MFT, à droite la tête de forage Taillant.....	17
Figure 14: Forage par havage.....	18
Figure 15: Forage par tarière.....	18
Figure 16: Schéma de principe-réglage poussée/rotation.....	22
Figure 17: Relation poussée sur l'outil/profondeur.....	22
Figure 18: Fosses de boues.....	24
Figure 19: Tubage à gauche en acier récupérable et à droite en PVC (récupérable au maximum à 20m de profondeur).....	25
Figure 20: Organisation d'un chantier.....	26
Figure 21: différents types de crépines de gauche à droite : Les crépines à fentes continues (type JOHNSON), les crépines à persiennes, les crépines à trous oblongs, les crépines à trous ronds et les crépines en PVC.....	28
Figure 22: Le massif filtrant en gravier.....	30
Figure 23: Cimentation.....	31
Figure 24: A gauche fermeture d'un forage et à droite une colonne d'un forage d'eau.....	31
Figure 25: Une caisse de carotte, rangeant des carottes mètre par mètre de 85m à 100m de profondeur.....	32
Figure 26: Log lithologique.....	35
Figure 27: Répartition du temps du forage.....	35
Figure 28: Log lithologique du forage BER2.....	35
Figure 29: Courbes comparatives.....	35

I INTRODUCTION

Les premiers forages réalisés sont des forages de pétroles en Allemagne en 1857, alors que la première initiative qui rencontra le plus grand retentissement fut cependant celle d'Edwin L. Drake en 1859 en Pennsylvanie pour extraire le pétrole à 23 m de profondeur. La faisabilité de forage est une fonction directe du rapport économique.

Les substances souterraines sont très précieuses et ont une grande importance : Minéralisation, Eau, Gaz et Pétrole. Se trouvant à des profondeurs plus ou moins importantes, il est toujours nécessaire de forer pour les explorer et les exploiter.

Les profondeurs de forages existants varient de quelques dizaines de mètres pour le cas d'exploration pour une minéralisation ou d'exploitation d'eau, à quelques dizaines de kilomètres pour l'extraction des réserves pétrolières ou pour la recherche scientifique (12,345 Km en Russie, 9,8 Km en Allemagne et 3,35 Km à Hassi Messaoud).

Les notes qu'on va trouver dans ce cours ne sont que des jalons pour introduire des notions élémentaires pratiques sur les opérations de forage et sur l'utilisation des données.

II-1 REFERENCES bibliographiques

Le livre de Peters (p. 431-460) expose les notions importantes pour l'exploration, mais les données techniques se retrouvent dans les documents suivants :

Norme XP P 94-202, Norme ISO 22475-11985. Philippe REIFFSTECK, Daniel LOSSY, Jean BENOÎT (2012) *Forages, sondages et essais in situ géotechniques. Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*. Ed. Presse des Ponts. 796 pages. Cumming, J.D. and Wicklund, A.P., *Diamond Drill Handbook*, Publié par J.K. Smit, Toronto (première ed. 1956). Reedmann, (op. cit.) ch. 7, p. 322-374. Gagné, Simons, Lavoie, *Cours de recyclage en forage au diamant. Préparé par Inspiration Drilling (date inconnue)*.

Ces documents s'adressent surtout aux foreurs, mais peuvent aussi être d'une grande utilité pour l'ingénieur ou le géologue qui a la responsabilité de commander le forage, décider du lieu d'implantation et de son orientation en fonction de l'attitude des formations, de faire la surveillance des travaux et l'analyse des résultats.

I-2 TYPES DE FORAGE ET COÛT DE REALISATION

I-2-A) Les sondages d'exploration

Les sondages d'exploration sont un outil indispensable pour la recherche des nappes d'eau et des gisements, mais aussi pour une meilleure connaissance du socle rocheux en général. Ces recherches tournaient autour d'une cible bien identifiée. Les étapes à suivre pour arriver à la détermination d'une telle cible sont :

I-2-A-1) Etapes à suivre

En réalité, les forages commencent bien avant qu'une cible soit en vue,

- a) Orientation des recherches : Si les carottes, logs ou coupes de sondage sont disponibles, c'est une première information pour orienter les travaux.
- b) Vérification des cibles : le forage montre la présence ou l'absence de nappes d'eau. Si des indices encourageants sont révélés, la cible devient un prospect.
- c) Évaluation : s'il s'agit d'une nappe d'eau, elle sera délimitée pour évaluer les réserves d'eau, le débit...
- d) Production ou cul-de-sac : Si les réserves délimitées sont importantes on procède à l'étape de l'exploitation et si elles ne le sont pas (insuffisantes), on aboutit à un cul-de-sac.

I-2-B) Les forages d'exploitation

Les forages d'exploitation permettent d'atteindre et exploiter (extraire) la substance liquide, tel que l'eau, le pétrole.... Toutefois, un certain nombre de facteurs, techniques, financiers et logistiques doivent être étudiés avant d'engager une campagne de forage afin de s'assurer de la faisabilité du projet.

I-3 LE COÛT DE FORAGE

Les coûts de forage dépendent de : l'objectif de forage (carottier, destructif...) ; de la nature de substance à exploiter (type de minerais : précieux, métallique... pétrole, eau...) ; de la nature de terrain (tendre, dur, effondré...) ; de la zone ou du lieu de travail (endroits isolés ou non, maritime ou non « désertique, aride, proche de la population ou dans la mer... »).

Au Sud d'Algérie le coût d'un forage pétrolier (profondeur supérieur à 3000m) est aux environs de centaines millions de Dinard. Au Nord d'Algérie le coût d'un forage géotechnique profond de 500m est aux environs de dizaines millions de Dinard. Le coût des forages maritimes pour des profondeurs plus ou moins faibles est de dizaines de millions d'Euro.

II LES TECHNIQUES DE FORAGE



II-1 La technique Rotary

II-1 -1 Principe

Elle est relativement récente. La technique rotary est utilisée spécialement dans les terrains sédimentaires non consolidés pour les machines légères, mais les machines puissantes de rotary peuvent travailler dans les terrains durs (pétroliers).

Un outil appelé trépan (trilame, tricône) (Fig. 1) est mis en rotation depuis la surface du sol par l'intermédiaire d'un train de tiges (Fig. 1). L'avancement de l'outil s'effectue par abrasion et broyage (deux effets) du terrain sans choc, mais uniquement par translation et rotation (deux mouvements). Le mouvement de translation est fourni principalement par le poids des tiges au-dessus de l'outil. La circulation d'un fluide (liquide visqueux : la boue ou l'eau) permet de remonter les cuttings à la surface. La boue est injectée à l'intérieur des tiges par une tête d'injection à l'aide d'une pompe à boue, et remonte dans l'espace annulaire en mouvement ascensionnel, en circuit fermé sans interruption (Fig. 2). La boue en circuit fermé, alimenté par le bassin à boue (Fig. 3), tapisse les parois non encore tubées et les maintiens momentanément en attendant la pose de tubage.

Remarque

- *Un accroissement du volume de boue est l'indice d'une venue de fluide souterrain dans le forage (eau, huile, gaz).*
- *Une perte de volume indique une zone fissurée ou dépressionnaire (vide). Le forage en perte de circulation peut être dangereux pour la ligne de sonde et l'ouvrage.*

- *Le dépôt de la boue qui recouvre les parois d'une formation aquifère de faible pression peut gêner la détection de cette formation.*



Figure 1: de gauche à droite : Trepan (Trilame et tricône) et tige (portant un filetage mal et femelle pour les raccorder les uns avec les autres, la première tige est raccorder à un Trilame)

➤ Avantages

- La profondeur du forage peut être très importante, la foration n'est pas perturbée par les terrains peu stables ou plastiques, sous réserve de l'utilisation d'un fluide de forage adapté.
- Ce système permet un bon contrôle des paramètres de forage (poids de l'outil, vitesse de rotation, qualité de la boue, débit d'injection de la boue) en fonction des terrains à traverser.
- Le forage au rotary entraîne une consolidation des parois en terrains meubles par dépôt d'un cake.

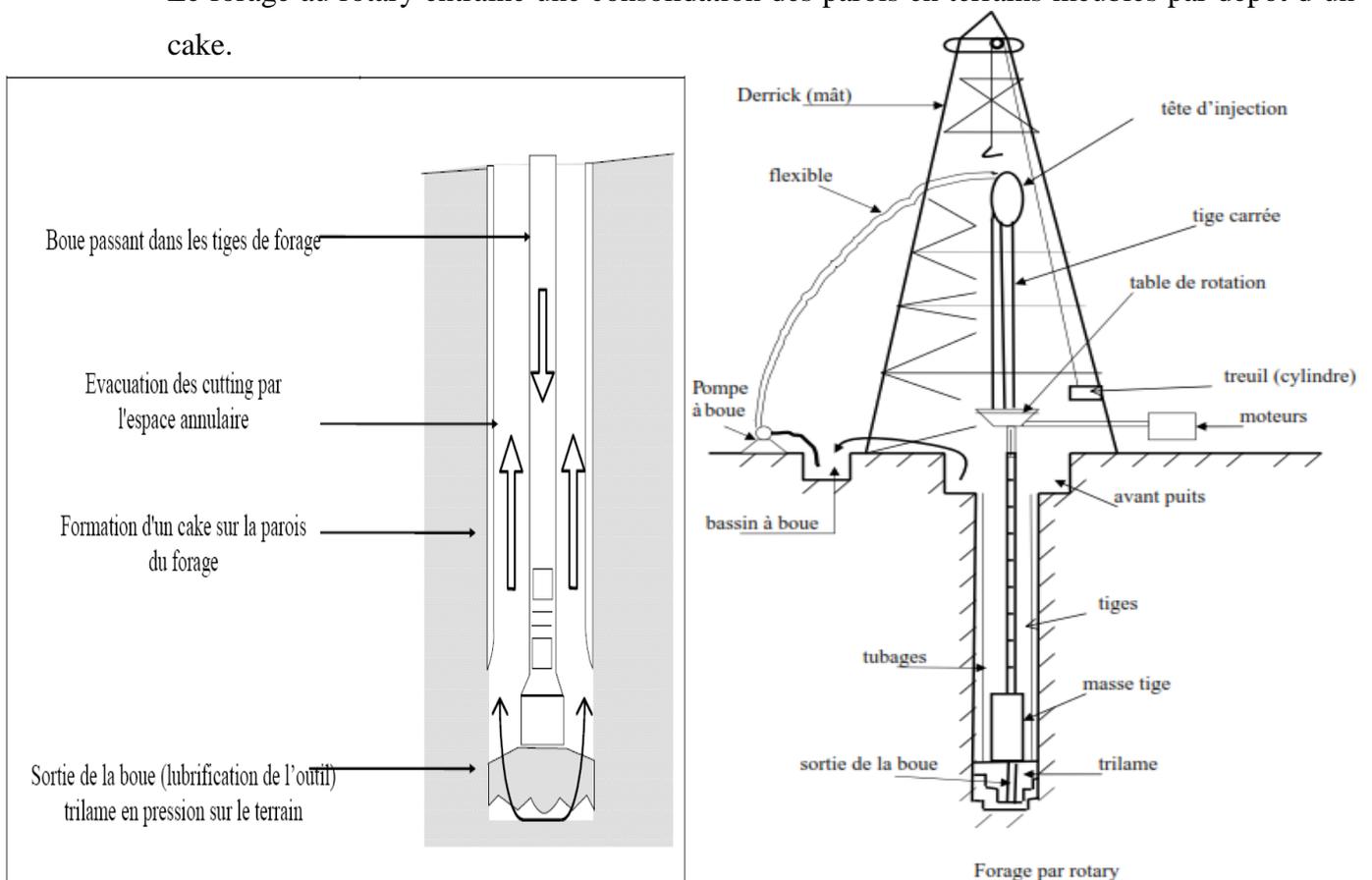


Figure 3: Principe de fonctionnement « Rotary »

➤ Inconvénients

- Nécessité d'un fluide de forage qui ne permet pas d'observation directe de la qualité des eaux des formations traversées.
- Colmatage possible des formations aquifères par utilisation de certaines boues (bentonite).
- Difficulté d'observation des cuttings,

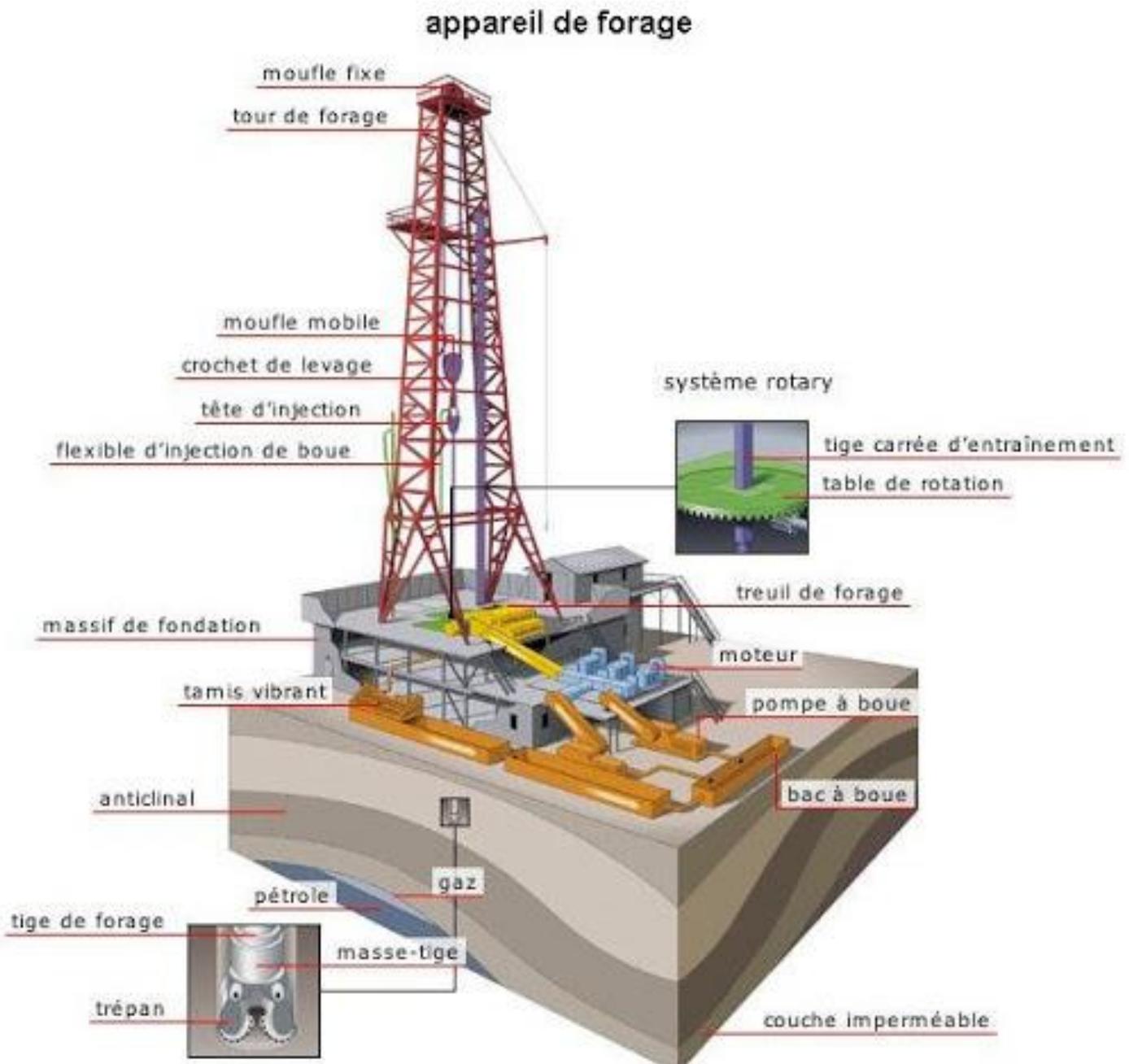


Figure 4: Les éléments d'un forage rotary mis en fonction

II-2 Technique Rotary en circulation inverse

II-2-1 Principe

Cette méthode de foration diffère des méthodes précédentes par une circulation de fluide (boue ou eau) dans l'espace annulaire (entre la formation et les tiges) avec remontée des cuttings par l'intérieur du train de tiges. Il existe également des tiges à double parois qui assurent l'injection et la remontée du fluide par l'intermédiaire des seules tiges.

➤ Avantages

- Information géologique plus précise et quasi instantanée. Les cuttings recueillis en surface proviennent du seul fond du trou sans mélange avec des cuttings provenant éventuellement de l'érosion du trou au cours de la remontée.
- Information géologique continue. La traversée de zones fissurées, fracturées ou cavernueuses, se traduit assez souvent par des pertes partielles (ou totales) de fluide de circulation (boue ou eau) dans les techniques de foration à circulation directe. La remontée des cuttings par le train de tiges diminue fortement les risques de pertes de fluide et de cuttings ainsi que les éventuels colmatages ou contamination des aquifères traversés.

➤ Inconvénients

- Présence d'un fluide de forage et de risque de colmatage (idem circulation directe).
- Il existe un risque d'occulté des informations importantes sur un niveau producteur d'épaisseur réduite par passage trop rapide
- Le forage rotary est généralement limité au diamètre 619 mm (24"), au-delà de celui-ci, les rendements sont moins bons et le coût des pompes à boue nécessaires pour assurer le nettoyage du forage devient prohibitif (excessif).

II-3 La technique de carottage

II-3 -1 Principes

Le principe des sondages carottés est de venir découper un cylindre de terrain le plus intact possible afin de réaliser des observations et des essais représentatifs des formations en place (Fig. 5). Le découpage des terrains peut être fait par fonçage ou battage (carottier poinçonneur) ou par rotation (carottier rotatif).



Figure 5: Machine et carotte de forage

II-3 -2 Carottage par fonçage ou poinçonnage

II-3 -2-1 Principe

Cette technique consiste à venir découper les terrains et faire pénétrer l'échantillon dans l'outil par poinçonnement sans rotation (fig. 7). Deux méthodes sont utilisées :

- fonçage par pression : le système de forage applique une force sur le carottier afin de s'assurer une vitesse d'enfoncement supérieure ou égale à 2cm/s aussi constante que possible.
- fonçage par battage : l'outil est enfoncé sous l'effet de chocs générés par la tête de forage et transmis par le train de tiges.

➤ Avantages

Avancement rapide à faible profondeur dans des formations meubles.

➤ Inconvénients

Méthode inadaptée aux terrains durs ou forage profond.

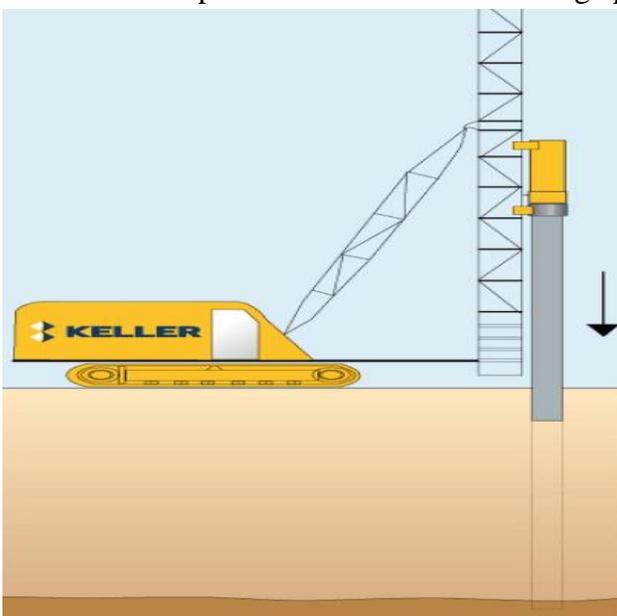


Figure 7: Forage par fonçage

II-3 -3 Carottage rotatif

De même que pour les autres types de sondages, la qualité des sondages carottés dépend évidemment des matériels employés, des modalités d'exécution mais également de l'expérience de l'opérateur.

II-3 -3-1 Principe

Les carottiers rotatifs sont constitués d'un tube cylindrique à l'extrémité duquel se trouve un outil appelé couronne (Fig. 9). L'ensemble est mis en rotation et en appui par la tête de forage via le train de tige (Fig. 10). La couronne, munie d'éléments d'abrasion (carbure de tungstène, diamants synthétiques, ...), découpe le terrain qui entre à l'intérieur du tube du carottier (Fig. 9). En fin de passe, à la remontée de l'ensemble, un extracteur rompt le contact entre la carotte et le terrain en place puis maintien la carotte à l'intérieur du tube du carottier (Fig. 8 & 10). Selon la nature des terrains à prélever et la qualité des échantillons recherchés, différents carottiers rotatifs seront mis en œuvre :

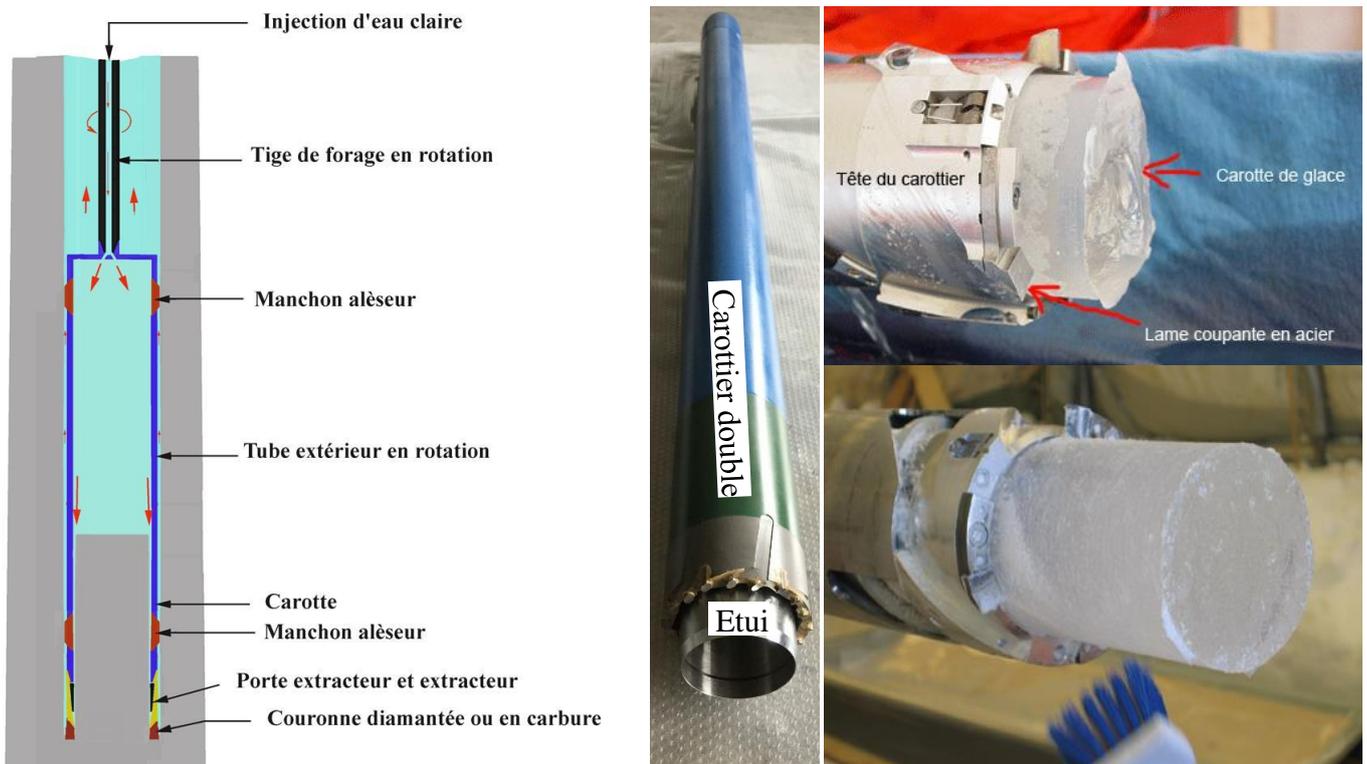


Figure 8: Exemple des carottiers avec et sans étui



Figure 9: Couronnes de gauche à droite : imprégnées (diamants synthétiques + matrice) ; à diamants synthétiques individuels ; à carbure de tungstène

- **Carottier simple :**

Le système se limite à un tube carottier muni d'une couronne (Fig. 8). Lors du forage, le fluide de forage passe le long de l'échantillon qui peut également être en contact avec le tube du carottier en rotation, de telle sorte que la qualité de l'échantillon est limitée et ne permet qu'une caractérisation de la nature des sols.

- **Carottier double :**

Le système comporte un tube extérieur entraîné en rotation portant la couronne et un tube intérieur monté sur pivot en partie haute qui ne tourne pas et emmagasine l'échantillon (Fig. 8). Le fluide de forage circule entre le tube extérieur et le tube intérieur. À l'exception des sols mous, les prélèvements réalisés par cette méthode permettent de caractériser la fracturation.

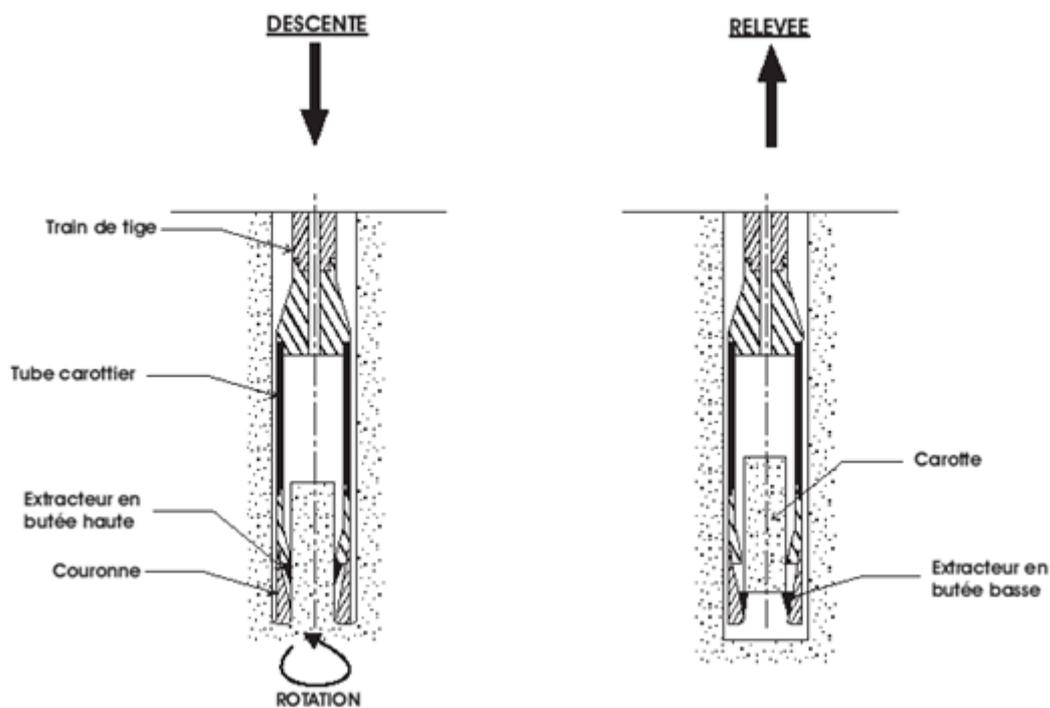


Figure 10: Principe de fonctionnement des carottiers rotatifs

▪ Carottier à câble :

La particularité de ce système ne réside pas dans le mode de découpage de l'échantillon, mais dans la liaison entre le carottier et la machine. Ce carottier est comme un ascenseur dans la cage. Les tiges reliant la machine à l'outil sont remplacées par un tubage de section constante depuis la surface jusqu'au fond. Ce tubage est entraîné en rotation et en pression, son extrémité inférieure portant une couronne (Fig. 11). Dans ce tubage, on descend un carottier, qui se verrouille lorsqu'il atteint sa place en bas du tubage sur des épaulements prévus à cet effet. Lorsque la passe de carottage est achevée, le carottier est déverrouillé à l'aide d'un système repêcheur. L'ensemble repêcheur-carottier-carotte est remonté à l'aide d'un treuil. Outre le gain de temps, le maintien du tubage en place assure la stabilité du forage.

➤ Avantages

- Observations géologiques de qualité optimale.
- Couplé à un dispositif d'orientation de la carotte, l'échantillon recueilli en zones fracturées permet une analyse des directions de fracturation.
- Procédé très rapide et stabilité du trou pendant la récupération surtout pour les carottiers à câble

➤ Inconvénients

- Coût élevé.
- Réalisation longue
- Diamètre réduit des carottes.
- Pourcentage de récupération des formations fonction de la nature des terrains (faible en structure non consolidée).

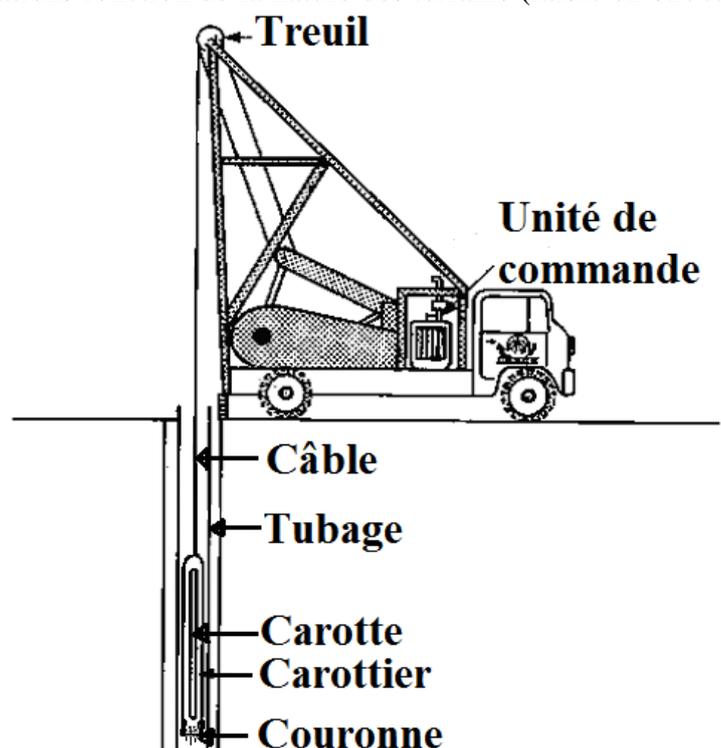


Figure 11: Carottier à câble

II-4 La technique de Battage

II-4-1 Principe

C'est la technique la plus ancienne, utilisée par les Chinois depuis plus de 4000 ans (battage à câble), elle consiste à soulever un outil très lourd (trépan) et le laisser retomber sur la roche à perforer en chute libre (Fig. 12). Le forage par battage ne nécessite pas de circuit d'eau ou de boue, et seul un peu d'eau au fond de forage suffit.

Il est tout indiqué pour les terrains durs surtout lorsque le terrain dur est en surface.

a) Récupération des débris

Le battage se produit par le mouvement alternatif d'un balancier actionné par un arbre à canne (ou bien un treuil : cylindre horizontal). Après certain avancement, on tire le trépan et on descend une curette (soupape) pour extraire les déblais (éléments broyés : cuttings). Pour avoir un bon rendement, on travaille toujours en milieu humide en ajoutant de l'eau au fond de trou. Le foreur de métier garde une main sur le câble et l'accompagne dans sa course, ce qui lui permet de bien sentir l'intensité des vibrations sur le câble ; et lorsque le fond de trou est encombré par les débris, celui-ci sera nettoyé par soupapes à piston ou à clapet.

Remarque : Le battage peut s'effectuer à l'aide d'un trépan accroché à câble ou accroché à un train de tiges pleines (Fig. 12).

➤ *Avantages*

- investissement moins important avec une énergie dépensée faible et une facilité de mise en œuvre
- récupération aisée d'échantillons
- nécessite moins d'eau (40 à 50 l/h) et de n'importe quelle qualité.
- pas de boue de forage, ce qui rend la détection de la nappe d'eau même à faible pression, facile
- pas de problèmes dans des zones fissurées (risque lié à la perte de boue)

➤ *inconvénients*

- le forage s'effectue en discontinue (forage puis curage de cuttings et ainsi de suite)
- forage lent et difficultés pour équilibrer les pressions d'eau jaillissante.
- absence de contrôle de la rectitude
- pas de possibilité de faire le carottage.

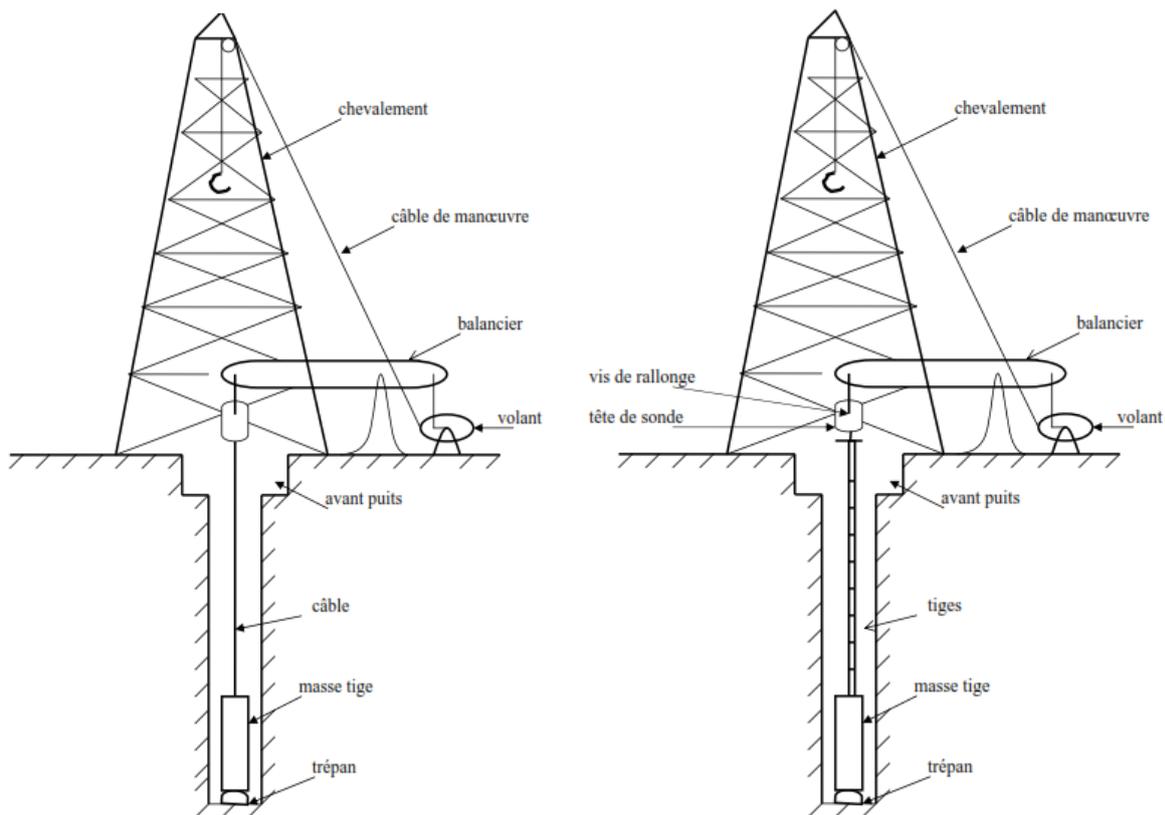


Figure 12: à gauche, Battage au câble « technique Pennsylvanienne » à droite, Battage à tige « technique canadienne »

II-5 La technique marteau fond de trou (MFT)

II-5-1 Principe

Cette technique permet de traverser des terrains durs. Le principe repose sur : un taillant à boutons en carbure de tungstène (Fig.13), fixé directement sur un marteau pneumatique, est mis en rotation et percussion pour casser et broyer la roche du terrain. Le marteau fonctionne comme un marteau piqueur, à l'air comprimé à haute pression (10 à 25 bars) qui est délivré par un compresseur, et permettant de remonter les cuttings (Fig.13).

Cette technique est surtout utilisée dans les formations dures car elle permet une vitesse de perforation plus élevée que celles obtenues avec les autres techniques. Elle permet de forer habituellement des trous de 85 à 381 mm.

➤ *Avantages :*

- *Elle très intéressante dans les pays où l'eau est très rare, elle permet de détecter la présence d'un aquifère lors du forage.*
- *Une mise en œuvre rapide et simple.*

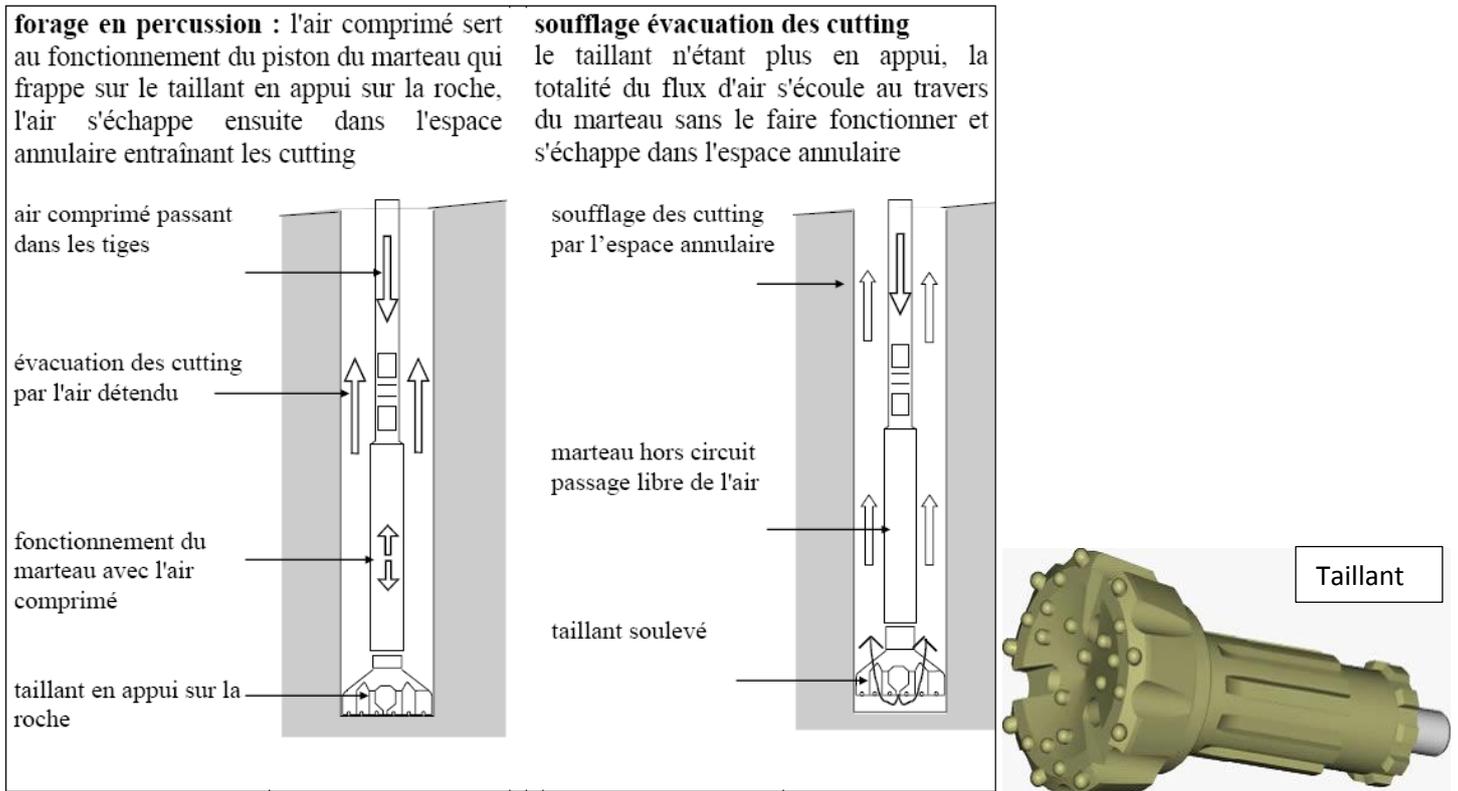


Figure 13: Le principe de fonctionnement du forage MFT, à droite la tête de forage Taillant

➤ Inconvénients

- Procédé peu adapté dans les terrains non consolidés ou plastiques.
- Risque de formation de bouchon de cuttings, nécessitant de fréquents nettoyages du trou par soufflage. Ce phénomène n'existe pas lorsque l'ouvrage est totalement sec ou lorsque le débit des niveaux producteurs est suffisant pour permettre un bon nettoyage par circulation.
- Nécessité d'utilisation de compresseurs très puissants voire de surpresseurs en cas de forassions sous des hauteurs importantes.
- Mauvaise identification de chaque niveau producteur en cours de forassions, le fluide recueilli en tête d'ouvrage intégrant l'ensemble des horizons traversés.

Remarque : Il convient de noter que la forassions MFT à l'air est parfois couplée à l'emploi de mousse de forage (injectée dans le circuit d'air) pour favoriser la tenue des parois et/ou la remontée des cuttings.

II-6 Technique de Forage par havage

II-6-1 Principes

Dans ce type de forage par curage ou havage, les tubages pénètrent dans la formation sous l'effet de leur propre poids ou sous l'action de vérins hydrauliques. Une benne preneuse "vide" rentre progressivement à l'intérieur et remonte les échantillons

Avantages

- Avancement rapide à faible profondeur dans des formations meubles,

➤ Inconvénients

- Méthode inadaptée aux terrains durs. Difficulté de mise en place ou d'arrachement des tiges et des tubages



Figure 14: Forage par havage

II-7 Technique Forage dirigé et horizontaux ou subhorizontaux

II-7-1 Principe

Le forage dirigé est une technique de génie civil permettant de faire passer des câbles, des canalisations pour drainage d'eau, pour assainissement... sous des obstacles (chaussées, bâtiments, cours d'eau...) sans intervenir directement sur ces obstacles.

II-8 Technique forage par tarière

II-8-1) Principe

forage avec une vis longue.

- **Avantage** : Cette technique est utilisée en forage de reconnaissance dans les limons, argiles, marnes ou craie... et permettant de forer des sections de gros diamètres comprises entre 150 mm et 600 mm.
- **Inconvénient** : la reconnaissance ne peut être sauf dans des terrains tendres pour des faibles profondeurs jusqu'à 25 mètres environ.



Figure 15: Forage par tarière

II-9 Choix d'une méthode de forassion

Le mode de forassions à retenir pour la réalisation d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres à prendre en compte au moment de la conception de l'ouvrage, qui sont :

- *Nature géologique des terrains traversés.*
- *Profondeur finale de l'ouvrage*
- *Nature de l'ouvrage réalisé (reconnaissance ou exploitation)*
- *Qualité des fluides des réservoirs.*
- *Environnement du chantier*

II-10 Les fluides de forage

Les fluides de forage sont soit de l'air lubrifié (avec ou sans mousse) pour le forage au marteau fond de trou soit de l'eau plus ou moins chargée en boue pour le forage rotary. Ceux-ci jouent plusieurs rôles qui sont résumés dans le tableau 1 ci-dessous.

Technique de forage	Type de fluide	Rôle du fluide
forage Rotary	Boue de forage : - Bentonite. - Polymère	Remontée des cutting. Colmatage et stabilisation des parois (formation d'un cake). Lubrification et refroidissement du train de tiges et de l'outil.
forage MFT	- Air comprimé lubrifié. - Air comprimé lubrifié + mousse (agent moussant).	Fonctionnement du marteau. Remonté des cutting (soufflage).

Tableau 1: Fluide du forage

II-10-1 Boue à la bentonite

La bentonite, est une variété d'argile très fine : la dimension des particules est inférieure à 1 µm et de densité de 2,6. A l'hydratation ; le volume devient 12 à 15 fois et parfois 30 fois plus grand. Un gramme de bentonite dispersé dans l'eau offre 4 à 5 m² de surface de contact. On ajoute parfois à la boue de bentonite des additifs pour la rendre compatible avec : le terrain, ou avec la pression de la nappe ; ou pour redonner à la boue ses propriétés initiales. Les caractéristiques intrinsèques de cette boue (densité, viscosité) sont contrôlées régulièrement et modifiées si besoin (allègement ou épaissement de la boue par exemple) en cours de forassion. On peut ajouter à ces deux paramètres, le filtra et la teneur en sable (Tableau 2).

<i>Caractéristique</i>	<i>Appareils de mesure</i>	<i>Conséquences et interprétations</i>	<i>remèdes</i>
<i>Densité (moyenne de 1,2)</i>	<i>Balance BAROID</i>	<i>Trop forte : -risque de perte de boue. -cake trop épais. Trop faible : -cake trop mince -risque de dégradation des parois -éboulement et éruption si artisanisme.</i>	<i>Dilution par l'eau en contrôlant les autres caractéristiques. Brasser énergiquement.</i>
<i>Viscosité (moyenne de 40 à 45 secondes MARSCH)</i>	<i>Viscosimètre MARSCH, Viscosimètre STORMER</i>	<i>Trop forte : -difficulté de pompage -risque de coincement pendant les arrêts de circulation. Trop faible : -risque de perte de boue et de coincement par séparation des éléments constitutifs de la boue.</i>	<i>Emploi de pyrophosphate, de tanins, de lignites, de ligno-sulfates</i>
<i>Filtrat 5 à 10 cm³ Cake 5 mm maximum</i>	<i>Filtre- presse BAROID</i>	<i>Trop grand = cake trop mince -risque d'éboulement et de perte de boue Trop faible = cake trop épais -risque d'aveuglement des venues d'eau</i>	<i>Ajouter Amidon, fécule ou CMC. Mixer, brasser.</i>
<i>Teneur en sable</i>	<i>Tamis BAROID</i>	<i>Risque d'usure des pompes à boue.</i>	<i>Employer les dessableurs à cyclones.</i>

Tableau 2: Les caractéristiques de la boue de forage

Les paramètres hydrodynamiques du fluide de la boue (débit, pression) jouent aussi un rôle fondamental :

- Le débit de la pompe influe sur la vitesse de circulation de la boue (vitesse ascensionnelle) et directement sur la remontée des cuttings.

II-10-2 Boue polymère

Les polymères peuvent être utilisés directement en tant que boue ou comme additif aux boues bentonitiques, et sont subdivisés en polymères naturels et polymères artificiels (synthétiques).

Les polymères naturels s'agissent d'un produit organique. La boue polymère permet pour le même poids de matière, de produire un gel 10 fois plus qu'une boue bentonitique, à la même viscosité.

II-10-3 La Mousse

La mousse est un composé gazeux (air) et liquide (eau + produits), où chaque élément agit différemment sous l'effet de la pression et de la température.

II-11 Les paramètres de la forassion (fluide et poussée-rotation)

Les paramètres qui contrôlent l'avancement du forage sont spécifiques à la technique utilisée (rotary, MFT ou carottier) : rotation et poussée sur l'outil (Fig. 13), vitesse ascensionnelle et pression du fluide (boue, eau ou

air). Ils influent de manière différente en technique rotary ou marteau fond de trou sur l'avancement. Le contrôle de ces paramètres est essentiel pour travailler dans de bonnes conditions : avancement, évacuation régulière des cutting, stabilisation des parois.

La vitesse de rotation est la plus régulière possible et en fonction du diamètre de l'outil d'une part et de la nature des terrains d'autre part. En règle générale la vitesse de rotation doit être plus lente pour les terrains durs.

En forage, pour une vitesse de rotation donnée le paramètre essentiel d'avancement d'un forage est le poids appliqué sur l'outil.

La poussée est fonction de la puissance propre de la machine et du poids du train de tige au-dessus de l'outil. De suite, il est clair que plus le forage est profond, plus le poids sur l'outil induit par le poids des tiges est important. Par conséquent, en début de forage la poussée sur l'outil est parfois faible, ceci est particulièrement vrai pour les machines légères, et inversement pour les profondeurs importantes, le train de tige doit être retenu pour ne pas appliquer une poussée excessive à l'outil (Fig. 17).

En forage MFT, la poussée n'est plus le facteur déterminant mais la percussion du taillant sur la roche donnée par la pression de l'air comprimé injectée dans le marteau. Toutefois, un défaut de poussée peut induire des frappes à vides qui sont très néfastes pour le matériel (marteau et tête de forage). Une poussée trop forte endommage les boutons du taillant. En pratique, avec l'expérience la poussée est réglée à l'oreille (son de la frappe lourde = marteau travaillant correctement) de façon à obtenir une vitesse de rotation régulière et à éviter les vibrations excessives du bâti de la machine.

II-12 TD/ Calcule de certains paramètres de forage

II-12 -1 calcul de la poussée et de la vitesse de rotation en rotary et MFT :

La poussée théorique minimum sur un tricône est de l'ordre de 450 kg par pouce du diamètre de l'outil et de 225 kg pour un trilame. Soit pour un trilame de 6'' (150 mm), une poussée minimum de 1350 kg et de 2700 kg pour un tricône de même taille.

Pour un marteau fond de trou, la poussée usuelle est de 100 à 200 kg par pouce d'outils en général. Soit pour un taillant de 6'' (150 mm) une poussée comprise entre 600 et 1200 kg.

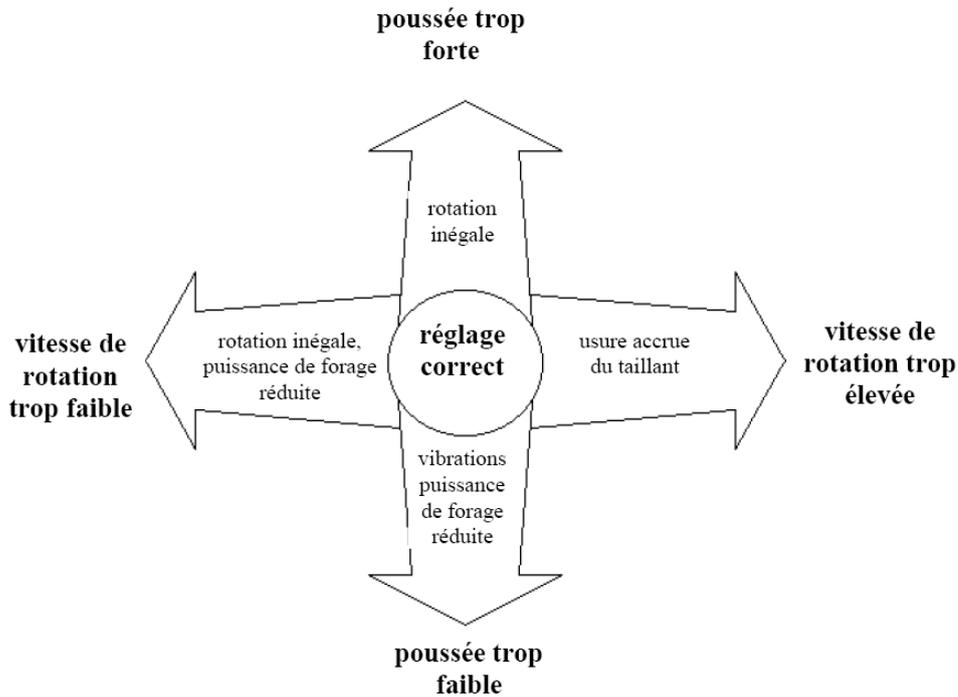


Figure 16: Schéma de principe-réglage poussée/rotation

Le taillant est de 150 mm, la poussée recherchée sur le marteau est de 800 kg environ. Les poids des tiges standards est de 7- 8 kg par mètres.

On voit que la poussée de la machine (en plus du train de tiges) doit être élevée en début de forage alors qu'à partir d'une certaine profondeur il faudra plutôt "retenir" le train de tiges (poids important).

poussée sur l'outil en kg force

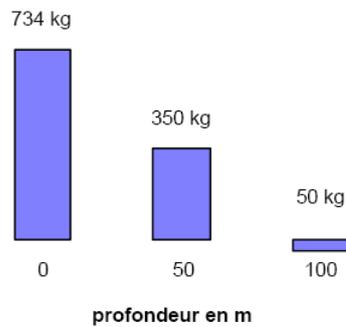


Figure 17: Relation poussée sur l'outil/profondeur

II-12-2 Vitesse de rotation

La vitesse que nous calculons, c'est la vitesse d'un point situé sur la périphérie de l'outil (vitesse tangentielle), c'est à dire le temps que met ce point à parcourir une certaine distance.

Pour calculer le nombre de tours par minute la formule est la suivante : distance par minute = rotation par minutes (tours/mn)

$\pi \times d$ avec $\pi = 3,14$ et $d =$ diamètre de l'outil en mètres

En forage rotary, la vitesse tangentielle minimum doit être de 60 mètres par minutes et de 10 mètres par minute pour le Marteau Fond de Trou soit pour un outil de 150 mm

- en rotary, 127 tours/minutes

- au MFT, 21 tours/minutes

II-12-3 Calcul de la vitesse ascensionnelle du fluide

Pour calculer la vitesse annulaire (cas de l'eau, densité 1), il suffit de prendre le débit de la pompe divisé par la section de l'espace. Soit pour une pompe débitant 19 l/s, un trou de 150 mm et des tiges de 76 mm :

$$Q / (\pi d^2 / 4 - \pi D^2 / 4) = V \text{ (m/s)} \quad 0,019 / (3,14 \times 0,150^2 - 3,14 \times 0,076^2 / 4) = 1,4 \text{ m/s.}$$

Raymond Bowles dans son manuel définit les vitesses annulaires minimales requises en fonction de la nature du fluide: 0,6 m/s pour de l'eau, 0,35 m/s pour une boue de forage (eau + bentonite), et de 15 m/s pour de l'air pure (sans mousse).

Il définit aussi des vitesses maximales à ne pas dépasser qui sont de 1,5 m/s pour de l'eau et de 25 m/s pour de l'air. Au-delà, des phénomènes d'érosion des parois du forage risquent d'apparaître, au risque de perdre le forage.

II-12-4 Calcul de la densité de la boue

La charge au fond d'un trou de profondeur h, provoquée par une colonne de boue de densité d, est :

$$H = h.d/10$$

Si, dans un trou de 120 m de profondeur, l'outil rencontre un aquifère artésien dont la pression résiduelle au sol est 5 bars : La pression totale de la nappe au fond est de :

$$120/10 + 5 = 17 \text{ bars}$$

Pour équilibrer cette pression, la boue doit avoir au minimum, une densité de :

$$d = 17.10/120 = 1,42.$$

Pour arrêter l'éruption.

On utilisant parfois la baryte ($BaSO_4$) de densité 4,3 ; pour alourdir la boue.

II-12-5 Calcule de l'alourdissement et l'allègement de la boue

L'alourdissement des boues s'effectue pour augmenter la densité de la boue (du fluide) et l'allègement pour la diminuer. Pour cela, on ajoute souvent de la baryte, la calcite et la galène pour l'alourdissement et l'eau, l'huile...pour l'allègement. Plusieurs substances selon leur densité qui peuvent être utilisées pour l'alourdissement ou l'allègement de la bqui sont mentionnées dans le tableau 3.

Barytine	: 4,3	Argile	: 2,5
Carbonate de calcium	: 2,7	Gypse	: 2,3
Galène	: 6,8	Dolomie	: 2,8
Ciment	: 3,3	Sel (NaCl)	: 2,17

Tableau 3: Les densités des substances utilisées souvent pour alourdir ou alléger le fluide de forage

$$\text{Alourdissement : } X = \frac{df-di}{da-di} da$$

X : Tonnes d'alourdissement à ajouter par mètre cube de boue

df : Densité finale à obtenir

di : Densité initiale de la boue à alourdir

da : Densité de l'alourdissement

Exemple : Si nous ajoutons de la baryte pour augmenter la densité de 1,4 à 1,5, la quantité sera, 148kg/m³

$$\text{Allègement : } V = \frac{di-df}{df-dal}$$

V : mètre cube de fluide d'allègement à ajouter par mètre cube de boue

di : Densité initiale de la boue à alléger

df : Densité finale à obtenir

dal : Densité du fluide d'allègement

Exemple : Si nous ajoutons de l'eau pour diminuer la densité de 1,5 à 1,4, la quantité sera, 250 litres/m³

II-12-6 calcule des fosses à boue

Les fosses à boue constituent une réserve de fluide de forage et permettent son recyclage par décantation. Elles se forment d'une fosse de décantation, d'une fosse de pompage et de canaux (Fig. 18). Le premier canal doit être assez long pour que la fosse soit en dehors du trottoir du futur point d'eau pour éviter le tassement différentiel sous la dalle. L'axe du second canal doit être décalé de celui du premier pour favoriser la décantation. Les fosses et les canaux sont régulièrement curés et nettoyés des sédiments déposés en cours de forage. Le dimensionnement des fosses à boue se fait en fonction de la profondeur du forage à réaliser.

Une méthode approximative de dimensionnement de la fosse :

* la fosse de décantation :

- largeur = [volume du forage.0,57]^{1/3}

- longueur (m) = 1,25 . largeur

- profondeur (m) = 0,85 . largeur

* fosse de pompage :

- largeur (m) = [volume du forage.0,57]^{1/3}

- longueur = 2,5 . largeur

- profondeur = 0,85 . largeur.

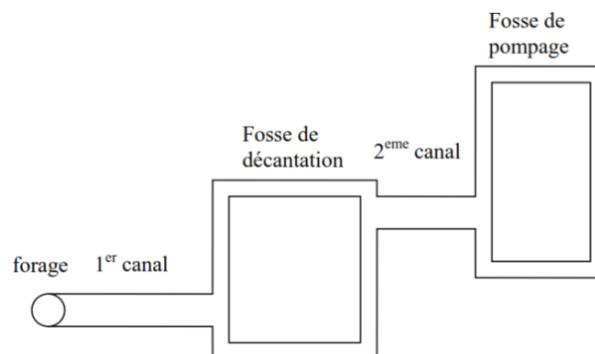


Figure 18: Fosses de boues

➤ EXERCICE

Dimensionner les fosses à boue pour un forage de profondeur 100 m et de diamètre 6" (15cm).

SOLUTION :

1- la fosse de décantation :

$$\text{largeur} = (\pi \cdot 0,15^2 / 4 \cdot 100 \cdot 0,57)^{1/3} = 1,01 \text{ m}$$

$$\text{longueur} = 1,25 \cdot 1,01 = 1,25 \text{ m}$$

$$\text{profondeur} = 0,85 \cdot 1,01 = 0,85 \text{ m.}$$

2- la fosse de pompage :

$$\text{largeur} = (\pi \cdot 0,15^2 / 4 \cdot 100 \cdot 0,57)^{1/3} = 1,01 \text{ m}$$

$$\text{longueur} = 2,5 \cdot 1,01 = 2,51 \text{ m}$$

$$\text{profondeur} = 0,85 \cdot 1,01 = 0,85 \text{ m.}$$

II-13 Le tubage

Le tubage est une action de faire introduire des tubes en acier ou en PVC pour soit pompé une substance liquide (eau par exemple), soit maintenir les parois de forage (Fig. 19).

Le tubage n'est pas systématique mais dépend de la stabilité des parois du forage. Les terrains de surface étant souvent peu consolidés, il est souvent nécessaire d'installer un tubage pour les stabiliser pour la suite du forage. Il est recommandé de cimenter la base du pré-tubage par un coulis de ciment lorsqu'il y a des problèmes importants d'érosion et d'éboulement (le flux d'air peut au fur et à mesure creuser une cavité à la base du tubage dans les arènes granitiques par exemple) ou d'infiltration de pollution de surface (nappe superficielle polluée que l'on veut isoler).

Au rotary, même pour des profondeurs importantes (50 à 80 mètres) les risques d'érosion des parois et d'effondrements sont réduits car la boue en formant un cake stabilise les parois et l'érosion est bien moindre (vitesse de circulation faible de la boue).



Figure 19: Tubage à gauche en acier récupérable et à droite en PVC (récupérable au maximum à 20m de profondeur)

Les terrains de surface peuvent être bouillants (sables, sols) et nécessiter un tubage sur quelques mètres.

Un prétubage PVC peut être temporaire et retiré lorsque sa profondeur d'installation est inférieure à 20 m et bien sûr pas cimenté. Au-delà il devient impossible de le retirer sans risquer de le casser. L'utilisation d'un tubage en acier peut permettre de le retirer quel que soit la profondeur mais dépend de la force de levage de la machine (poids des tubes plus frottements). Le diamètre intérieur du tubage doit être inférieur d'au moins 1 à 2'' ou plus au diamètre de l'outil utilisé pour forer les terrains sous-jacents. Le tubage est donc choisi en fonction de l'outil que l'on désire faire passer dedans.

III Le chantier de forage

L'organisation de chantier de forage doit permettre au foreur d'intervenir rapidement en cas de problème. Les précautions à prendre doivent conduire à déterminer (Fig. 20) :

- un périmètre de sécurité autour du chantier.
- un accès pour les véhicules.
- un approvisionnement en eau (citernes)
- un accès facile pour le remplissage des fosses
- un endroit sec pour la rédaction (bureau)
- une zone de déblais (cuttings)
- un terrain aplani pour faciliter le calage de la machine
- l'emplacement et le creusage des fosses à boue

- le positionnement du compresseur de façon à ce qu'il ne reçoive pas la poussière de forage
- l'installation de toutes les unités de pompage, de pression hydraulique et des moteurs sur un plan horizontal.
- l'outil de mesure de la pression hydraulique doit être protégé du soleil.



Figure 20: Organisation d'un chantier

III-1 Contrôle de la rectitude et de la verticalité

La verticalité de trou assure un bon fonctionnement de forage et faciliter le tubage (les tubes ne traversent pas un trou coudé « courbé »).

On reconnaît qu'une déviation de 0,25% est insignifiante, mais à partir de 0,5% commence d'être sérieuse.

On mesure la verticalité par un inclinomètre.

III-2 Échantillons de forage

Les débris de roche (les cuttings) ou la carotte sont l'image fidèle du terrain traversé, l'échantillon est donc très précieux et doit être traité avec beaucoup de soin. Il est donc recommandé de :

- a) Embaucher des foreurs expérimentés.

- b) Si les trous doivent être longs, ou la roche de mauvaise qualité, choisir un fort diamètre pour avoir la possibilité de diminuer en cours de forage. Plus le diamètre est gros, meilleure est la récupération.
- c) Le foreur doit surveiller la pression exercée sur la foreuse, la vitesse de rotation, le débit et la nature du fluide.
- d) A l'approche du minerai ou de la nappe d'eau, il faut diminuer la longueur des passes pour éviter la perte de carottes par usure (fragments coincés) et/ou pour déterminer l'épaisseur de la nappe d'eau.
- e) En cas de perte de carotte, demander au foreur de recueillir les boues du passage dans le minerai.

La carotte d'un forage sert parfois à déterminer la roche réservoir surtout si elle est fracturée, mais aussi apporte des informations géologiques importantes au géologue. Les carottes de plus gros diamètre fournissent de meilleures informations. Chaque échantillon est placé dans un sac accompagné d'une étiquette portant un numéro (ex. No 0901) et indiquant les analyses désirées. Une partie de la même étiquette est placée dans la boîte de carotte et une autre demeure dans le livret d'étiquettes.

IV Le développement

Le développement d'un forage est une étape très importante qui permet d'éliminer la plupart des particules fines du terrain et du gravier filtre qui pourraient pénétrer dans le forage ainsi que le reste du cake de boue et d'arranger le terrain autour de la crépine afin d'en augmenter la perméabilité.

Cette opération permet d'augmenter de façon significative le débit du forage initialement estimé. La nappe est en effet progressivement mise en production, l'aquifère est libéré de ses fines, la perméabilité et le débit instantané augmentent.

V La crépine

Le rôle de la crépine est d'éviter l'entrée de sables et des éléments fins de l'aquifère à l'intérieur de la colonne de crépine afin d'être aspirés par la pompe, car ils constituent un grand risque pour cette dernière (corrosion, usure).

V-1) longueur et position des crépines

Le choix de la longueur d'une crépine dépend de :

- le niveau de la nappe.
- le rabattement de la nappe pendant son exploitation.
- l'épaisseur de la nappe à exploiter.
- la nature et la structure des couches aquifères formant la nappe.

V-2) En Nappe captive

On crépine 80 à 90%:

- *Dans le cas des terrains hétérogènes* : on crépine les couches les plus perméables.
- *Dans le cas des terrains homogènes* : on crépine 80 à 90% de son épaisseur, en s'assurant que le rabattement ne descend pas sous le niveau du toit.

V-3) En nappe libre en terrain homogène

Il est recommandé de crépiner au moins le tiers inférieur sans dépasser une hauteur de 50% à 80%.

- *Dans le cas des terrains hétérogènes* : on crépine les couches les plus perméables.
- *Dans le cas des terrains homogènes* : Pour une nappe ayant une épaisseur inférieure à 45m, on crépine au maximum 50%, pour une nappe à épaisseur plus grande, on peut crépiner jusqu'à 80% de son épaisseur.

V-4) différents types de crépines

Comme la crépine est l'élément essentiel du forage ; son choix se fait selon :

- ouvertures continues sur sa périphérie permettant un écoulement régulier.
- surface d'ouverture maximum (compatible avec sa résistance).
- les ouvertures (les fentes) doivent être croissantes vers l'intérieur pour éviter le colmatage.
- choix de la matière pour éviter la corrosion.

Il y a plusieurs types de crépines (Fig. 21), leur matière peut être en acier ordinaire, en acier inoxydable, en PVC...etc.

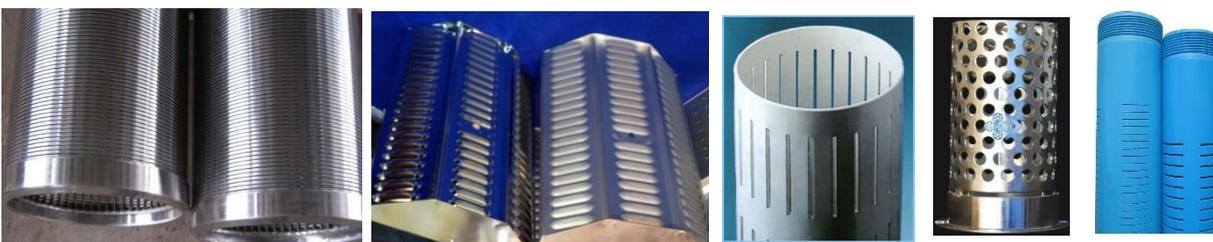


Figure 21: différents types de crépines de gauche à droite : Les crépines à fentes continues (type JOHNSON), les crépines à persiennes, les crépines à trous oblongs, les crépines à trous ronds et les crépines en PVC...

V-5) paramètres de crépinage

V-5-1) Ouverture des fentes de crépines

Elle doit être en principe, inférieure à la plus fine granulométrie du gravier de filtre. Sa détermination est en fonction de la courbe granulométrique de la formation.

La forme et la répartition des ouvertures de crépines sont plus ou moins aussi importantes que la détermination de l'ouverture elle-même, puisqu'elles conduisent à un coefficient d'ouverture le plus élevé que possible pour obtenir le meilleur rendement d'exploitation du forage.

V-5-2) TD/ Coefficient d'ouverture des crépines

Pour les crépines JOHNSON le coefficient d'ouverture est égal à :

$$Co = e.100 / (e+h)$$

Où e : étant la dimension de la fente unique hélicoïdales (intervalle entre deux spires)

h : étant la largeur du fil enveloppe (base du triangle de la section).

V-5-3) Vitesse de pénétration de l'eau dans la crépine

Le coefficient d'ouverture doit être tel qui permet d'avoir une vitesse d'entrée de l'eau de l'ordre de 3 cm/s afin de réduire l'érosion, la corrosion, l'incrustation et la perte de charge.

Certains recommandent des vitesses entre 3 et 7,5 cm/s. Pour des formations silteuses, la vitesse correcte est de 2 cm/s. Tandis que beaucoup de chercheurs recommandent des vitesses en relation avec la transmissivité de la nappe

EXERCICE

Une crépine à fente continue de $\varnothing 356$ mm et de 6 m de longueur doit être placée dans un forage. Le fil utilisé pour ce type de crépine est de 4 mm de largeur ayant une ouverture de fente de 1,5 mm. Le débit attendu est de 7,8 m³/min.

-la surface par mètre linéaire de crépine = 1,12 m².

-la surface totale pour 6 m linéaires = 6,7 m².

-le coefficient d'ouverture $Co = 1,5 .100 / (1,5 + 4) = 27 \%$

-la surface totale ouverte $Sc = 1,8$ m².

-la surface ouverte par m² de crépine = 0,3 m².

-vitesse d'entrée dans la crépine $Q = V.Sc$ d'où $V = Q/Sc = 7$ cm/s.

Cette vitesse est nettement supérieure à la vitesse préconisée, il est donc nécessaire soit d'augmenter le diamètre de la crépine, soit d'augmenter la longueur de celle-ci, si l'épaisseur de l'aquifère et le rabattement de la nappe le permettent.

Pour obtenir la longueur de crépine nécessaire, on cherchera la surface d'ouverture correspondant à une vitesse de 3 cm/s, soit :

$$V.Sc = V1.Sc1 \rightarrow Sc1 = V. Sc /V1 = 0,07.1,8/0,03 = 4,2 \text{ m}^2/\text{ml}$$

La longueur de la crépine $\varnothing 356$ mm nécessaire serait de : $4,2/0,3 = 14$ m.

V-5-4) Diamètres de tubes et crépines

Le choix des diamètres d'une colonne de tubage (crépine), est souvent conditionné par l'encombrement de la pompe, et celui-ci est en fonction de débit. Il est recommandé de laisser un pouce (2,54 cm) de jeu entre pompe et tubage

VI Le Massif filtrant (gravier additionnel, massif de gravier)

Le rôle du gravier additionnel est d'augmenter les débits d'exploitation, de diminuer les vitesses d'écoulement, et d'éviter le risque d'érosion en évitant l'entrée des sables fins. Dans la pratique, le gravier additionnel est défini par la granulométrie de la formation et par l'ouverture de la crépine. Il doit être uniforme, propre, calibré et siliceux de préférence (Fig. 22). Le gravier descend dans l'espace annulaire le long du tubage. Une remontée de boue par le tube de forage indique une descente correcte du gravier. Lorsque le niveau du gravier atteint le haut des crépines, la boue ne remonte pas par le tube mais par l'espace annulaire : le massif de gravier doit alors dépasser le haut des crépines sur quelques mètres.



Figure 22: Le massif filtrant en gravier

VII La cimentation

La cimentation est une opération indispensable qui permet de protéger le forage des pollutions extérieures ; même si une dalle est par la suite construite autour du tube de forage, seule une cimentation correcte peut prévenir les écoulements préférentiels d'eau d'infiltration qui peuvent se développer le long du tubage. Un bouchon d'argile doit être mis entre le gravier filtre et le ciment, afin d'éviter que le laitier de ciment colmate le massif filtrant.

VII-1 TD/ Préparation du lait de ciment

Cette opération consiste à remplir avec un mélange eau + ciment (laitier de ciment) l'espace annulaire au-dessus du massif de gravier jusqu'à la surface du sol. Le dosage est d'environ 50 litres d'eau pour 100 kg de ciment, ce qui donne 75 litres de laitier. Si vous disposez de bentonite, utiliser le mélange

Suivant : 70 litres d'eau, 4 kg de bentonite et 100 kg de ciment ; ce mélange évitera à l'eau de filtrer hors du ciment, mais le temps de prise sera légèrement supérieur.

VII-2 Mise en place

Procéder de la même façon que pour la mise en place du gravier filtre. Remplir l'espace annulaire jusqu'au niveau du sol, et laisser sécher un minimum de 12 heures avant d'effectuer les opérations de développement. La cimentation doit être faite en règle générale avant les essais de pompage. Cependant, lorsqu'il n'est pas possible d'attendre 12 heures, il est toujours possible de faire une cimentation après les opérations de développement et d'essais de pompage, dans la mesure où un bouchon d'argile a été déposé au-dessus du gravier filtre.



Figure 23: Cimentation

VII Capot du forage

Le forage à la fin doit être fermé soigneusement avec un capot (et un cadenas) et protéger par une dalle de béton (Fig. 24), pour à la fin obtenir une colonne comme celle illustrée dans la figure 24.

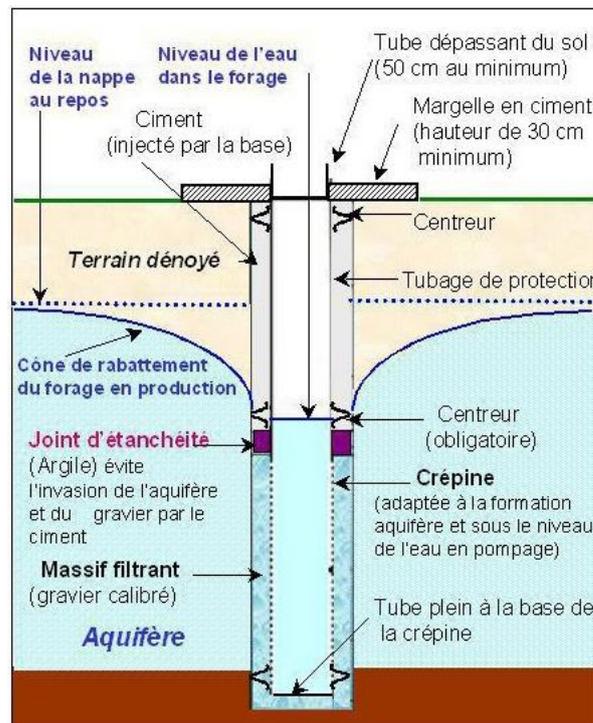


Figure 24: A gauche fermeture d'un forage et à droite une colonne d'un forage d'eau

VIII Rôle de l'ingénieur géologue

Chaque environnement hydrogéologique constitue un cas particulier où la précision de l'échantillonnage dépend du sens pratique et de l'esprit critique du géologue. Celui-ci doit s'assurer que les échantillons sont les plus représentatifs possibles. Il doit tenir compte des contraintes budgétaires et des contraintes de production puisqu'il faut que l'échantillonnage ne ralentisse pas la production.

L'ingénieur géologue utilise ces échantillons au moment de l'exploration, de la définition et de la mise en valeur pour prédire les ressources et réserves du gisement. L'échantillonnage permet l'établissement de la courbe granulométrique pour définir les caractéristiques des crépines et du gravier additionnel.

VIII-1) Rangement des carottes

Les carottes sont placées par le foreur dans des boîtes rainurées spécialement conçues à cette fin. Chaque boîte, d'une longueur de 0,5 à 1m peut contenir cinq rangées, soit 5m de carottes (Fig. 5 & 25). Il est très important pour le géologue de bien s'entendre avec ses foreurs sur la façon de disposer les carottes dans les boîtes. La méthode la plus courante consiste à les disposer selon l'ordre naturel de lecture :

0 >>>>> 1
 1 >>>>> 2

Chaque passe de 1m de longueur occupe une rangée de la boîte. Lorsque des sections de carottes ne sont pas récupérées, il faut placer des baguettes (préparées à l'avance) ou des bouts de branche à la place. La lecture doit toujours donner la distance précise du collet du trou.

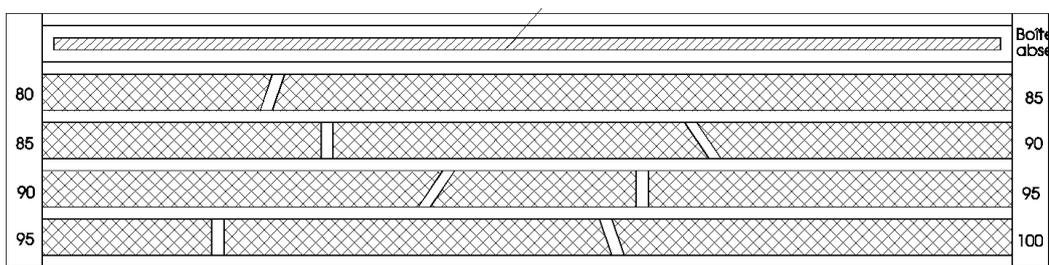


Figure 25: Une caisse de carotte, rangeant des carottes mètre par mètre de 85m à 100m de profondeur.

Le rangement des carottes et l'étiquetage des boîtes est la responsabilité du foreur, mais le géologue doit s'assurer que les indications dans le bout des boîtes sont rigoureusement fidèles à la réalité. La moindre erreur de disposition des carottes ou d'identification des boîtes risque de compromettre la pertinence de l'information recherchée. L'étiquette doit porter le nom du projet, le n° du trou et la profondeur couverte à partir du collet.

VIII-2 Description Logging de la carotte

Le géologue mouille d'abord les carottes pour en faire ressortir les contrastes. Il fait ensuite l'étude de toutes les caractéristiques des carottes pour faire le journal de sondage qui doit contenir toutes les informations utiles sur le sondage (Fig. 26 & 28). Les compagnies d'exploration ont généralement leurs formulaires particuliers pour le journal de sondage. Le tableau suivant fournit un modèle de journal de sondage.

MODÈLE DE JOURNAL DE SONDAGE

Trou n°: Dates: début..... fin

Coordonnées du collet N-S..... E-W

Élévation du collet

Direction Inclinaison

Collet dans la galerie Section

Diamètre de la carotte

Journal fait par Date

Profondeur Description Ech.N° Distance Analyses

O - X Tubage (casing)

X - Y Roches A-208 190'-198' x% Cu, Zn...

Indiquer: , Pétrographie, Altération, Cisaillement, Structure-minéralisation etc.

VIII-3 TD/ Évaluation du taux de récupération

Le taux de récupération est :

Taux = carotte recouvrée

Longueur totale forée = 130 cm = 114 cm = 80%

On vise toujours un taux de récupération de 100%.

VIII-4 RQD: Rock quality designation

Le R.Q.D. est une mesure très utilisée pour évaluer rapidement les propriétés géomécaniques d'un massif rocheux.

On retrouve 2 définitions différentes du R.Q.D. dans la littérature. i. (Peters, 1987, p.160)

R.Q.D. = Somme des longueurs $> (10\text{cm}, 2 \times \text{diamètre de la carotte}) / \text{longueur totale de la carotte}$.

Dans un trou NX (5.5cm), si la somme des longueurs $> 10\text{cm}$ est 71.5 cm, dans une carotte mesurant 130 cm, alors:

R.Q.D. = $71.5/130 \text{ cm} = 55\% \Rightarrow \text{moyen}$

R.Q. D.: 0 - 25% Très pauvre

25 - 50% pauvre

50 - 75% moyen

75 - 90% bon

90 -100% excellent

Pour un trou BQ (3.6cm), on comptera plutôt la somme des longueurs des fragments de taille supérieure à 7.2 cm.

ii. (Priest, 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, p.128) considère plutôt un seuil fixe de 10cm peu importe le diamètre du trou. Cette dernière définition est celle utilisée le plus fréquemment.

Note : Une carotte présentant des ondulations au toucher peut indiquer qu'une trop grande pression a été exercée sur la couronne.

VIII-5 LE SUIVI D'UN FORAGE

Le suivi du forage est le contrôle en permanence des paramètres de forage et des carottes prélevées. Le suivi des paramètres de forage consistait en un chronométrage précis des différentes passes, des manœuvres diverses et des temps d'attente. Les faits divers s'étant produits en cours de passes (changement de couleur de la boue, blocage, avance anormalement faible...) seront également répertoriés en fonction de la profondeur et mis en regard de toutes les autres informations recueillies. Ces différentes informations recueillies sur le terrain ont permis d'établir différentes courbes et diagrammes présentant un certain intérêt dans l'explication des performances du chantier (Fig. 27 & 29) :

VIII-5-1 La courbe d'état d'avancement du chantier de forage : cette courbe donne l'évolution du forage en profondeur en fonction du temps total passé sur chantier. Y sont répertoriés les débuts et fins de postes et leurs côtes respectives, les changements de couronnes. Cette courbe permet de visualiser la vitesse d'avance globale du chantier et de localiser les différents problèmes survenus.

VIII-5-2 La courbe d'avance moyenne par tige : cette courbe donne l'avance moyenne des tiges en fonction de la profondeur. Elle permet de détecter les variations de vitesses d'avances en fonction de la profondeur et de relier par la suite ces performances à la coupe lithologique du forage.

VIII-5-3 La courbe du taux de récupération de carottes : cette courbe donne le taux de récupération de carotte en fonction de la profondeur. Le taux de récupération de carotte est défini comme étant le rapport entre la longueur de la carotte récupérée et la longueur de la passe réellement forée. Ce paramètre permet de localiser le passage de couches facilement lessivables lors du forage. Ce fut notamment le cas lors du passage de différents conglomérats à matrice argileuse tendre et gros galets.

VIII-5-4 La courbe de rendement de chantier : cette courbe donne le rendement de chantier en fonction de la profondeur. Le rendement de chantier est défini comme étant le rapport entre le temps passé en forage (forage réel + manœuvres de changement de tige en cours de forage) divisé par le temps total passé sur le chantier. Ce paramètre permet de mettre en évidence des dysfonctionnements sur le chantier et faire le lien avec la lithologie.

VIII-5-5 Le diagramme de répartition de l'utilisation du temps en cours de forage (Fig. 27) : ce diagramme et le diagramme bilan du forage. Il donne les répartitions des différentes opérations : forage, manœuvres diverses, réparations, ... sur toute la durée du forage.

TD/

Exp. Sondages effectués par l'école polytechnique des Mons

BER3 Le sondage BER3 a débuté le 23 septembre 2002 et s'est terminé le 27 novembre 2002 et a duré 46 jours. Le forage a été carotté entièrement de la surface jusqu'à -349.95 m. Les couches wéaldiennes ont été rencontrées à environs -265 m et ont une épaisseur d'environ 50m. Le socle houillier a été touché à environs -315 m. La coupe lithologique (Fig. 26 & 28) a été réalisée sur la base de la description des carottes de forage. Elle reprend les différentes formations rencontrées, le nom des unités géologiques, et indique la présence de passe conglomératiques et de faille ainsi que leur inclinaison.

Les diagraphies réalisées permettent de détecter les différentes structures lithologiques présentes dans le sous-sol et de localiser précisément le toit de la

formation wéaldienne à -263 m, et de positionner la transition wéaldien - houillier à -316 m. La puissance des argiles wéaldiennes est donc de 53 m.

Ces informations sont reprises sur la figure comparative (Fig. 29) des informations du forage. Sont repris sur cette figure les différentes informations recueillies lors du suivi du forage. Le premier diagramme est la courbe d'état d'avancement du forage. Le second est celui de l'avance moyenne par tige. Le troisième est celui du taux de récupération de carotte. Le quatrième est celui du rendement de chantier.

La figure comparative permet de constater que les problèmes majeurs rencontrés lors du forage tirent essentiellement leur origine des formations conglomératiques à matrice argileuse difficiles à forer. C'est en effet dans ces couches que simultanément les rendements de forage, les taux de récupérations de carotte et les avances par passe sont les plus faibles, et les taux d'usure de couronnes les plus élevés. Le rendement moyen de chantier tourne environs de 80% dans les phases de forage normal. Il chute à 20% voire moins dans les faciès conglomératiques. Le taux de récupération est excellent entre 90 et 100 % sauf dans les passages de conglomérats à matrice argileuse où il chute à moins de 50%.

Le diagramme de répartition du temps donne une bonne idée de la répartition des différentes tâches sur la durée du chantier.

Sondage BER4

Le sondage BER4 a débuté le 2 décembre 2002 et s'est terminé le 20 décembre 2002. Il a été réalisé en 15 jours dont 10 jours de forage non stop. Le forage a été réalisé en destructif jusque -268 m et ensuite a été carotté de -268 m à -330.85 m. La décision de carotté à -268 m a été prise le 11 décembre car les cuttings qui remontaient avec la boue de forage semblaient être de l'argile sombre. Les carottes remontées n'ont pas montré d'argiles wéaldiennes.

Sondage BER2

Le sondage BER2 a débuté le 2 décembre 2002 et s'est terminé le 10 mars 2003. Le forage a été réalisé en destructif jusque -268 m et ensuite a été carotté de -268 m à -330.85 m. La décision de passer en forage carotté à -268 m a été prise le 17 décembre car les cuttings qui remontaient avec la boue de forage semblaient être de l'argile wéaldienne. Les intempéries de début d'année ont provoqué un retard dans la reprise du chantier, et lors de la reprise, un ébouleme

du puits a été constaté à -63 mètres. Un nettoyage du trou a été nécessaire. Les carottes remontées à partir de -268 m ont montré des argiles wéaldiennes. Le socle houiller a été atteint vers -291 m

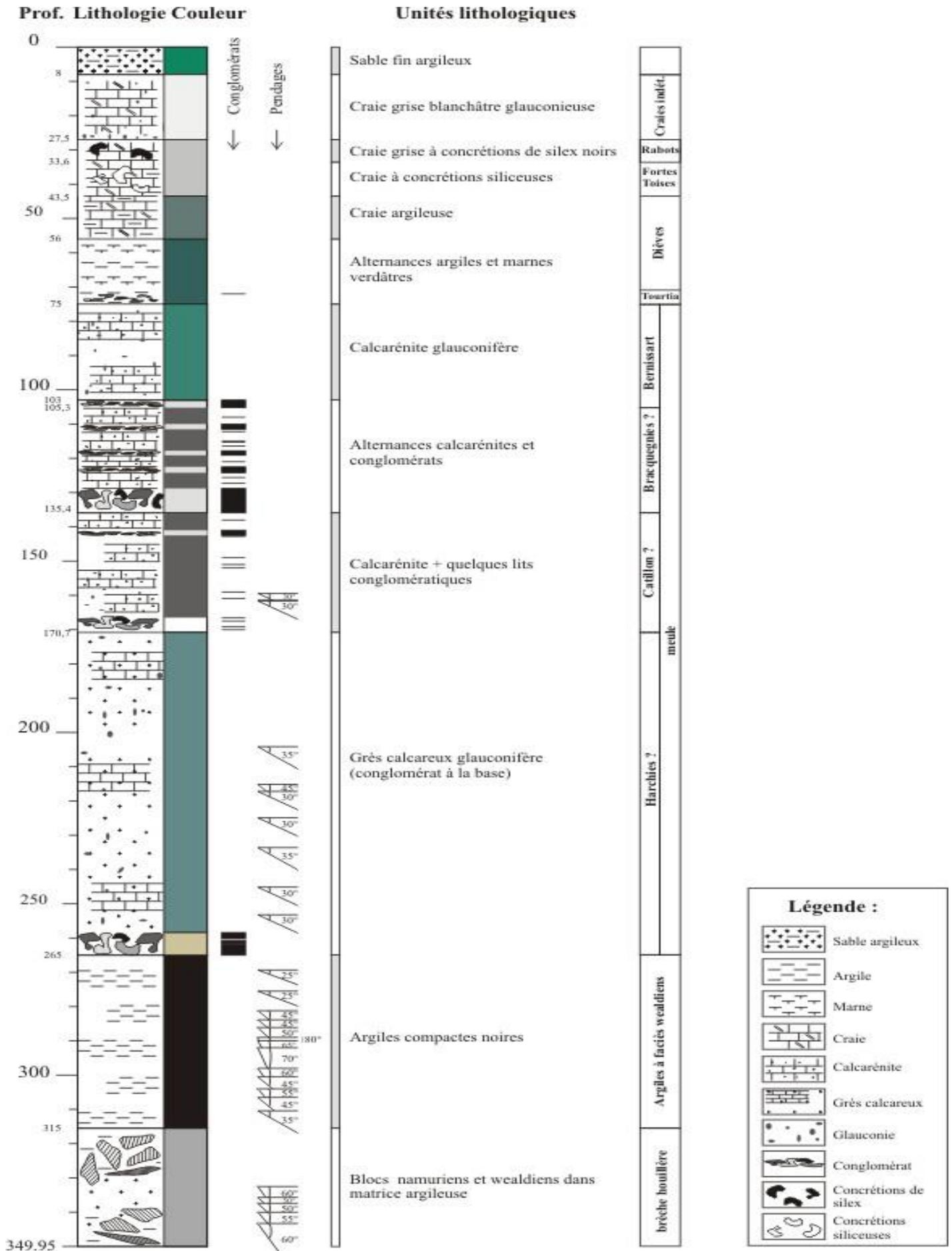


Figure 26: Log lithologique

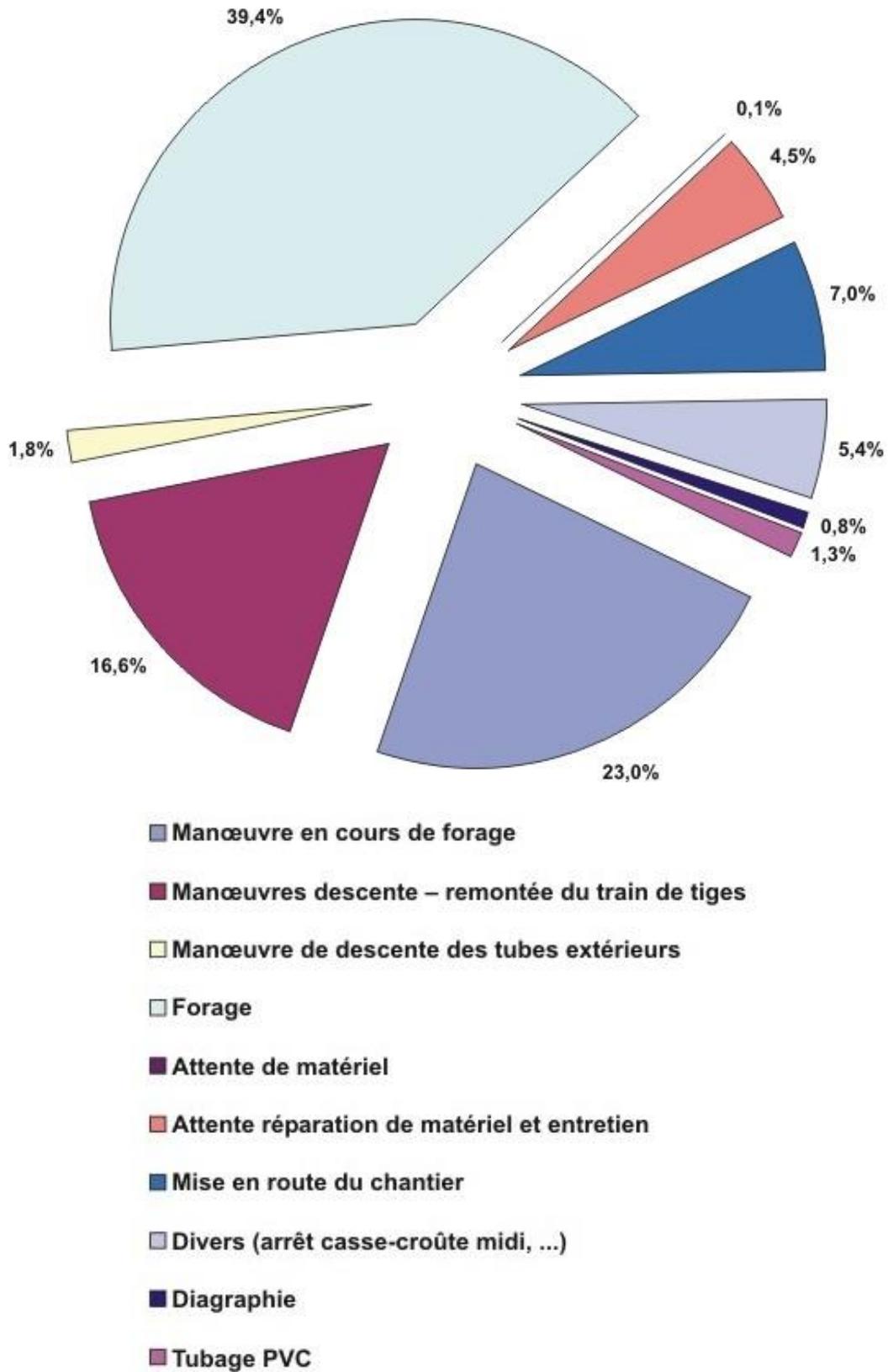


Figure 27: Répartition du temps du forage

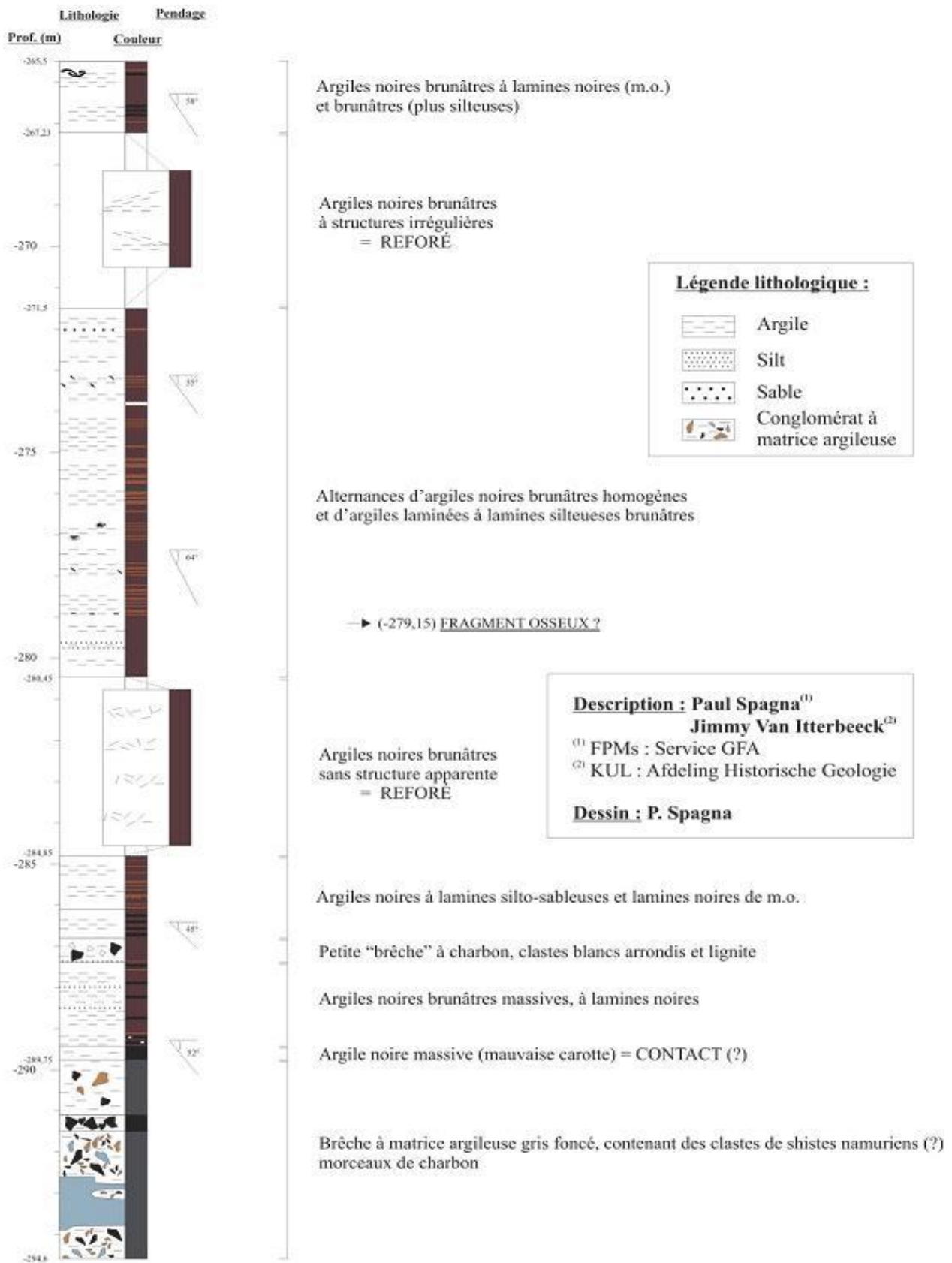


Figure 28: Log lithologique du forage BER2

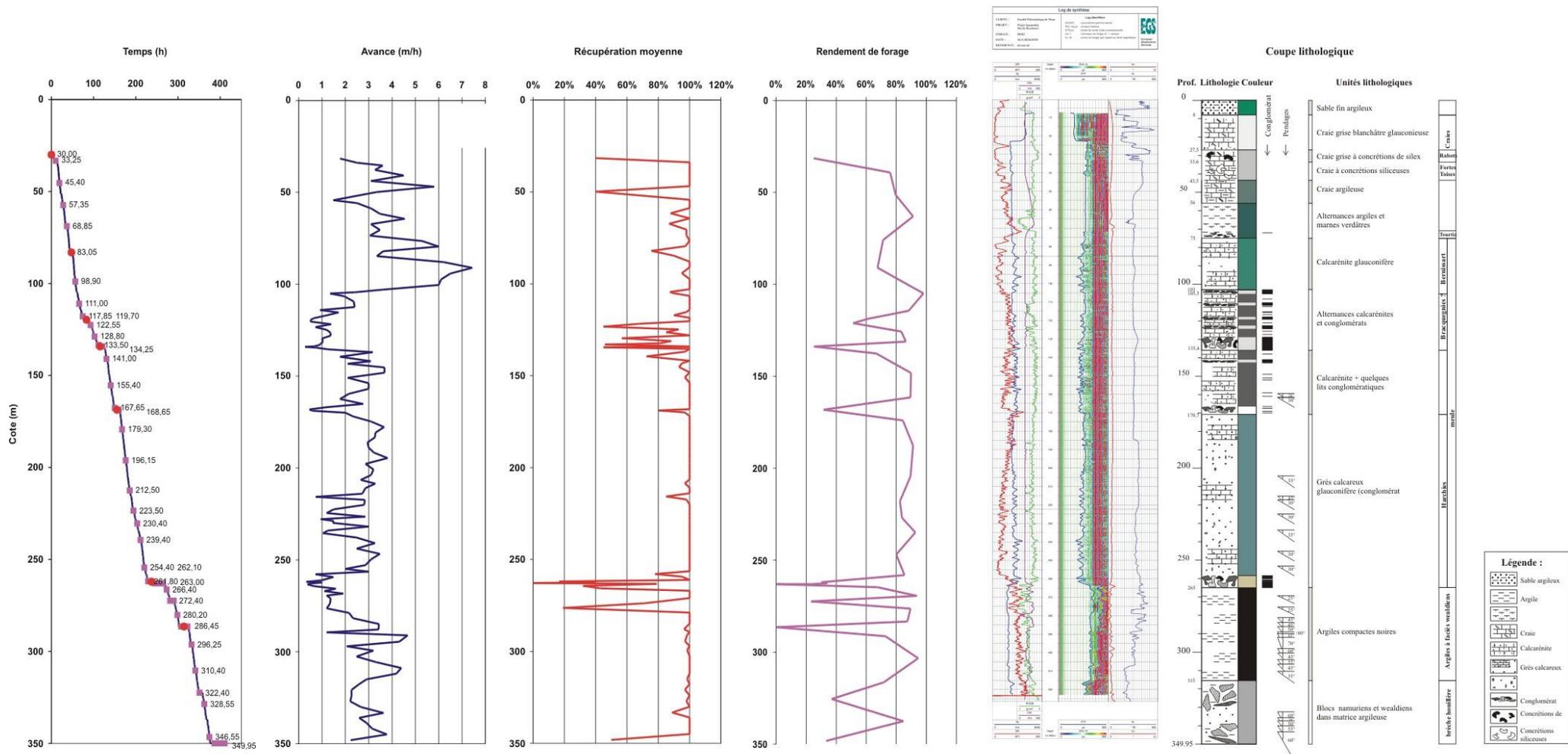


Figure 29: Courbes comparatives