

Techniques de forage

Le **forage** est une technique ancienne qui date de plus de 4000 ans. Elle est **originnaire de chine** où des morceaux de bambous attachés à un poids lourd permettaient de forer des puits d'eau. Ils atteignaient des profondeurs de l'ordre de mille mètres.

SONDAGE OU FORAGE ?

Un sondage est un trou destiné à étudier le sous-sol (nature des roches, structure, etc.) sans en exploiter quelque ressource (ex. sondage minier).

Un forage est un trou qui a vocation à être utilisé ou exploité (ex. forage d'installation de piézomètre, forage de pompage en eau potable, forage géothermique, forage pétrolier, forage de mise en solution, forage géotechnique de fondation par pieux).

En outre, l'action de faire le trou est appelée « foration », que ce soit pour un sondage ou un forage.

Un sondage ou un forage peut atteindre des profondeurs allant de quelques mètres à plusieurs milliers de mètres. Pour mémoire, le sondage le plus profond jamais réalisé, à but scientifique a atteint la profondeur surprenante de 12 262 m (« sondage SG3 » ou « sondage profond de Kola » foré entre 1970 et 1989 en Russie, dans la péninsule de Kola).

LES DOMAINES D'APPLICATION

Les principaux domaines du sondage et du forage sont :

- a) Technique : les forages techniques sont destinés pour les buts suivants : passer des canalisations et des câbles sous des obstacles (forage horizontal), pompage d'eau, injection du gaz liquéfiés comme le propane dans des formations poreuses et perméables (pour réaliser des stockages souterrains), évacuation des eaux, extinction des incendies des puits pétroliers et dans les mines.
- b) Préparation de sols en vue de la réalisation d'ouvrages de génie civil : pieux forés, injection du ciment en vue de la consolidation des appuis de ponts, des digues, etc.. (ex. bâtiments, barrages, tunnels, édifices d'art).
- c) Orientation des recherches : (premier indice) des forages ont pu avoir déjà été faits dans la région pour des minéraux, pétrole, eau, granulats... Si les carottes, logs ou coupes de sondage sont disponibles, c'est une première information pour orienter les travaux.
- d) Reconnaissance : forages faits pour établir des coupes stratigraphiques ou des informations lithologiques. Spécialement dans des régions de gisements stratiformes.
- e) Investigation de région cible: les informations souterraines renseignent sur la structure, la stratigraphie, le zonage et servent de points d'interprétation des données géophysiques, sismiques et de diagaphiques.
- f) Vérification des cibles: le forage montre la présence ou l'absence de minéralisation. Si des indices encourageants sont révélés, la cible devient un prospect.

g) Évaluation: la minéralisation est délimitée et échantillonnée pour déterminer son tonnage, sa teneur et évaluer s'il s'agit d'un gisement.

h) Préproduction : Le prospect s'achemine vers l'étape de la mine. D'autres forages délimitent mieux le gisement. On procède au calcul des réserves, aux investigations géotechniques et métallurgiques et on planifie le cheminement du développement éventuel de la mine.

i) Production ou cul-de-sac: Si les réserves délimitées sont insuffisantes pour les conditions du marché, on aboutit à un cul-de-sac (Situation bloquée, sans issue).

Aujourd'hui, il existe **deux grandes approches du forage** :

- Le **forage manuel** réalisé avec des outils manuels pour des puits peu profonds jusqu'à 40 m de profondeur.

- Le **forage mécanisé** avec l'aide d'équipements légers ou de plateforme de forage et d'équipements lourds grâce auxquels il est possible d'atteindre de grandes profondeurs. Dans certains cas, ces forages mécanisés sont montés sur des plateformes mobiles autotractées, beaucoup plus rapides, faciles à utiliser et permettant de forer dans des sols durs à grande profondeur, mais ils sont beaucoup plus onéreux (coûteux).

Remarque : les forages mécanisés sont souvent trop coûteux pour les populations des zones rurales ou périurbaines les plus pauvres. Il ne faut donc pas négliger, même si elles sont moins rapides et un peu plus fatigantes, les techniques de forage manuelles.

Le forage manuel est une solution pratique qui, bien que fatigante, est intéressante et peu coûteuse pour les points d'eau de moins de 40 mètres de profondeur dans les sols meubles tels que l'argile et le sable et les formations de roches tendres telles que les grès et calcaires tendres. Si les caractéristiques du sol le permettent, le prix d'un forage manuel peut en effet se révéler plus de 4 fois moins élevé qu'un forage mécanisé. Mais lorsque le sol est dur, ou lorsqu'on veut forer à une grande profondeur ou éviter des travaux pénibles ou aller plus vite et qu'on en a les moyens, les forages mécanisés constituent une meilleure, voire indispensable solution.

Les forages manuels à moindre coût intéressent les ONG (Organisation Non Gouvernementale) et les pouvoirs publics car ces techniques permettent de réaliser plus de puits, dans les villages, les petites communautés et les agriculteurs des zones rurales à faibles ressources car cela leur permet de prendre eux-mêmes en charge, avec un minimum d'aide et de conseils, la réalisation de petits forages.

En fait, il existe de nombreux procédés entre lesquels il peut être d'ailleurs assez difficile de se reconnaître, tant leurs noms sont parfois curieux, et même souvent différents selon les ouvrages ou la langue utilisée (souvent l'anglais).

LES FORAGES MANUELS

Nous avons répertoriés dans ce paragraphe quatre techniques différentes de forages manuels d'usage courant en Afrique. Ces différentes techniques sont les suivantes : la technique du lançage à l'eau, le forage à la tarière, le forage à la percussion et le forage à la boue. Ces techniques de forage manuel sont estimées 5 à 10 fois moins chères que les ouvrages conventionnels. Cependant, on observe des limitations techniques ne permettant pas d'utiliser systématiquement de telles techniques de forage.

a) Le forage à la tarière (hand-auger drilling) profondeur maxi de 25 mètres



Le forage à la tarière consiste à faire tourner une vrille appelée tarière avec une grande poignée. On rajoute des allonges en acier au fur et à mesure que la tarière s'enfonce dans le sol. Lorsque la tarière est remplie de débris du sol, on la remonte pour la vider puis on répète l'opération.

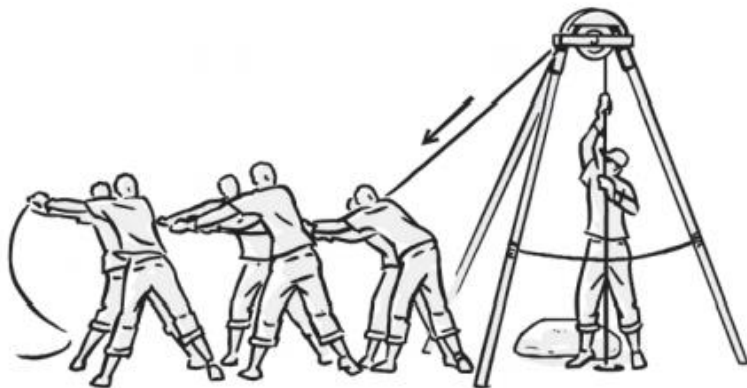
Généralement au-dessus du niveau de la nappe, le trou du forage reste ouvert et n'a pas besoin d'être consolidé. Lorsque l'on a atteint la nappe, un pré-tubage temporaire peut être utilisé pour empêcher l'effondrement des parois du trou du forage. Le forage se poursuit à l'intérieur de ce pré-tubage à l'aide d'une **tarière de mise en eau** jusqu'à ce que la profondeur désirée soit atteinte (la tarière de mise en eau est une tarière à clapet ; elle est utilisée afin d'évacuer l'eau et les résidus du milieu poreux). Puis, on enlève le pré-tubage et on met en place le tubage permanent.

Le forage à la tarière peut être utilisé jusqu'à une profondeur d'environ 15 à 25 mètres

Applications géologique : technique appropriée pour les formations non consolidées : Sables, limons & argiles tendres.

Cette technique est largement utilisée dans des pays tels que le Niger, le Tchad, le Zimbabwe, la Tanzanie,

b) Le forage à la percussion (appelé aussi « battage », ou « percussion drilling », ou encore « stone hammer ») profondeur maxi : également 25 m



Dans le forage à percussion, un lourd outil coupant (**le trépan**) est attaché à une corde ou un câble puis projeté à la force de son poids dans le trou du forage. **Un trépied** (ou chèvre ou tripode) est utilisé pour permettre le relevage de l'outil avec la corde ou le câble. En retombant, le trépan fragmente le sol. De l'eau est ajoutée dans le trou pour qu'elle se mélange aux débris et qu'elle se transforme en boue. Cette boue consolide les parois du forage et soulève les débris de roche mais est aussi remontée à la surface avec une tarière de mise en eau (identique à la tarière à clapet). Puis, le trépan est de nouveau remonté et relâché dans le trou autant de fois que nécessaire. L'utilisation d'une colonne de boue et surtout d'un **pré-tubage**, en plastique ou mieux en acier, est souvent nécessaire pour éviter tout risque d'effondrement du trou, surtout si le sol est meuble.

La technique à la percussion (ou battage) est généralement utilisée jusqu'à des profondeurs de 25 mètres pour l'eau potable mais des forages plus profonds peuvent être réalisés.

Le forage à percussion peut être combiné à d'autres techniques de forage comme la tarière manuelle. Cette dernière permet en effet de forer rapidement les premiers mètres du forage jusqu'à des terrains durs.

De la main d'œuvre est nécessaire pour réaliser ce forage, ainsi, dans une localité rurale, tous les habitants du village peuvent prendre part à la réalisation du puits commun.

Application géologique : appropriée pour les formations non consolidées et consolidées: Sables, limons, argiles dures, calcaire tendre, latérite, les couches contenant des graviers et des petits cailloux.

c) Le forage par injection d'eau sous pression ou lançage à l'eau (ou jetting ou washbore) profondeur maxi de 35 à 45 m selon la technique

Il existe deux techniques de lançage à l'eau :

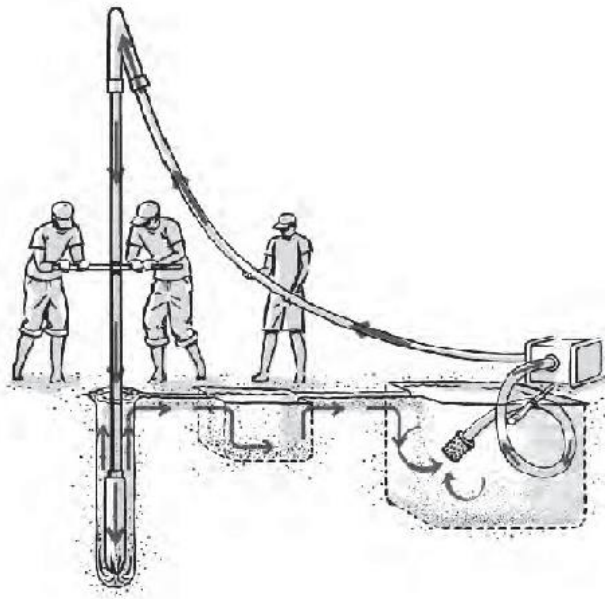
1) le lançage rapide sous pression ou « lançage direct » (profondeur maxi : 35 m)

La technique consiste à faire pénétrer un tuyau dans le sol grâce à l'injection sous pression d'une grande quantité d'eau avec une motopompe ou une pompe à pédale. Elle est utilisée pour forer rapidement, le plus souvent en moins d'un jour, des forages peu profonds à coût moyen.

On confond parfois **puits foncé** (ou puits instantané) et **puits foré** car ils utilisent des procédés relativement similaires.

Ce qui différencie surtout le puits foncé du puits foré, c'est que l'on y enfonce directement un tube équipé à son extrémité d'une crépine, alors que celle-ci n'est mise en place qu'à la fin des opérations pour un puits foré.

2) le forage (ou lançage) à l'eau rotatif ou rotary manuel (rota sludge en anglais) profondeur maxi : une quarantaine de m



Cette technique est l'une des plus utilisées. C'est une évolution de celle du lançage direct. Elle permet des forages plus profonds, mais ne peut être utilisée que dans des sols constitués de matériaux alluvionnaires, tels que des sables faiblement compactés, des limons, de fines couches d'argiles tendres.... A noter cependant qu'une autre technique de type « rotary » appelée « **rotary drilling** », de principe similaire mais mécanisée (usage d'un compresseur ou d'un petit moteur monté sur un bâti), permet d'atteindre de plus grandes profondeurs et de travailler en terrain dur.

Elle est également basée sur la circulation et la pression de l'eau et sur l'utilisation d'un outil lourd perforant mais que l'on fait ici tourner. L'eau est injectée à l'intérieur du train de tiges et la boue (eau et débris) remonte le long des parois du forage. Afin d'obtenir une pression d'eau suffisante, on utilise de préférence une **motopompe**. On peut laisser l'extrémité inférieure du tuyau de forage simplement ouverte, ou y rajouter, cas le plus fréquent, un outil de fonçage (trépan). L'abrasion du sol est réalisée par une **trilame** ou un **tricône** mis en rotation manuellement depuis la surface en utilisant un train de tiges. Les débris, ou « cuttings » sont remontés à la surface par la circulation de la boue du forage. Celle-ci est introduite à l'intérieur des tiges, sort par l'outil de forage, remonte à la surface par l'espace annulaire entre les parois du forage et le train de tiges, va ensuite décanter dans des petits bassins creusés près du forage, puis est de nouveau pompée et injectée.

Cette technique nécessite deux bassins de décantation. Un premier dans lequel l'eau évacuée des profondeurs sera purifiée des matériaux grossiers, et le second éliminera les matériaux plus fins. Une motopompe est nécessaire afin de prendre de l'eau de ce second bassin de décantation et de l'injecter en profondeur du forage.

Un fluide de forage (additif) peut être mélangé à l'eau pour éviter l'effondrement des parois du trou et la perte incontrôlée de l'eau par infiltration. La technique du lançage à l'eau (avec rotation) peut être utilisée jusqu'à une profondeur d'environ 35 – 45 mètres.

Application géologique : appropriée pour les forages dans les matériaux alluvionnaires tels que les sables faiblement compactés, les limons et les fines couches d'argile tendre.

d) Le forage à la boue (sludging) profondeur maxi 35 m

Cette méthode a été développée et largement diffusée au Bangladesh en utilisant des tubes faits de bambou.

Elle consiste à utiliser un train de tiges de forage que l'on enfonce manuellement et progressivement à l'aide d'un **bras de levier** dans le sol ainsi qu'à faire circuler de l'eau pour faire remonter à la surface du sol les débris des matériaux broyés par l'outil de forage (cuttings).

Le train de tiges de forage est actionné manuellement de haut en bas à l'aide d'une sorte de perche pour pouvoir le relever. Dans certains cas, un opérateur fait aussi tourner manuellement ce train de tiges pour qu'il descende plus facilement. Pendant la descente des tiges, le choc créé sur le sol par le trépan fixé au bout du train de tiges ameublisse le sol et surtout fragmente les matériaux.

Pour faire remonter ces débris à la surface, l'opérateur obstrue avec sa main l'extrémité supérieure du train de tiges pendant qu'un autre le fait remonter afin de créer (**effet de soupape**) une aspiration de l'eau et des débris qu'elle contient jusqu'à la surface. Au cours du mouvement de descente suivant, la main est retirée du train de tiges et la boue gicle dans un petit bassin préalablement creusé à côté du forage où les débris se déposent et où l'eau décantée est ensuite à nouveau utilisée pour être réinjectée dans le trou du forage. La pression de l'eau sur les parois du forage et la boue évitent l'effondrement de ces dernières. Ce type de forage à boue (**avec ou sans rotation**) peut être utilisé jusqu'à une profondeur d'environ 35 mètres.

Application géologique : appropriée pour les formations non consolidées: Sables, limons et argiles. Si la rotation est utilisée (avec un trépan), il est possible de pénétrer des formations semi consolidées telles que l'argile dure, le calcaire tendre et la latérite altérée.

PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Le tableau suivant compare les principales techniques de forage manuel :

Méthodes	Techniques	Profondeur moyenne	Géologie	Avantages	Inconvénients	Durée d'exécution
Tarière	tarière manuelle	10 à 15 m	Sable, limon, argile (faible épaisseur), graviers (< 4 mm)	facile à utiliser	Cuvelage difficile à enlever en présence d'une couche d'argile épaisse	1 jour
A la boue	madrill, rotary manuel, emas, rota sludge	20 à 35 m	Sable, limon, argile (faible épaisseur), formations consolidées tendres (altérites)	facile à utiliser	Consommation d'eau importante dans les couches perméables de sables grossiers	2 à 4 jours
Lançage à l'eau	jetting, washbore	6 à 15 m	Sable et limons	rapide	Un volume important d'eau sur une courte durée est nécessaire	moins d'un jour
Battage	percussion, stone hammer	15 à 25 m	Formations consolidées moyennes et dures (latérite, roche)	adaptés aux formations dures	Long et coût des équipements élevés	1 semaine à 10 jours
Tarière motorisée	Pat drill 201, rotary motorisé	35 à 45 m	Tout type de formations consolidées moyennes dépourvues de roches	rapide dans les couches dures	Consommation d'eau importante, coût des équipements et de réalisation élevé	1 à 5 jours

LES FORAGES MECANISES

Lorsqu'on est en présence de sol dur, ou bien qu'on veut procéder à un forage d'une grande profondeur, les forages mécanisés se révèlent être la meilleure solution pour obtenir un meilleur délai d'exécution, mais nécessite un budget un peu élevé. Les forages mécanisés avec des moyens plus ou moins lourds nécessitent souvent l'intervention de professionnels spécialisés. Par leur savoir-faire et leur maîtrise des techniques adaptées à chaque terrain, le travail est concis et de qualité en respectant les normes et les réglementations en vigueur.

Du forage par : Battage, Havage, Rotary à circulation inverse, Rotary à circulation directe, Marteau fond de trou, Marteau fond de trou avec tubage à l'avancement, Marteau hors du trou, Avancement ODEX et forage par Carotte, et autre toute une panoplie de méthode de forage que chacune d'eux a des avantages et des inconvénients.

Le développement technologique et la nécessité d'exploration et d'exploitation des richesses naturelles des sous sol sont à l'origine du perfectionnement de ces techniques de forage principalement celle du marteau fond de trou et celles de rotary.

HISTORIQUE:

Le battage au câble ou à tige pourrait être la plus ancienne procédure de perforation. La première consistait à lâcher un outil de forage en métal qui s'enfonçait dans le sol par son propre poids et à extraire la roche réduite en poudre à l'aide d'un conteneur cylindrique, alors que la deuxième technique (utilisé au Bangladesh) consistait à enfoncer, en présence de l'eau, une tige en bambou dans le sol et à l'aide d'une valve à mains, l'eau munie des débris est rejeté.

Cette technique est apparus en Egypte et en Chine, il y'a quatre milles ans. A l'époque le câble était en textile et les tiges en bambou (nom de différentes variétés de plante analogues à des roseaux, qui poussent dans des pays chauds et dont la tige atteint jusqu'à 25m).

A l'Etats-Unis de 1860 à 1866 des innovations réalisées sur la sonde percutante, ont permet de fonder les véritables bases des techniques de pénétration en roche dure, grâce à l'invention du levier de battage et son actionnement par l'énergie à vapeur, bientôt suivis par l'équipement des ateliers d'une accroche coulisse.

Dès 1880 une campagne de recherche d'eau et du pétrole par battage a été lancée avec succès aboutissant à une amélioration du « savoir faire » des sondeurs.

En 1890, le système rotary est devenu plus performant avec l'emploi de la boue, grâce à un ingénieur français nommé Flauville qui a examiné en 1833 une opération de forage au câble au cours de laquelle les appareils de forage s'enfonçaient dans l'eau. Il réalisa que l'eau, en jaillissant, permettait d'extraire très facilement les déblais hors du puits. Dès lors, le principe d'utilisation d'un fluide en mouvement pour évacuer les déblais du puits était établi.

A la fin de 1949, une innovation importante est apparue avec l'emploi de l'aire comprimé remplaçant le liquide de forage. Deux ans après, l'efficacité de rotary à l'aire est assimilée (adopté) dans la recherche pétrolière avec une pénétration de 2000m de profondeur.

L'une des premières campagnes de recherche d'eau en Afrique, exécutée par cette technique (rotary à aire), a été réalisée au Maroc en 1957, exactement sur les terrains paléozoïques du Maroc orientale.

Les premières applications du marteau fond de trou pour la recherche d'eau en milieu fissuré sont signalées en Nouvelle Angleterre dans le milieu des années 1950 (A.L Hodges, 1968). Cette Techniques de forage a été introduite en Afrique subsaharienne en 1973 (sud de la Mauritanie) (G.Martin, 1973).

Au cours des années 1960 le marteau hors de trou a subi une amélioration pour qu'il puisse atteindre une cinquantaine de mètre de profondeur.

A) Le forage rotatif ou la technique rotary (rotary drilling)

La technique rotary est relativement récente, elle 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).

L'appareillage de surface est essentiellement constitué par une tour en charpente métallique, ou *derrick*, et par une centrale énergétique : à l'origine machine à vapeur, aujourd'hui moteur Diesel et parfois turbine à gaz actionnent le tambour du *treuil* sur lequel s'enroule le câble du *palan* et, simultanément, entraîne la *table de rotation*, située au niveau de la *plate-forme de service*. L'outil, appelé *trépan* ou *tricône*, comporte trois rouleaux dentés de forme tronconique, s'emboîtant comme des engrenages, munis de dents en carbure de tungstène, matériau choisi pour son exceptionnelle dureté, et éventuellement incrustés de diamants industriels. Le mouvement de rotation est transmis à l'outil par l'intermédiaire des *tiges de forage*, tubes d'acier creux que l'on visse les uns après les autres au fur et à mesure que le puits descend et dont le dernier, au niveau de la surface, est la *tige carrée*, qui s'emboîte au passage dans la *table de rotation*. Suivant la consistance de la couche rocheuse traversée par le forage, il faut modifier non seulement la vitesse de rotation, mais la force avec laquelle l'outil avance dans le terrain qu'il traverse : au besoin, le poids des tubes de forage, ou *train de tiges*, est augmenté en remplaçant les derniers tubes inférieurs, juste au-dessus du trépan, par des barres pleines en acier appelées *masses-tiges*.

Le foreur peut également régler le poids appuyant sur l'outil en ajustant le palan pour abaisser plus ou moins la *moufle mobile porte-crochet* : pour forer une roche dure, il faudra, par exemple, appliquer une force de 40 t sur un outil de 300 mm de diamètre, ce qui s'obtient en disposant des masses-tiges sur une hauteur de 250 m ; la vitesse de pénétration ne dépasse pas 1 m/h. En revanche, dans un terrain tendre, il n'est pas rare d'obtenir un avancement de 100 m/h, la vitesse de rotation atteignant 250 tr/mn.

La puissance de la machinerie sur un appareil lourd moderne est de l'ordre de 2 000 ch.

La circulation

Le forage rotatif n'est possible que grâce à l'envoi continu au fond du puits d'un fluide de lavage qui a pour but de :

- 1- entraîner les débris (appelés *cutting*) et les remonter à la surface ;
- 2- refroidir le trépan tout en le lubrifiant ;
- 3 - humidifier la roche, ce qui facilite le travail de l'outil ;
- 4 - déposer un gâteau d'argile, appelé *cake*, sur les parois du puits, ce qui contribue à éviter les éboulements ;
- 5- maintenir dans le puits une pression hydrostatique positive empêchant les entrées intempestives d'eau en provenance des nappes aquifères souterraines et permettant de contrôler toute arrivée inopinée de gaz ou de pétrole.

Le fluide, qui joue un rôle si important, est généralement une boue, mélange d'eau, d'argile et de divers produits chimiques, dont la composition est très variable suivant l'opération en cours.

À tout moment, on doit maintenir à une valeur comprise entre 0,5 et 1 m/s la vitesse de circulation de la boue dans le circuit suivant :

- Bassins de stockage situés à côté du derrick ;
- Pompes ;
- Conduite de refoulement, colonne montante et flexible ;
- Tête d'injection suspendue au crochet de la moufle mobile ;
- Descente à l'intérieur des tiges de forage ;
- Sortie par trois événements spéciaux ménagés dans le tricône de manière à balayer les dents de chaque rouleau ;
- Entraînement des déblais ;
- Remontée à la surface par l'espace annulaire compris entre les tiges de forage et la paroi du puits ;
- Retour au bassin de stockage.

En arrivant à la surface, la boue est envoyée à l'aide d'une **goulotte d'évacuation** sur un **tamis vibrant** où sont retenus les déblais, source précieuse de renseignements sur la roche forée.

Un incident fréquent au cours d'un forage est la « **perte de circulation** » qui peut se produire lorsqu'on traverse une roche poreuse ou caverneuse où s'engouffre la boue. Il est alors nécessaire d'adjoindre à cette dernière des matières obturantes telles que des fibres ou de la sciure de bois, des serpentins de Cellophane ou même du ciment.

Le fluide de forage doit être constamment adapté à la nature du terrain traversé, ce qui se fait en y incorporant des additifs variés tels que :

- Du sel marin coagulé à l'amidon ou au gel de silice pour éviter de dissoudre les couches salifères ;
- Des biocides comme les phénols chlorés pour lutter contre la corrosion bactériologique
- Des dilueurs et des abaisseurs de viscosité comme le tanin, les lignites ou les phosphates.

La viscosité de la boue doit être particulièrement bien surveillée, car elle augmente spontanément lors de la traversée de bancs d'argile ou de marne. De même, si le forage vient à être perturbé par des venues intempestives de pétrole ou de gaz, il faut immédiatement alourdir la boue en y ajoutant de la barytine (sulfate de baryum BaSO_4 appelé **bentonite**) et le polycol (le polycol permet de préparer des boues de forage performantes).

*NB : Lorsque les récupérations sont trop faibles en terrain non consolidé, il faut adapter la concentration en **POLYCOL**, La boue change alors d'aspect, devient un liquide collant, particulièrement glissant. L'échantillon glisse sans frottement à l'intérieur du porte extracteur, ce qui évite les bourrages et permet des remplissages du carottier nettement plus importants.*

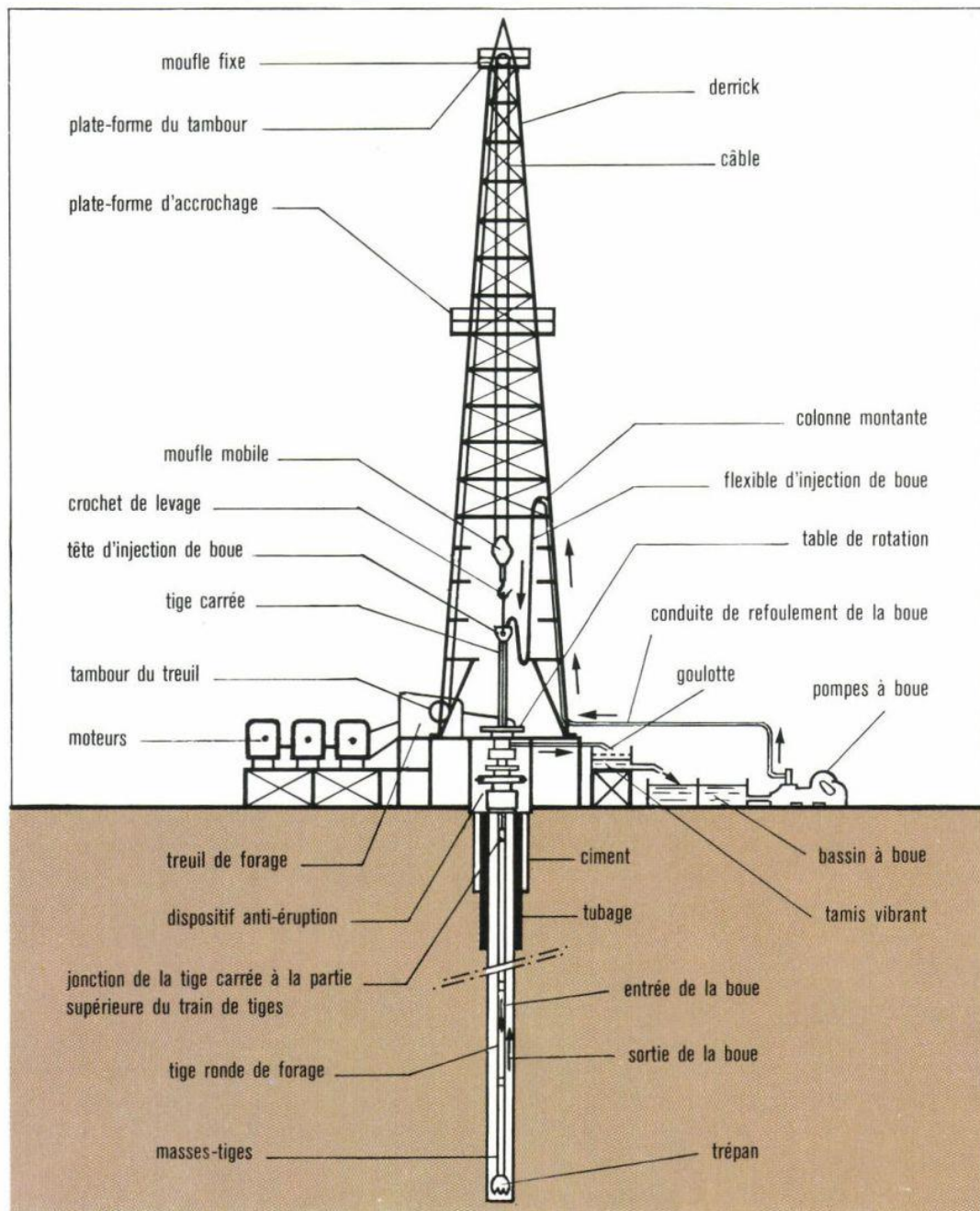
Deux types courants de trépan :

A- Un trilame (à gauche)

B- Un tricône (à droite)



Derrick et son équipement de forage.



Principe du forage rotatif ou technique rotary

- 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.

- Inconvénients

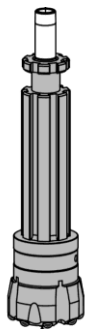
- Nécessité d'un fluide de forage qui ne permet pas d'observation directe de la qualité des eaux des formations traversées.
- Colmatage possible des formations aquifères par utilisation de certaines boues (bentonite).
- Difficulté d'observation des cuttings, la présence de tamis vibrants en circuit retour diminue sensiblement cet inconvénient.

B) Le forage MFT « au marteau fond de trou » (ou « rotary-percussion drilling ») ou encore « down-the-hole (DTH) »

(Le marteau fond de trou (MFT) est un développement ultérieur de la technique rotary).

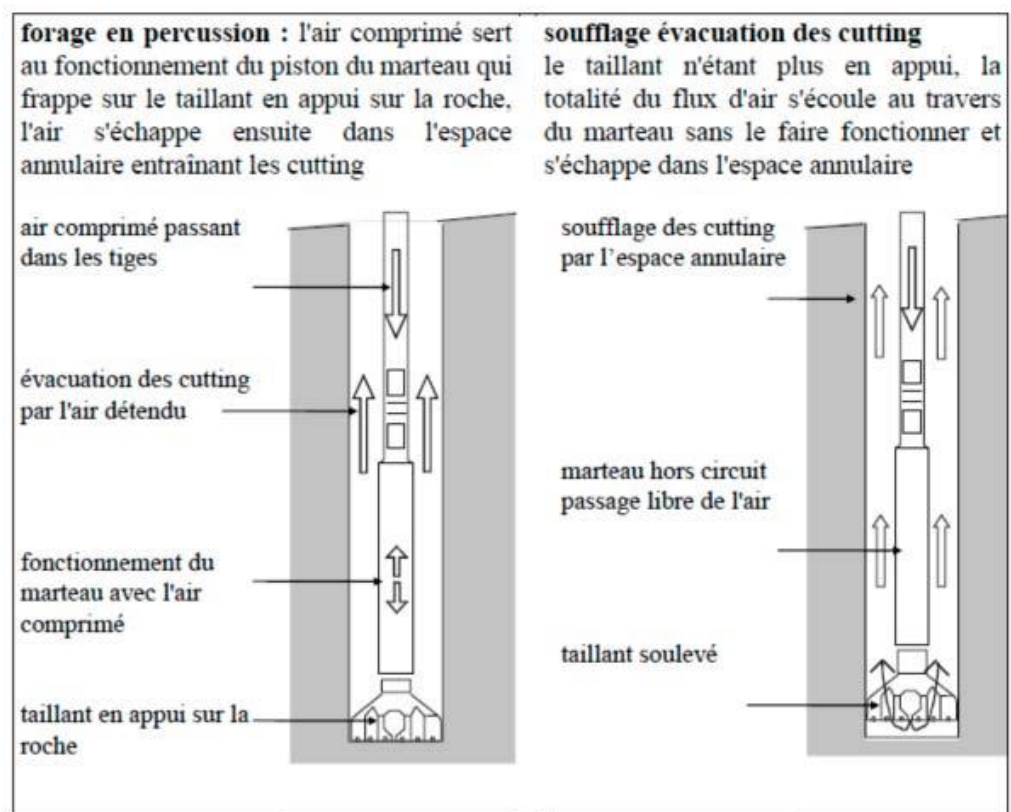
Comme alternative au forage rotary, si une formation est trop dure pour être pénétrée par un trépan, un marteau fond de trou (MFT) est généralement utilisé. Cet outil a été mis au point pour l'industrie minière et l'exploitation de carrières. L'extrémité mobile -le taillant- est serti de « pastilles » de carbure de tungstène hémisphériques et comprend des rainures qui permettent à l'air comprimé de s'évacuer. Lorsque le marteau est pressé contre le sol, l'air comprimé à haute pression (10 -25 bars) injecté dans les tiges, force l'outil à entamer un mouvement pneumatique (semblable à celui d'un marteau piqueur). Quand l'outil commence à tourner, le taillant à boutons agit sur toute la base du trou (voir figures).

La plupart des marteaux tournent à une vitesse de 20 à 30 tours par minute et peuvent frapper jusqu'à 4000 coups par minute. Les débris (appelés cutting) sont généralement expulsés (soufflés) hors du trou à l'extrémité de chaque tige. Les MFT sont particulièrement efficaces dans les formations rocheuses dures, comme le calcaire ou le basalte. Les formations meubles et fines tendent à boucher les conduites d'air. Néanmoins, les MFT ont un excellent rapport coût-efficacité et sont donc très appréciés des foreurs professionnels.



Taillant à pastilles en carbures de tungstène

Principe du forage au marteau fond de trou (MFT)



Remarque

Une large gamme de taillant optimisé suivant la nature de terrain rencontré est disponible au marché :

- Le taillant bilame (terre glaise, Argile, sols mixtes sableux et cohérents sans obstacles)
- Le taillant en croix (sables denses, graves, sol cohérents avec obstacles)
- Le taillant à boutons en acier (roches altérées, phyllithes, schistes)
- Le taillant à pointe de carbure de tungstène (béton armé, roche résistante)
- Le taillant à étages avec carbure de Tungstène (roche dure, stabilité à la déviation)
-

- Avantages :

- Elle est très intéressante dans les pays où l'eau est très rare.
- Mise en œuvre rapide et simple.
- Permet de détecter la présence d'un aquifère lors du forage.

- 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, les cuttings recueillis en tête d'ouvrage intégrant l'ensemble des horizons traversés.

NB : 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. S'agissant d'un contexte "eau minérale", le choix d'une mousse "inerte" doit être une préoccupation pour l'opération

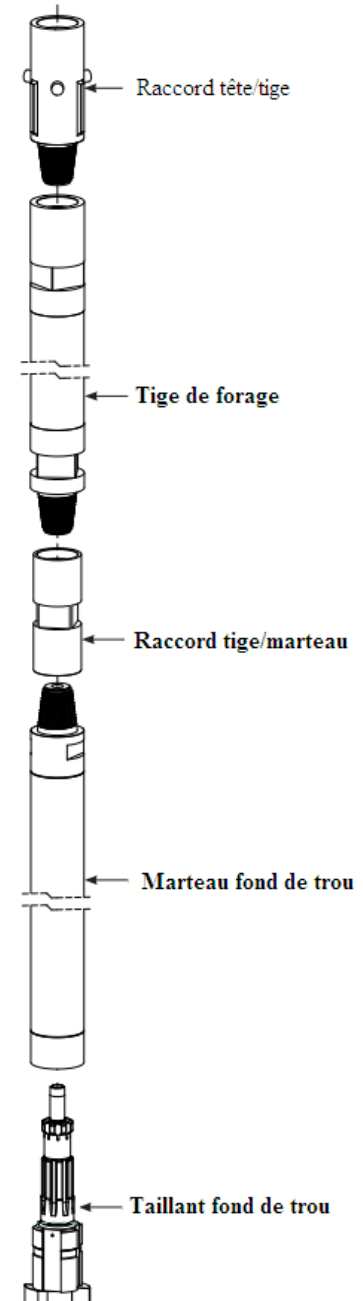


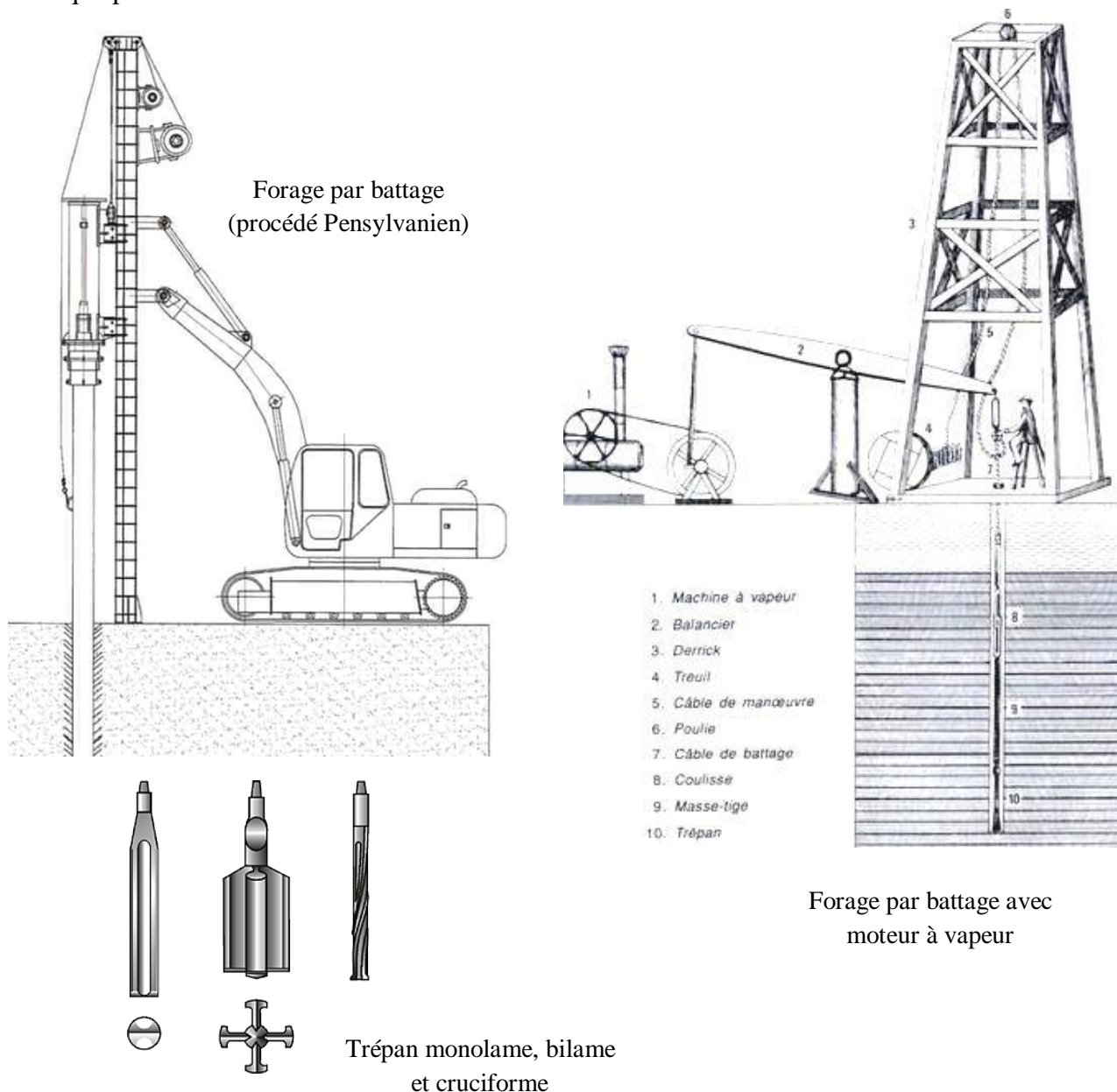
Schéma de principe pour le forage marteau fond de trou

C) Le forage par battage

C'est la technique la plus ancienne, utilisée par les Chinois depuis plus de 4000 ans (battage au câble ; le câble était en textile et les tiges en bambou).

Grâce à l'invention du moteur à vapeur qu'une machine de forage par battage mécanisé a vu le jour et a entamé avec curiosité la recherche d'eau pour qu'elle sera ensuite surprise par sa rencontre avec l'or noir, et c'est l'évolution. En gardant presque le même principe de forage, l'évolution de ces appareils s'est faite pour perforer plus vite, plus profondément et bien sûr moins chère (voir figure).

Le processus consiste à soulever un **outil très lourd** (trépan) et le laisser retomber sur la roche à perforer en chute libre. La hauteur de la chute et la fréquence des coups varient avec la dureté de la roche. L'outil appelé trépan est de forme soit **monolame, bilame ou cruciforme (en croix)** (voir figure), de diamètre variant entre 300 à 1200 mm. Cet outil est suffisamment lourd (400 kg à 3 tonnes) pour qu'il puisse donner au câble une extension parfaite et pour minimiser tant que possible les déviations du trou.



- Si le trépan est accroché directement au câble, ou sous une masse tige, c'est le procédé **Pensylvanien**
- S'il se trouve fixé sous un train de tiges, c'est le procédé **Canadien**.

Le même principe de battage au câble a été conservé, alors que le matériel a été amélioré pour qu'il puisse pénétrer les roches dures et perforer vite et beaucoup plus profond. Cette amélioration consiste à l'équipement d'un camion muni d'un levier par un treuil à câble et par un moteur pour soulever le trépan. Ce dernier est levé à une hauteur et avec une fréquence qui dépend de la roche. Après certain avancement, on tire le trépan et on descend une **curette** ou **cuillère** (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.

Selon la nature du terrain, il est presque toujours nécessaire d'utiliser un tubage de travail, en acier, pour protéger les parois du terrain.

Ces machines de forage par battage sont rarement utilisées de nos jours pour les forages profonds. Elles sont plus utiles pour réaliser des ouvrages d'observation ou d'exploration peu profonds.

Remarque : le battage **au treuil** est une technique utilisée en géotechnique, généralement dans la fixation des **pieux**.

NB : Un **pieu** est un élément de construction en béton, acier, bois ou mixte permettant de fonder un bâtiment ou un ouvrage. Ils sont utilisés lorsque le terrain ne peut pas supporter superficiellement les contraintes dues à la masse de l'ouvrage. Il est également possible d'utiliser des pieux pour renforcer des fondations existantes.

- Avantages:

- Peu coûteuse ;
- Energie dépensée faible
- Facilité de mise en œuvre
- Pas de boue de forage
- Récupération aisée d'échantillons
- Nécessite moins d'eau (40 à 50 l/h) et de n'importe quelle qualité.
- La détection de la nappe même à faible pression est facile : la venue de l'eau à basse pression se manifeste directement dans le forage sans être aveuglée par la boue.
- Pas de problèmes dans des zones fissurées (risque lié au perte de boue)
- Technique applicable presque dans tous les terrains ;
- Bien adapter pour les forages de moyenne profondeur (200m)

- Inconvénients:

- Le forage s'effectue en discontinue (forage puis curage de cuttings et ainsi de suite)
- Forage lent ; Vitesse d'avancement faible, quelques mètres par jour
- Usure rapide des lames de trépan ;
- Difficultés pour équilibrer les pressions d'eau jaillissante.
- Absence de contrôle de la rectitude
- Pas de possibilité de faire le carottage
- Méthode peu adaptée dans les terrains plastiques ou bouillants (s'effondrent facilement)

D) Le forage RC (Circulation inverse) :

Technique destructive qui utilise un jeu de deux tiges creuses emboîtées concentriques avec un « marteau percutant en rotation ». Elle permet de collecter sous forme de « **cuttings** » un échantillonnage continu des roches le long du trou réalisé ; la roche concassée est recueillie sous forme de cutting remontant à l'intérieur des tiges. La boue passe en descendant dans l'espace annulaire situé entre la tige intérieure et le tube extérieur (entre le diamètre extérieur du tube intérieur et le diamètre intérieur de la tige externe).

Dans la première partie du forage le tubage est utilisé pour prévenir l'éboulement des parois généré par la dépression durant le forage. La stabilisation du forage est garantie par la pression hydrostatique du fluide de perforation qui peut être d'eau ou de boue.

Si les conditions le demandent le mélange peut être constitué également de bentonite ou de polymère ce qui augmente la pression hydrostatique. Le procédé de forage utilisé peut être la force de l'outil de percussion aussi bien que l'action combinée de la rotation d'un tricône.

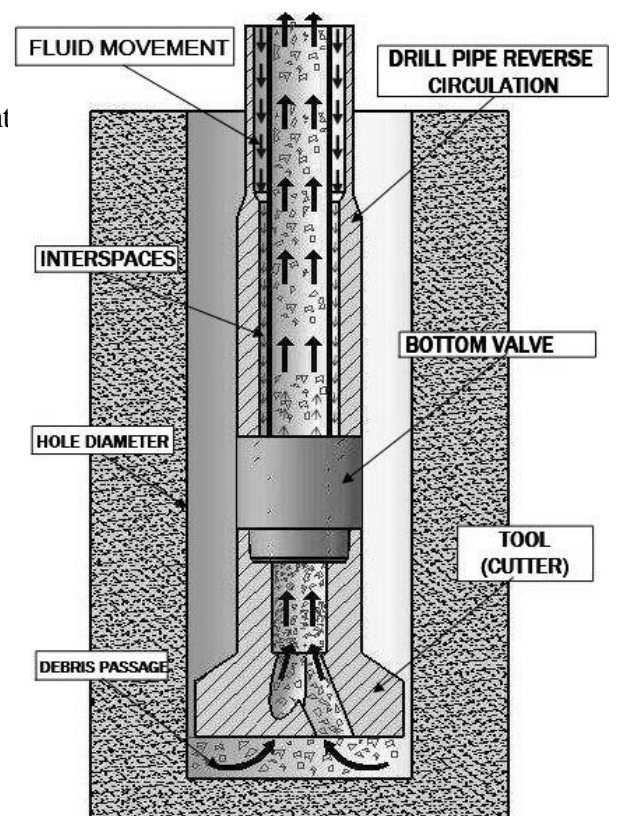
Cette technique rapide d'exécution se réalise habituellement en 150 mm de diamètre, sur une profondeur variant entre 50 et 200 mètres.

Ce forage est conseillé dans des terrains alluvionnaires meubles y compris lorsque l'on trouve des blocs dont il faut se séparer par percussion. Elle peut également être appliquée dans des sols compacts comme le grès ou les marnes.

Remarque : Pour permettre l'aspiration de matériaux plus importants, le débit du fluide doit être d'une vitesse de 2.5 à 3 m par seconde.

Avantages

- Cette méthode permet de récupérer intégralement les échantillons en continu.
- L'installation est rapide
- Il n'y a pas de contact entre les parois et les cuttings pris au fond.
- Le taux de pénétration est rapide



E) Le forage carotté

Le **carottage** (en anglais diamond drilling, ou core drilling) est un type de forage d'exploration, visant à prélever un échantillon du sous-sol terrestre ou marin obtenu à l'aide d'un tube appelé **carottier** que l'on fait pénétrer dans le sous-sol. L'échantillon ainsi obtenu s'appelle une **carotte**. Le carottage est utilisé dans de nombreux domaines :

- Le carottage en climatologie
- Le carottage en océanographie
- Le carottage dans le BTP
- Le carottage en exploration pétrolière et minière

Les **Sondages carottés** permettent d'effectuer un certain nombre d'essais. Les échantillons prélevés sont utilisés pour :

- Préciser la profondeur des couches géologiques d'intérêt (couche ou zone minéralisée).
- Déterminer la lithologie des roches contenues dans les carottes : dureté, porosité, perméabilité...
- Diaclases et stratification dans le cas d'une roche et pour y pratiquer des essais de laboratoire (mécanique des roches ou des sols, analyses minéralogiques ou chimiques).
- Mesurer in situ des modules et du champ de contraintes, ...

En fonction de ces informations, la société exploitante peut ensuite ajuster la campagne de production.

De façon générale, les carottes de sondages sont conservées dans des caisses adaptées à cet effet. La carotte est normalement photographiée en couleur et coupée en deux dans le sens de la longueur. Une moitié de la carotte est réservée aux essais et l'autre moitié (échantillon témoin) est entreposée pour un futur examen et sera de nouveau évaluée si nécessaire. Une carotte de large diamètre est plus coûteuse. Les tailles de diamètre les plus communes sont AQ, BQ, NQ, HQ, PQ. Un plus grand diamètre permet d'extraire des carottes plus conséquentes donc d'autant plus d'information, par contre forer avec un plus gros diamètre consomme plus d'énergie.

Le diamètre interne du carottier correspond au diamètre de la carotte forée.

- **Quelques exemples de diamètres de sondages carottés :**

Dimensions	Externe diamètre, mm	Interne diamètre, mm
AQ	48	27
BQ	60	36.5 (jusqu'à 1000 m de profondeur d'investigation)
NQ	75.7	47.6 (jusqu'à 700 m de profondeur d'investigation)
HQ	96	63.5 (jusqu'à 450 m de profondeur d'investigation)
PQ	122.6	85

- Principe de fonctionnement :

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. Le découpage des terrains peut être fait par fonçage ou battage (carottier poinçonneur) ou par rotation (carottier rotatif).

I- Carottage par fonçage ou poinçonnage :

Cette technique consiste à venir découper les terrains et faire pénétrer l'échantillon dans l'outil par poinçonnement sans rotation. 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. Selon la fréquence de frappe, on distingue le battage (< 2 Hz), la percussion (> 2 Hz) (Hz : hertz).

Les carottiers utilisés ont des caractéristiques (géométriques notamment) adaptées à la méthodologie de fonçage et à la nature des terrains à prélever.

On distinguera les techniques suivantes :

- **Carottier à paroi mince** : Il s'agit d'un tube d'épaisseur fine au regard de son diamètre intérieur qui permet de **prélever des matériaux fins**. Selon les configurations, le tube du carottier peut directement servir au conditionnement de l'échantillon (tube à changer après chaque passe) ou recevoir un étui intérieur extrait en fin de passe de sondage (Fig.01).

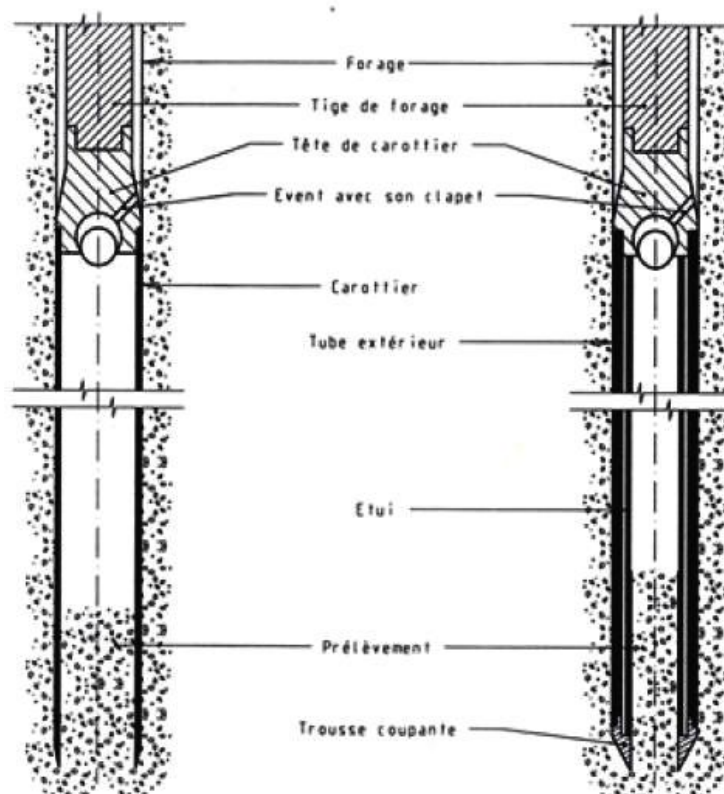


Figure 01 : Carottier à paroi mince
avec et sans étui

- **Carottier à paroi épaisse :** Le schéma et le principe de fonctionnement sont analogues à celui du carottier à paroi mince, mais en raison de l'épaisseur de la paroi du tube carottier cet outil peut être mis en œuvre par battage et permet de **prélever des sols grenus**.
- **Carottier à piston stationnaire :** Il s'agit d'un carottier à paroi mince associé à un système de piston qui permet de **prélever des sols très mous**. Le verrouillage du piston commandé depuis la surface par un câble, bloque l'entrée du carottier jusqu'à la cote de début de forage (descente), permet la pénétration de l'échantillon durant la phase de fonçage et assure l'étanchéité pour éviter la chute de la carotte lors de la remontée (Fig. 02).

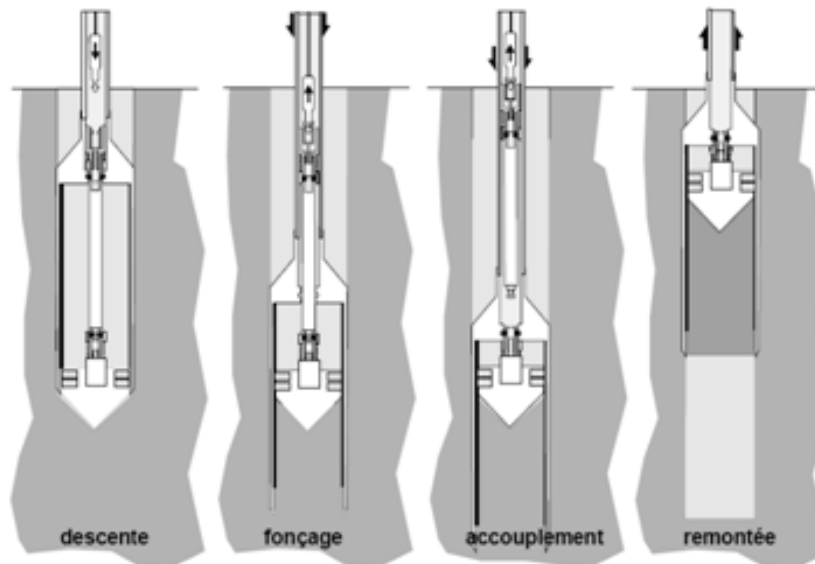


Figure 02 : Étapes du prélèvement d'échantillons
avec un carottier à piston stationnaire

- **Carottage vibratoire haute fréquence :**

Le carottage vibratoire utilise une tête de forage munie d'un moteur hydraulique qui entraîne deux masses dans des sens de rotation opposés et génère ainsi, sur le train de tiges, une force « sinusoïdale ». La fréquence de vibration peut varier de façon à optimiser la pénétration de l'outil dans le sol (généralement fréquence comprise entre 50 et 120 Hertz). Un système de double tubage permet de remonter le tube échantillonneur en fin de passe en laissant un tubage en place. Les carottes prélevées peuvent être extraites par vibration, elles sont alors recueillies dans un film plastique maintenu à la sortie du tube ou conditionnées dans une gaine équipant le tube intérieur. Cette technique est particulièrement adaptée pour le **prélèvement de sols graveleux non consolidés**.

II- Carottage rotatif :

Les carottiers rotatifs sont constitués d'un tube cylindrique à l'extrémité duquel se trouve un outil appelé **couronne**. L'ensemble est mis en rotation et en appui par la tête de forage via le train de tige. La couronne (voir figure), munie d'éléments d'abrasion (carbure de tungstène, diamants synthétiques, ...), découpe le terrain qui entre à l'intérieur du tube du carottier. En fin de passe, à la remontée de l'ensemble, un **extracteur** rompt le contact entre la carotte et le terrain en place puis maintient la carotte à l'intérieur du tube du carottier (Fig.03).

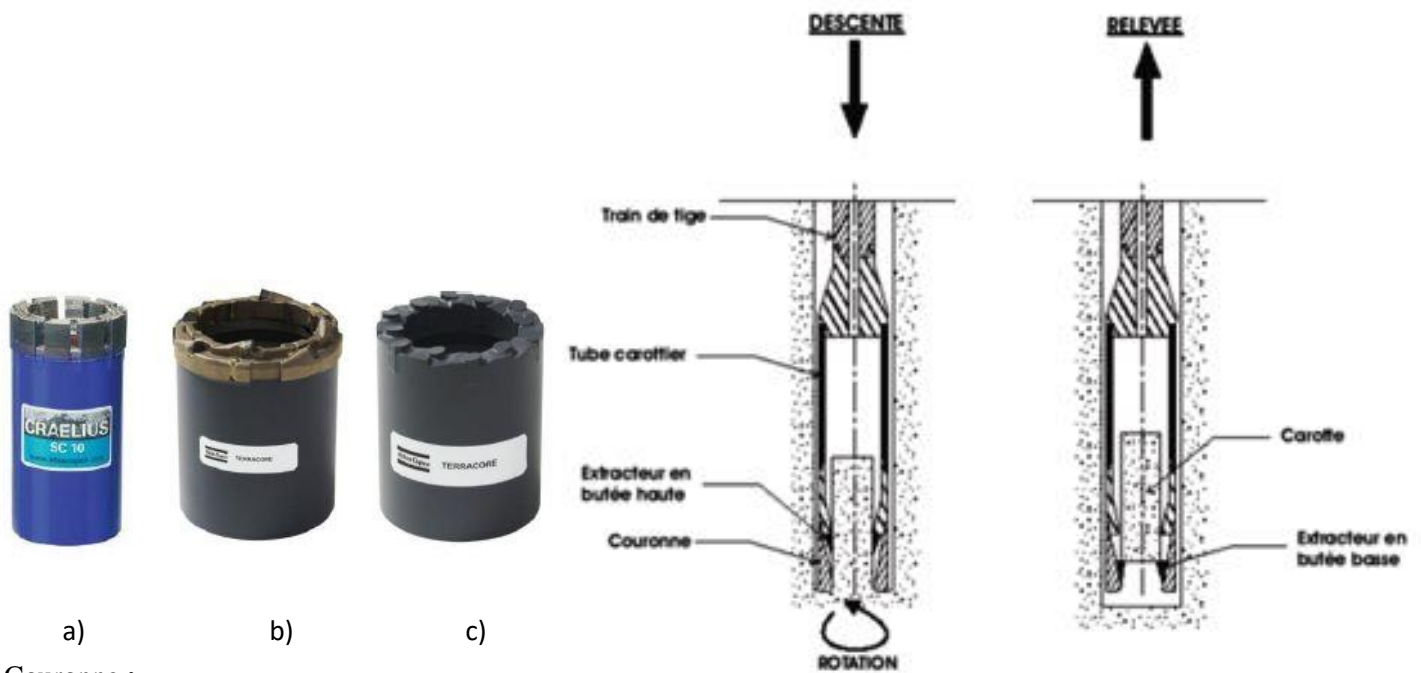


Figure 03 : Principe de fonctionnement des carottiers rotatifs

Couronne :

- a) imprégnées (diamants synthétiques + matrice)
- b) à diamants synthétiques individuels
- c) à carbure de tungstène

Selon la nature des terrains à prélever et la qualité des échantillons recherchés, différents carottiers rotatifs seront mis en œuvre (Fig.04) :

- **Carottier simple :**

Le système se limite à un tube carottier muni d'une couronne. 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. Cette technique est couramment pratiquée en **carottage de chaussée**.

- **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. 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 nature et partiellement l'état des sols (à l'exception des caractéristiques mécaniques). Cette méthode est la plus couramment **appliquée en géotechnique**.

- **Carottier triple :**

Ce carottier ajoute au carottier double un étui amovible qui recueille l'échantillon et permet l'extraction d'une carotte directement conditionnée. À l'exception des sols mous et fins, cet outil assure le meilleur type de prélèvement et autorise la caractérisation de la nature et de l'état des sols. L'échantillon n'est jamais en contact avec le fluide de forage et directement protégé par une gaine en PVC. Cette gaine peut être fendue ou non, translucide ou non.

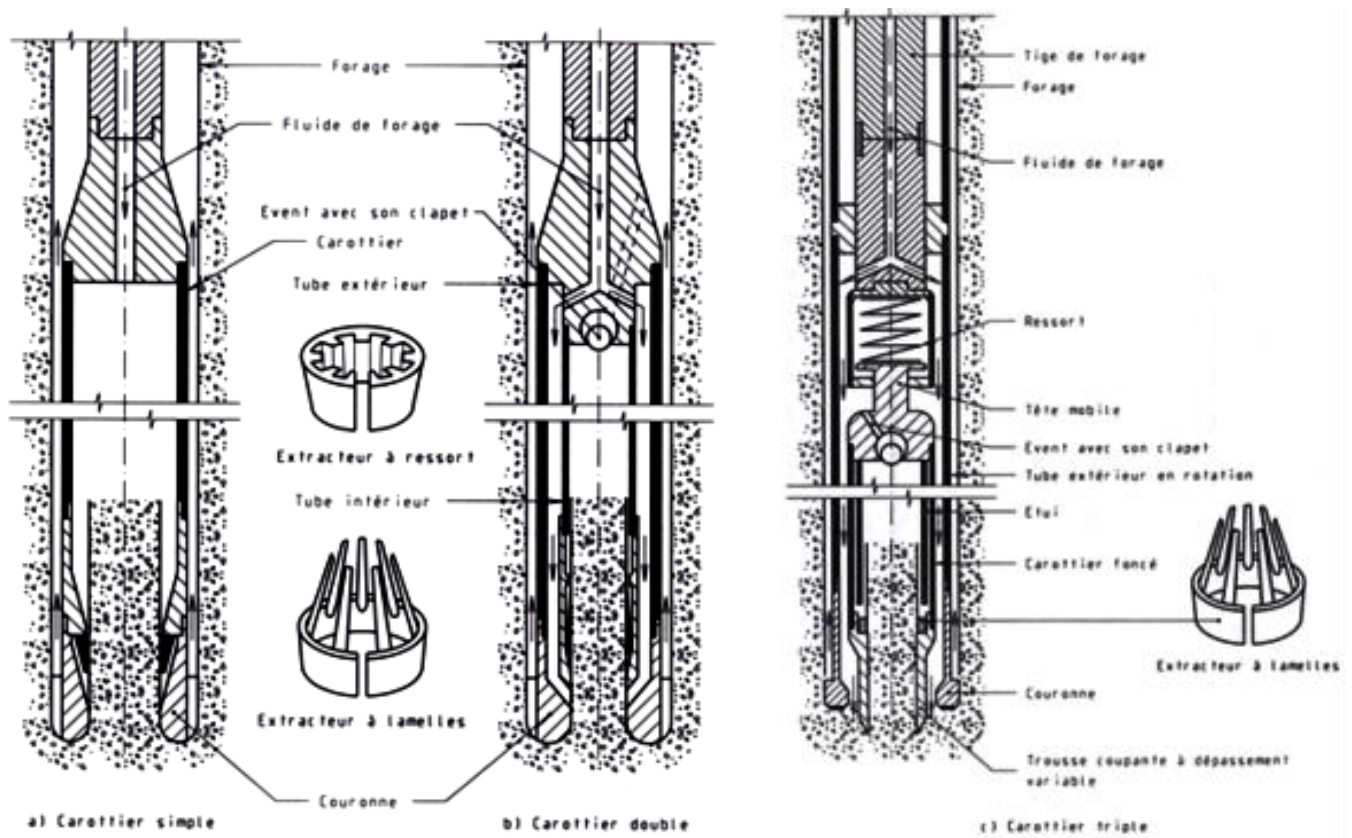


Figure 04 : les différents types de carottiers rotatifs ;
 a) carottier simple b) carottier double c) carottier triple

- **Carottier à trousse coupante :**

Il s'agit d'un carottier double dont le tube intérieur est muni d'une trousse coupante qui se prolonge en dehors de la couronne fixée sur le tube extérieur (Fig 04.c) Ce système permet le prélèvement d'échantillon de meilleure qualité car découpé par la trousse coupante « fine » ; la couronne ne venant que supprimer les frottements avec le sol en place. Ce procédé est également connu sous l'appellation « **carottier Mazier** ».

- **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. 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. 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'overshot). 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.

III- Difficultés – Malfaçons :

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. Ce dernier paramètre est sans doute prégnant pour les sondages carottés tant la connaissance locale joue un rôle prégnant dans la recherche d'une adéquation entre outils de prélèvement et sol à prélever : le choix d'opérateur localement expérimenté est un critère de qualité.

Face à ce constat, outre des objectifs assignés au sondeur, tel qu'un taux de récupération minimum à atteindre, la recherche de qualité doit aussi être intégrée dans la conception de la campagne de reconnaissance. Pour choisir les bons outils, il convient de connaître les terrains : il peut donc être pertinent de commencer par exécuter des sondages plus simples renseignant sur la nature des terrains avant de chercher à prélever des échantillons de qualité.

Enfin, il faut souligner que la qualité du sondage carotté dépend également de son objectif : dans le cas de prise d'échantillons pour essais en laboratoire, l'échantillon doit être le moins remanié possible (tant lors du prélèvement que lors de son transfert au laboratoire) mais surtout avoir un diamètre suffisant pour confectionner des éprouvettes : carotte de 92mm de diamètre minimum soit un carottier de 116mm.

Certaines difficultés sont liées au respect de l'environnement et au rebouchage du trou. On peut en effet avoir la nécessité de prendre des précautions spécifiques liées :

- aux voies d'accès pour le matériel de sondage
- aux fluides utilisés et leur conséquence sur les nappes phréatiques (fluide biodégradable)
- aux éventuelles fuites d'huile, d'hydrocarbure et autres fluides potentiellement polluants
- au rebouchage du trou pour éviter le risque de tassement, d'érosion interne, de chute

Dans chacun des cas les précautions sont envisagées avec les services de contrôle et transcrites dans un document de type **Plan de Prévention Sécurité et Sanitaire** ou **Plan d'Assurance de la Qualité**.

IV- Tableau comparatif entre méthode carottage et RC

	Méthode par carottage	Méthode par circulation inverse (RC)
Application	Utilisée pour les prélèvements très précis où la stratigraphie et l'analyse des veines sont importantes.	Utilisée pour des prélèvements en masse où une définition large des corps de minerais et où l'analyse géochimique est importante.
Echantillon	L'analyse peut se faire directement sur site car l'échantillon est intact, les grains et les veines sont visibles, possibilité d'enregistrer l'orientation de l'échantillon et de pouvoir surveiller le sondage avec précision.	Echantillons de masses des cuttings ; possibilités d'analyser les cuttings les plus larges ; surveillance du sondage possible.
Vitesse de forage	Vitesse d'avance lente, peut varier considérablement suivant le type de formation mais généralement 25-30 m par équipe.	Taux de pénétration rapide, peuvent varier considérablement en fonction des conditions du sol et la profondeur du trou, mais généralement 200 m par équipe.
Capacité de profondeur	Au-delà de 3 000 m avec des machines de grande capacité.	800 m maximum avec les plus grands appareils de forage et hautes pressions à l'aide de booster.
diamètre du trou	46 à 146 mm, fonction de l'outil utilisé.	89 à 146 mm, fonction de l'outil utilisé.
Flexibilité	Possibilité de sélectionner des outils pour une variété de formations rocheuses et sols, y compris échantillonnages non remaniés dans les terrains sédimentaires et dans du charbon non consolidé.	Limitée à des formations consolidées seulement où le forage à trou ouvert est possible.
Coût	Faible investissement initial, mais généralement plus coûteux aux mètres forés à cause de la limitation de la rapidité de cette méthode.	Investissement initial important mais cette méthode de forage est plus rapide et donc le prix au mètre foré est plus intéressant.