

# LE FORAGE

<b>1. LES FORAGES D'EAU</b>	<b>3</b>
<b>2. LES TECHNIQUES DE FORAGES</b>	<b>6</b>
2.1 Principe du forage Rotary	7
2.2 Principe du forage percussion (MFT)	8
2.3 Les paramètres de la foration	9
2.3.1 Rotation, poussée et force de levage	10
2.3.2 L'air et la boue de forage	12
2.3.3 La boue de forage au forage rotary	13
2.3.4 L'air au forage MFT	14
2.3.5 Résumé des paramètres de forage.	15
<b>3. LES MACHINES LEGERES DE FORAGE</b>	<b>16</b>
3.1 Le kit AcF PAT 201	17
3.1.1 Les spécificités techniques du kit AcF PAT 201	19
3.2 Le kit AcF PAT 301	19
3.2.1 Spécificités techniques	21
3.2.2 Principe de fonctionnement de la PAT 301	22
3.3 Les autres machines de Forages légères	23
<b>4. DIMENSIONNEMENT DES FORAGES</b>	<b>26</b>
4.1 Principe de dimensionnement	26
4.1.1 Choix du diamètre des tubes	26
4.1.2 Prétubage	27
4.2 Exemples de design courants	28
<b>5. LA REALISATION DES FORAGES</b>	<b>31</b>
5.1 Le choix de la technique	31
5.2 La préparation du chantier	32
5.2.1 L'installation du chantier	32
5.2.2 La préparation des fosses à boue	34
5.2.3 Préparation de la boue de forage	35
5.2.4 Evacuation des cutting au Marteau Fond-de-Trou	37
5.3 Mise en oeuvre du forage Rotary	38
5.3.1 Démarrage du forage au rotary	38

5.3.2 l'avancement - l'ajout d'une tige Cf. Figure 18	38
5.3.3 Le retrait d'une tige	40
5.3.4 Difficultés au rotary et solutions préconisées	40
5.3.5 Analyse des cutting et signes d'eau	41
<b>5.4 Mise en oeuvre du forage percussion MFT</b>	<b>42</b>
5.4.1 Le marteau fond de trou	42
5.4.2 Installation du marteau Cf. Figure 21	44
5.4.3 Déroulement de la foration	45
5.4.4 Difficultés au MFT et solutions possibles	46
5.4.5 Analyse des cutting, et estimation du débit	47
<b>6. L'EQUIPEMENT DU FORAGE</b>	<b>49</b>
<b>6.1 Le tubage définitif</b>	<b>51</b>
6.1.1 Choix des tubes et crépines	51
6.1.2 Mise en place du tubage	52
<b>6.2 Le gravier filtre, et la cimentation</b>	<b>53</b>
6.2.1 Mise en place du massif filtrant	53
6.2.2 La cimentation	54
<b>7. LE DEVELOPPEMENT</b>	<b>55</b>
<b>7.1 Le nettoyage du forage</b>	<b>55</b>
<b>7.2 Le développement</b>	<b>56</b>
7.2.1 L'auto-développement	57
7.2.2 Les procédés de développement	57
7.2.3 Débit instantané	60
<b>8. SUIVI ET RAPPORT DE FORAGE</b>	<b>61</b>

# LE FORAGE

Ce chapitre est un guide pratique pour s'initier aux techniques de forage les plus courantes et pour mettre en place des campagnes de forages où il existe un potentiel hydrogéologique accessible aux machines de forage dites légères. Leurs performances en font d'excellentes machines polyvalentes très appropriées aux situations difficiles de crise humanitaire compte tenu de l'accès ou de la sécurité. Trois machines ont été développées par Action contre la Faim. La PAT 301 pour la réalisation de forage dans les formations consolidées et la PAT 201 qui est une machine plus légère et beaucoup moins onéreuse mais limitée aux formations sédimentaires non consolidées. La PAT 401<sup>1</sup> est une machine plus puissante que la PAT 301 en cours de développement qui donne des résultats très prometteurs.

## 1. LES FORAGES D'EAU

La réalisation de forages d'eau permet de répondre rapidement à un besoin en eau.

- *Les forages de prospection*

Dans un contexte hydrogéologique difficile (par exemple peu ou pas de nappe alluviale, présence d'aquifères multicouches avec des niveaux d'eau salée), il s'avère intéressant de réaliser des forages de prospection. Ils permettent de s'assurer de la présence et de la qualité de l'eau souterraine, de connaître la nature de l'aquifère, ou d'étalonner les relevés d'une campagne de prospection géophysique.

Ils sont en général réalisés et équipés en petit diamètre (43 mm à 100 mm), puis soit conservés en piézomètre, soit rebouchés et abandonnés. Des essais de pompage simples permettent de vérifier la présence d'eau.

La réalisation d'une campagne de forages de prospection est fréquente avant de réaliser un forage d'exploitation de diamètre important (> 200

---

<sup>1</sup> Machine en Angola avec les équipes d'Accion contra el hambre

mm). Une fois le forage de prospection fait, s'il s'avère positif il sera alésé et équipé pour l'exploitation de la ressource.

- *Les forages d'exploitation*

Ces ouvrages permettent d'atteindre et d'exploiter une nappe d'eau souterraine, même située à des profondeurs importantes, au delà de la centaine de mètres. Dans le cadre de nos programmes, la majorité des forages sont équipés de pompes manuelles pour alimenter en eau potable des populations rurales (hydraulique villageoise), et/ou déplacées.

Au delà des standards nationaux de certains pays, qui imposent des forages par rapport aux puits (qualité de l'eau souterraine), la réalisation de forage d'eau doit être particulièrement étudiée lorsque :

- Il n'existe pas de ressources superficielles intéressantes (mares, cours d'eau, puits peu profonds),
- La nappe phréatique superficielle est polluée, l'eau de mauvaise qualité bactériologique ou physico-chimique
- La réalisation de puits serait trop longue ou onéreuse pour répondre aux besoins des populations (camps de déplacés).
- Le contexte géologique ne permet pas de creuser des puits car les formations sont trop dures (rocher) ou la profondeur de l'ouvrage trop importante (nappe situé au delà de 20 mètres)
- L'entretien d'une station de traitement d'eau installé en urgence au delà de la présence de l'organisation sur place paraît illusoire (pas de réel prise en charge par la communauté). L'approvisionnement en eau à partir de point d'eau équipé de pompe manuelle est plus adaptée et appropriée au contexte.
- Les forages permettent de répondre de manière rapide aux besoins urgents.

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 programme :

- Le potentiel hydrogéologique de la zone : Une étude de faisabilité doit être faite pour s'assurer de la possibilité de forer, à quelle profondeur et avec quelle machine. Un certain nombre d'hypothèses seront levées, tel que la possibilité de forer, le type de machine nécessaire, les débits

d'exploitation et les chances de succès. Elles peuvent être faibles et il faut donc le prévoir dès le plan d'action.

- Le choix de la pompe (manuelle ou immergée) à installer en fonction du débit d'exploitation souhaité et du potentiel hydrogéologique.
- Les possibilités de trouver une machine en état de marche sur place ou de l'importer (transport aérien, maritime et/ou terrestre).
- Les compétences techniques locale (foreur, mécanicien, géologue). La formation d'un foreur au technique de forage est loin d'être impossible mais peut prendre du temps au démarrage du programme. L'utilisation d'une PAT 201 est basique et ne pose aucun problème généralement.
- Les délais d'importation et de démarrage (un mois minimum)
- Les moyens de transport locaux de l'atelier de forage de site en site
  
- *Exemples et coûts de forage (matériel uniquement)*

AcF à réalisé depuis 1991, plus de 1700 forages d'exploitation équipés de pompes manuelles en Asie (Cambodge, Birmanie), et en Afrique, (Liberia, Sierra Leone, Côte d'Ivoire, Guinée, sud Soudan, Ouganda, Mozambique) avec des machines PAT 201 et 301.

Le coût d'un forage équipé d'une pompe manuelle (pompe aspirante type VN6, niveau > à 7 mètres) au Cambodge est de 300 USD.

Le coût d'un forage équipé en Guinée de profondeur moyenne de 40 mètres, avec une pompe à main Kardia (2500 USD) revient à 4000 USD.

Le Coût d'une campagne de 30 forages, en comptant l'amortissement d'une machine PAT 301, pour une profondeur d'investigation moyenne de 40 mètres avec un taux de forages positifs de 80 %, revient à un coût unitaire par forage de 7000 USD.

A titre de comparaison, un forage sous traité, sans pompe revient à:

- En Haïti, pour une profondeur de 35 mètres, diamètre de 8", 8500 USD
- Au Mali, pour une profondeur de 120 mètres, diamètre de 6", 12000 USD
- En Angola, pour une campagne minimum de 10 forages, à 60 mètres, le forage coûte 8000 USD avec une machine au battage et 13 000 USD avec une machine Rotary.
- Au sud Soudan/Ouganda, pour une profondeur de 50 mètres, diamètre de 6", 12 à 15000 USD.

## **2. LES TECHNIQUES DE FORAGES**

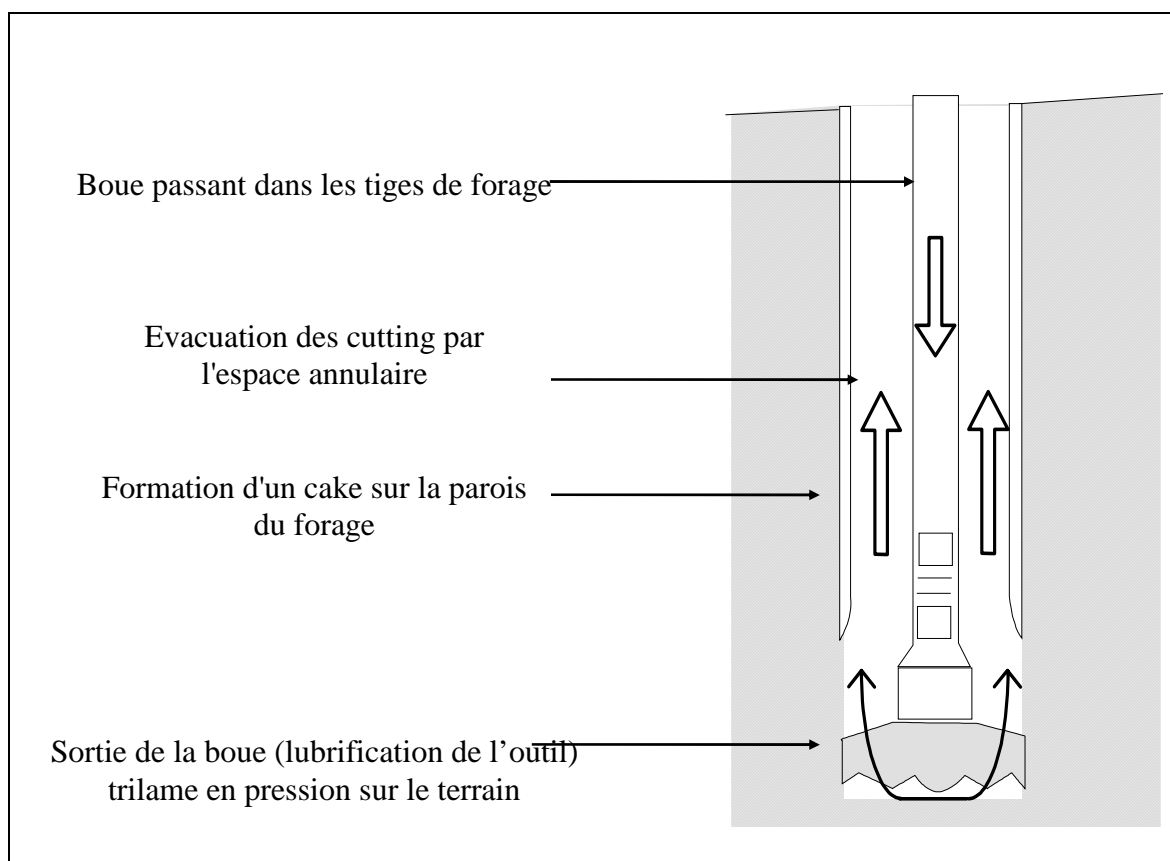
Plusieurs techniques de forages d'eau ont été développées en fonction du type d'ouvrage recherché et du contexte géologique. Nous retiendrons ici 3 techniques courante de forage d'eau, le forage au battage, le forage Rotary et le forage percussion Marteau Fond de Trou (MFT).

Le forage au battage est la technique la plus ancienne, simple de conception, elle présentent un intérêt surtout dans les terrains sédimentaires grossiers (graviers, galets) qui sont d'excellents réservoirs. Nous n'aborderons pas en détail cette technique dans ce manuel. Le terrain est remonté mécaniquement à la surface à l'aide d'une benne cylindrique ou d'une cuillère (type de machines "Beneto").

Les techniques Rotary et Marteau fond de Trou sont les plus répandues et adaptées aux forages d'eau. Certaines machines Rotary sont de taille très importante et peuvent forer jusqu'à plusieurs centaines de mètres.

Les machines légères utilisées par Action contre la Faim fonctionnent en rotary seul pour ce qui est du modèle PAT 201 et aussi en percussion (MFT) pour le modèle PAT 301 et 401. Le principe de fonctionnement de ces 2 techniques est expliqué ci-dessous.

## 2.1 Principe du forage Rotary



**Figure 1: le principe rotary**

La technique rotary est exclusivement utilisée dans les terrains sédimentaires y compris les terrains durs pour les machines de fortes puissances.

Un outil appelé trilame ou tricône est mis en rotation depuis la surface du sol par l'intermédiaire d'un train de tiges. L'avancement de l'outil s'effectue par abrasion du terrain, sans choc, uniquement par rotation et poussée. Celle-ci est fournie par la puissance de la machine mais surtout par le poids des tiges au-dessus de l'outil. Il existe sur les ateliers de forages conséquents des tiges spécialement lourdes pour cela (masse-tiges).

L'outil détache dans le fond du trou des copeaux de terrain (appelés cutting). La circulation d'un liquide, la boue de forage, permet de les remonter à la surface. La boue de forage est injectée à l'intérieur des tiges, ressort au niveau de l'outil et remonte à la surface par l'espace annulaire entre le train de tiges et les parois du trou foré. Lors de sa remontée, la boue de forage tapisse les parois du trou (cake) pour les stabiliser. La "boue de forage" est faite à partir d'une argile (la bentonite) ou d'un polymère usuellement appelé polycol. Elle circule en circulation fermée, arrivée à la surface du sol elle est canalisée dans une série de fosses qui permettent aux

cutting de décanter, puis pompée et injectée sous pression dans le train de tige.

## 2.2 Principe du forage percussion (MFT)

Cette technique permet de traverser des terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (grès, calcaires).

Un taillant à boutons en carbure de tungstène fixé directement sur un marteau pneumatique, est mis en rotation et percussion pour casser et broyer la roche du terrain foré. Le marteau fonctionne comme un marteau piqueur, à l'air comprimé qui est délivré par un compresseur en plus de la machine de forage. Le flux d'air permet de remonter les cutting du terrain. On distingue 2 phases, la percussion et le soufflage.

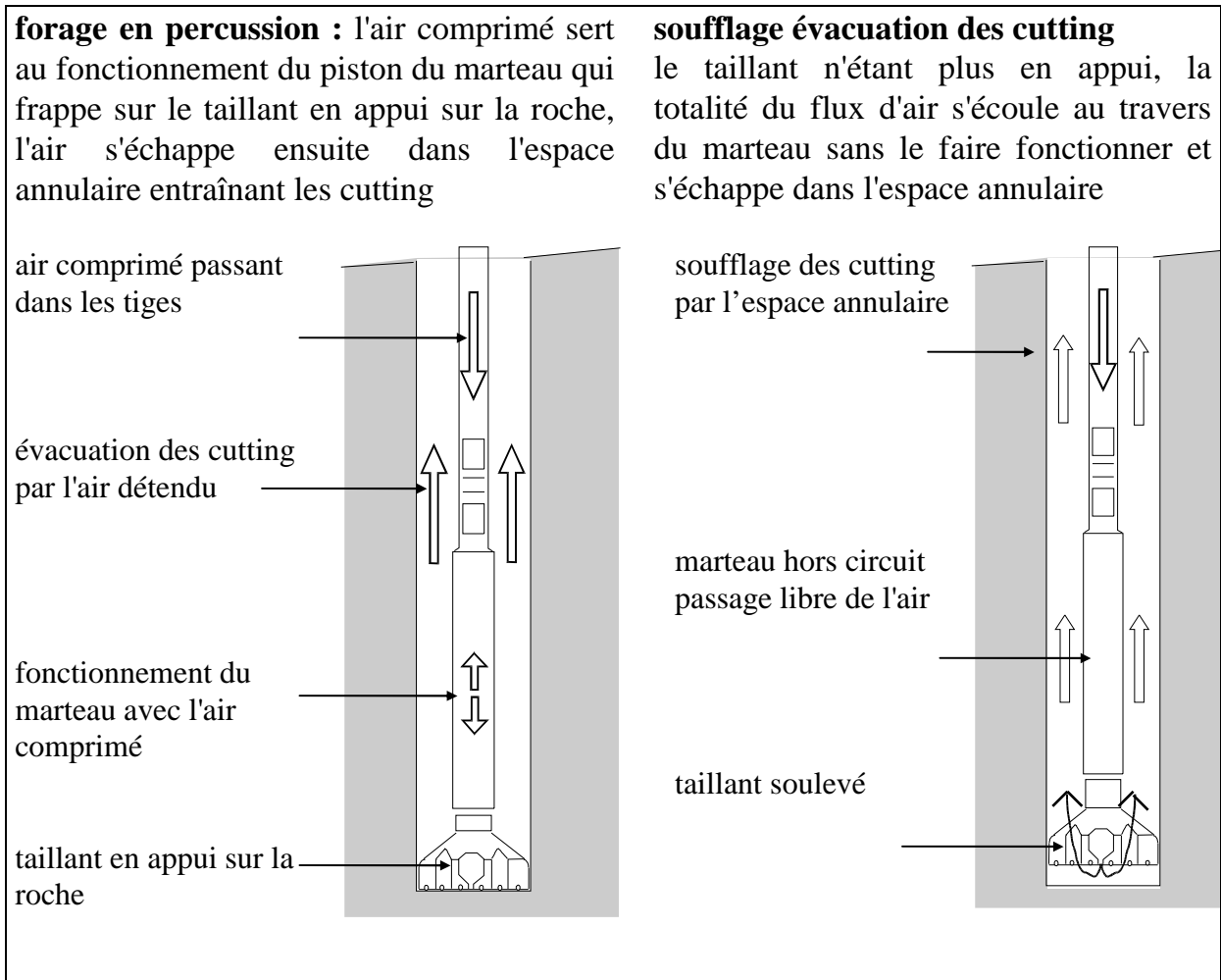


Figure 2: principe de fonctionnement du Marteau Fond de Trou



## 2.3 Les paramètres de la foration

Les paramètres qui contrôlent l'avancement du forage sont spécifiques à la technique utilisée (rotary ou MFT) : rotation et poussée sur l'outils Cf. Box 1, vitesse ascensionnelle et pression du fluide (boue ou air) Cf. Box 2. 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.

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

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 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.

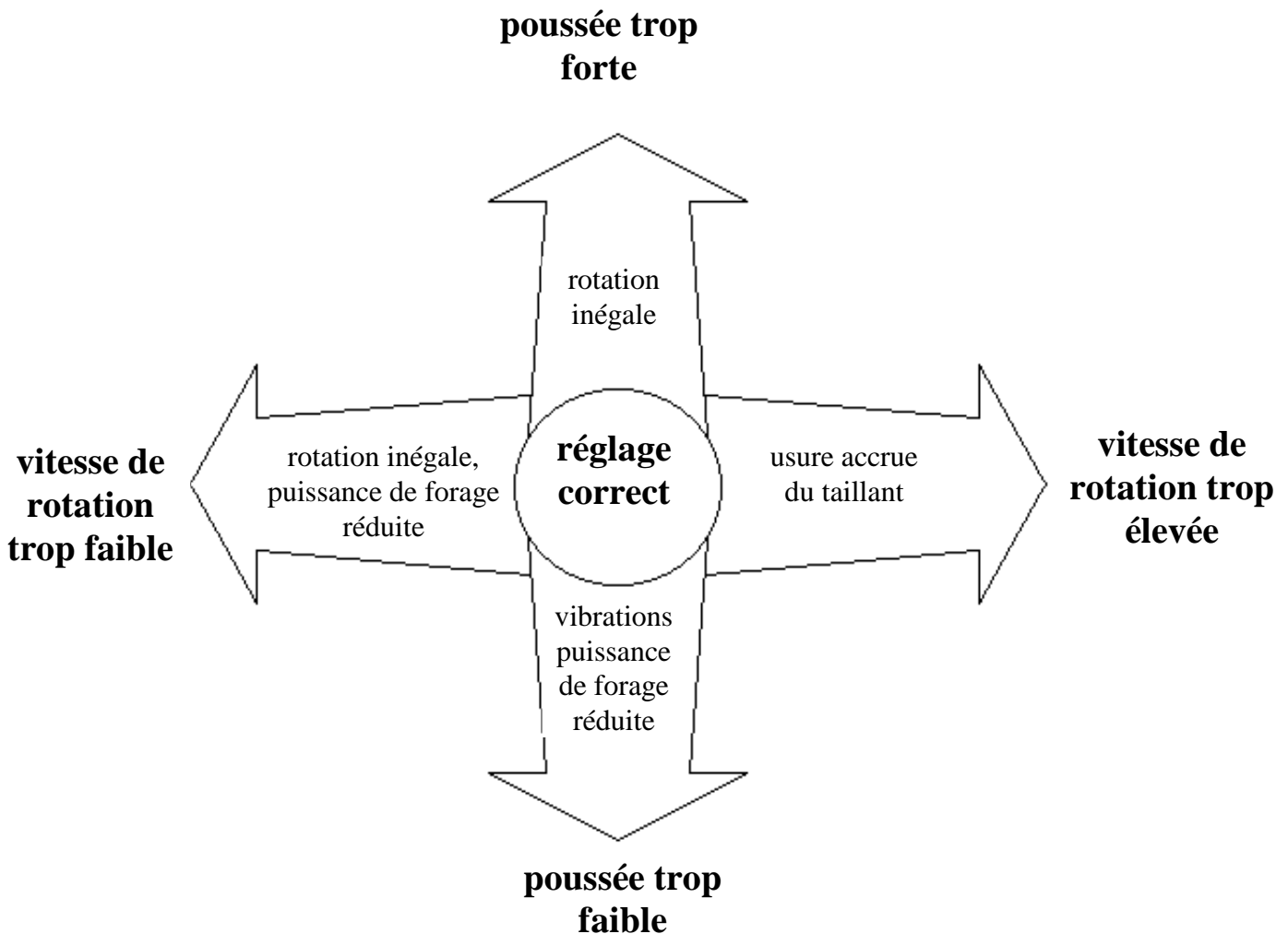


Figure 3: schéma de principe - réglage de la poussée/rotation

### 2.3.1 Rotation, poussée et force de levage

La rotation est transmise soit de manière hydraulique (circuit hydraulique), soit directement (moteur, boîte, embrayage ou tige carrée sur les grosses machines) au train de tige par la tête de rotation qui entraîne les tiges mécaniquement. Elle se calcule simplement en comptant le nombre de tour par minute.

Le couple de la machine s'exprime en Newton-mètre et joue un rôle fondamental pour les machines rotary travaillant dans des formations sédimentaires dures et pour les grandes profondeurs. Pour les machines légères, il joue un rôle secondaire car la technique rotary est limitée dans les terrains durs. Nous verrons que les valeurs exprimées sont très en deçà des normes conseillées.

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 conséquence, 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 Cf.Figure 4.

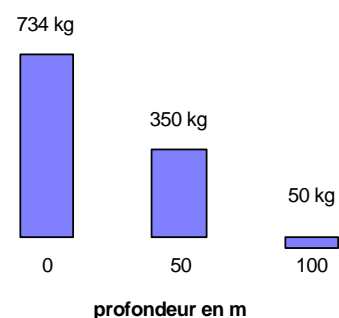
La poussée à appliquer sur un tricône (rotary) est beaucoup plus importante que pour un taillant (MFT). Par contre la vitesse de rotation est réduite Cf.Box 1.

La force de levage est fournie par la puissance de la machine, sa valeur est donnée par le constructeur et s'exprime généralement en tonne. Elle permet évidemment de relever le train de tige mais aussi de débloquer l'outil en cas de blocage de celui ci suite à un effondrement des parois.

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 4: poussée à appliquer en fonction de la profondeur et du poids des tiges.**

### **Box 1: calcul de la poussée et de la vitesse de rotation en rotary et MFT<sup>2</sup>**

- Poussée sur l'outils

Pour un Rotary, la poussée théorique minimum sur un tricône est de l'ordre de 450 kg par pouce du diamètre de l'outils 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.

- Vitesse de rotation

La vitesse que nous calculons, c'est la vitesse d'un point situé sur la périphérie de l'outils (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:

$$\frac{\text{distance par minute}}{\text{Pi} \times d} = \text{rotation par minutes (tours/mn)}$$

avec Pi = 3,14 et d = diamètre de l'outils 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

- Couple

Pour un forage Rotary et MFT, le couple minimum conseillé est de 2000 N-m par pouce de diamètre d'outil utilisé. Un coefficient de sécurité de 1,33 est appliqué. Soit pour un outil de 150 mm (6'') un couple de 16 kN-mètre.

### **2.3.2 L'air et la boue 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 ci-dessous.

---

<sup>2</sup> Raymond Rowles : A drilling for water, a practical manual; Edition Avebury/Cranfield University Ray.

Technique de forage	Type de fluide	Rôle du fluide
forage Rotary	Boue de forage : - Bentonite. - Polycol.	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).

Le forage rotary peut être réalisé à l'air seul, sans boue de forage. Cette technique est surtout appliquée en début de forage pour les premiers mètres (10-20 mètres) et évite de préparer une boue de forage, dans l'optique de forer au Marteau Fond de Trou (socle proche de la surface). Toutefois, les terrains superficiels n'étant pas stabilisés par le "cake" les risques d'effondrement sont plus importants (érosion des parois par le flux d'air). De plus, les cutting humides ont tendances à s'agglomérer entre eux, trop lourds pour remonter à la surface par le flux d'air, ils restent en suspension dans le trou jusqu'à réaliser un bouchon dans l'espace annulaire.

### 2.3.3 La boue de forage au forage rotary

Nous voyons donc que la boue joue un rôle essentiel dans la mise en oeuvre du forage : remontée des cutting, stabilisation des parois, lubrification de l'outil.

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 forage :

- La densité de la boue, influe sur la remontée des cutting et la stabilisation des parois. Une boue lourde a une meilleure portance et les cutting flotteront mieux.
- La température de la boue permet de refroidir l'outil de forage
- La viscosité influe sur la lubrification de l'outil

Les paramètres hydrodynamiques de ce fluide (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 cutting Cf.Box 2. En effet pour que ces cutting remontent dans l'espace annulaire il s'agit

de conserver une vitesse minimale adaptée à la densité du fluide. A débit constant la vitesse du fluide (m/s) diminue si l'espace annulaire augmente.

- La pression de la boue permet de faire face aux pertes de charges dans le train de tige car le circuit est équilibré (circuit en U ouvert à l'air libre) et donc aucune pression n'est nécessaire théoriquement pour assurer la remontée de la boue. Une forte pression est néanmoins très utile en cas de bouchon dans l'espace annulaire.

**Box 2: 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:

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

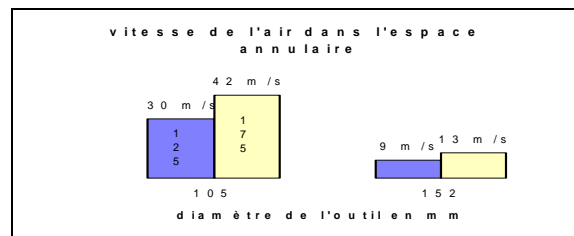
Raymond Bowles dans son manuel définit les vitesses annulaires minimales requises en fonction de la nature du fluide : 0,6 m/s pour de l'eau, 0,35 m/s pour une boue de forage (eau + bentonite), et de 15 m/s pour de l'air pure (sans mousse).

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.

**2.3.4 L'air au forage MFT**

L'air a deux fonctions distinctes, faire fonctionner le marteau et remonter les cutting à la surface. Les paramètres essentiels à contrôler sont donc :

- Le débit d'air minimal pour le fonctionnement du marteau (quelques litres par secondes) et surtout celui disponible pour créer un flux d'air d'une vitesse suffisante permettant de faire remonter les cutting de tailles moyennes (quelques millimètres) Cf. Figure 5.



**Figure 5: Vitesse de l'air fonction du débit du compresseur (125 et 175l/s) et du diamètre de l'outil**

Le tableau ci-dessous donne la vitesse annulaire nécessaire pour remonter des cutting sphériques de densité 2.8 en forage MFT à l'air sans ajout de mousse.

$\phi$ des cutting en mm	vitesse de l'air en m/s
0.1	1
0.5	5
1	8
5	18
10	24

L'ajout de mousse permet de créer une émulsion air/mousse qui augmente le phénomène de portance, et donc permet de remonter des cutting de diamètres de l'ordre du centimètre pour des vitesses ascensionnelles faibles de l'ordre de 10 à 15 m/s.

- La pression de l'air injecté : Elle a un rôle direct sur la puissance du marteau pour écraser la roche et donc sur la vitesse d'avancement du forage Cf. tableau 1.

- La lubrification de l'air doit être permanente car elle lubrifie la chemise du piston du marteau.

	Compresseur 8 bars - 175 l/s			Compresseur 12 bars - 125 l/s		
Numéro de forage	10825	10823	10829	10828	10832	10836
Temps moyen par tige de 2 mètres (mm.)	44	52	69	23	18	36

**tableau 1: vitesse d'avancement des forages réalisés au Nord de l'Ouganda dans des formations de Gneiss avec une PAT 301 équipé d'un taillant de 150 mm avec un compresseur de 8 bars et de 12 bars.**

### **2.3.5 Résumé des paramètres de forage.**

Ces valeurs ne sont qu'indicatives et correspondent aux normes conseillées pour les foreuses classiques, elles sont donc beaucoup plus importantes que les valeurs utilisées par rapport à nos foreuses légères. Nous verrons que les caractéristiques des foreuses PAT sont en deçà des normes ci dessous (poussée, couple) en technique rotary mais cela ne veut pas dire qu'il est impossible de forer avec. Il est par contre très clair que ces foreuses ont des limites d'utilisation précises et qu'il faudra adapter la

technique (rotary ou marteau fond de trou) en fonction du terrain. Dès que le terrain est dur, la technique rotary n'est plus applicable avec les machines de forage légères mais il est par contre possible de travailler au marteau fond de trou.

Paramètres de forage	Valeurs guides	
	Rotary	MFT
Poussée sur l'outil trilame tricône taillant	par pouce de $\phi$ d'outil 225 kg min. 450 kg min.	100-200 kg
Rotation (en rotation/minute)	10-150 rpm	25-50 rpm
Couple	2000 N-m par pouce de $\phi$ d'outil coefficient de 1,33 en plus à appliquer	
Vitesse du fluide min. max.	boue de forage 0,35 m/s 1,5 m/s	air (pure) 15 m/s 25 m/s
Pression du fluide (en bars) min. pour un forage de 4'' max.	boue 1 bar fonction du $\phi$	air 12 bars fonction du $\phi$

### 3. LES MACHINES LEGERES DE FORAGE

Nous présentons ici les 2 machines développées par l'entreprise PAT, basée en Thaïlande. Action contre la Faim a adaptés ces machines originellement conçues pour travailler dans des contextes Asiatiques de terrains sédimentaires, aux contextes Africains, en particulier pour travailler dans les zones de socle. 2 kits de forage ont été élaborés; le kit AcF PAT 201 et kit AcF PAT 301.

Suite aux premiers résultats concluants de la foreuse PAT 401, plus puissante, un nouveau kit de forage est en cours d'élaboration.



### 3.1 Le kit AcF PAT 201

La machine très simple de conception est une foreuse rotary composée d'un bâti et d'un moteur monté sur ce bâti Cf. Figure 6, d'une pompe à boue et d'un petit compresseur léger pour le développement du forage.

Les principaux avantages de cette machine sont sa conception légère et mobile, qui permet d'aller forer dans des zones isolées sans avoir à déplacer un atelier de forage complet très lourd. Un Pick-up classique ou petit camion plateau suffit pour la transporter avec l'ensemble de l'équipement de site en site. L'ensemble du kit est transportable par avion léger, ce qui est un atout pour intervenir sur les terrains de crise humanitaires de plus en plus complexes.

La mise en oeuvre très simple de ce type de forage permet aux équipes locales d'acquérir une autonomie technique très rapidement. Les forages sont équipés de pompes manuelles ou parfois immergée de 4'' en fonction des besoins et du débit. La profondeur d'investigation est environ de 45 à 60 mètres dans toutes les formations non consolidées type sable, argile et petits graviers. Pour les profondeurs au delà de 60 mètres, la machine est limitée par la configuration de son train de tige dans sa version standard (60 mètres), par son système de treuil manuel de relevage et le débit de la pompe à boue. Il est conseillé de rester dans cette gamme de profondeur d'utilisation de la machine (Option équipement 80 mètres possible).

La puissance de foration étant donnée par le poids de tiges au dessus de l'outil, elle est limitée par les terrains de surface indurés comme la carapace latéritique par exemple.

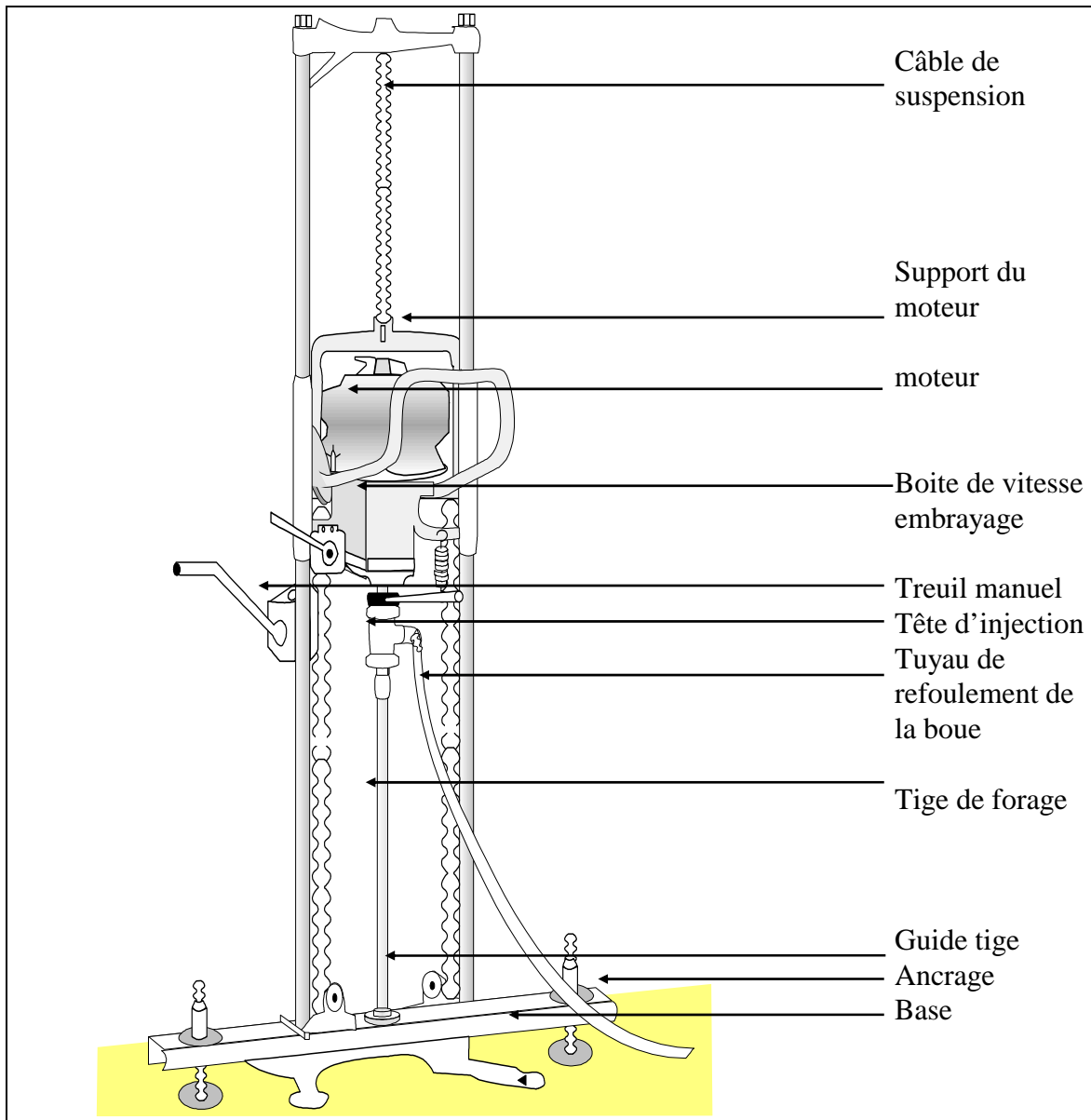
Sa configuration et son coût, en fait aussi une très bonne petite machine de prospection pour optimiser l'implantation d'une campagne de puits et ainsi éviter des ouvrages secs onéreux.

De nombreux programmes de forages ont été développés avec cette machine sur l'Asie du Sud Est par les Organisations Humanitaires, en Afrique par Action contre la Faim, sur des zones très isolées tel que le Sud Soudan, le Liberia, la Sierra Leone, le Mozambique ou l'Angola.

La rapidité de mise en oeuvre dépend essentiellement du contexte géologique et des conditions d'accès du site. Dans un contexte très favorable (nappe phréatique peu profonde), il est possible de forer un forage par jour. Toutefois, pendant une campagne de forage il ne faut pas négliger les temps de transport, d'installation et de replis, de choix de sites,

d'implantation des forages, et de maintenance. En moyenne, dans un contexte difficile, il est possible de réaliser un forage par semaine.

*Photo de la PAT 201*



**Figure 6: Bâti de la PAT 201**

### 3.1.1 Les spécificités techniques du kit AcF PAT 201<sup>3</sup>

Bâti	portique de 2,20 m. de course utile, poids kg treuil manuel de relevage équipé de 5 poulies (longueur de câble 11,5 m, rapport 4/1) Chassi d'installation pour un pick-up
Tête de rotation	moteur Honda GXV-140 essence 5 HP, 3600 rpm + boîte de vitesse + embrayage vitesse de rotation 80- 120 rpm
Tige de forage Outils standards et accessoires	longueur 1,5m × 40 unités - pas de vis 2''3/8 API reg. φ extérieur des tiges 54 mm - ep 4 mm - poids 16 kg - total 45 m Trilames : 1 pcs 8'' (200 mm) - 2 pcs 6''1/2 (165 mm) - 2 pcs 3''1/2, 6 (150 mm) - 1 Trilame pour la boue 165 mm Adaptateur : 2 pcs 201 A - 2'' 3/8 API rég femelle 2 pcs 201 A - 3''1/2 API reg femelle Caisse à outils complète
Poussée couple force de levage	treuil manuel 196 N/m treuil manuel max.: 400 kg
Pompe à boue	Pompe Taki - HMT 40 m - Débit 19l/s Moteur Honda GX 390 - 13 HP essence Tuyau d'aspiration 3'' x 4 m. Tuyau de refoulement 1'' 1/4 x 6 m.
Compresseur de développement	Moteur Honda GX 390 - 13 HP - 3600 tours/mn Compresseur FUSHENG model TA 80, 3 cylindre de compression : débit max. : 125 m <sup>3</sup> /h - HMT max. : 100 mCE Flexible d'air de 80 mètres sur toupie

## 3.2 Le kit AcF PAT 301

La machine PAT 301 est une foreuse rotary et percussion (MFT). Elle a été développée pour forer dans les formations dures sédimentaires et Action contre le Faim a adapté cette machine aux terrains beaucoup plus durs comme ceux du socle.

En rotary, elle permet de réaliser des forages plus profonds que la PAT 201 et dans les formations légèrement indurées. Sa configuration peut alors se limiter au rotary. La profondeur d'investigation est de l'ordre de 100 mètres en 6" et jusqu'à 150 mètres en 4" (Birmanie 96).

<sup>3</sup> Version 1998

En percussion, elle permet de réaliser des forages de 40 à 60 mètres de profondeur dans le rocher et les altérites pour capter les aquifères de fractures ou situés dans les altérations du rocher.

Cette machine garde dans une certaine mesure les avantages de la machine légère avec un domaine d'utilisation beaucoup plus large que celui de la PAT 201. Elle se trouve sous forme de kit transportable par avion et est donc mobilisable en urgence sur les terrains de crise, sa technologie est relativement simple et accessible à une équipe locale formée.

L'atelier peut être fixé sur un pick-up, un plateau de camion, ou posé directement au sol. Le bâti peut être tracté en étant monté sur 2 roues (déconseillé sur les pistes).

Le kit AcF comprend un châssis adapté au dimension d'un plateau de pick-up Land Cruiser permettant de fixer la machine. Il est important d'installer des vérins sur l'arrière du pick-up ou du camion pour régler la verticale du forage et stabiliser le véhicule pendant la foration.

L'installation de la machine au sol est la technique la plus simple qui permet de démarrer très rapidement, éventuellement en attendant le montage sur un véhicule.

<b>Contexte</b>	<b>Caractéristiques</b>	<b>Configuration de l'atelier</b>
Forage sur des camps en zone urbaine ou proche de la base	Pas de grandes distances entre les différents points de forage	Machine au sol ou sur pick-up Compresseur tracté
Forage villageois sur une zone étendue (type Sahel)	Grandes distances, pistes très mauvaises	Machine et compresseur sur camion
Forage rotary seul		Machine sur pick-up Machine au sol

**tableau 2: configuration de l'atelier en fonction des contextes d'intervention**

### 3.2.1 Spécificités techniques

La Machine est composée d'un bâti, d'une tête de rotation hydraulique, d'une unité hydraulique, et d'une unité de pompage. A cela, s'ajoute un compresseur d'air pour travailler en marteau fond de trou. Les spécificités techniques du kit standard sont données dans le tableau suivant.

Le domaine d'utilisation de la PAT en rotary est en déca des normes conseillées donc l'utilisation du tricône qui demande une forte poussée est proscrite. En pratique dès que l'on se trouve dans des terrains sédimentaires un peu durs, le MFT est mieux adapté car il nécessite une poussée bien moindre. Les vitesses ascensionnelles de l'air sont limitées au débit du compresseur utilisé.

Bâti	hauteur 3 m avec portique de 2,20 m. de course utile, équipé de 2 roues - poids 320 kg diamètre de la table de forage 200 mm
Tête de rotation	moteur hydraulique vitesse de rotation 0 - 40 rpm couple 120 kg force.m (soit 1160 N.m)
Tige de forage et outils standards	longueur des tiges 2m × 50 unités - $\phi$ extérieur 76 mm épaisseur: 4 mm - poids 16 kg Pas de vis : 2''3/8 API reg trilames : 2 pcs 9'' (245 mm) - 1 pcs 8'' (200mm) - 2 pcs 6'' (165mm) - 2 pcs 4'' (100mm) - 1 trilame 6'' pour la boue 3 adaptateurs 2''3/8 x 2''3/8 API reg (femelle - femelle) 2 adaptateurs 2''3/8 x 3''1/2 API reg (femelle - femelle) Marteau Stenuick Challenger 5'' Taillants : 1 x 150 mm - 2 x 165 mm
Unité hydraulique	moteur essence Honda 13 HP - 3600 tours/mn (châssis portable) réservoir huile hydraulique 40 litres pompe hydraulique 210 bars - 3 circuits d'huile séparés pour la rotation, la poussée, et la montée
Pompe à boue R standard	Moteur Honda GX 390 - 13 HP - 3600 tours/mn - essence pompe "Taki" 65-25 (168 kg) débit max. : 19 l/s - HMT max. : 42 mCE - Idem 201
Pompe à boue option H	moteur Honda GX 390 - 13 HP - 3600 tours/mn - essence pompe "Kato" (127 kg) débit max. : 34 l/s - HMT max. : 10 mCE kit pour forer en rotary diamètre 216 mm dans le cas de l'utilisation de tubage définitif 167-180 mm ou d'un prétubage 180 mm systématique avant de forer au marteau 150 mm.o

Compresseur à vis pour la foration	ATLAS COPCO XAH 12 bars -175 l/s - poids 1,5 tonnes - 2 roues. moteur Diesel DEUTZ 115 HP
Compresseur de développement	Moteur GX 390 HONDA 13 HP - 3600 rpm Compresseur FUSHENG TA 80 (3 cylindre)- pression 10 bars max - débit max 7.5 l/s toupie de flexible d'air de 80 mètres
Pompe à mousse (karcher)	Moteur essence Honda GX 120 - 3,8 HP 3600 t/mn pompe à piston 3 cylindres (Triplex piston pump) pression max. 35 bars - débit 20 l/mn Tuyau de refoulement de 25 mm x 6 m. Tuyau d'aspiration 25 mm x 2 m.

### 3.2.2 Principe de fonctionnement de la PAT 301

La foreuse fonctionne grâce à un circuit hydraulique qui alimente un moteur hydraulique pour la rotation du train de tiges; un vérin hydraulique pour la montée/descente des tiges et délivre la poussée sur l'outil. Ce vérin agit sur la tête de rotation (mobile le long du portique) par l'intermédiaire d'une chaîne. La machine est pilotée par un panneau de commandes. Cf. Figure 8.

Le Marteau pneumatique est alimenté par le compresseur Atlas, 175 l/s, 12 bars. L'air comprimé utilisé pour le marteau doit être en permanence chargée en huile (lubrificateur placé entre le compresseur et la vanne d'admission d'air). Une pompe à mousse permet d'injecter en plus de l'air un agent moussant pour une meilleur remonté de cutting.

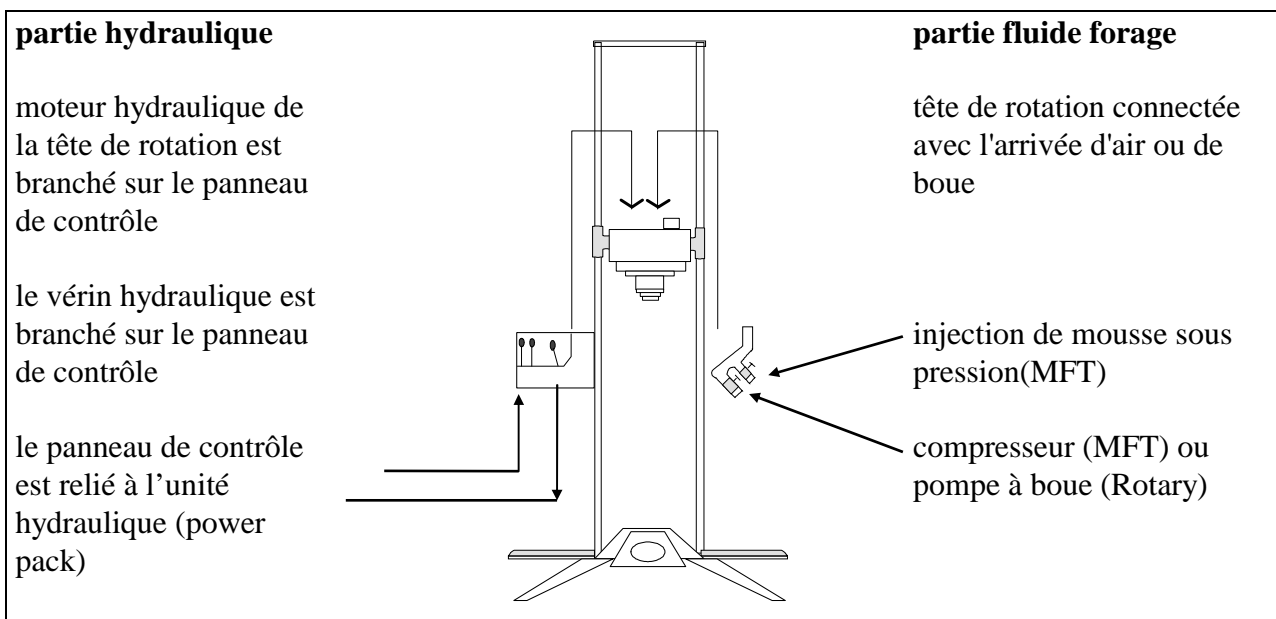
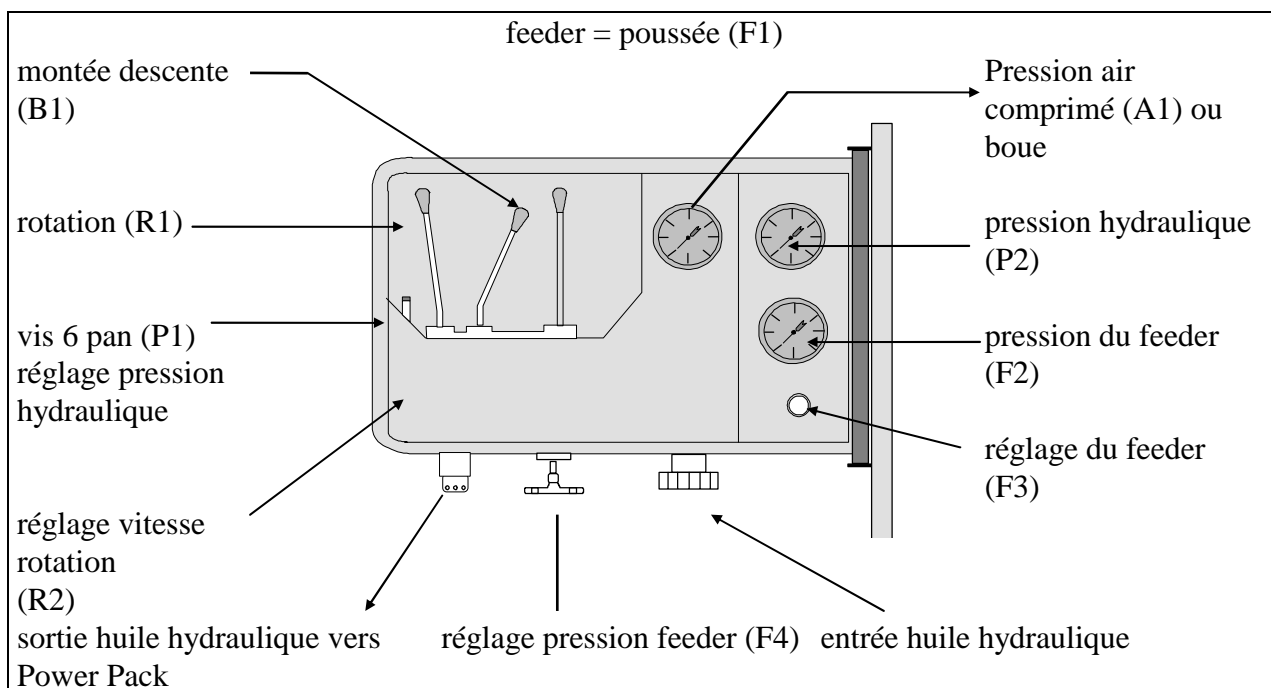


Figure 7: principe de fonctionnement



La pression hydraulique donnée par le "power pack" est de 210 - 220 bars (P2) maximum, et est réglé à l'entrée du panneau de contrôle par la vis de réglage à 6 pans P1. Une chaîne qui casse trop souvent peut signifier que cette vis est mal réglée.

Pression du feeder F3 : ce réglage permet d'obtenir une rotation correcte en marche automatique et de pouvoir bien utiliser la plage de réglage de la vis F3.

- tourner la vis de réglage du feeder F3 au minimum
- ajuster à l'aide de la vanne F4 la pression hydraulique à 400 PSI (mano F2)

Figure 8: fonctionnement du panneau de commande<sup>4</sup>

### 3.3 Les autres machines de Forages légères

Il existe sur le marché d'autres machines de forages similaires aux machines PAT. Vous trouverez ci suivant un tableau comparatif des caractéristiques des principales machines légères utilisées dans les programmes d'approvisionnement en eau potable. Les machines Eurêka et Dando sont d'origine anglaise.

Les machines Stennuick (BB) sont peu utilisées pour le forage d'eau mais présentent des caractéristiques intéressantes pour le forage marteau fond de trou et leur particularité est d'être entièrement pneumatique ce qui simplifie la maintenance.

<sup>4</sup> Modèle 1996

	Poids du bâti seul ou du kit	Force de levage (Kg)	vitesse de levage en mètres par minutes	Vitesse de rotation en tours /minutes	Couple en N-m	pompe à boue Q: débit d'air P: pression de service	compresseur (MFT) Q: débit d'air P: pression de service	remarques
<b>Eurêka drill System</b> Rotary	1500 kg	750		40-75	1 000		Non	
<b>Dando Buffalo 3000</b> machine au battage	1850 kg moteur : 1710 kg	7000 moteur 20 hp + treuil 3000				Non	Non	options: - rotary - MFT
<b>Stenuick<sup>5</sup>BB</b> Rotary+MFT pneumatique		2600		70	1800		Q: 250 l/s P:12 bars	
<b>Kit AcF 201</b> Rotary	900 kg	400 manuel	manuel	80-120	196	Q :19 l/s P :4,2 bars	Non	Kit
<b>Kit AcF 301</b> rotary+MFT	3,5 tonnes	1590 intermittents	max. :15 nor: 10	0-40	1320	Q : 19 l/s P : 4,2 bars	Q:125 à 175 l/s P:12 bars	kit Puis. 13 CV
<b>Kit AcF 401</b> rotary+MFT	4,5 tonnes	4389 intermittents	max. :19 nor: 13	0-40	1519		Q:125 à 175 l/s P:12 bars	Finalisation du kit 12/99 Puis. 40 CV
<b>401 Dyna PTO</b> rotary + MFT	3,5 tonnes	4389	max. :19 min.: 13	0-40	1862		Q:125 à 175 l/s P:12 bars	Puis. 90 CV

<sup>5</sup> Foreuse BB, équipé d'un moteur pneumatique F624 pour la rotation et de 2 moteurs F575 pour la montée et descente.



## 4. DIMENSIONNEMENT DES FORAGES

### 4.1 Principe de dimensionnement

#### 4.1.1 Choix du diamètre des tubes

Le plan du forage (profondeur, diamètre des tubes et place des crépines) dépend du contexte hydrogéologique (profondeur de la nappe, débit d'exploitation) et de son utilisation (pompe manuelle ou immergée).

Le choix du diamètre de la colonne est conditionné par l'encombrement de la pompe immergée (son diamètre) qui dépend du débit qu'elle peut fournir. Cf tableau ci dessous.

La hauteur de refoulement est fonction du nombre d'étage de roue que la pompe immergée comporte.

<i>Diamètres ext. des pompes (pouces)</i>	<i>Gamme de débits prévu (m<sup>3</sup>/h)</i>
3''	1 - 3 m <sup>3</sup> /h
4''	3 - 10 m <sup>3</sup> /h
6 ''	10 - 50 m <sup>3</sup> /h
8''	50 - 150 m <sup>3</sup> /h

Une pompe de 4'' passe normalement dans un tube de 100 mm de diamètre. Toutefois, il est recommandé de laisser un pouce de jeu entre pompe et tubage pour limiter les pertes de charge (surtout pour les débits importants) et pour le refroidissement de la pompe.

Pour une pompe immergée de 4'', il est donc recommandé d'utiliser un tubage de 112 mm intérieur.

En toute logique, le diamètre extérieur (épaisseur) dépend des contraintes mécaniques (pression horizontale des terrains et poids des tubes en suspension). Nous verrons plus loin le cas de figure du tubage PVC le plus utilisé pour les forages d'eau de profondeur moyenne (pas de corrosion, facilité de mise en oeuvre etc..).

Le diamètre de foration choisi doit permettre de passer le tubage librement sans forcer et de laisser un espace pour le gravier filtre autour des crépines. La qualité d'un forage (pérennité, qualité et turbidité de l'eau, débit d'exploitation) dépend pour beaucoup de la mise en place de l'équipement, du positionnement des crépines en face des venues d'eau ou niveaux de la mise en place du gravier filtre de la cimentation de l'espace annulaire pour éviter les infiltrations de surface.

Ci dessous, voici les correspondances pratiques entre les diamètres de tubes PVC courants et les diamètres des outils pour travailler dans de bonnes conditions.

<i>Diamètre ext. du tubage (pouce - mm)</i>	<i>Diamètre minimal d'outil à utiliser</i>
4'' - 110 mm	6'' - 150 mm
4'' 1/2 - 125 mm	6'' 1/2 - 165 mm
6'' - 165 mm	8'' - 200 mm
6'' 1/2 - 180 mm -	8'' 1/2 - 215 mm
7'' - 195 mm	9'' 5/8 - 245 mm

#### **4.1.2 Prétubage**

Le prétubage 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 prétubage pour les stabiliser pour la suite du forage. Il est recommandé de cimenter la base du prétubage 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 prétubage 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).

Les terrains de surface peuvent être bouillants (sables, sols) et nécessiter un prétubage 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 prétubage en acier peut permettre de le retirer quelque soit la profondeur mais dépend de la force de levage de la machine (poids des tubes plus frottements). Les machines de forage légères telle que les PAT ne sont pas assez puissantes, (forces de levage limitées) pour effectuer ce genre d'opération au delà de 20 mètres.

Le diamètre intérieur du prétubage doit être supérieur de quelques millimètres au diamètre de l'outil utilisé pour forer les terrains sous-jacents. Le prétubage est donc choisi en fonction de l'outil que l'on désire faire passer dedans.

Par exemple, pour passer un taillant de 165 mm (6''1/2) afin d'équiper avec un tubage définitif de 125 mm, le prétubage choisi sera de 178 intérieur. Le prétubage de 167 mm intérieur parfois disponible sur le marché ne laisse aucun jeu et les précautions de mises en oeuvre sont alors d'autant plus importantes pour passer le taillant sans le faire percuter ou frotter et risquer de casser le prétubage.

## **4.2 Exemples de design courants**

Ces exemples sont issus des forages destinés à recevoir des pompes manuelles ou électriques immergées de 4'' Cf. Figure 9 Figure 10.

En règle générale, les pompes manuelles passent dans des tubes de 100 mm intérieur. Attention toutefois au pompe Kardia K 65 dont le cylindre fait 96 mm et les centreurs 96 mm (prévoir un tubage de 112 mm intérieur).

Pour les pompes électriques immergées de 4'', afin de réduire les pertes de charge il est conseillé d'équiper en tubage de 112 mm intérieur même si dans la majorité des cas elle passe dans des tubes de 100 mm intérieur.

Le prétubage sera alors de 178-195 mm ou de 167-180 mm à si nécessité.

Il est fortement conseillé d'équiper les forages sur toute leur hauteur pour assurer une longévité au niveau du captage et un filtrage des fines du terrain au niveau du gravier filtre.

Il arrive parfois de rencontrer des forages dans le socle qui ne sont pas tubés dans leur partie inférieure (surtout pour des forages équipés de

pompes manuelles). Le forage est alors équipé uniquement d'un tubage protégeant la partie haute moins consolidée en diamètre de 125 mm ou plus. La partie basse, fracturée n'est pas tubée et laissée telle quelle.

Cette technique n'est pas à conseiller car elle porte préjudice à la pérennité de l'ouvrage même si les fractures sont propres et l'eau pompée apparemment claire dans l'immédiat.

Exceptionnellement avec les foreuses légères dans des formations très dures (temps de forage très long), la seule solution est parfois de forer en diamètre plus petit (100 mm) et de laisser le trou nu.

Contexte géologique	Technique	Prétubage (mm)	Trilame (mm)	Tubage (mm)	Trilame (mm)	Taillant (mm)
sédimentaire	Rotary	167 - 180	215	112 - 125	165	
sédimentaire	Rotary	178 - 195	244	101 - 125	165	
consolidé	MFT	167 - 180	215	101 - 110		150
consolidé	MFT	178 - 195	244	112 - 125		165

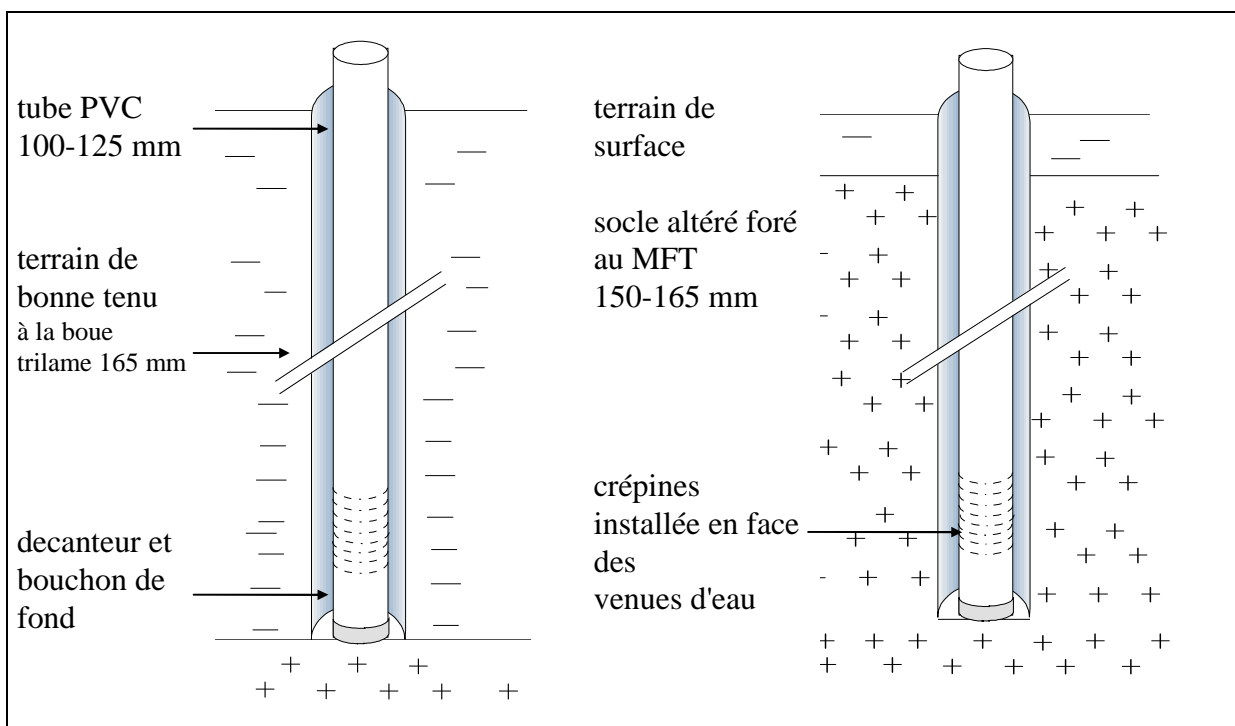
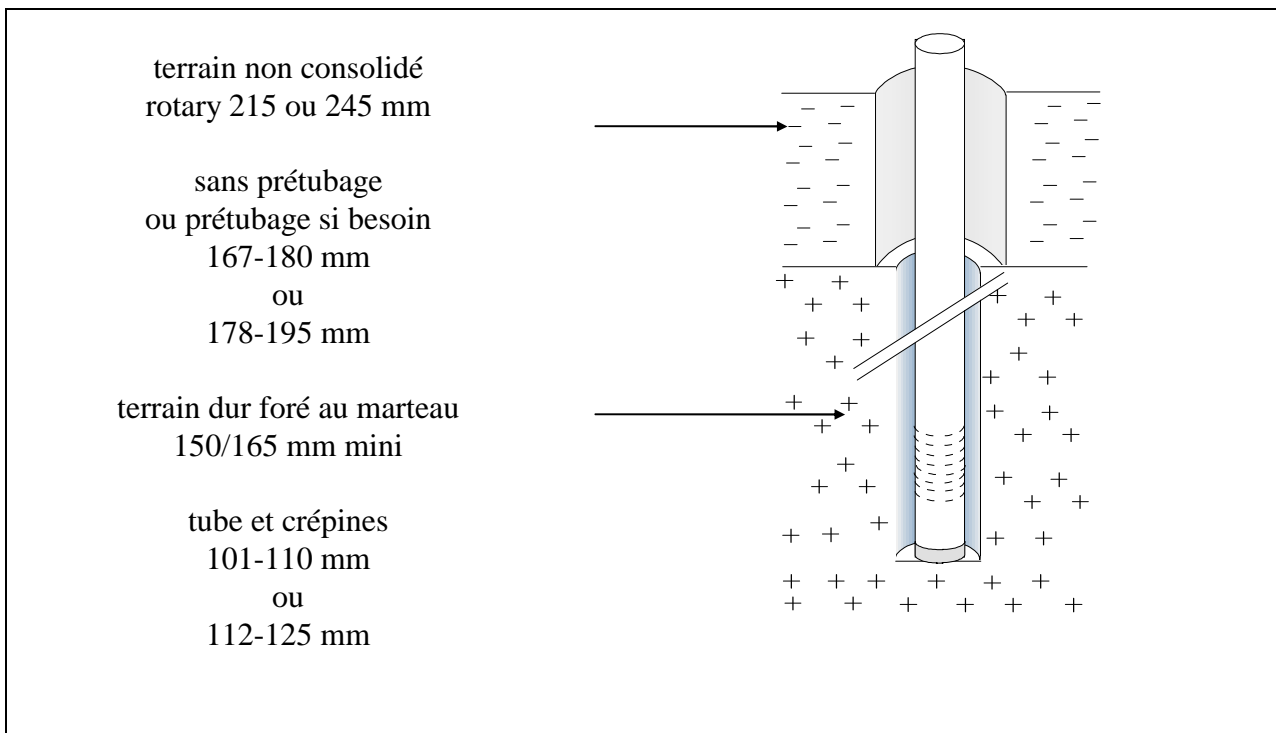


Figure 9: forage rotary et marteau fond de trou

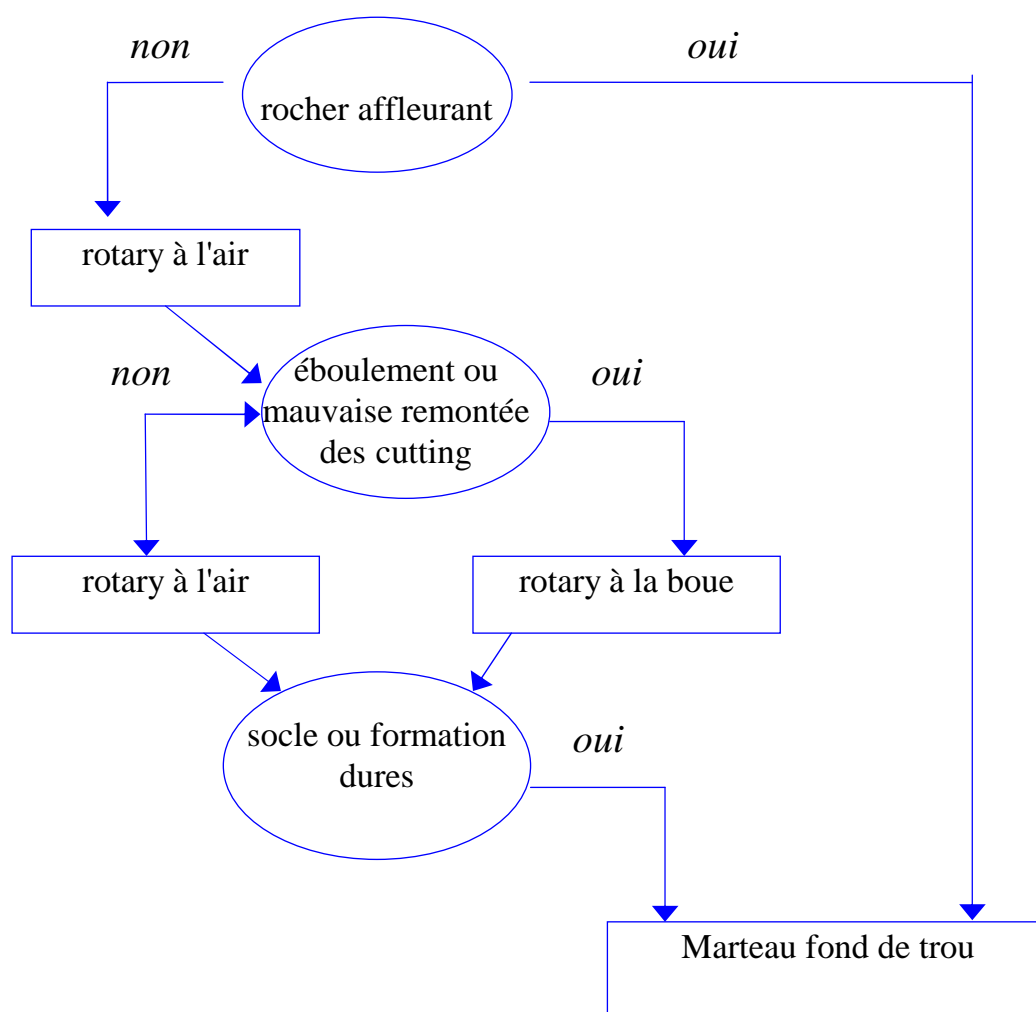


**Figure 10: forage mixte Rotary et Marteau Fond de trou**

## 5. LA REALISATION DES FORAGES

De nombreux exemples et astuces concernent plus particulièrement la réalisation de forages avec les machines PAT 301 mais la technique est applicable à d'autres machines ayant des caractéristiques similaires.

### 5.1 Le choix de la technique



**Figure 11: organigramme de choix pour les forages dans le socle**

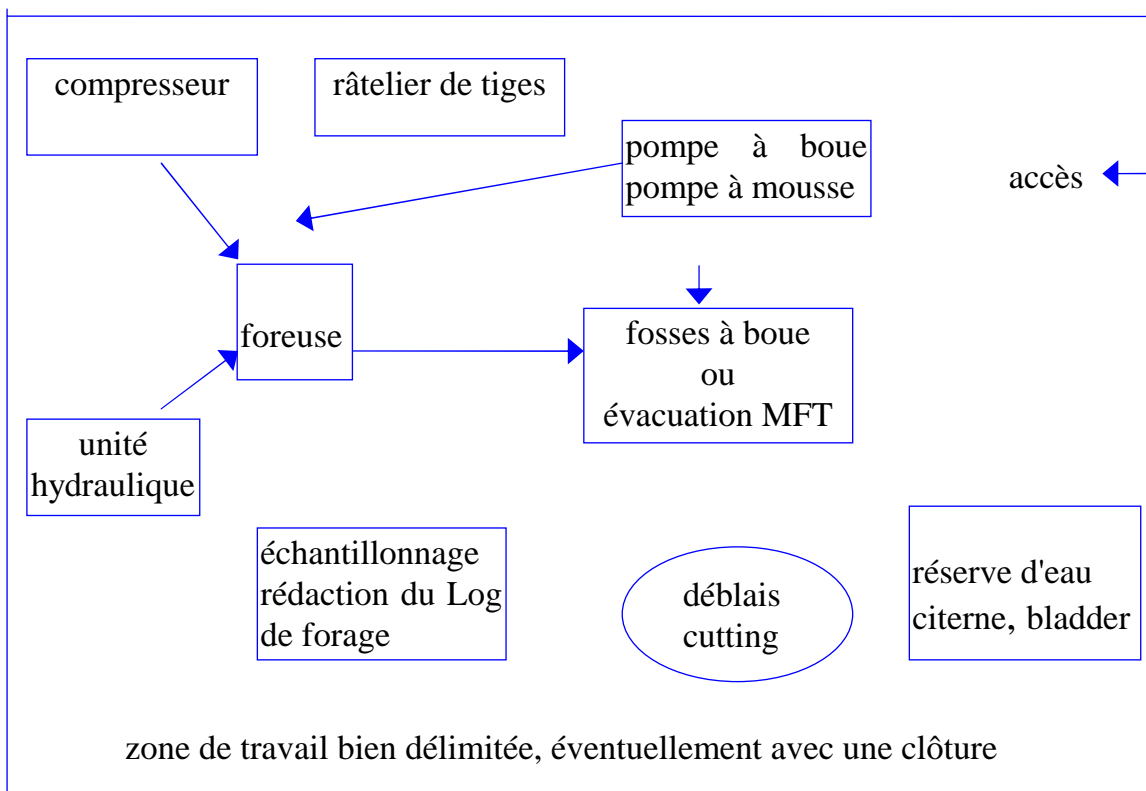
Le comportement des terrains à la foration dépendra bien sûr de leur nature, mais aussi de leur teneur en eau. L'expérience seule permet d'évaluer correctement la remontée de cutting et l'avancement du forage en fonction de la méthode utilisée.

Au delà d'une certaine profondeur le rotary à l'air est exclu car difficile à maîtriser (remontée des cutting).

Dans les terrains sédimentaires peu consolidés, la technique valabe est celle du rotary à la boue.

## **5.2 La préparation du chantier**

### **5.2.1 L'installation du chantier**



**Figure 12: organisation du chantier**

L'organisation du chantier doit permettre au foreur d'en visualiser la totalité et donc d'intervenir rapidement en cas de problèmes.

Les précautions pratiques à prendre sont les suivantes:

- déterminer un périmètre de sécurité autour du chantier.
- prévoir un accès au chantier pour les véhicules et l'approvisionnement en eau (citernes d'eau).
- prévoir un accès facile pour le remplissage des fosses.

- prévoir un endroit sec pour la rédaction.
- prévoir une zone de déblais (cutting).
- aplanir le terrain pour faciliter le calage de la machine.
- prévoir le creusage des fosses à boue et son emplacement.
- positionner le compresseur de façon à ce qu'il ne reçoive pas la poussière de forage (pas sous le vent de la machine).
- installer toutes les unités de pompage, de pression hydraulique et les moteurs sur un plan horizontal.

• *Recommandations pratiques*

Pour assurer une meilleure stabilité à la machine lorsque celle-ci est au sol, il est conseillé d'installer les haubans (câbles acier de 6 mm) fixés aux angles supérieurs du bâti du mât et à des piquets solidement plantés dans le sol, ainsi que de disposer des sacs de sable sur les bras d'ancrage de la machine si besoin.

L'unité de pression hydraulique (power pack) sera protégée du soleil et placée dans une zone aérée afin d'éviter des échauffements trop importants qui entraînent une perte de puissance (température critique de l'huile à 60°C).

La PAT 301 et l'unité de pression hydraulique sont reliées par deux tuyaux d'huile hydraulique. Les embouts (mâles et femelles) de ces tuyaux ne permettent aucune erreur de branchement sur l'unité de pression ou sur le panneau de contrôle. L'unité hydraulique ne doit pas être démarrée avant d'avoir effectué les branchements car il provoque une mise sous pression des raccords qui bloquent la circulation.

Lors d'un stockage prolongé, il faut laisser les tuyaux connectés (un tuyau en circuit fermé sur l'unité hydraulique et un sur le panneau de contrôle).

Le râtelier pour les tiges permet de répartir celles-ci en deux groupes, ce qui permet d'éviter les erreurs de comptage et donc de profondeur forée. Il est toujours bon de les numéroter afin de les différencier les unes des autres. Les filetages doivent être protégés par des bouchons. Les filetages (tiges et tête de rotation) seront systématiquement graissés pour chaque utilisation à la graisse au cuivre (hydraulique) qui assure l'étanchéité du train de tige et sert d'anti-grippant.

Si la machine est fixée sur un véhicule, l'organisation se fera suivant le même plan. Sur un véhicule léger type Land Cruiser 4x4, l'unité de pression hydraulique et les tiges seront sur le plateau du 4x4. Le



compresseur est alors tracté par un autre véhicule qui transporte le reste du matériel.

Sur les camions de 5 tonnes, il sera possible de monter en plus le compresseur.

La mise en route d'un chantier avec une machine fixée sur un véhicule, est plus rapide. Les vérins doivent permettre de stabiliser la foreuse à la verticale, et de soulever le camion. Des madriers seront posés sous les vérins afin de répartir la pression sur une plus grande surface au sol.

### **5.2.2 La préparation des fosses à boue**

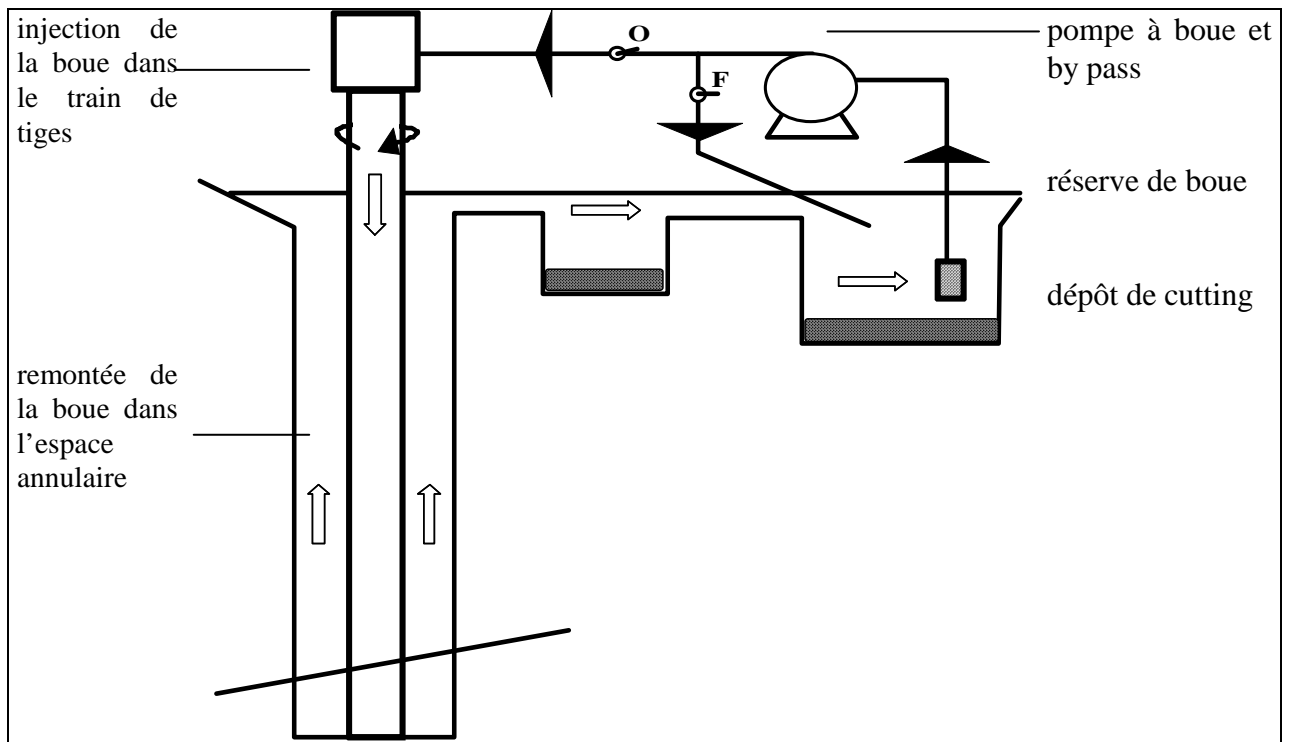
Les fosses à boue constituent une réserve de fluide de forage, et permettent le recyclage de la boue par décantation. Pour des forages peu profonds (20/30 mètres) dans des terrains non consolidés, les dimensions suivantes peuvent être utilisées.

Un premier canal de 2 mètres de longueur et de 0.20 X 0.20 m. de section est creusé à partir de l'emplacement choisi pour le forage. Il se jette dans la première fosse. Il doit être assez long pour que la fosse soit en dehors du trottoir du futur point d'eau pour éviter un tassement différentiel sous la dalle.

La première fosse (fosse de décantation) facilite la sédimentation amorcée dans le canal. Son volume est de 0.20 m<sup>3</sup>. (0.60 x 0.60 x 0.60 m).

Le second canal doit être décalé de l'axe du premier afin de former une chicane qui ralentit le flux et favorise la décantation.

La seconde fosse (fosse de pompage) est une réserve où est pompée la boue pour être injectée dans le train de tige. Son volume est environ de 1 m<sup>3</sup>. Les fosses et canaux sont régulièrement curés et nettoyés des sédiments déposés en cours de forage.



**Figure 13: circulation de la boue**

### Box 3: Dimensionnement des fosses

Le dimensionnement des fosses à boue se fait en fonction de la profondeur du forage à réaliser : idéalement, le volume total des fosses doit être égal à 3 fois le volume du forage avec :

le volume de la fosse de décantation égal à:

Largeur = racine cubique (volume du forage en gallon x 2/ (2.125 x 7.5))

Longueur = 2.5 x largeur

Profondeur = 0.85 x largeur

et celle de la fosse de pompage égale à:

Largeur = idem à celle de la fosse de décantation

Longueur = 1.25 x largeur

Profondeur = 0.85 x largeur

### 5.2.3 Préparation de la boue de forage

Dans les terrains argileux il est préférable de forer à l'eau simple sans bentonite pour éviter de colmater l'aquifère. L'eau se chargera au fur à mesure d'argile du terrain.

En l'absence d'informations fiables sur la nature des terrains, on mélange à l'eau de forage de la bentonite ou de la polycol, pour augmenter la densité

de l'eau et préparer une boue que l'on pourra épaissir ou alléger par la suite.

La polycol : c'est un produit polymère très répandu en forage rotary, qu'il faut doser entre 2.5 et 5 kg par m<sup>3</sup> d'eau. Le mélange eau + polycol est plus homogène que le mélange eau + bentonite et son utilisation demande moins d'attention. Il existe de nombreux type de polycol avec des caractéristiques différentes en fonction des contextes ou l'on fore (milieu salin, anti-colloïdes, climat, polycol biodégradable etc.).

La bentonite : c'est une argile en poudre qu'il faut doser entre 15 et 30 kg par m<sup>3</sup> d'eau. Son risque majeur de colmatage de l'aquifère en fait aussi son avantage dans des terrains très perméables (aquifères, graviers, sables, silts) où les pertes de boue peuvent être importantes ainsi que les risques d'effondrement.

- *Recommandations pratiques*

L'eau utilisée sera propre. Il est indispensable de prévoir une réserve d'eau sur site de 1 à 2 m<sup>3</sup> (réservoir souple, ou tonne à eau) pour compenser rapidement une perte de boue.

La densité de la boue doit être ajustée au fur et à mesure de l'avancement de la foration. Avec un peu d'expérience et en fonction des terrains traversés le foreur ajuste la densité au "touché". Les terrains argileux traversés ont pour effet d'épaissir la boue de forage. Il faut donc diluer cette boue par ajout d'eau claire pour obtenir une boue plus légère. Dans les terrains bouillants ou sableux, il est nécessaire de forer avec une boue assez dense. Une venue d'eau souterraine peut alléger excessivement la boue.

Pour obtenir un mélange homogène, la polycol ou la bentonite doivent être saupoudrés au dessus du jet d'eau pendant le remplissage de la fosse. Un mélangeur à l'aide de quelques fitting peut être fabriqué : il s'agit de faire un venturi que l'on branche au refoulement du by pass.

La boue est mise en circulation de fosse à fosse pour qu'elle reste homogène avant le démarrage effectif du forage. Cf. Figure 13 Figure 15.

### 5.2.4 Evacuation des cutting au Marteau Fond-de-Trou

La remontée violente des cutting et de l'eau (soufflage de l'air comprimé) sera canalisée pour permettre un échantillonnage et une estimation du débit.

Lorsque la machine est installée sur un véhicule, le mélange eau/cutting vient heurter le dessous de son plateau. Il faut prendre soin de définir au sol un plan circulaire orientant l'écoulement vers une rigole. En pratique le moyen le plus efficace de canaliser les cutting et d'éviter les projections est de placer un tube de 1 à 2 m. de hauteur, sous la table de forage.

Les cutting sont récupérés dans un seau placé sous la "pluie de cutting"

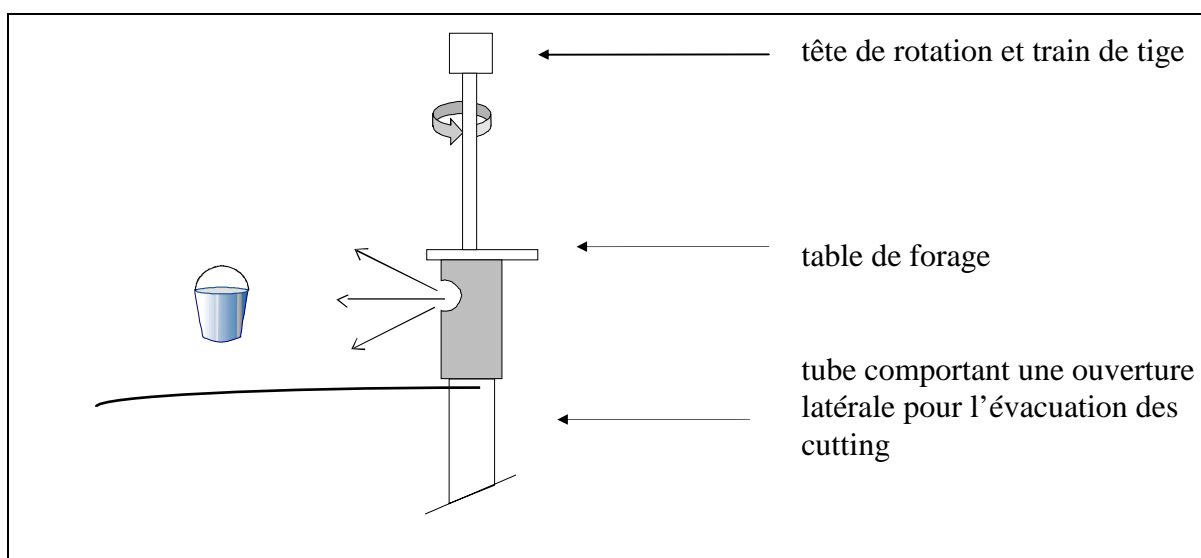


Figure 14: évacuation des cutting

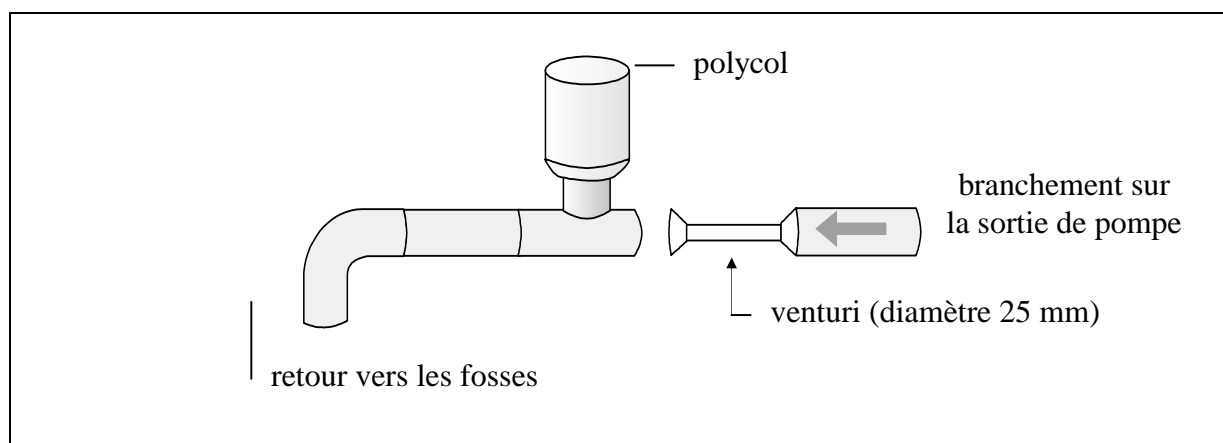


Figure 15: mélangeur venturi fabriqué avec des fitting PVC

## 5.3 Mise en oeuvre du forage Rotary

### 5.3.1 Démarrage du forage au rotary

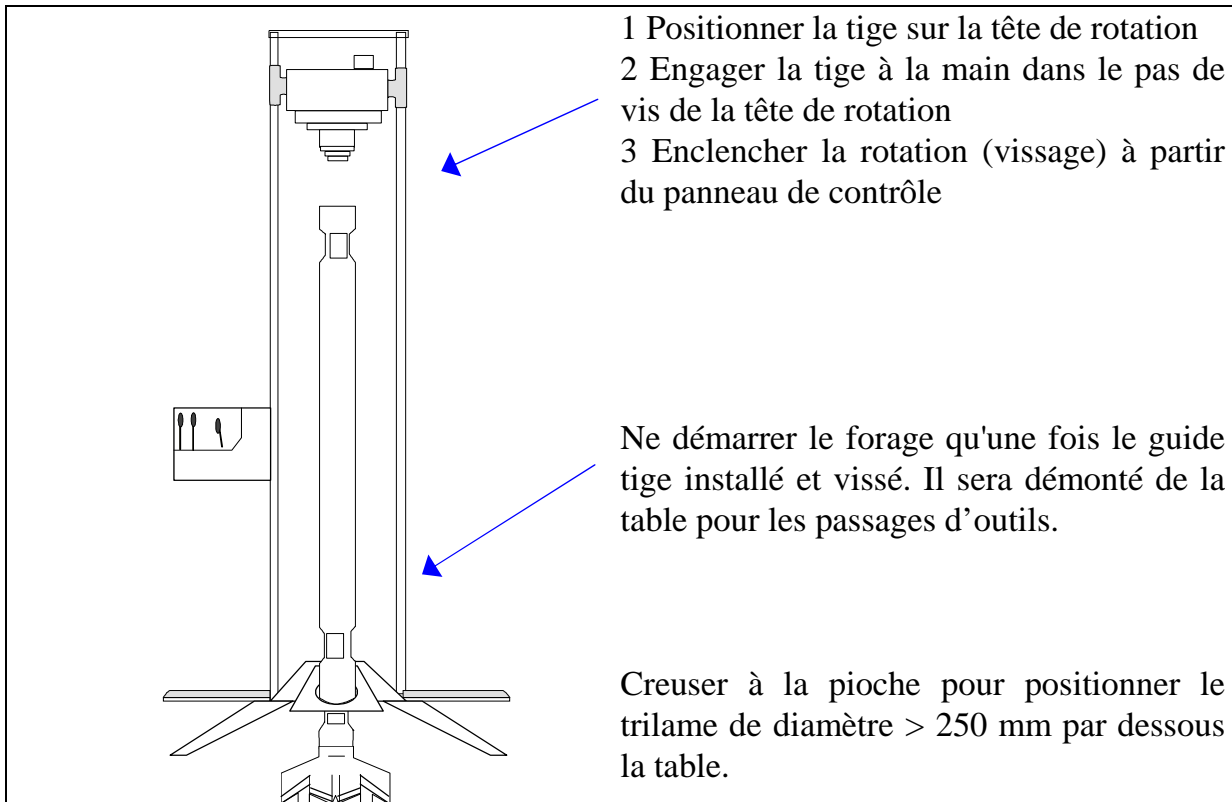


Figure 16: installation de la première tige

### 5.3.2 l'avancement - l'ajout d'une tige Cf. Figure 18

L'avancement est réglé à partir du couple rotation/pression sur l'outil contrôlé par le panneau de contrôle. Plus loin, nous verrons plus spécifiquement les solutions possibles aux problèmes d'avancement et de foration.

Il faut forer jusqu'au bout de course de la tige afin de permettre, lors du changement de tige, de garder un espace entre le fond du trou et l'outil. En fin de tige, remonter et descendre une fois sur la hauteur de la tige, afin de contrôler le trou et de nettoyer les parois puis laisser le trou se nettoyer avec la circulation de boue. Lorsque la boue est exsangue de cutting, l'ajout d'une tige peut être effectué.

Basculer alors le refoulement de la pompe à boue en circulation de fosse à fosse (ralentir le régime moteur) et procéder au changement de tige. L'arrêt et la reprise de la circulation doivent se faire le plus doucement possible pour éviter toute déstabilisation des parois.

Le sabot de blocage sert à bloquer les tiges en suspension dans le forage pour toutes les manipulations d'ajout ou de retrait de tiges en l'enclenchant au niveau du plat des tiges.

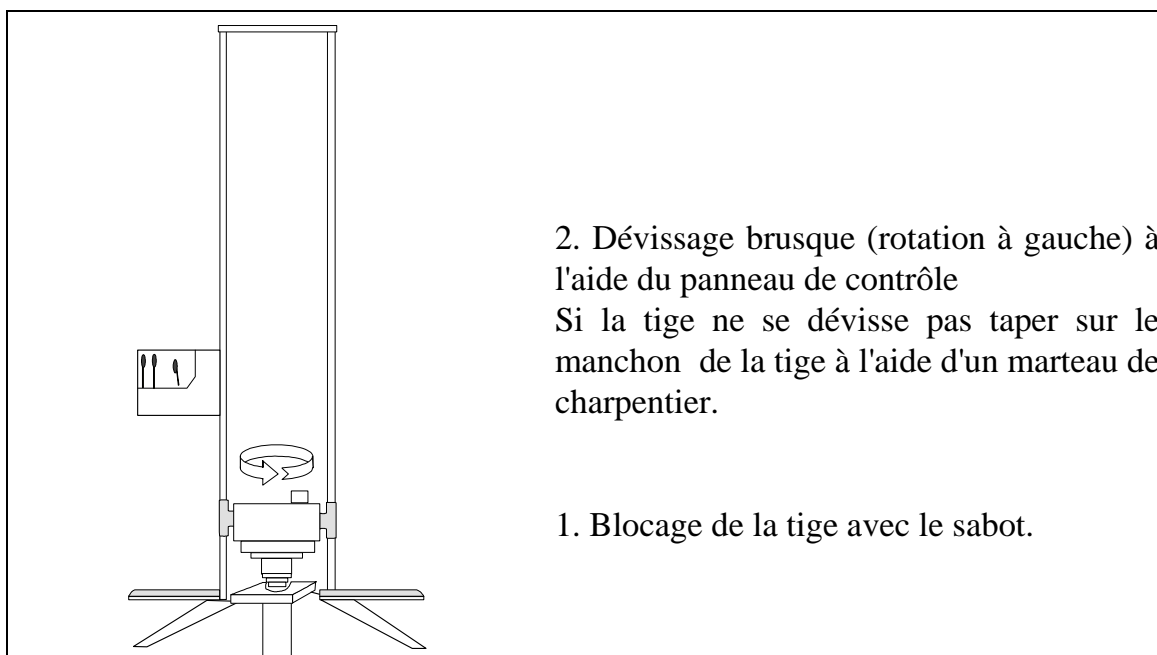


Figure 17: blocage des tiges en suspension

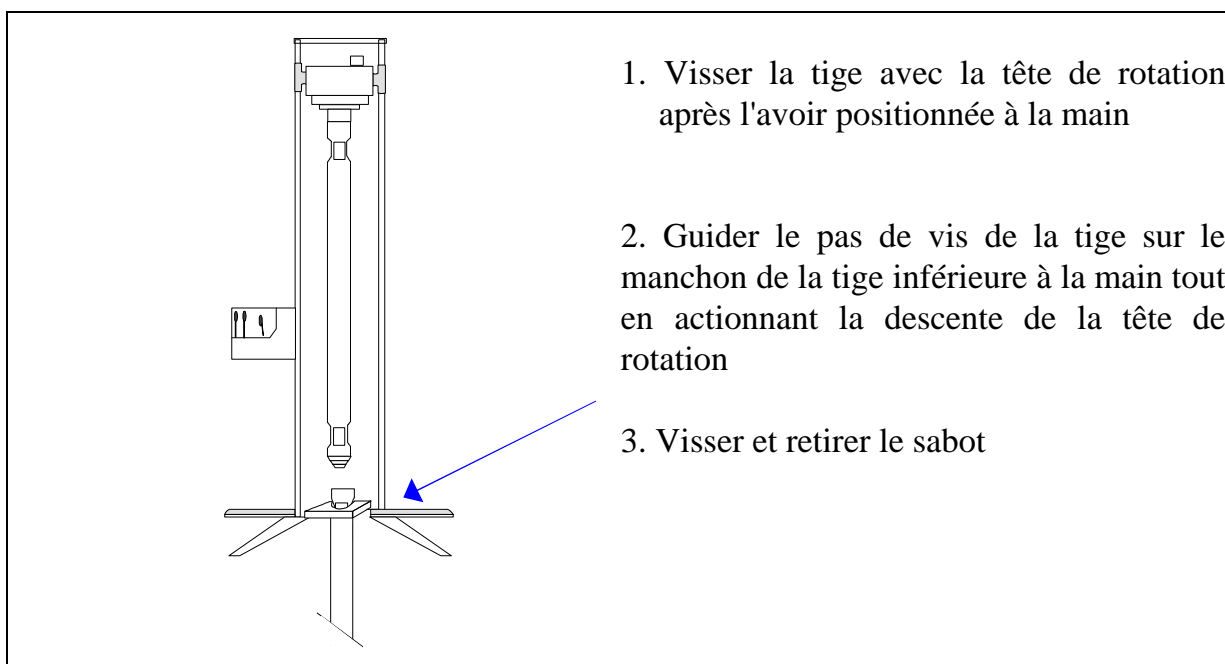


Figure 18: l'ajout d'une tige

### 5.3.3 Le retrait d'une tige

La tête de rotation est mise en position haute et le sabot enclenché sur le plat de la tige inférieure. Le retrait de la tige se fait dans l'ordre, d'abord en dévissant le filetage haut avec la tête de rotation, puis avec la clé et le filetage du bas.

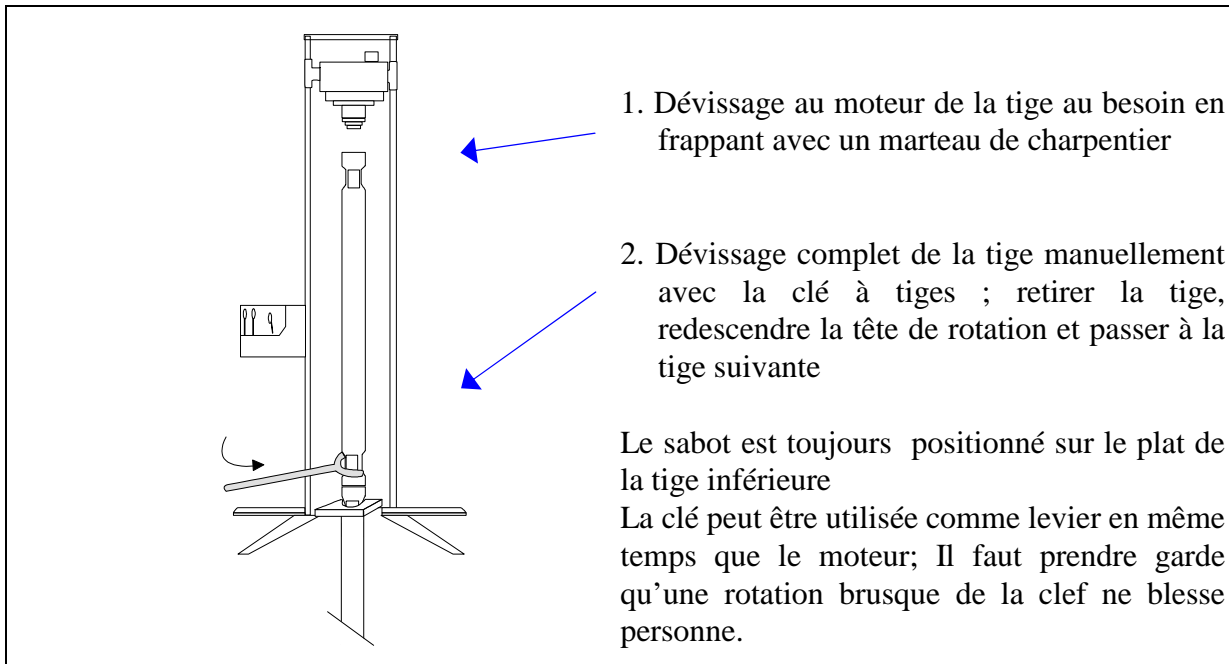


Figure 19: le retrait d'une tige

### 5.3.4 Difficultés au rotary et solutions préconisées

De nombreuses difficultés apparaissent en cours de forage, la majorité sont simples à régler avec un peu d'expérience. La clé du succès repose sur un suivi constant de tout phénomène pouvant influencer sur la suite des opérations sur une observation précise des cutting et sur "l'écoute de la machine". Les foreurs d'expériences sont très attentifs pendant les phases clés du forage et apportent beaucoup de solutions judicieuses. Ci-dessous sont résumés les problèmes fréquents et les solutions préconisées.

<i>Difficultés - observations</i>	<i>Solutions préconisées</i>
Pertes importantes et/ou dilution de la boue Terrains sableux	Augmentation de la densité de la boue Utilisation de bentonite préférentiellement à la polycol Installation d'un prétubage
Epaissement de la boue	Vidange et nettoyage des fosses Ajout d'eau clair

Parois de forage non stabilisé et effondrements Erosion des parois du trou	Augmentation de la densité de la boue Réduction de la vitesse de circulation du fluide Réduction des temps de nettoyage et de circulation Mise en place de l'équipement immédiatement
Effondrement des parois, arrêt de la circulation; Blocage de la rotation	Augmentation de la pression et du débit de boue Remontée du train de tiges jusqu'à la reprise normal de la circulation Installation d'un prétubage
Colmatage de l'aquifère	Nettoyage à l'eau claire pour casser le cake Utilisation de la polycol

### 5.3.5 Analyse des cutting et signes d'eau

- *Analyse des cutting*

Les "copeaux" de terrain qui remontent avec la boue sont la source d'information essentielle : leurs analyses géologiques permettent d'identifier les formations traversées, de connaître leur nature s'ils sont perméables (notion de réservoir) et susceptibles de fournir de l'eau.

Des échantillons sont prélevés à chaque changement de tige et de terrain. Ils sont prélevés à la main, juste à la sortie du forage et sont placés dans une boîte compartimentée pour visualiser la coupe géologique. Ils seront conservés par la suite dans des sacs plastiques identifiés (nom du forage, profondeur de l'échantillon). La bentonite rend difficile la "lecture" des cutting car tous les échantillons sont noyés dans une matrice argileuse. Ils doivent être légèrement nettoyés.

La coupe géologique du terrain est établie par l'hydrogéologue, ou son assistant, au fur et à mesure du forage et décrite dans le rapport de forage de façon précise.

- *Les signes d'eaux*

En forage rotary, rien ne permet d'infirmer ou d'affirmer la présence d'eau pendant la foration : seuls des tests d'eau (soufflage direct) et des essais de pompage réalisés une fois le forage équipé permettent de confirmer la présence d'eau et d'évaluer le débit d'exploitation.



En cours de forage, les indices suivants sont des signes d'eau qui permettent de localiser une zone aquifère.

L'analyse des cutting, comme discuté précédemment, permet de suspecter un aquifère en identifiant les couches de terrains perméables (sables, graviers), et en recoupant les informations recueillies sur d'autres forages exécutés dans la même zone et qui se sont avérés positifs.

Les pertes de boue, qui correspondent à une infiltration de boue dans le terrain se manifestent par une baisse rapide des niveaux dans les fosses pendant la circulation, ou par une baisse du niveau de la boue dans le forage après arrêt de la circulation (pendant un changement de tige par exemple). Ces phénomènes indiquent que le forage traverse des horizons perméables.

Les traces d'oxydation et d'altérations visibles sur les grains de quartz et de feldspath (aspect ocre/rouille) sont signes d'une circulation d'eau souterraine. Celle ci peut être ancienne et ne plus correspondre aujourd'hui à une circulation d'eau (baisse du niveau statique par exemple).

L'allégement de la boue, c'est à dire sa dilution, indique une venue d'eau souterraine artésienne. Mais ce phénomène est rarement visible car la pression de la boue est souvent supérieure à la pression de la nappe et l'aquifère est souvent colmaté par le cake.

## **5.4 Mise en oeuvre du forage percussion MFT**

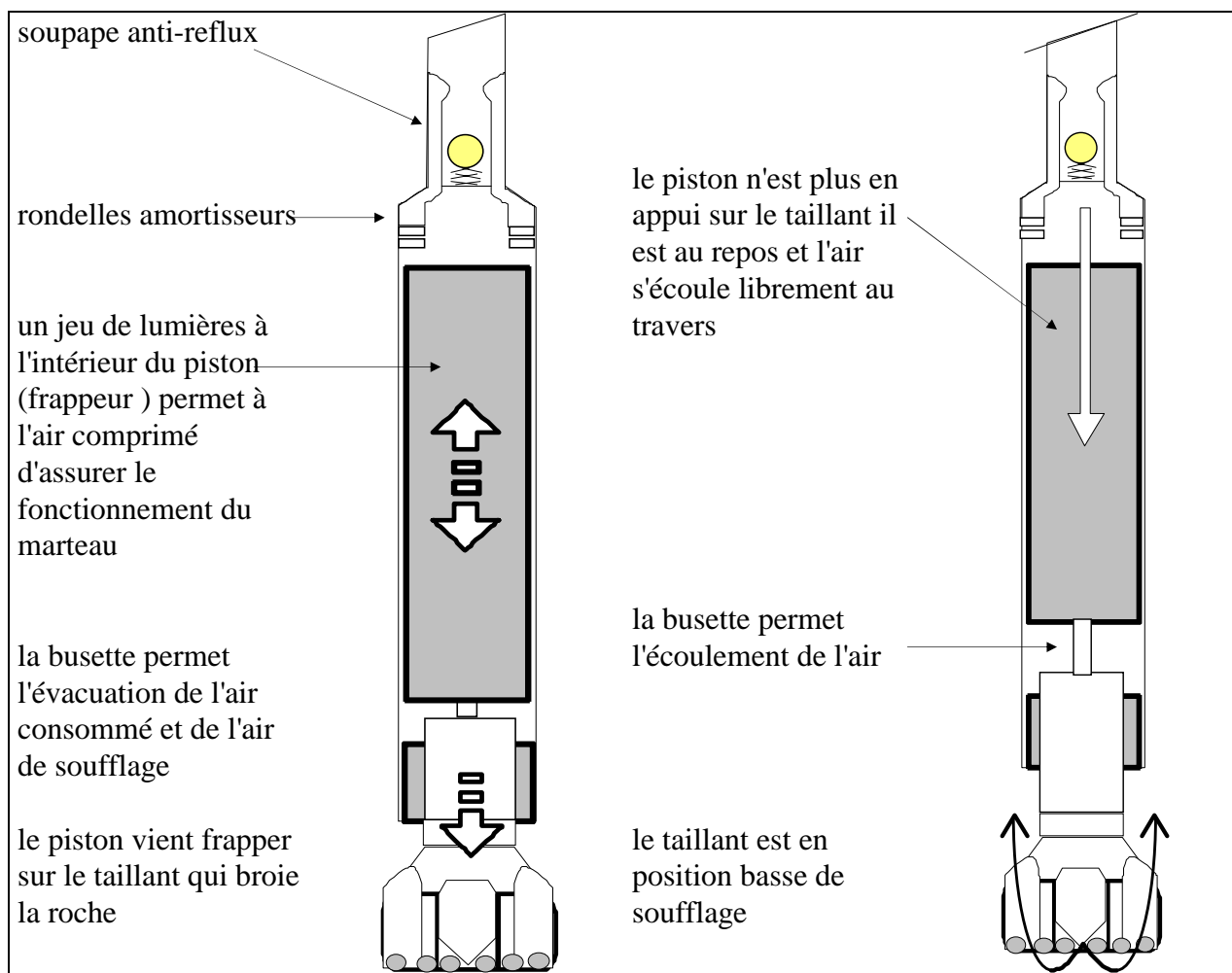
### **5.4.1 Le marteau fond de trou**

- *Lubrification du marteau*

Le marteau est un outil de précision, composé d'un piston qui coulisse dans une chemise par un jeu de lumières dans lequel circule l'air comprimé. Le piston frappe le taillant en phase de percussion et laisse passer l'air comprimé en phase de soufflage Cf. Figure 20.

La lubrification du marteau (piston) est primordiale et l'air injecté dans celui ci est lubrifié tout au long du forage grâce à un lubrificateur qui se place entre le compresseur et la vanne d'admission d'air de la foreuse. (huile de forage biodégradable). Il est impératif de vérifier à chaque changement de tige la présence d'arrivée d'huile avec l'air à la sortie de la tête de forage (soufflage léger et rapide sur une planchette placée sur le haut du train de tiges - traces d'huile sur la planchette).

Lors du démontage complet du marteau on prendra soin de le huiler en introduisant de l'huile hydraulique directement et de bien graisser à la graisse au cuivre tout les filetages.



**Figure 20: fonctionnement du marteau**

- *Réglage de la lubrification de l'air comprimé*

Le réglage s'effectue avec la circulation d'air ouverte et en observant l'huile pulvérisée sur la planchette placée sous une tige en suspension. Le débit est optimal (0.2 litre par heure) lorsque l'imprégnation de la planche est légère et régulière. Le réglage s'effectue avec la vis située sur le lubrificateur (elle est vissée à fond à droite puis tournée successivement d'un quart de tour). La quantité d'huile utilisée avec l'ajout de mousse doit être plus importante.

### 5.4.2 Installation du marteau Cf. Figure 21

Dans les contextes géologiques de socle, les altérites sont forées au rotary à l'air ou à la boue jusqu'au toit de rocher ou la poursuite du forage s'effectuera au marteau. Cf. Figure 11: organigramme de choix pour les forages dans le socle.

Certaines précautions sont à prendre pour l'installation et la descente du marteau au fond du trou de forage.

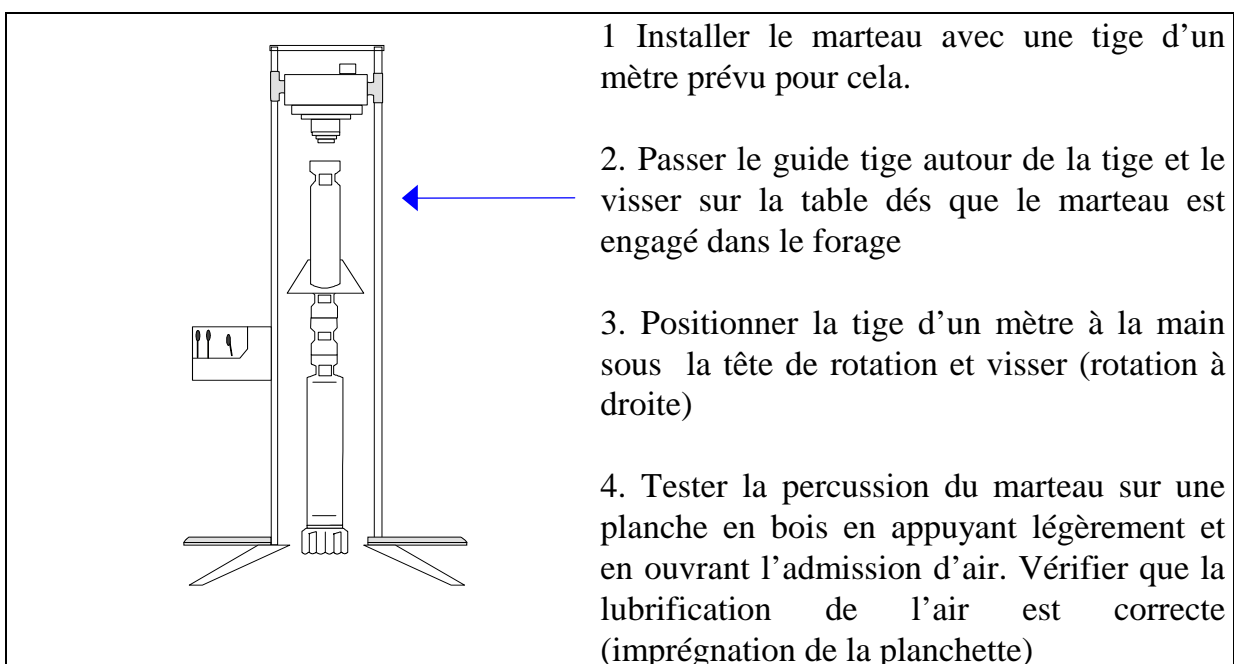
- Tous les tuyaux et tiges doivent être purgés à l'air avec le compresseur pour enlever tous les résidus de boue avant la connexion au train de tiges (endommagement du marteau),

- les tiges utilisées lors du forage au rotary sont nettoyées avec la pompe à mousse en position Karcher, à l'eau claire avant d'être stockées (résidus de boue sèche),

- avant de descendre le MFT, la profondeur du forage est contrôlée (sonde piézométrique) afin de repérer un éventuel effondrement,

- a chaque ajout de tige, celle ci est purgée une fois qu'elle est vissée à la tête de rotation avant d'être connectée au train de tiges (disposer une planchette sur la tige bloquée dans le sabot et donner un coup de chasse à l'air pour évacuer toutes les impuretés dans la nouvelle tige),

- la boue contenue dans le forage est chassée régulièrement (soufflage à l'air) au fur à mesure de la descente du marteau. Si le trou est prétubé et le jeu entre le tube et le taillant faible (quelques mm), il y a toujours un risque de mettre le marteau en percussion s'il frotte contre les parois (détérioration du prétubage). La descente du train est contrôlée.



**Figure 21: installation du marteau**

### **5.4.3 Déroulement de la foration**

Avant la mise en percussion, la rotation à droite est démarrée puis maintenue pour la montée ou la descente du train de tige. Elle ne sera stoppée que si toutes les autres opérations sont arrêtées.

Toutes les rotations à gauche peuvent entraîner un dévissage complet du train de tiges ou du marteau et provoquer sa chute au fond du forage. Le repêchage d'un outil ou d'une partie du train de tige nécessite des outils spécialisés de repêchage et est une opération délicate. Ce phénomène est aggravé par les vibrations dues à la percussion. La rotation à gauche pendant la percussion est à exclure.

- *Amorçage du trou au marteau*

La circulation d'air fermée, le taillant est approché à quelques centimètres du terrain à forer, puis la rotation à droite engagée. L'arrivée d'air est ouverte et le marteau progressivement mis en appui sur le sol pour qu'il rentre en percussion.

Au démarrage, la circulation d'air est ouverte à mi course, la percussion relativement faible et la rotation lente jusqu'à ce que le taillant pénètre dans le terrain. Les vannes d'air sont progressivement ouvertes à fond pour augmenter la percussion.

La poussée et la rotation sont alors réglées de manière à obtenir un avancement régulier.

- *Avancement*

Une bonne foration correspond à un équilibre poussée/rotation offrant une vitesse de pénétration constante et une rotation régulière sans à-coup Cf. Figure 3.

Régulièrement (tout les 50 cm) le trou est nettoyé par soufflage afin d'évacuer les cutting et d'éviter tout bourrage. Les gros cutting ont tendance à rester en suspension au-dessus du MFT pendant la foration. A l'arrêt de la circulation d'air, ils retombent sur le MFT et peuvent le bloquer.

Pour nettoyer le trou, le MFT est relevé légèrement (arrêt de la percussion) et mis en position de soufflage. La totalité du débit d'air fourni par le compresseur doit permettre de nettoyer le forage de tous les cutting. Si nécessaire, on peut ramoner sur la hauteur de la tige pour bien nettoyer le trou.

• *L'ajout et le retrait des tiges (Cf Forage Rotary)*

Avant de dévisser les tiges, la pression résiduelle dans le train de tiges est contrôlée au manomètre. Cette pression reste élevée s'il y a un bouchon de cutting dans l'espace annulaire qui se forme. Nous verrons les solutions qui sont préconisées dans ce cas. Si la pression reste élevée, il faut dévisser doucement les tiges entre elles pour une décompression progressive.

La lubrification de l'air est vérifiée à chaque ajout de tige.

**5.4.4 Difficultés au MFT et solutions possibles**

Tout forage à l'air, d'un terrain meuble ou dur surmonté d'un terrain meuble non prétubé, peut de par la circulation d'air présenter des difficultés :

- Au démarrage d'un forage, l'air de soufflage peut éroder et miner le sol autour du trou foré et mettre en danger la stabilité de la machine,
- en cours de forage, la remontée des cutting érode les parois du trou, ce qui peut entraîner des effondrements susceptibles de bloquer le train de tige,
- les pertes d'air dans les terrains très meubles entraînent une diminution de la vitesse ascensionnelle des cutting.

Si le terrain de surface ne possède pas un minimum de tenue et les cutting ne remontent pas correctement (bouchon), il faut opter pour la technique rotary à la boue plutôt qu'à l'air. Si les terrains de surface s'effondrent, la mise en place d'un prétubage est indispensable avant de continuer le forage au marteau.

Pour les problèmes courants rencontrés en cours de forage, il existe un certain nombre de solutions préconisées dans le tableau ci dessous. L'adjonction de mousse (polymère) permet de modifier sensiblement les caractéristiques de l'air en circulation et de répondre à un certain nombre de problèmes (de remontée des cutting, de colmatage, et de pertes d'air dans le terrain).

Observations - Difficultés	Solutions préconisées
Mauvaise remontée des cutting	Temps de soufflage plus long Injection de mousse + eau
Diminution du débit d'air à la sortie du forage - bourrage des cutting	Injection de mousse + eau Précaution au dévissage des tiges

Pression résiduelle élevée dans les tiges	Rotary à la boue si cela persiste
Pertes d'air dans le terrain superficiel	Injection de mousse Prétubage si nécessaire
Bourrage par des cutting secs ou légèrement humides Formation de boulettes	Injection d'eau + mousse si nécessaire Soufflages brusques et fréquents Remontée du train de tiges
Erosion des parois due au flux d'air et à la remontée des cutting.	Diminution du débit d'air Utilisation de la mousse Prétubage nécessaire
Forte arrivée d'eau et mauvaise remontée des cutting	Augmentation du temps de soufflage Équipement du forage en eau
Formation d'une cavité importante	Arrêt du forage - équipement ou prétubage
Blocage de l'outil par la chute de débris important au dessus de celui ci	Rotation, montée, descente saccadées pour écraser les débris Possibilité de forer juste à côté pour casser les débris tombés
Blocage de la rotation	Percussion et reprise brutale de la rotation Dévissage léger à gauche pour augmenter l'amplitude des à-coups.
Foration dans une cavité - Terrains karstiques Pertes de circulation Avancement anormal et rotation rapide	A l'appréciation des foreurs Risque de casse et de perte du train de tiges Déviation probable du forage

#### 5.4.5 Analyse des cutting, et estimation du débit

- *Analyse des cutting*

Le fluide utilisé étant de l'air les cutting sont propres et non mélangés à une boue. Leur analyse en est donc facilitée. En règle générale, plus ils sont gros plus le terrain traversé est friable et plus ils sont fins (poussière), plus la roche forée est dure.

- *Signes d'eau et estimation de débit*

En forage à l'air, les venues d'eau sont dans la majorité des cas visibles et quantifiables (remonté d'un mélange eau + cutting au soufflage). Toutefois, des venues d'eau peuvent être ignorées car colmatées par les cutting qui forment un cake sur les parois du forage.

Il est facile d'estimer le débit en cours de forage, pour décider de son arrêt et de son équipement. Une mesure de débit est prise à chaque venue d'eau importante et sur un temps assez long (soufflage). Toute l'eau sortie du

forage est canalisée vers un exutoire équipé par un bout de tube de forage pour faciliter la mesure prise au seau.

La venue d'eau doit être régulière et ne pas s'épuiser. Le débit mesuré est minimisé puisque les cutting colmatent certaines zones d'alimentation et le forage n'est pas encore développé correctement.

Les venues d'eau sont en général progressives, elles apparaissent sous forme de traces d'humidité puis au fur à mesure de l'avancement du forage par un débit cumulé provenant des divers fissures ou fractures. Dans certains cas, la traversée d'une fracture majeure bien alimentée entraîne l'augmentation radicale du débit.

### ***PHOTOS DE FORAGE***

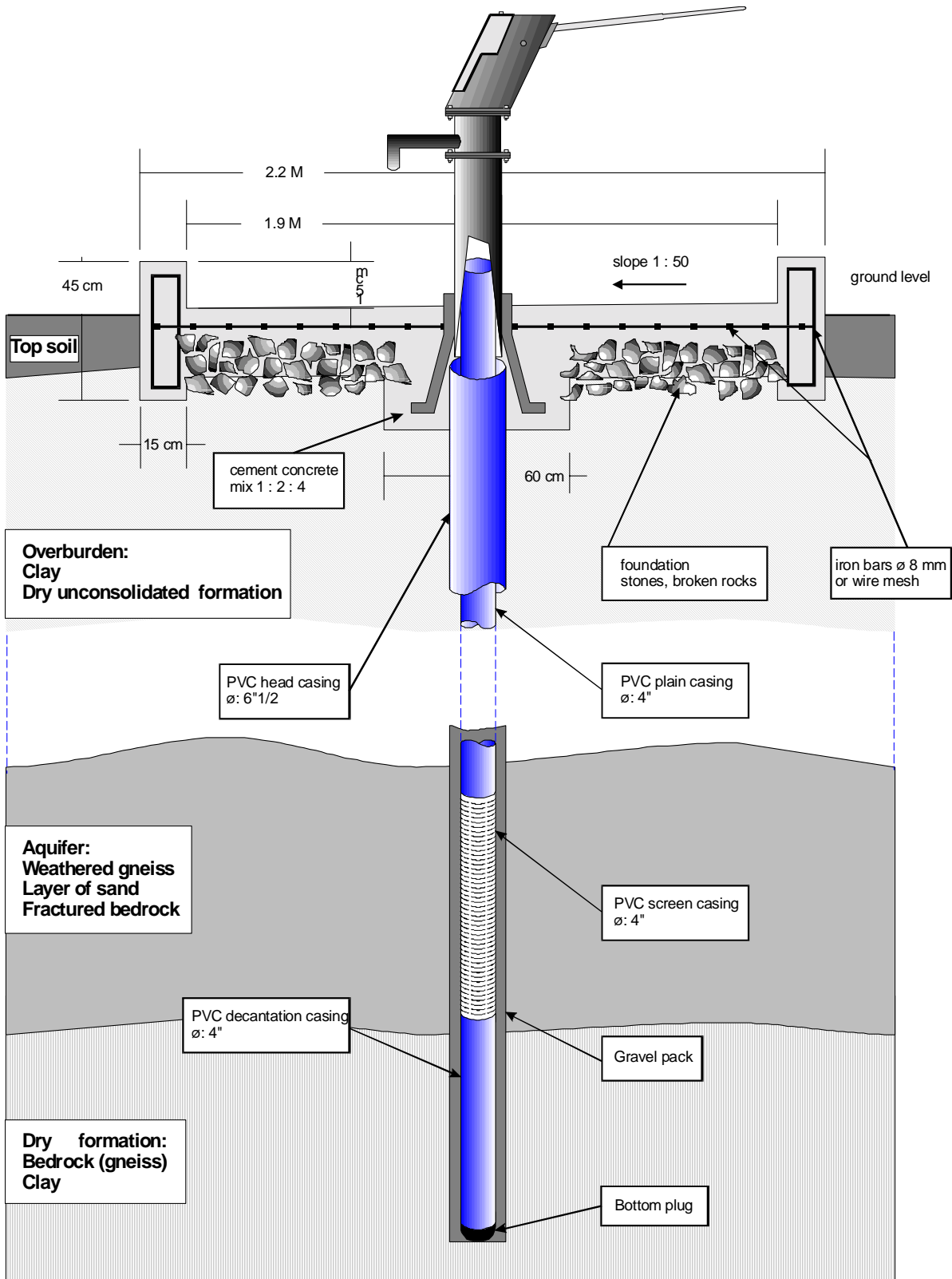
## **6. L'EQUIPEMENT DU FORAGE**

La mise en place de l'équipement, des tubes et du captage (crépine et gravier filtre) est une étape essentielle de la réalisation du forage d'eau.

Le plan de captage et la position des crépines influera de façon très importante sur le débit d'exploitation de l'ouvrage. La nappe captée doit être isolée des pollutions superficielles pouvant s'infiltrer le long du tubage (rôle de l'aménagement de surface et du bouchon de ciment). Cf Figure 22

*PHOTOS D AMENAGEMENT DE SURFACE*





© Action contre la Faim - Kampala 1997

Figure 22: Forage équipé d'une pompe manuelle et aménagement de surface.

## 6.1 Le tubage définitif

### 6.1.1 Choix des tubes et crépines

Le matériau le mieux adapté aux forages d'eau peu profond est le PVC. Il est préférable d'utiliser du vrai tubage de forage renforcé à visser. La résistance mécanique des tubes peut être calculé. Cf. Box 4.

En absence d'information sur la granulométrie de l'aquifère, l'ouverture des crépines sera choisie entre 0.8 et 2 mm. En toute rigueur, l'ouverture dépend de la granulométrie de la formation aquifère captée.

Le gravier filtre est choisi par rapport à l'analyse granulométrique de l'aquifère et deux paramètres sont retenus dans le choix du gravier: sa granulométrie et son indice d'uniformité. L'ouverture des crépines ne doit pas laisser passer les plus petit grains du massif filtrant.

#### Box 4: Résistance des tubes à l'écrasement

Dans le domaine du forage d'eau, la principale caractéristique mécanique à considérer pour un tubage est la résistance à l'écrasement. Elle est parfois donnée par les fournisseurs sinon il faut la calculer. Le calcul des contraintes exercées sur un tubage mis en place dans un forage est beaucoup plus approximatif.

La formule simplifiée pour calculer la résistance du tube à l'écrasement est sous la forme:

$$Re = K.E.(e/D)^3$$

Re = Résistance en bars

K = coefficient sans unité, pour le PVC K=2,43 (Tubafor) et pour les aciers K=2,2

E = Module d'élasticité du matériaux à 20° en bar, pour le PVC  $3.10^4$  et les aciers  $2.10^6$

e = épaisseur du tube

D = diamètre extérieur

Pour les tubes crépinés, il faut multiplier les valeurs calculées par ces formules par le coefficient 1-F avec F = pourcentage des vides. Pour les cas particuliers, il faut se référer au fournisseur (crépines Johnson etc..).

Le calcul des contraintes, c'est à dire **la pression latérale** exercée sur le tubage est estimée généralement par:

- **le poids spécifique des terrains**, avec une composante horizontale du tenseur des forces égale à la moitié de la composante verticale qui est égale au poids des

terrains meubles, secs ou saturés (poids spécifique de 2 à 2,5). On considère alors que les terrains durs n'exercent pas de pression latérale.

- **la pression due à la présence d'eau ou de boue** dans le forage (la pression hydrostatique en bar est égale à  $P = H d/10$ ).

Par exemple, si le niveau statique est proche du sol, et les formations meubles la contrainte horizontale serait alors de 20 bars pour 100 mètres de profondeur (poids des sols divisé par 2 + 10 bars de pression hydrostatique).

Mais compte tenu de la faible section des forages, l'équilibre des parois est difficile à étudier car il faudrait faire intervenir l'effet de voûte. **En règle pratique**, seul la pression hydrostatique statique et dynamique sera prise en compte : laitier de ciment, descente de tubage fermée, fort rabattement au développement.

Pour **les forages à faible profondeur** dans les **terrains durs du socle**, l'expérience montre qu'il suffit de considérer une contrainte horizontale de 0,75 bars par tranche de 10 mètres. Un tubage de résistance de 7,5 bars peut être mis en place dans un forage de 100 mètres.

### **6.1.2 Mise en place du tubage**

Les risques d'effondrement pouvant être importants, le tubage est mis en place le plus rapidement possible. Le trou de forage ne doit pas rester longtemps sans protection au risque de perdre le forage (effondrement du trou).

Le plan de tubage (longueur et position des tubes pleins et des tubes crépinés) est établi en fonction de la coupe géologique du forage ou sont notées les différentes "couches" de terrain et les venues d'eau, ainsi qu'en observant de visu la coupe géologique grâce aux échantillons. Des essais de diagraphie (résistivité électrique, gamma ray, neutron) peuvent être effectués avant l'équipement pour améliorer le plan de captage, spécialement dans les formations sédimentaires (forage rotary) où il est parfois difficile d'identifier les horizons argileux.

Les crépines sont placées en face des niveaux aquifères ou des venues d'eau. Par ailleurs, le plan respectera les points suivants :

- le bas du tubage doit être constitué d'un tube plein d'environ 0.5 mètre bouché à sa base (tube décanteur).
- le tubage ne descend pas toujours jusqu'au fond du forage (dépôts des cutting en suspension dans la boue lors de l'arrêt de la circulation ou

parfois effondrement), il faut donc en tenir compte en réduisant la longueur du tubage de 0.5 à 1 mètres par rapport à la profondeur réelle forée.

- le dernier tube doit dépasser d'environ 0.5 mètres au dessus de la surface du sol.

Les longueurs de tube pouvant varier avec le filetage, il est conseillé de mesurer chaque longueur de tube pour établir un plan précis avec un captage correcte de l'aquifère.

Le tubage doit descendre librement sous son propre poids dans le trou. Si le forage n'est pas vertical (fréquent au delà de 20 mètres), il est fréquent que les frottements le long du tube bloquent la mise en place du tubage. Ceci peut être résolu en appuyant légèrement sur le tubage pour qu'il descende. Dans le cas contraire, il faut le remonter et réaléser le trou.

Une "méthode" alternative consiste à descendre le tube sans bouchon de fond pour qu'il puisse ripé le long des parois. Il sera recommandé de boucher le fond du forage en faisant descendre du ciment depuis la surface.

## **6.2 Le gravier filtre, et la cimentation**

### **6.2.1 Mise en place du massif filtrant**

Le gravier filtre doit être assez uniforme, calibré, propre, rond et siliceux de préférence. Il ne doit pas être calcaire, latéritique ni concassé.

Dans la pratique, la granulométrie du gravier filtre est définie par l'ouverture de la crépine : le gravier doit être le plus fin possible sans pour autant passer au travers de la crépine. A titre d'exemple, pour une ouverture de crépine de 0.8 mm, la taille des plus petits graviers doit être de 1 mm et celle des plus gros 3 mm.

Le gravier descend dans l'espace annulaire le long du tubage. L'emploi d'un tablier (tôle ou bâche plastique) facilite son introduction.

Le gravier peut rester bloqué et former un pont qui obstrue l'espace annulaire. Dans ce cas, la mise en route d'une circulation d'eau ou de boue peut permettre de faire descendre le gravier.

Une remontée de boue par le tube de forage indique que le gravier descend correctement. Lorsque le niveau du gravier atteint le haut des crépines, la

boue ne remonte plus par le tube de forage mais continue à remonter par l'espace annulaire. Le massif de gravier doit dépasser le haut des crépines sur quelques mètres. Son niveau peut être contrôlé à l'aide d'une sonde piézométrique pour les forages peu profonds.

Le volume nécessaire de gravier peut être défini théoriquement (volume du trou foré moins volume du tubage) ou de manière empirique Cf. Box, mais est toujours inférieur au volume réel mis en place (trou non rectiligne, cavitation). La table ci dessous donne les volumes indicatifs en fonction du diamètre.

DIAMETRE DE FORAGE	DIAMETRE DU TUBAGE	VOLUME DE GRAVIER (en litre par mètre linéaire)	
		THEORIQUE (formule empirique)	PREVISIBLE
3"3/4	1"1/2	9.45	16
3"3/4	2"	8.05	15
5"3/4	4"	13.65	20
6"1/2	4"	21	30
6"1/2	4"1/2	17.6	25

#### **Box 5: volume du gravier**

Calcul du volume du massif de gravier, d'après la formule empirique:

$$V = h \times 0.8 \times (D^2 - d^2) \text{ avec :}$$

V = Volume de gravier, en litres

h = hauteur du massif de gravier, en mètres

D = Diamètre du trou, en pouces

d = diamètre des tubes, en pouces

### **6.2.2 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.

- *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.

- *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.

## **7. LE DEVELOPPEMENT**

### **7.1 Le nettoyage du forage**

Au rotary à la boue, il s'agit de laver les parois du forage à l'eau claire pour éliminer le "cake". L'idéal est d'alléger la boue autant que possible sans pour autant risquer d'effondrer le forage juste avant la mise en place de l'équipement.

Une fois tubé, l'injection d'eau propre depuis la surface permet de rincer abondamment les crépines et le gravier filtre qui sont colmatés avec la boue de forage. On alternera les phases de rinçage et les phases de pompage par air lift dans le forage pour sortir de l'eau claire.

Au MFT, la technique utilisée n'a pas colmaté l'aquifère, au contraire le forage a été développé par les soufflages successifs au cours de son fonçage.

Une fois tubé et nettoyé, le forage pourrait être exploité comme ça, mais nous risquerions d'aspirer beaucoup de sable et d'endommager le matériel de pompage, voir de provoquer des affaissement de sols autour des crépines et nous ne tirerions pas toute l'eau que l'aquifère est susceptible de fournir. Il s'agit donc de procéder au développement de l'ouvrage.

## **7.2 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.

### **Box 6: gradient et perméabilité**

Le gradient hydraulique  $i$ , est proportionnel à la vitesse à la vitesse du flux et inversement proportionnel à la comme la perméabilité. Le gradient diminue si la perméabilité augmente.

d'après la loi de Darcy :  $K = Q/Si$   
avec  $K$  = coefficient de perméabilité  
 $Q$  = débit  
 $S$  = section traversée  
 $i$  = gradient hydraulique et

$i = h/d$ , avec  $h$  rabattement et  $d$  distance par rapport au forage.

Le gradient croit lorsque l'on se rapproche du forage et c'est donc sur la zone qui entoure le forage que le développement doit agir.

### **7.2.1 L'auto-développement**

Une formation aquifère mise en production par un forage se développe automatiquement en pompage.

Le rabattement est maximum dans le forage et décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne. C'est le cône de dépression. La dimension de ce cône dépend de la nature du terrain, de l'alimentation de la nappe ou de ses limites, ainsi que du temps et du débit de pompage.

Nous pourrions démontrer que la vitesse de l'eau décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du forage d'après la loi de Darcy, et donc qu'il va s'effectuer un classement des matériaux autour du forage sous l'influence du pompage. Les matériaux les plus gros se placeront autour de la crépine et les plus fins à la limite de la zone d'influence. Les fines seront donc aspirées dans la crépine, au fil du temps mais ce processus est long et détériore les pompes.

De plus, il se forme des "ponts de sable", matériaux fins qui s'accumulent entre eux sous l'effet du flux et se consolident. Pour les casser il faut inverser le flux, d'où l'intérêt de provoquer des effets de dépression (aspiration) suivi de pression (arrêt brusque) et cela est l'objet même de l'opération de développement.

### **7.2.2 Les procédés de développement**

Il existe plusieurs moyens qui s'offrent à nous pour opérer un développement, notons:

- le surpompage
- le pompage alterné
- le développement pneumatique.

Le développement par surpompage, consiste à mettre provisoirement le forage en production par un pompage à un débit supérieur à celui de l'exploitation future. L'ensemble des fines et des sables de la zone de pompage sera entraîné par ce surpompage et le forage pourra être exploité à un régime inférieur. C'est donc un moyen de nettoyer le forage de ces fines, mais la capacité de l'aquifère n'a pas forcément été exploitée en totalité. Les ponts de sable n'ont pas été détruits.



Le pompage alterné, consiste aussi à mettre le forage en production, avec en plus des arrêts brusques de la pompe qui provoquent la chute de la colonne d'eau agissant sur l'aquifère par des variations de pression qui ont pour effet de développer l'aquifère.

Le développement pneumatique (l'air lift) est le plus efficace et le plus répandu. L'avantage est que le matériel de pompage ne subit pas de détérioration (pompage de sable).

Il s'agit de faire subir au captage des contraintes assez fortes dans toutes les directions, pression et dépression en introduisant d'important volumes d'air et de mettre en production l'ouvrage par "air lift". L'opération consiste à alterner les phases de pompage à l'air lift et les phases de soufflage direct d'air au niveau des crépines.

Pratiquement, cela consiste à introduire deux tuyaux dans le forage :

- un tuyau galvanisé ou PVC 1"1/2 appelé tuyau d'eau, par lequel l'eau pompée remontera à la surface,
- un tuyau polyéthylène monté sur une toupie appelé tuyau d'air qui est introduit dans le tuyau d'eau et qui injecte de l'air comprimé.

En fonction de sa position à l'intérieur du tuyau d'eau, il permettra de pomper l'eau du forage ou de souffler à l'inférieur du tubage.

- *pompage*

- descendre le pied du tube d'eau à 0.60 m environ du fond du forage;
- descendre le tube d'air dans le tube d'eau, en le bloquant à environ 0.30 m au dessus du tube d'eau (position de pompage) avec une pince étau;
- installer un té à la sortie du tube d'eau pour canaliser le jet. Pour assurer l'étanchéité tube d'air / tube d'eau , bourrer un chiffon ou utiliser une pièce en caoutchouc (tongue) mise en compression par le poids du tube d'air;
- Ouvrir l'air et laisser s'écouler l'eau pompée, jusqu'à ce qu'elle soit claire.

- *Soufflage :*

- fermer l'air; et descendre le pied du tube d'air à environ 0.30 m en dessous du tube d'eau, soit 0.60 m plus bas que précédemment (position de chasse d'air);
- ouvrir la vanne d'air : l'eau contenue dans le casing est pulsée;
- refermer et rouvrir brusquement la vanne d'air plusieurs fois.

- *Pompage*

- remonter ensuite le tube d'air de 0.3 m à l'intérieur du tube d'eau : l'eau éjectée est très trouble (renversement de flux donc turbulence dans la formation autour de la crépine).

- *Renouveler l'opération sur toute la hauteur de la crépine*

- quand l'eau est redevenue claire, remonter le tube d'eau de 1 m et recommencer les opérations (alternance pompage et soufflage) sur toute la hauteur de la crépine;

- recommencer ensuite en repartant du bas, et continuer le processus jusqu'à ce que l'eau sorte claire.

- *Terminer par un nettoyage du casing*

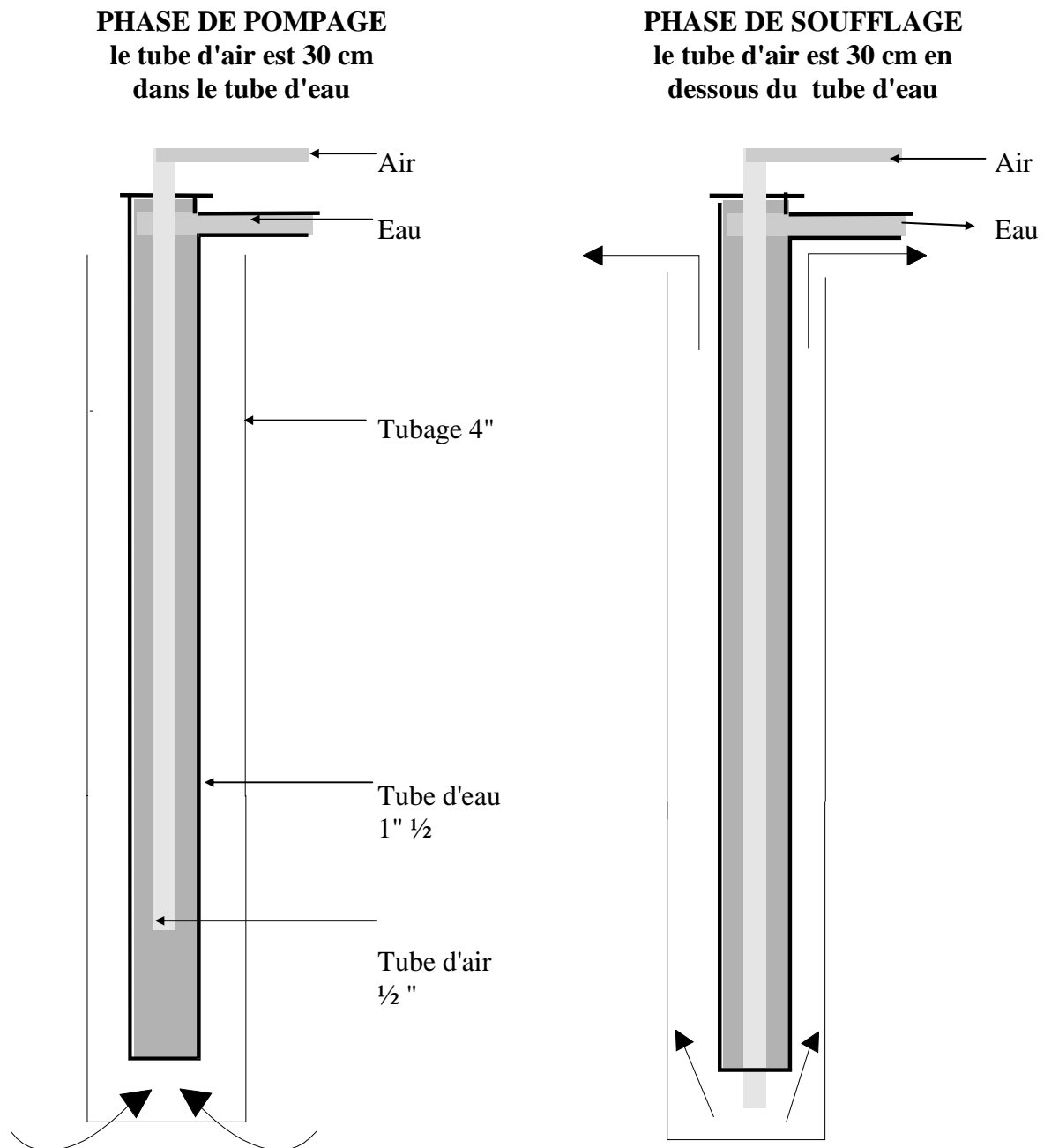
Lorsque vous êtes arrivés au dessus de la crépine, redescendre le dispositif en fond de forage et pomper pour sortir le sable déposé dans le fond.

Si votre forage est colmaté par de l'argile, la bentonite, vous devez rincer le forage de la façon suivante:

- placer vos tubes en fond de forage, en position de soufflage (tube d'air en dessous du tube d'eau);
- connecter le refoulement de la pompe à boue sur le tube d'eau
- refouler de cette manière de l'eau propre dans le forage en même temps que vous soufflez de l'air. Une circulation qui va rincer le forage se crée ainsi : l'eau descend par le tube d'eau et remonte par le casing.

Pour des forages de petits diamètres, 1"1/2 ou 2", un test de soufflage simple permet néanmoins de confirmer ou d'infirmer la présence d'eau. La méthode consiste à souffler à partir du bas du forage par phases successives jusqu'au dessus de la crépine.

Le développement n'est terminé que lorsque l'eau qui sort du forage est parfaitement claire, l'opération peut durer plusieurs heures. Pour vérifier si l'eau est claire, la recueillir dans un seau et observer les éventuelles matières en suspension.



### 7.2.3 Débit instantané

Les caractéristiques de l'aquifère sont définies par des essais de pompage longue durée, souvent difficiles à mettre en oeuvre sur le terrain. Les caractéristiques de l'ouvrage sont définies par des essais de pompage par palier de débit, plus facile à réaliser dans le cadre de nos programmes. La méthodologie est développée dans le chapitre Essais de pompage.

Afin de préparer les paliers de forages des essais de pompage, il faut mesurer le débit instantané du forage en fin de développement, ainsi que le rabattement correspondant de la manière suivante:

- Le débit doit être mesuré lorsque le dispositif d'air lift est en position de pompage; attention les dimensions du dispositif influent sur le débit d'eau qui est soufflé.
- Rabattre le niveau en essayant de ne pas dénoyer l'ouvrage si possible, attendre assez longtemps pour stabiliser le débit.
- mesurer le débit au seau (20 l. pour x sec.) et le rabattement correspondant.

## **8. SUIVI ET RAPPORT DE FORAGE**

Le suivi de forage n'est pas forcément effectué par un hydrogéologue. L'expérience a montré qu'un chef de chantier formé et rigoureux peut très bien faire ce travail après une période de formation avec l'hydrogéologue responsable de la campagne de forage. Par la suite, ce technicien réfèrera toutes les informations majeures et décisions importantes prises en cours de forage à l'hydrogéologue régulièrement (journalière par radio si nécessaire). Des fiches de suivi et de rapport de forage sont proposées en annexes.

Toutes les informations relatives au forage doivent être notées telles que :

- nom du site ou village, coordonnées GPS si possible,
- date des travaux, horaires de démarrage, arrêt , reprise,
- nom de l'entreprise de forage et le cas échéant du foreur,
- compteur horaire des machines (compresseur, moteur),
- technique utilisée, avancement par tige ou mètre, ajout de tige,
- tous les incidents majeurs ou opérations importantes telles que la remontée d'un train de tige, l'arrêt des machines, l'équipement du forage
- le plan de tubage, avec la longueur exacte des tubes pleins et crépinés, leur diamètre, la position du massif filtrant, du bouchon d'argile et de ciment.

En plus des informations géologiques indispensables comme :

- la nature des terrains traversés
- les signes d'eau, et le débit estimé après chaque venue d'eau

A la fin des travaux les informations essentielles seront reprises sur le rapport de forage, qu'il soit sec ou en eau. La rédaction de ce document est de la responsabilité de l'hydrogéologue, responsable de la campagne ou de l'entreprise de forage. Ces rapports sont une source d'information précieuse pour le projet, mais aussi pour constituer une banque du sous sol. Ils doivent donc être centralisés au niveau du projet mais également remis aux autorités locales compétentes qui peuvent dans certains cas préconiser une forme standard pour tous les intervenants travaillant sur une zone.

Ces rapports sont archivés par forage, dans lesquels se trouvent également toutes les informations techniques sur ce point d'eau : enquêtes de terrain, données et interprétation des essais de prospection géophysiques, données d'essai de pompage, le plan de masse de l'implantation etc.....

Le foreur tiendra à jour un livre réunissant toutes les informations concernant les consommations des matériaux (ciment, tube, bentonite), des carburants et lubrifiants, la maintenance des machines, les problèmes mécaniques rencontrés et leurs solutions.