

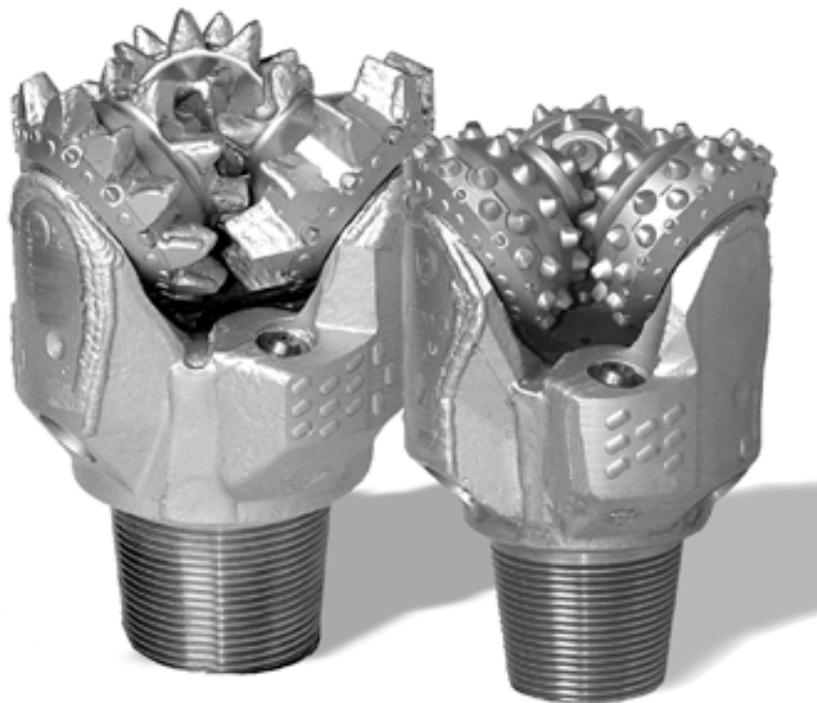


GEOLEP- Laboratoire de géologie
de l'ingénieur et de l'environnement



Cours de Géologie de l'environnement

Reconnaissance in-situ



Prof. Dr. Aurèle Parriaux

Table des matières

Préambule	5
1. Objectifs de la reconnaissance	6
1.1. Définitions.....	6
1.2. Conditions d'observation du milieu	7
1.3. Quel est le problème à résoudre et quelle technique choisir ?	8
1.4. Les intervenants dans une campagne de sondage et leurs missions	11
2. Les techniques de sondage et de forage	12
2.1. Les fouilles à la pelle mécanique	12
2.1.1. Les fouilles à la rétrocaveuse	12
2.1.2. Les fouilles au grappin	15
2.1.3. Etayage provisoire des fouilles	16
2.2. Les pénétromètres	18
2.2.1. Les pénétromètres statiques	18
2.2.2. Les pénétromètres dynamiques	19
2.2.3. Les piézomètres battus	28
2.3. Les sondages non tubés à la tarière	28
2.3.1. Les tarières à main	29
2.3.2. Tarière à moteur	30
2.4. Les forages par chasse d'eau	30
2.5. Les sondages carottés par rotation	32
2.5.1. L'agrégat de sondage et les opérations de foration	32
2.5.2. Les carottiers	34
2.5.3. Les outils de coupe	37
2.5.4. Le télescopage des tubages	39
2.5.5. La cimentation des tubages	39
2.5.6. Les sondages obliques	40
2.5.7. Le prélèvement d'échantillons	41
2.5.8. Les observations utiles du sondeur	41
2.6. Les sondages par carottier battu	41
2.7. Les forages au marteau	43
2.7.1. Marteau hors-trou	43
2.7.2. Marteau fond-de-trou	44
2.8. Les forages au rotary	47
2.9. Les sondages déviés	51
2.10. Les puits	52
2.10.1. Les puits tubés	52
2.10.2. Les puits non-tubés	53
2.10.3. Les puits de grand diamètre	55
2.11. Synthèse comparative des techniques de sondage	56
3. Le relevé géologique exhaustif des échantillons	58
3.1. Sondages carottés	58
3.1.1. A connaître avant de faire le relevé	58
3.1.2. Identification géologique	61
3.1.3. Le Rock Quality Designation (RQD)	63
3.1.4. Essais de terrain	64
3.1.4.1. Le pénétromètre de poche	64
3.1.4.2. Le scissomètre de poche	65

3.1.4.3. L'essai Franklin (ou brésilien)	67
3.2. Sondages destructifs	68
4. Essais en forage et équipement	69
4.1. Essais en cours de foration	69
4.1.1. Essai Lefranc et dérivés	69
4.1.2. Essai Lugeon	71
4.1.3. Essai SPT (Standard Penetration Test)	75
4.1.4. Essai pressiométrique	77
4.1.5. Essai dilatométrique	79
4.2. Essais trou nu en fin de foration	81
4.2.1. Essai d'eau par packers	81
4.2.2. Diagraphies spécifiques à la géologie de l'ingénieur	82
4.3. Equipement du forage	86
4.3.1. Piézomètres	86
4.3.2. Sondes à pression hydrostatique	89
4.3.3. Inclinomètres	90
4.3.4. Extensomètres	94
4.3.5. Défectomètres	95
4.3.6. Sondes de déformation de sondages	96
4.4. Essais dans le forage équipé d'une colonne crépinée	97
4.4.1. Essai de pompage	97
4.4.2. Courantométrie de forage	98
4.4.3. Logging hydro-physique	101
4.4.4. Essais de traçage	102
Conclusion	102

Préambule

Ce cours s'adresse aux étudiants en géologie ayant choisi une direction en géologie de l'ingénieur ou à de futurs ingénieurs civils et en environnement. Il se fixe comme objectif de donner un minimum de connaissances sur les méthodes de reconnaissances directes sur le terrain dans les divers domaines couverts par la géologie de l'ingénieur et de l'environnement. En effet, l'expérience montre que beaucoup d'étudiants arrivent dans leur première situation professionnelle sans jamais n'avoir vu et relevé un sondage de reconnaissance. Au contraire des méthodes géophysiques, qui sont intensivement enseignées dans le cursus des géologues, les méthodes directes souffrent d'un grave défaut de formation qui finit par porter préjudice à la formation tout entière, notamment aux yeux des futurs employeurs.

Les étudiants qui suivent ce cours ne deviennent pas ingénieurs de forage mais ils acquièrent des bases théoriques sur toutes les méthodes que l'on peut rencontrer dans tous les pays du monde (y compris dans les pays en développement). Ils ont l'occasion de mettre en pratique ces bases dans des exercices sur des cas vécus sur le terrain. Ils seront sans doute plus à l'aise pour prendre des responsabilités rapidement dans des bureaux d'étude en géologie de l'ingénieur et en géotechnique.

1. Objectifs de la reconnaissance

Les reconnaissances in-situ font essentiellement appel à des méthodes directes par pénétration physique dans le sous-sol. Ce sont les opérations de sondage mécanique par toute une gamme de techniques plus ou moins technologiques. Les méthodes indirectes, surtout les méthodes géophysiques de surface, font aussi partie des reconnaissances in-situ. Elles ne sont cependant traitées dans ce cours, d'autres enseignements leur étant déjà consacrés.

Plusieurs termes sont utilisés dans des sens proches pour décrire la pénétration dans le sous-sol. Quelques définitions sont nécessaires.

1.1. Définitions

Sondage

Opération et résultat de l'opération consistant à pénétrer dans le sous-sol pour déterminer les propriétés de ce dernier. Au sens strict du terme, les sondages mécaniques sont des trous de diamètre centimétrique à décimétrique de profondeur allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres.

Ce terme est donc spécifiquement lié aux reconnaissances.

Forage

Opération ou résultat de l'opération de pénétrer dans le sous-sol afin de réaliser un accès à un point. Fondamentalement, ce terme concerne plus une action de construction (par exemple un ancrage) ou la mise en place d'un équipement de reconnaissance (par exemple un inclinomètre). Les forages sont faits généralement par des techniques destructives du milieu géologique. En pratique, on utilise souvent le mot forage comme synonyme de mot sondage. L'opération de forage s'appelle aussi foration.

Fouille

Excavation largement développée en surface et généralement peu pénétrante. Elle est effectuée par une pelle mécanique.

Puits

Sondage ou forage de gros diamètre (plusieurs décimètres à plusieurs mètres).

1.2. Conditions d'observation du milieu

La finalité souvent nécessaire (et souvent non suffisante) d'une reconnaissance in-situ est l'observation directe du milieu géologique en place. La technique de sondage choisie amène en surface un matériel qui est une image plus ou moins fidèle de ce qu'est le milieu en profondeur. Cette image va du meilleur (échantillons dits non-remaniés) au pire (échantillon non représentatif ou même absence d'échantillon), principalement selon les techniques utilisées, mais aussi des terrains sondés (figure 1.1)

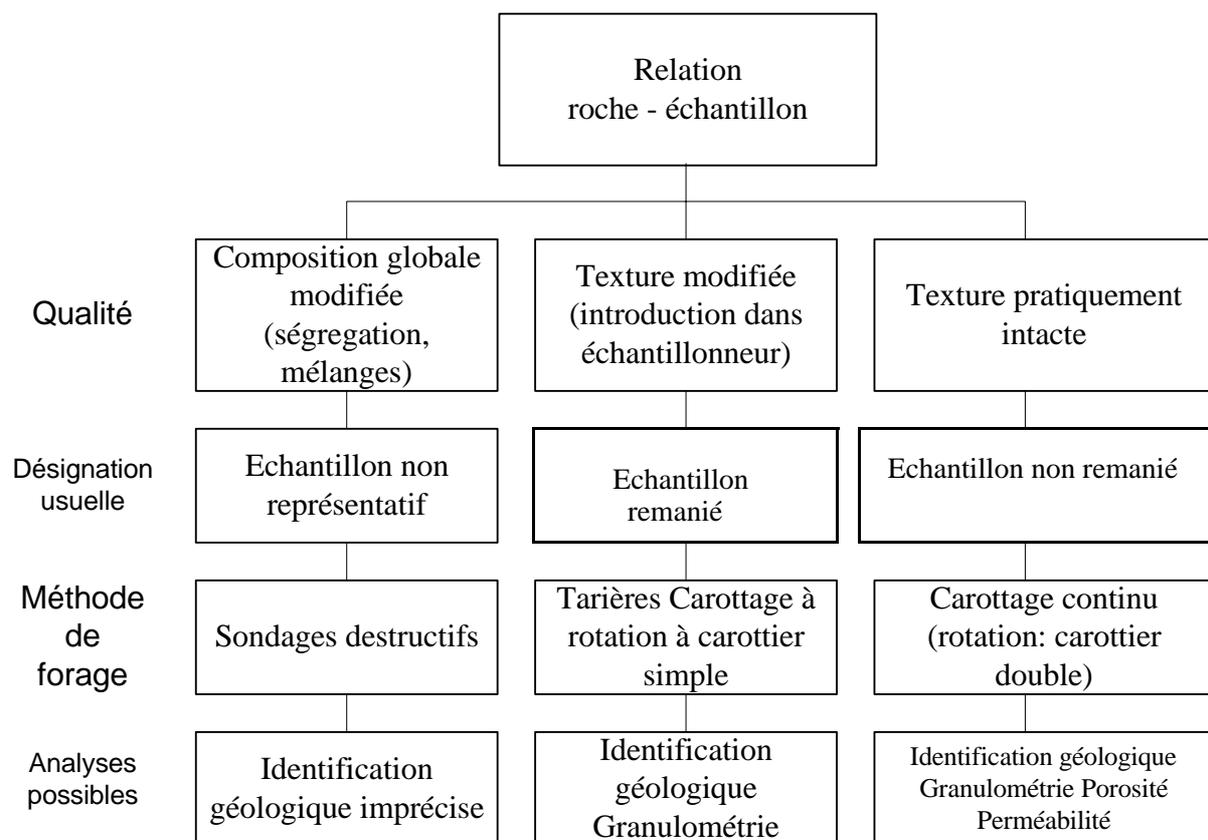


Figure 1.1. : Les différents types d'échantillons obtenus par les diverses techniques de sondage

1.3. Quel est le problème à résoudre et quelle technique choisir ?

Pour bien choisir une méthode de reconnaissance, il est indispensable d'avoir bien éclairci le problème à résoudre et listé les questions précises auxquels nous devons répondre. Beaucoup de campagnes de sondage sont peu optimales en raison d'un choix hâtif d'une méthode ou d'une analyse partielle des données disponibles avant la campagne. Rappelons que les méthodes de reconnaissance in-situ pas sondage ne se situent pas au début de la chaîne des reconnaissances (figure 1.2). Leur coût relativement élevé implique que les reconnaissances de surface doivent avoir été soigneusement effectuées et interprétées avant de concevoir une campagne de sondage.

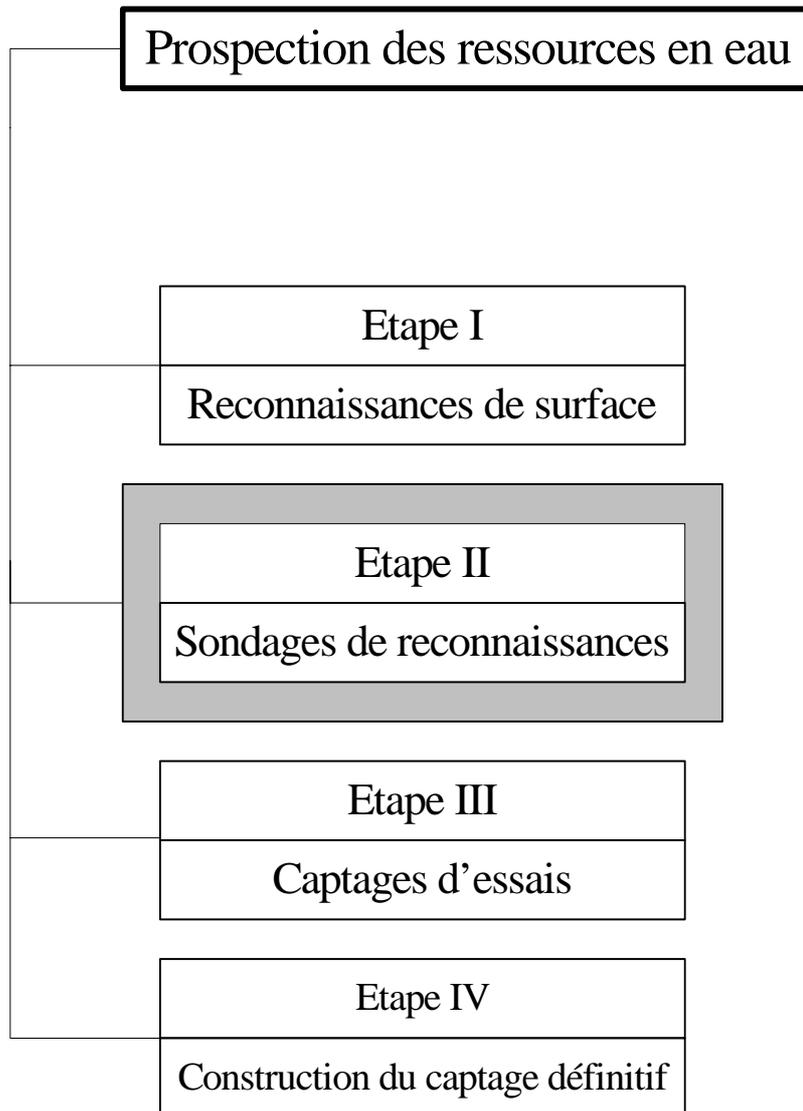


Figure 1.2. : Place de la campagne de sondage dans la chaîne de prospection. Exemple de la prospection d'eau souterraine en vue de la construction d'un captage

Les différents buts possibles d'une campagne de sondage de reconnaissance sont résumés à la figure 1.3.

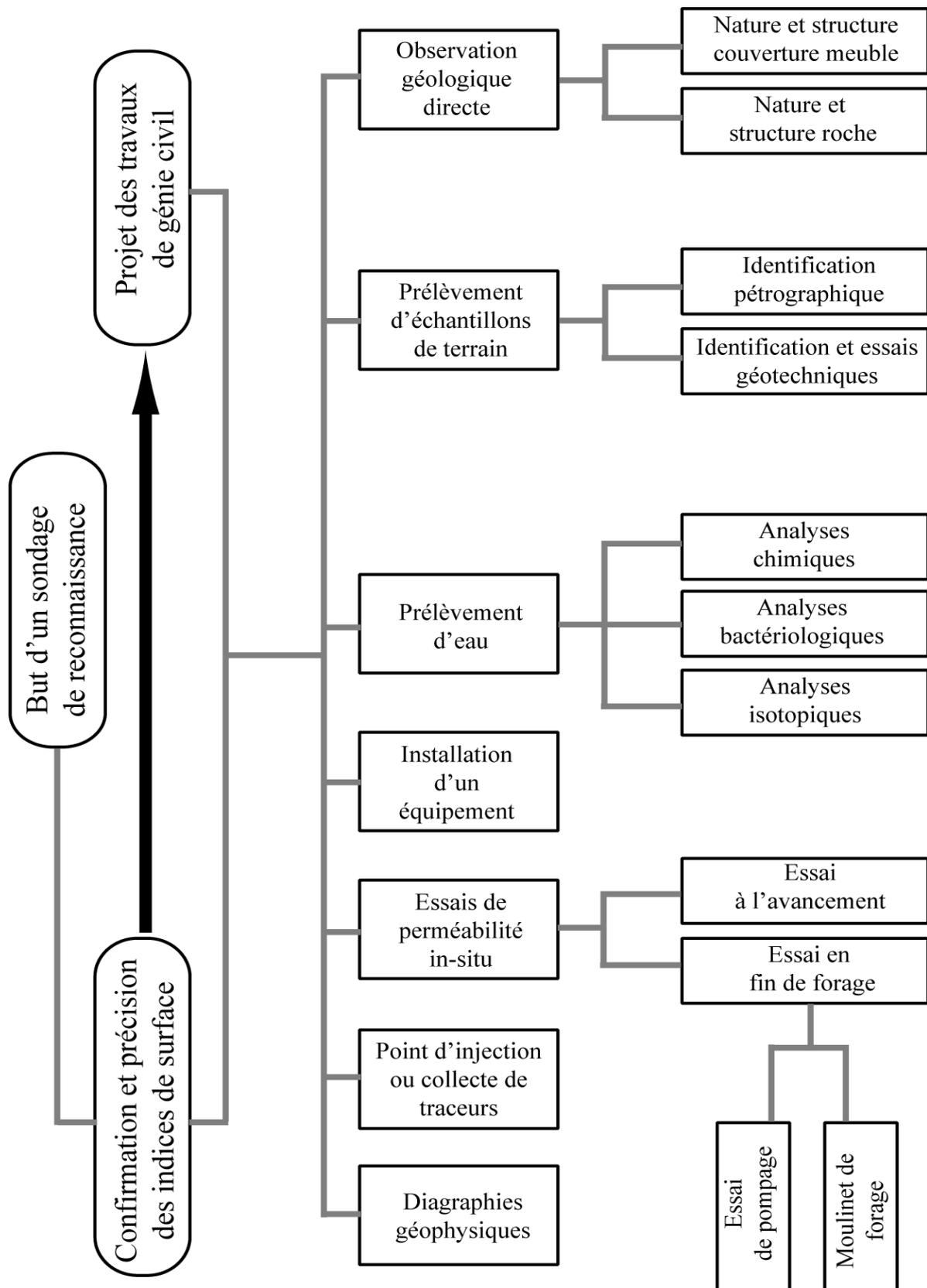


Figure 1.3. : But des sondages mécaniques dans les études de projet de génie civil

Le choix de la technique optimale doit être fait en se posant les questions suivantes :

Question 1 : La technique x apporte-t-elle tous les éléments dont j'ai besoin ?

Question 2 : N'y a-t-il pas une technique plus économique qui donnerait pratiquement les mêmes réponses ?

Question 3 : Puis-je acquérir la (les) donnée(s) manquante(s) par une autre méthode ?

La réponse à ces questions permet de déterminer la technique la plus adéquate selon la figure 1.4.

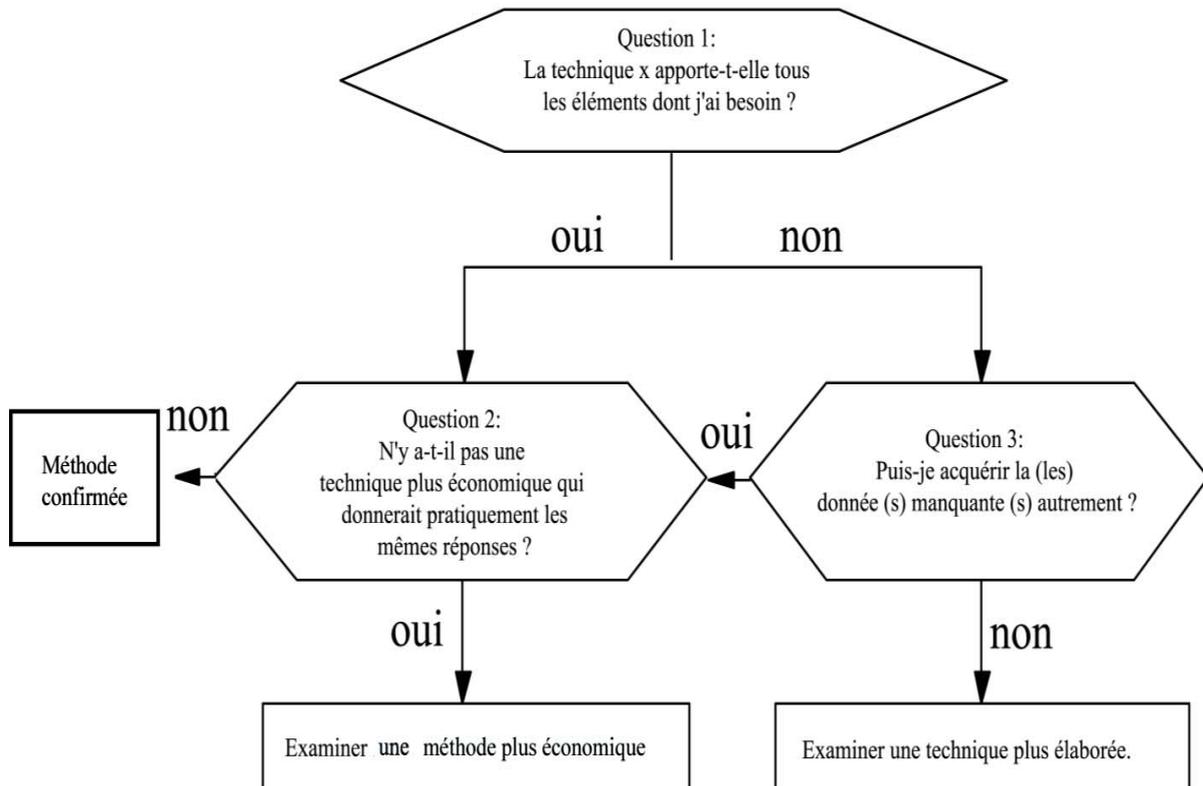


Figure 1.4. : Les critères de choix d'une technique de sondage.

A titre d'exemple, les questions suivantes se posent souvent en pratique :

- Vaut-il la peine d'économiser x milliers de francs en faisant le sondage en destructif plutôt qu'en carottage continu ?
- Ne peut-on pas économiser un sondage carotté et passer directement au creusage d'un puits ?

Une méthode est parfois préférée à une autre en raison de la possibilité d'effectuer des essais ou de la nécessité d'implanter un équipement spécial dans le sondage. Certaines contraintes sont incontournables : par exemple, pour effectuer un essai de pompage dans un sondage, un diamètre minimum du trou de 110 mm est nécessaire pour placer une pompe immergée pouvant atteindre 200 l/mn.

Le choix définitif de la méthode et du programme des essais sont faits après avoir analysé en détail ce qu'offrent et n'offrent pas les différentes techniques à disposition. Une matrice d'évaluation est recommandée pour résumer les variantes. Nous verrons au § 2.11 les performances spécifiques de chaque méthode en fonction du contexte géologique.

Une collaboration avec les entreprises de forage est recommandée car elles connaissent bien leur matériel et peuvent être de bon conseil sur leur expérience de nombreux cas vécus.

1.4. Les intervenants dans une campagne de sondage et leurs missions

L'organisation d'une campagne de sondage de reconnaissance dépend beaucoup du projet dans lequel entre la reconnaissance en question. Elle est plus complexe dans des grands projets tels que la construction d'un ouvrage important comme un tunnel par exemple. Elle comprend dans ces cas les institutions suivantes :

Le maître d'ouvrage : c'est le commanditaire et propriétaire de l'ouvrage, privé ou public. Il délègue souvent sa mission à un bureau d'ingénieur qui assure le contrôle de la bien-facture des travaux. Il choisit ses mandataires ingénieurs principaux et entrepreneurs. Les géologues et géotechniciens sont parfois mandatés directement par le maître d'ouvrage.

L'ingénieur auteur du projet ou maître d'œuvre : c'est le consultant principal qui définit l'objet à construire et qui organise le chantier pour que les coûts et délais annoncés soient tenus. Il assure la direction des travaux. Il choisit de s'entourer de divers conseillers spécialisés comme les géologues et les géotechniciens, s'ils ne l'ont pas été directement par le maître d'ouvrage. C'est la direction des travaux qui assure la planification des reconnaissances en collaboration avec le géologue et le géotechnicien.

L'entreprise : c'est souvent un consortium d'entreprises qui a remporté l'appel d'offres. Elle est responsable d'effectuer l'ouvrage conformément aux directives fixées par le maître d'œuvre et dans les délais acceptés par l'entreprise. L'entreprise de sondage ne fait généralement pas partie de ce consortium. Son mandat est spécifique à la campagne de reconnaissance. De plus en plus, de grandes entreprises offrent une prestation d'entreprise générale : non seulement la construction de l'ouvrage mais aussi sa conception (couplage des rôles d'ingénieur et d'entrepreneur). Ce nouveau système est attrayant pour les maîtres d'ouvrage puisqu'il permet des contrats clé en main et un report de la responsabilité entière sur l'entreprise générale. Dans ce cas, les campagnes de reconnaissance incombent au moins en partie à l'entreprise générale et le géologue en dépend alors directement.

Géologues et géotechniciens : le géologue sera chargé, en collaboration avec le géotechnicien, de déterminer si le terrain prévu pour la construction d'un ouvrage présente les conditions de stabilité nécessaires. Voici comment ces deux professions se complètent dans ce type de problème :

- le géologue : c'est d'abord un naturaliste qui analyse la structure du sous-sol d'un chantier sur la base de son expérience de la région, de relevés sur le terrain et par des sondages. Il donne ensuite une prévision sur les terrains à rencontrer dans les excavations en mentionnant les caractéristiques globales des terrains qui sont utiles pour l'ingénieur. Il évalue le danger du chantier sur le sous-sol et l'environnement construit. Dans une campagne de sondage, c'est lui qui procède à l'identification génétique et structurale des terrains rencontrés.

- le géotechnicien : c'est un ingénieur civil qui s'est spécialisé dans la paramétrisation des propriétés mécaniques des terrains de fondation. Il commande des essais de résistance en laboratoire et in-situ et les interprète. Il donne à l'ingénieur auteur du projet les valeurs des paramètres qu'il juge déterminants pour le dimensionnement des fondations de l'ouvrage.

Dans les cas plus simples comme par exemple un prospection de ressource en eau ou de géomatériaux, le géologue peut assurer lui-même la direction des travaux, en relation directe avec le maître d'ouvrage et l'entreprise.

2. Les techniques de sondage et de forage

Dans ce chapitre, nous traitons des principales techniques de sondage, de forage, de fouilles et de puits utilisées actuellement. Certaines ne se pratiquent plus que rarement dans les pays industrialisés. En revanche on les trouve à une bonne place dans les pays en développement où elles permettent par leur simplicité d'être pratiquées avec la main d'œuvre locale à peu de frais.

L'ordre de présentation va en principe des techniques les plus simples aux plus sophistiquées (sondages au rotary) ou plus lourdes (creusement des puits). Un accent particulier est consacré au sondage carotté par rotation, en raison de son rôle nettement dominant dans les méthodes de reconnaissance en Suisse et de nombreux pays industrialisés.

2.1. Les fouilles à la pelle mécanique

Beaucoup de problèmes de géologie de l'ingénieur peuvent être résolus élégamment par de simples sondages à la pelle mécanique. Cette technique permet d'atteindre aisément quelques mètres de profondeur en terrains meubles dans des conditions d'observation excellentes et pour un coût modeste. Deux types de machines peuvent être utilisés.

2.1.1. Les fouilles à la rétrocaveuse

La plupart des fouilles de reconnaissance sont effectuées avec des rétrocaveuses (figure 2.1).

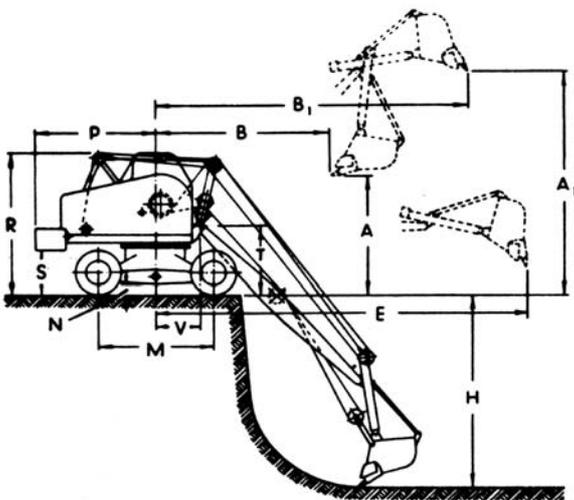


Figure 2.1. : Mouvement de creusage d'une rétrocaveuse. Tiré de Gabay

Ces machines permettent en effet de descendre rapidement à la limite de l'action de leur bras, dans pratiquement tous les terrains meubles. Cette limite est d'environ 4 m pour les machines usuelles, mais peuvent descendre à 7 m pour celles qui sont équipées d'un bras à rallonge. Le sondage est sous la forme d'une fouille de section horizontale rectangulaire, dont la largeur est celle du godet utilisé (en général 40 à 60 cm) et la longueur celle que nécessite le mouvement du bras (en général 3 à 4 m). Le fond de fouille est légèrement concave. Il peut être rendu horizontal pour certains essais comme les essais d'infiltration par exemple (voir figure 2.3).

L'étude du matériel rencontré se fait par prélèvement dans le godet au sortir de celui-ci. C'est la raison pour laquelle le géologue doit être à côté de la machine lors de la creuse. Il est interdit de descendre dans la fouille si elle n'est pas étayée. La grande taille du sondage permet de bien mettre en évidence la structure des dépôts (pendage, variation d'épaisseur etc.). Bien que les échantillons soient officiellement non représentatifs, ils peuvent en fait être pratiquement non perturbés si le prélèvement par la pelle est effectué avec soin.

Cette méthode s'applique mal aux terrains très bouillants comme les alluvions aquifères où les parois s'éboulent instantanément (le trou s'élargit plutôt qu'il ne s'approfondit). La présence de très gros blocs gêne également la creuse.

Cette technique est très utilisée par exemple pour sonder des glissements superficiels (figure 2.2).

EPF Lausanne GEOLEP		"Bas-Monts"		ANNEXE		Sondage 8				
Maître de l'oeuvre : Commune de Belmont		Coord. : Y= 542'560 X=153'560 Z=		Profondeur: 4.20 m.						
Entreprise : ENTRARO			Sondeur :		Date : 24-29.10.86					
Equipements spéciaux :										
Prof. (m)	Profil	Stabilité Tectonique	Limites (prof. m)	Description lithologique	Formation géologique	Echantillon	Méth. sond.	φ Carottier	Profondeur	Eau
0.30				Terre végétale brune						
1				Limon argileux organique, finement sableux, beige-brun, avec des petits galets, humide	Dépôts Moraine					
2										
2.50				Argile limoneuse grise, avec galets cristallins et débris organiques (charbon)						
3										
3.20				Marne molassique décomposée, avec débris de bois; surface de glissement lustrée						
4										
3.80									3.80	
4.20				Grès marneux à grains moyens; présence de micas	Molasse Chattienne				4.00	
5										
										< 1/2 l/min < 1/2 l/min < 1/2 l/min

Figure 2.2. : Sondage à la pelle rétro dans un glissement de terrain à Belmont sur Lausanne.

Les études de zones de protection des eaux font également appel à cette technique pour reconnaître la nature de la couverture de la nappe et effectuer des essais d'infiltration (fig 2.3).

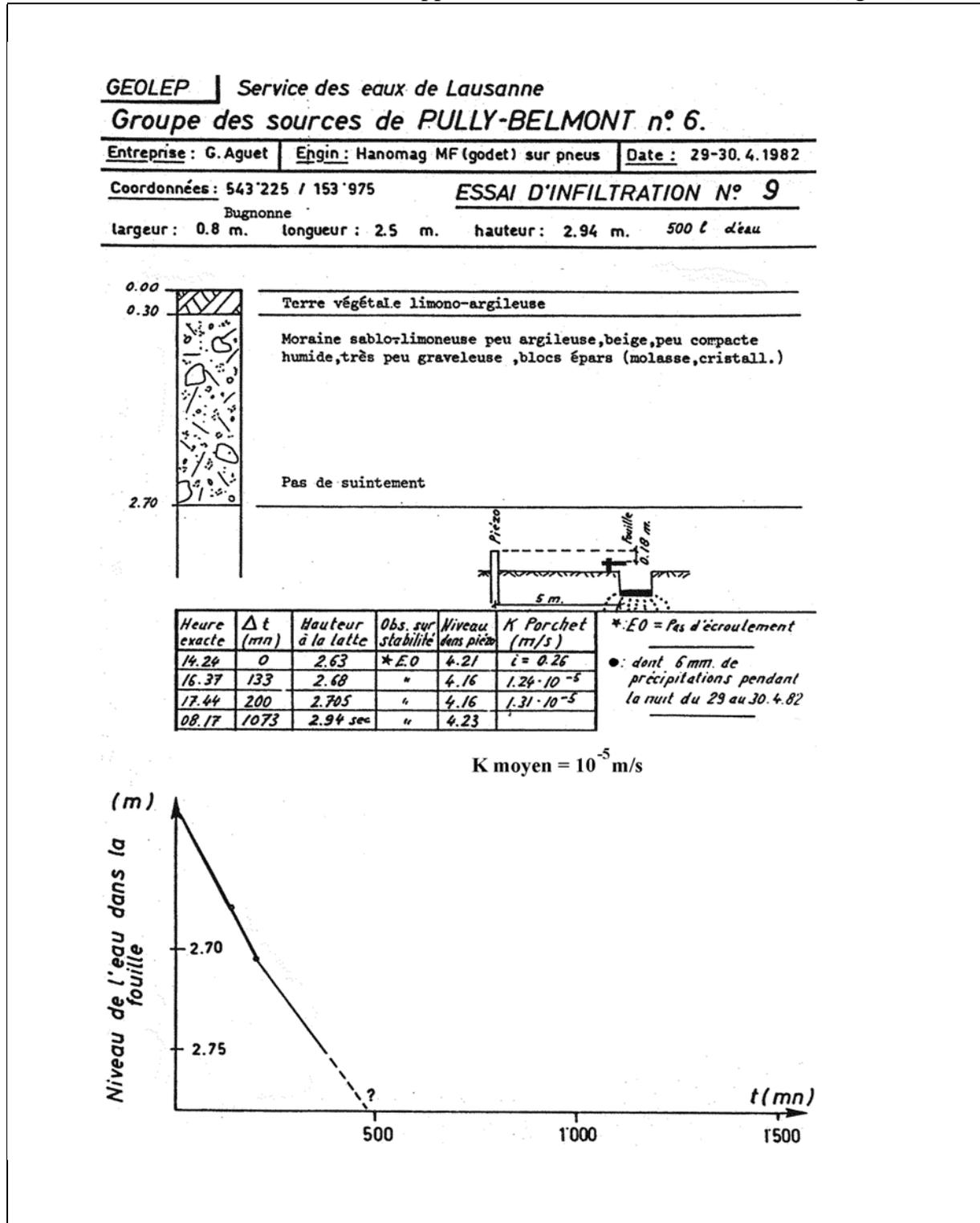


Figure 2.3. : Fouille à la pelle rétro avec essai d'infiltration en fond de fouille pour la délimitation des zones de protection des eaux.

Le coût de telles reconnaissances est dérisoire : la machine coûte à l'heure quelque Fr 200 et l'on peut exécuter près d'une dizaine de fouilles en un jour sur un site donné.

2.1.2. Les fouilles au grappin

Les fouilles au grappin sont faites également par un pelle mécanique de type excavateur à câble. Au bout du câble est fixé un grappin qui permet de descendre plus profondément qu'une rétro-caveuse, si le terrain le permet (fig 2.4)

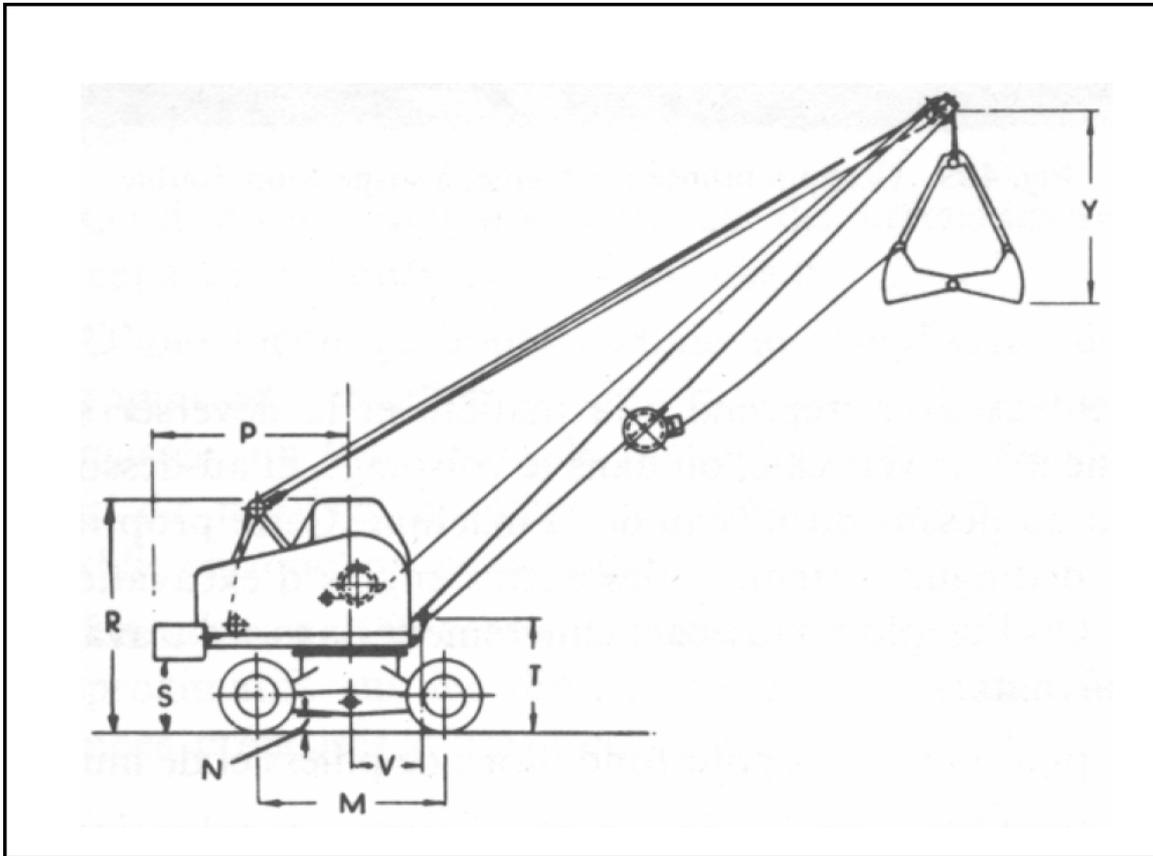


Figure 2.4. : Excavateur à câble équipé d'un grappin. Tiré de Gabay.

Il n'y a en principe pas de limite de profondeur. Nous avons fait sans problème une fouille de 10 m de profondeur dans les graviers secs du cône de la Gryonne à Bex. En fait, il est rare que la stabilité des parois du trou puisse être garantie très profondément dans les terrains meubles. La force de pénétration est également bien inférieure à celle de la rétopelle puisque seul le poids du grappin agit pour faire pénétrer des dents de l'engin.

2.1.3. Etayage provisoire des fouilles

Dans des terrains bouillants ou lorsque l'observation nécessite que le géologue pénètre dans la fouille, il est nécessaire de procéder à un soutènement provisoire des parois. Dans des terrains très instables et fluents, la seule possibilité est de battre une enceinte de palplanches (fig 2.5).

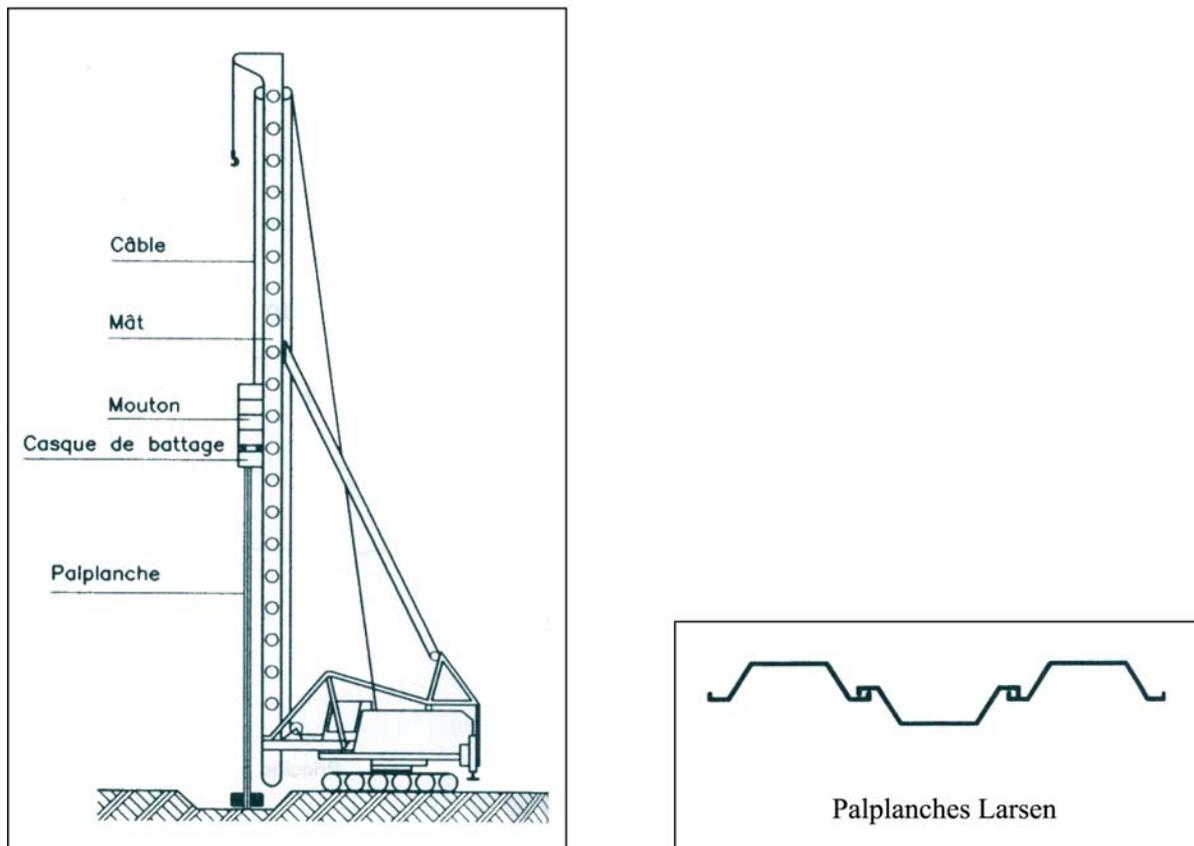


Figure 2.5. : A : Palplanches permettant de soutenir une fouille en terrain meubles

B : Sonnette pour battre les palplanches. Tiré de Kurtz.

Dans des terrains moins susceptible à la liquéfaction, on peut utiliser des éléments de blindage métalliques (appelés aussi Krings). On peut aussi faire appel aux anciennes méthodes de boisage avec étayage, comme le montre la figure 2.6.

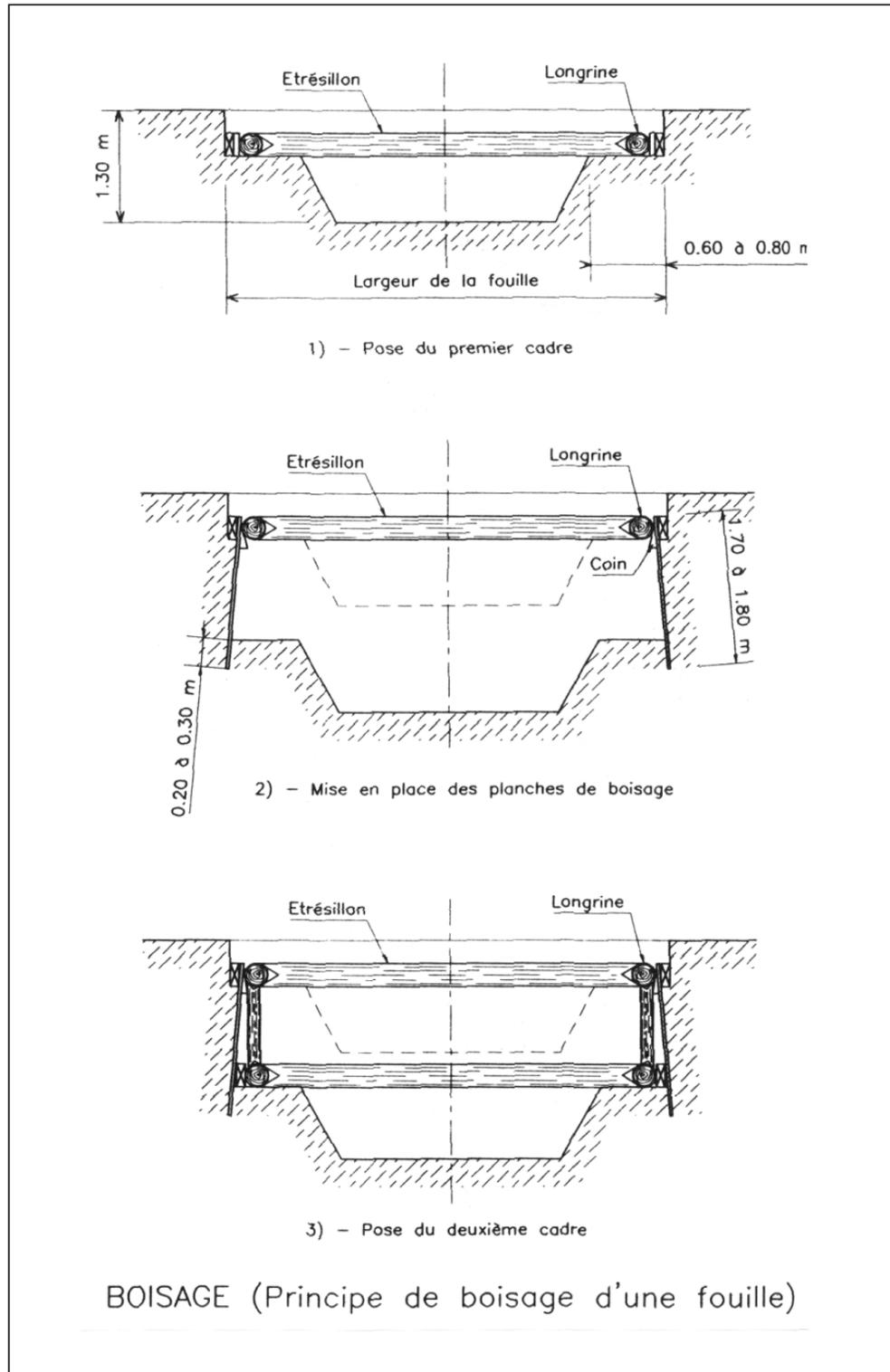


Figure 2.6. : Le pénétromètre statique Solétanche. Tiré de Letourneur

Le fait de devoir placer un soutènement dans la fouille rend celle-ci immédiatement beaucoup plus chère et en diminue ainsi l'intérêt principal. Cette technique se rapproche ainsi de celle des puits de grand diamètre (voir § 2.10.3).

2.2. Les pénétromètres

Bien que cette technique ne fournisse en fait aucun échantillon du sous-sol, nous l'avons intégrée dans les méthodes de sondage car elle remplace souvent des sondages de reconnaissance, surtout dans le domaine des fondations. Même si elle ne dit rien directement sur la nature du substrat, elle est intéressante au sens où elle livre une mesure de sa compacité donc de sa capacité portante.

Les pénétromètres sont constitués d'une pointe de géométrie standardisée, fixée à des tiges métalliques. On enfonce cette pointe en mesurant la difficulté de la faire pénétrer.

2.2.1. Les pénétromètres statiques

Ces pénétromètres entrent dans le sous-sol par un vérin qui les pousse en profondeur (fig 2.7). Le vérin s'appuie au châssis d'un véhicule lourd.

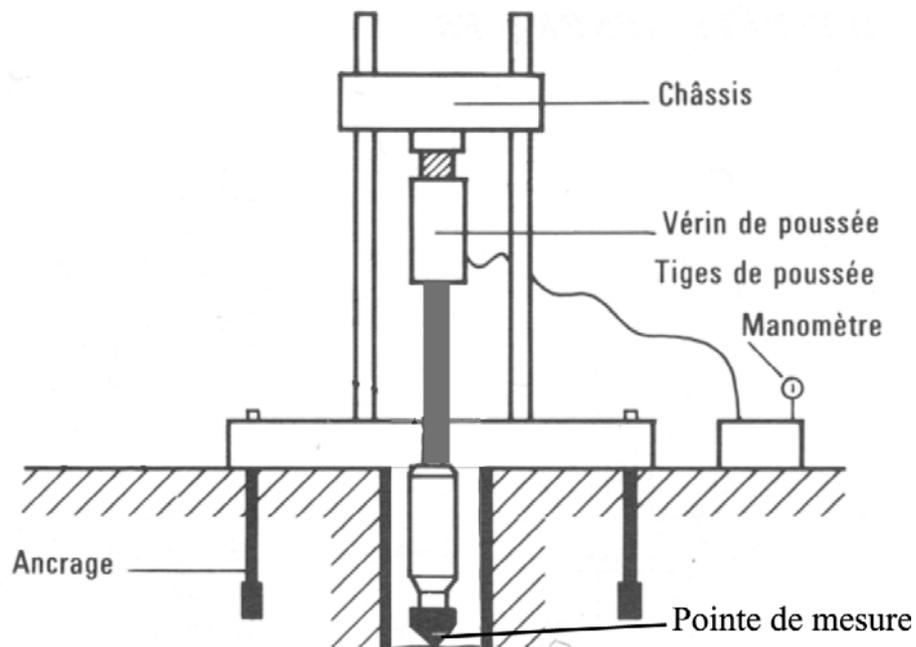


Figure 2.7. : Pénétromètre statique

On mesure en général la résistance du terrain par l'effort nécessaire pour faire avancer le pénétromètre à vitesse constante. Ce pénétromètre est peu utilisé en Suisse car les terrains sont trop variables et la présence d'un niveau graveleux stoppe la progression. Il est en revanche beaucoup utilisé dans les pays à sédiments fins comme la Hollande par exemple.

2.2.2. Les pénétromètres dynamiques

La pointe est chassée dans le sous-sol par battage avec un mouton qui tombe sur plateau posé sur des mordaches fixées aux tiges. L'énergie de battage est également standardisée (poids du mouton, hauteur de chute). Une chèvre avec un moufle permet les manœuvres de tiges (fig 2.8). On note le nombre de chutes du mouton pour descendre 10 ou 20 cm.

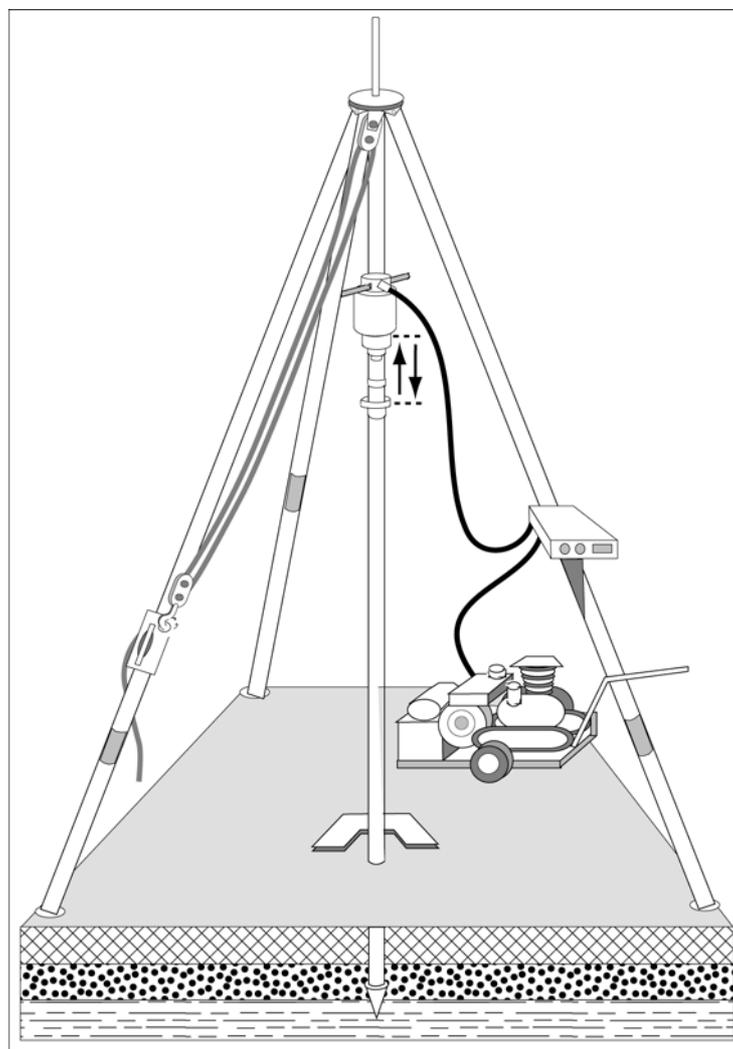


Figure 2.8. : Agrégat d'un pénétromètre dynamique. Ici le relevage du mouton est assuré par un groupe à air comprimé.

Les résistances à la pénétration du pénétromètre peuvent être mises en regard des contraintes admissibles pour des fondations d'ouvrages (fig 2.9).

Ordre de grandeur des résistances à la pénétration et des contraintes admissibles de poinçonnement pour les terrains alluviaux s.l. (sols saturés)

Conditions: - Mouton de 30 kg / chute 20 cm
- Pointe \varnothing 36 mm (surface projetée 10 cm²),
angle de pointe 60°

	N	$\sigma_{\text{admissible}}$	
		kg/cm ²	KN/m ²
Tourbe	0-4	0	0
Limon argileux saturé	0-5	0 - 0,3	0 - 30
Limon sableux	2-10	0,3 - 0,6	30 - 60
Sable limoneux	5-15	0,5 - 1,0	50 - 100
Sable moyen	10-20	0,7 - 1,3	70 - 130
Sable grossier graveleux	15- 40	1,2 - 2,0	120 - 200
Gravier fin sableux	30-100	1,8 - 3,0	180 - 300
Gravier moyen sableux	60-150	2,5 - 3,5	250 - 350
Gravier grossier	100-200	3,0 - 4,0	300 - 400
Pierres et blocs	> 200	(4,0)	(400)

N = nombre de coups par 10 cm d'avancement, frottement tangentiel déduit

Figure 2.9. : Contraintes admissibles pour les différentes classes de résistance à la pénétration d'un pénétromètre dynamique courant.

Un pénétrömètre à électrode avait été développé par l'Institut de géophysique de l'UNIL dans les années septante (fig 2.10). Trois circuits sont activables sur la base des deux électrodes de référence et de l'électrode – pointe (fig 2.11)

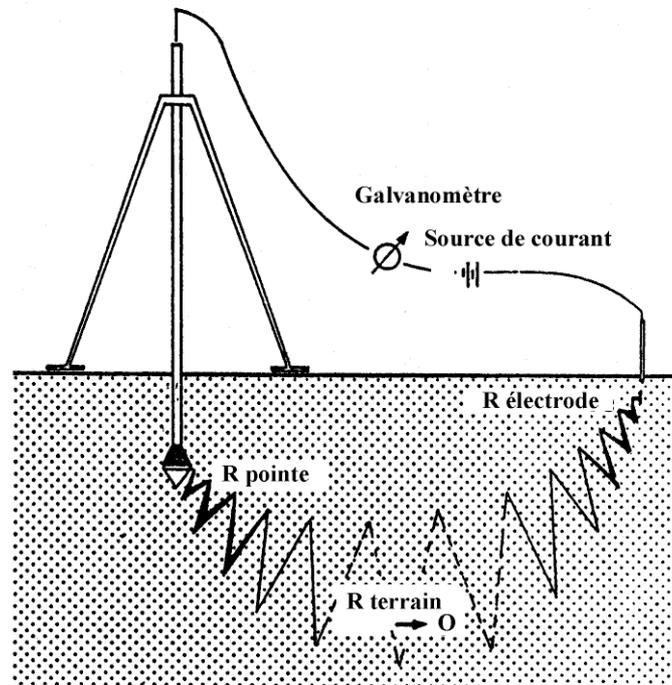


Figure 2.10. : Principe du pénétrömètre à électrode l'Institut de géophysique de l'UNIL.

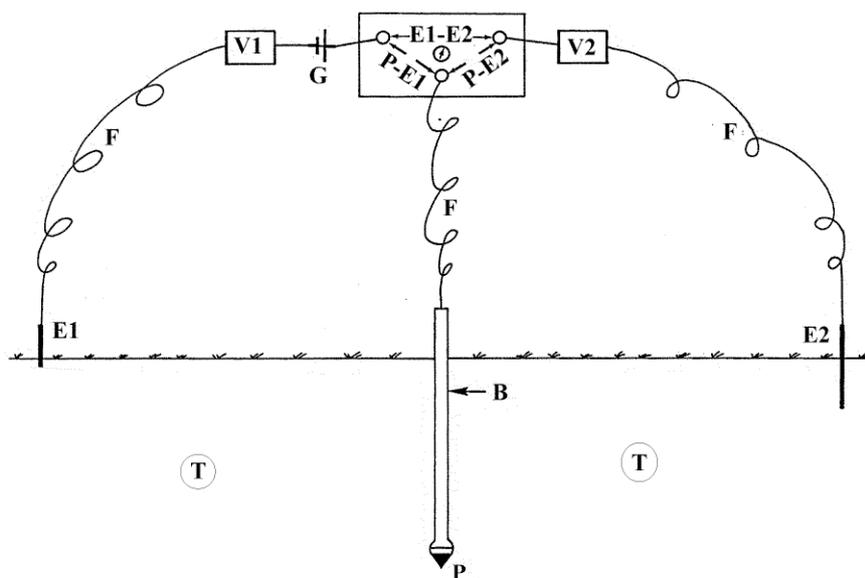


Figure 2.11. : Schéma de montage électrique du pénétrömètre à électrode.

Le calcul de la résistivité électrique à la pointe est développé à la figure 2.12.

PENETROMETRE A ELECTRODE

But : résistivité du terrain autour de la pointe.

Signification des termes :

G = Générateur à tension constante ΔV (mV), avec ampèremètre

F = fils électriques des circuits

P = pointe du pénétromètre

B = barres

T = terrain

E1 = électrode de référence 1 (à la surface du sol)

E2 = électrode de référence 2 (à la surface du sol)

R_{V1} = résistance variable sur le circuit allant à E1

R_{V2} = résistance variable sur le circuit allant à E2

R_F = résistance des fils

R_T = résistance du terrain loin des électrodes

R_P = résistance du terrain au voisinage immédiat de l'électrode de pointe P

R_{E1} = résistance du terrain au voisinage immédiat de l'électrode de référence E1

R_{E2} = résistance du terrain au voisinage immédiat de l'électrode de référence E2

R_{P1} = R_P approximatif selon circuit P-E1 seul

R_{P2} = R_P approximatif selon circuit P-E2 seul

i = intensité (mA)

Hypothèse simplificatrices :

Grâce aux fils de cuivre : $R_F \cong 0$

Grâce à la faible densité de courant dans le massif de terrain :

$R_T \ll R_P, R_{E1}, R_{E2}$ on pose $R_T = 0$

Circuits

3 circuits commutables, soumis à la différence de potentiel ΔV :

Circuit P-E1Tension : ΔV intensité : i_{P-E1} Résistance : $R_{P-E1} = R_F + R_P + R_T + R_{E1} + R_F + R_{V1}$
 $= R_P + (R_{E1} + R_{V1})$ pour $R_F, R_T = 0$

$$R_{P-E1} = \frac{\Delta V}{i_{P-E1}} = R_P + (R_{E1} + R_{V1})$$

Circuit P-E2Tension : ΔV intensité : i_{P-E2} Résistance : $R_{P-E2} = R_F + R_P + R_T + R_{E2} + R_F + R_{V2}$
 $= R_P + (R_{E2} + R_{V2})$ pour $R_F = R_T = 0$

$$R_{P-E2} = \frac{\Delta V}{i_{P-E2}} = R_P + (R_{E2} + R_{V2})$$

Circuit E1-E2Tension : ΔV intensité : i_{E1-E2} Résistance : $R_{E1-E2} = R_{V1} + R_F + R_{E1} + R_T + R_{E2}$
 $+ R_F + R_{V2} = (R_{E1} + R_{V1}) + (R_{E2} + R_{V2})$ pour $R_F = R_T = 0$

$$R_{E1-E2} = \frac{\Delta V}{i_{E1-E2}} = (R_{E1} + R_{V1}) + (R_{E2} + R_{V2})$$

 R_{V1} et R_{V2} sont réglés pour que ce circuit soit symétrique au début du sondage

$$\Rightarrow R_{E1} + R_{V1} \cong R_{E2} + R_{V2} \cong \frac{R_{E1-E2}}{2}$$

Lorsque la pointe pénètre dans le terrain, la symétrie des circuits peut s'altérer. On calcule alors sur les deux circuits P-E1 et P-E2 deux résistances approximatives R_{P1} et R_{P2} . La résistance réelle à la pointe R_P est obtenue par la moyenne des valeurs approximatives.

Paramètres mesurés : $\Delta V, i_{P-E1}, i_{P-E2}, i_{E1-E2}$ 1) Calcul de R_P approximatif par rapport à l'électrode de référence E1 seule (R_{P1})

$$R_{P-E1} = \frac{\Delta V}{i_{P-E1}} = R_{P1} + (R_{E1} + R_{V1})$$

Comme le circuit E1-E2 est peu dissymétrique:

$$R_{E1} + R_{V1} \cong \frac{R_{E1-E2}}{2}$$

$$R_{P1} = R_{P-E1} - \frac{R_{E1-E2}}{2}$$

2) Calcul de R_P approximatif par rapport à l'électrode de référence E2 seule (R_{P2})

$$R_{P-E2} = \frac{\Delta V}{i_{P-E2}} = R_{P2} + (R_{E2} + R_{V2})$$

Comme pour l'autre circuit :

$$R_{E2} + R_{V2} \cong \frac{R_{E1-E2}}{2}$$

$$R_{P2} = R_{P-E2} - \frac{R_{E1-E2}}{2}$$

3) Calcul de R_P moyen R_P est calculé par la moyenne arithmétique de R_{P1} et R_{P2}

$$R_P = \frac{R_{P1} + R_{P2}}{2} = \frac{R_{P-E1} + R_{P-E2} - 2 \frac{R_{E1-E2}}{2}}{2}$$

$$R_P = \frac{R_{P-E1} + R_{P-E2}}{2} - \frac{R_{E1-E2}}{2}$$

ou

$$R_P = \frac{\frac{\Delta V}{i_{P-E1}} + \frac{\Delta V}{i_{P-E2}} - \frac{\Delta V}{i_{E1-E2}}}{2}$$

$$R_P = \frac{\Delta V}{2} \left(\frac{1}{i_{P-E1}} + \frac{1}{i_{P-E2}} - \frac{1}{i_{E1-E2}} \right)$$

4) Calcul de ρ_P :

$$\rho_P = K \cdot R_P$$

K = facteur géométrique déterminé en laboratoire (cuve)

(K = 0,2512 pour pénétromètre GEOLEP)

Figure 2.12. : Principe de mesure et de calcul de la résistivité du terrain à la pointe

Cet équipement n'a malheureusement pas réussi à s'implanter dans la pratique. Cependant, c'est un instrument très intéressant sur la plan didactique qui permet de mettre en parallèle la résistance mécanique du terrain et sa résistivité électrique, comme le montre l'exemple de la figure 2.13.

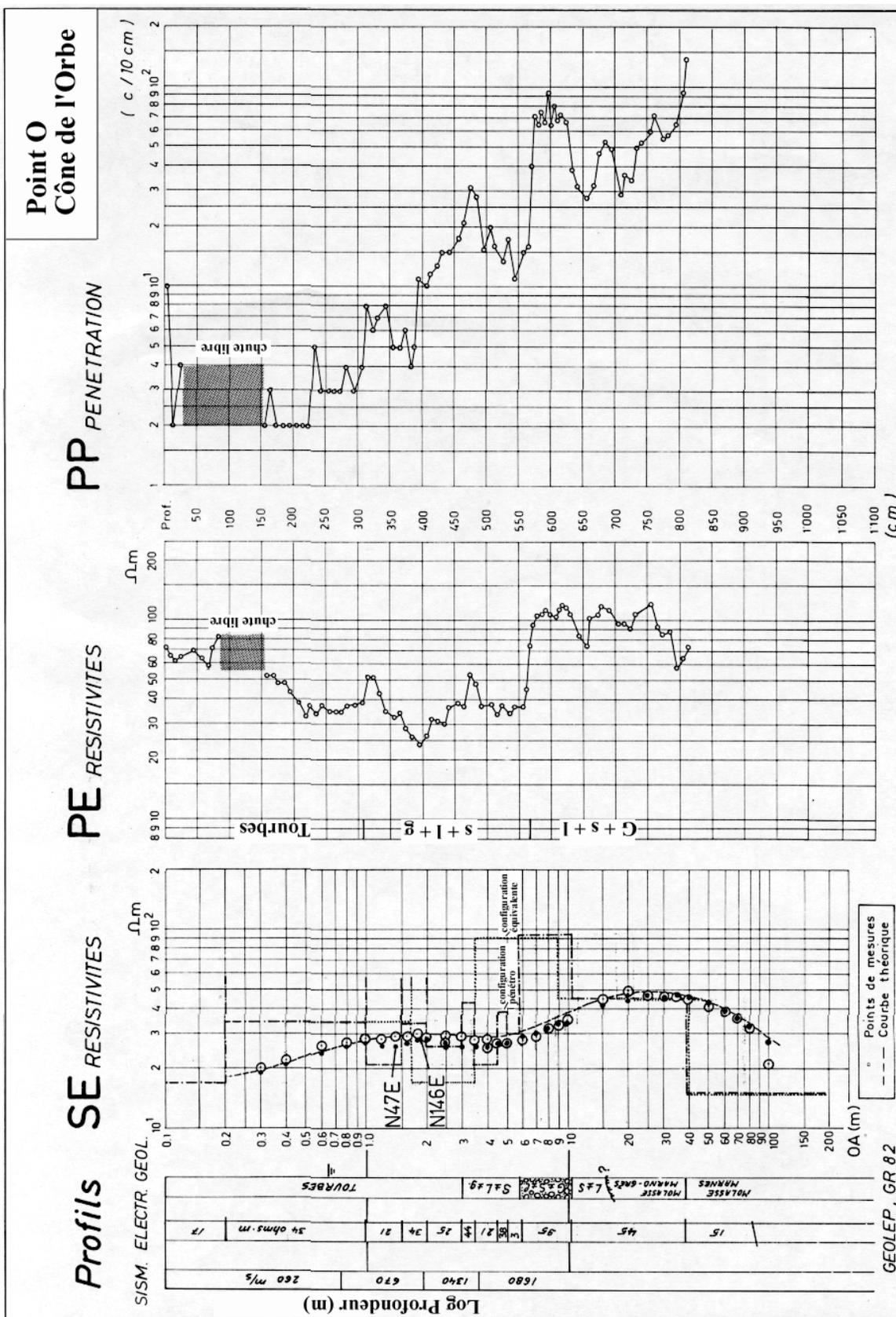


Figure 2.13. : Sondage pénétrométrique dans le cône de l'Orbe, en aval de la ville d'Orbe. Ce point a été testé par plusieurs méthodes de reconnaissance : PP = pénétration pénétromètre en nombre de coups pour 10 cm d'avancement. PE = Pénétration résistivité électrique du terrain contre la pointe en ohm x m (échelle des profondeurs arithmétique). SE = sondage électrique Schlumberger. Profil électr. = interprétation du sondage électrique. Profil sism. = interprétation d'un sondage sismique réfraction. Profil géol. = sondage à la tarière à moteur (échelle des profondeurs en logarithme pour le SE et les profils). La corrélation PP et PE avec la coupe géologique (profil géol.) montre que les tourbes ont été très bien identifiées par PP avec des résistances à la pénétration inférieures à 4 coups pour 10 cm. L'arrivée dans la nappe à 60 cm de profondeur n'a cependant pas été détectée par PP mais bien par PE avec une baisse de résistivité électrique de 60 à 80 ohm x m baissant à environ 35 ohm x m. Les signaux électriques et mécaniques sont donc bien complémentaires. L'arrivée dans les sables limono-graveleux n'est visible que sur la piste mécanique. La résistivité électrique reste identique à celle de la tourbe. La pénétration dans les graviers à 5.70 m est bien visible sur les deux pistes du pénétromètre : forte croissance de résistance mécanique et nette accroissement de la résistivité électrique. La pénétration devient trop lente à 8.10 m avec près de 200 coups pour 10 cm et le pénétromètre est stoppé.

2.2.3. Les piézomètres battus

Nous plaçons dans la famille des pénétromètre les piézomètres battus, bien que le battage ne soit là que pour faire pénétrer le tube perforé et non pas pour mesure la compacité du sous-sol. Les tubes battus sont en général en métal, parfois en PVC à parois épaisses. Le tube est battu par un mouton (voir aussi les sondages carottés battus, § 2.6) ou éventuellement mis en vibration et poussé. Une fois la nappe souterraine atteinte, la manœuvre est stoppée. Le niveau de la nappe souterraine est mesuré dans le tube comme pour tout piézomètre.

Les piézomètres sont souvent battus pour diminuer les coûts d'installation d'étude d'une nappe souterraine, par rapport à la solution piézomètres forés avec tubage. Comme tout piézomètre mis en place sans tubage provisoire, le piézomètre battu donne souvent des observations contestables. En effet, il présente les défauts suivants :

- on ignore dans quel matériel l'eau souterraine est présente
- il peut court-circuiter plusieurs horizons aquifères au potentiel différent
- il ne possède pas de protection contre les eaux superficielles (voir fig 4.15)

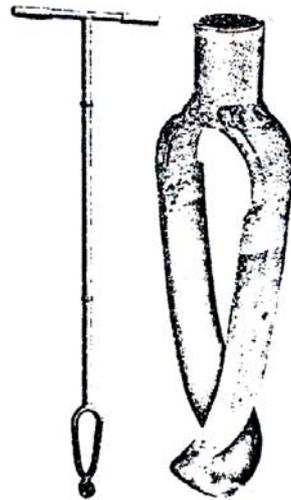
L'utilisation de piézomètres battus est donc risquée. Il y a lieu de prendre garde aux difficultés de la mesure piézométrique qui est traitée en détail au chapitre 4.

2.3. Les sondages non tubés à la tarière

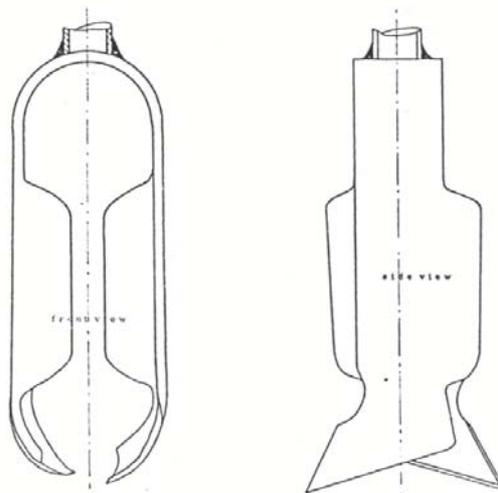
La tarière de sondage est l'instrument de base de la pédologie de terrain. Elle peut être aussi très utile en géologie de faible profondeur. Il s'agit d'une tige métallique munie d'une lame hélicoïdale qui est vissée dans le terrain. En remontant la tige sans la dévisser, on récolte le matériel pris dans la lame hélicoïdale.

2.3.1. Les tarières à main

Cette tarière des pédologues permet aussi d'atteindre la base du sol et de connaître ainsi la nature du sous-sol (horizon C). Elle est munie d'une sorte de carottier derrière l'hélicoïdal qui permet de loger un peu de matériel peu déformé (fig 2.14).



carottier pour terrains fins



carottier pour gravier

Figure 2.14. : Tarières à main avec différents types de carottiers.

L'échantillon est considéré comme remanié. Une identification soignée permet cependant de reconnaître des structures sédimentaires comme des laminations, même déformées par le sondage. Cette technique est limitée par la présence de couches de gravier ou de blocs. Non tubé, le trou se referme systématiquement en cas de terrain mouvant. A l'instar d'un marteau, tout géologue devrait avoir avec soi une tarière à main pour une première investigation d'un site où il aura à travailler.

2.3.2. Tarière à moteur

Des tarières hélicoïdales peuvent être animées par des moteurs (fig 2.15). Ceci permet de descendre à des profondeurs nettement plus importantes (nous avons atteint une profondeur de 17 m dans le glissement de la Chenaulaz à Pully avec une tarière à moteur Stihl sur un véhicule tout-terrain avec treuil muni d'une chèvre). Le principal problème est de retirer la tarière, ce qui nécessite des engins de levage puissants. Un tel dispositif peut être utilisé pour faire un sondage ou de placer un piézomètre à faible coût. Les mêmes risques que cités plus haut à propos des piézomètres battus doivent être mentionnés (voir § 2.2.3). De grosses tarières sont utilisées pour creuser des pieux. Elle seront traitées avec les puits (voir § 2.10.2).



Figure 2.15. : Tarière à moteur Stihl du GEO-LEP sur véhicule tout-terrain. Sondage dans les sédiments palustres du glissement de terrain du marais de la Vraconne (Jura vaudois).

2.4. Les forages par chasse d'eau

Dans des terrains sableux et limoneux, on peut réaliser des forages en chassant de l'eau sous pression à la pointe d'un tube. La grande pression et la grande vitesse de l'eau érodent le terrain devant la pointe et font ressortir le mélange eau – sédiment par l'extérieur du tube. On appuie également sur le tube pour le faire descendre. Cette technique est surtout utilisée pour mettre en place les « pointes filtrantes » ou « well point » lorsque l'on doit abaisser le niveau d'une nappe souterraine dans des sédiments sablo-limoneux (fig 2.16). Il ne s'agit donc pas d'un sondage de reconnaissance mais d'un pur forage

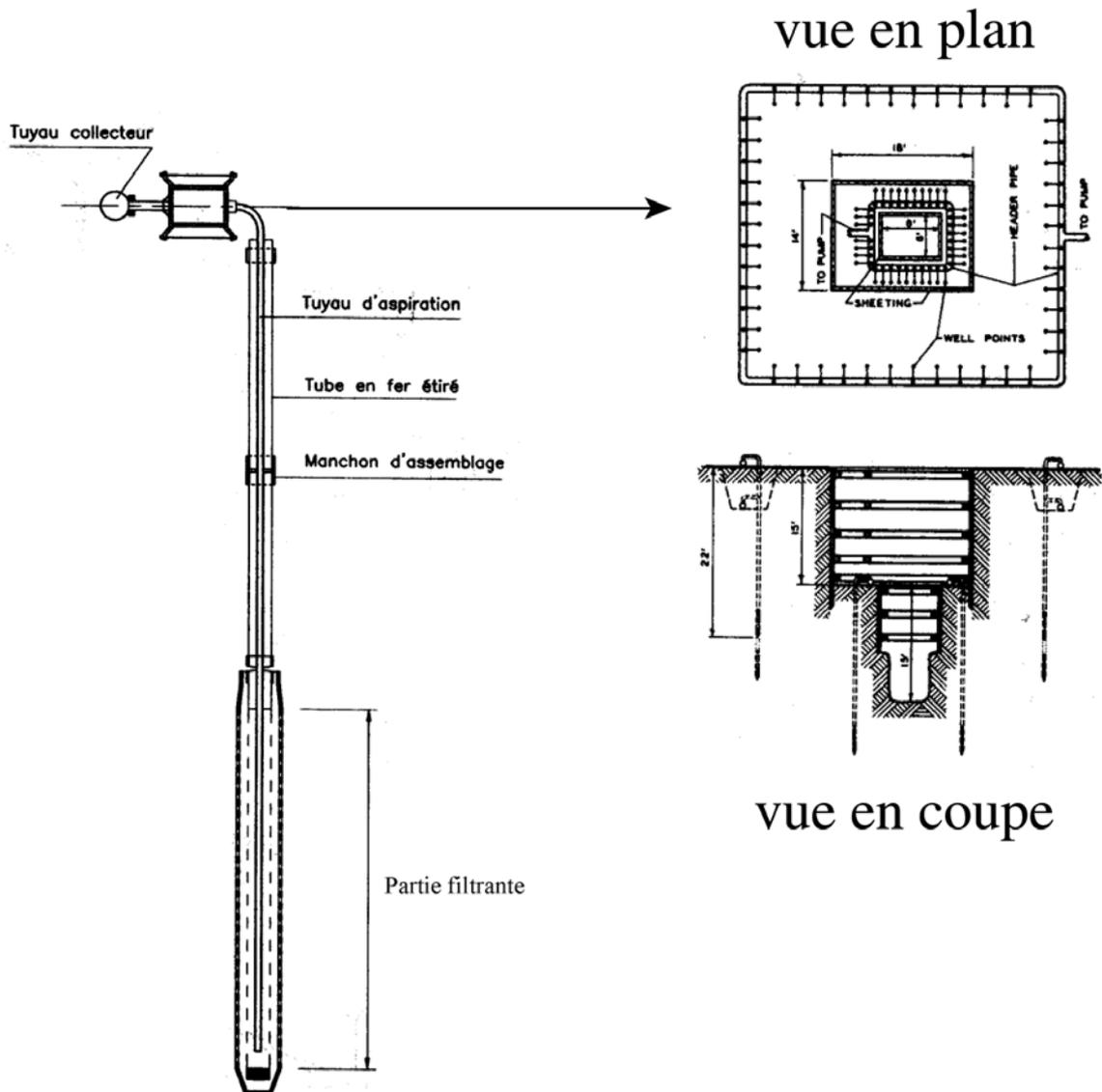


Figure 2.16. : A : Système d'abaissement de nappe par pointes filtrantes (well points). L'abaissement de la nappe se fait par dépression dans chaque pointe en pompant dans la conduite reliant toutes les pointes. Le rabattement maximum est d'environ 6 m. Pour des rabattements plus importants, on construit plusieurs étages de pointes filtrantes. Ce système fonctionne pour des aquifères à perméabilité limitée ($k < 10^{-4}$ m/s). Les pointes doivent être d'autant plus serrées que la perméabilité du terrain est faible. Elles sont souvent espacées de 1 m. Pour des perméabilités plus élevées, on utilise des puits filtrants (voir § 2.10.1). Tiré de Hvorslev. B : détail d'une pointe filtrante. Tiré de Kurtz

2.5. Les sondages carottés par rotation

La technique du sondage carotté consiste à faire pénétrer dans le terrain un tube portant à son extrémité un outil de découpe du terrain meuble ou de la roche. L'outil isole ainsi un cylindre de terrain (la carotte) qui pénètre à l'intérieur du tube au fur et à mesure de l'avancement. Le carottier une fois rempli est retiré pour recueillir la carotte.

Les sondages carottés par rotation correspondent à la technique de reconnaissance par excellence. En effet, ils présentent le rapport qualité – prix le plus intéressant lorsque l'enjeu est important, ce qui est souvent le cas en géologie de l'ingénieur. La sécurité de la collecte des échantillons et la mise en place des équipements est incomparable. Beaucoup de projets nécessitent cette sécurité optimale en géologie de l'ingénieur : sites de barrages, glissements de terrain, sites contaminés sont autant de domaines où l'on ne doit pas se tromper. Cette technique déjà très ancienne a peu évolué si ce n'est des matériaux plus résistants et une manœuvre plus aisée qui a permis de diminuer le nombre de sondeur par poste et par conséquent les prix.

Les avantages majeurs de cette technique peuvent être résumés dans les points suivants :

- échantillons géologiques peu remaniés qui permettent une bonne identification du matériel et des essais en laboratoire (perméabilité, porosité, granulométrie), même dans la partie aquifère
- pose de tubes perforés avec bouchons d'étanchéité d'argile contre les eaux de surface et entre différents horizons aquifères (voir chapitre 4) et d'un petit massif filtrant dans les zones perforées.

2.5.1. L'agrégat de sondage et les opérations de foration

L'agrégat de sondage est fait de plusieurs modules (fig 2.17) :

- un véhicule tout-terrain (à roues ou à chenilles) portant la sondeuse proprement dite composée des modules suivants :
- un moteur permettant de mettre l'hydraulique en pression pour les nombreux mouvements de la sondeuse (rotation de la tête, mouvement haut – bas de la chaîne sur le mât, les multiples vérins servant à la manœuvre)
- un mât de sondage orientable portant sur la chaîne la tête de rotation
- un train de tiges creuses qui est animé par la tête de rotation
- une pompe à faible débit mais haute pression qui permet d'injecter de l'eau dans le train de tige au moyen d'un pivot; l'eau permet de ressortir les débris du forage à l'extérieur du train de tiges
- un carottier fixé à l'extrémité du train de tiges et à son extrémité une couronne
- un jeu de tubages (casing) pour soutenir le trou dans la partie meuble

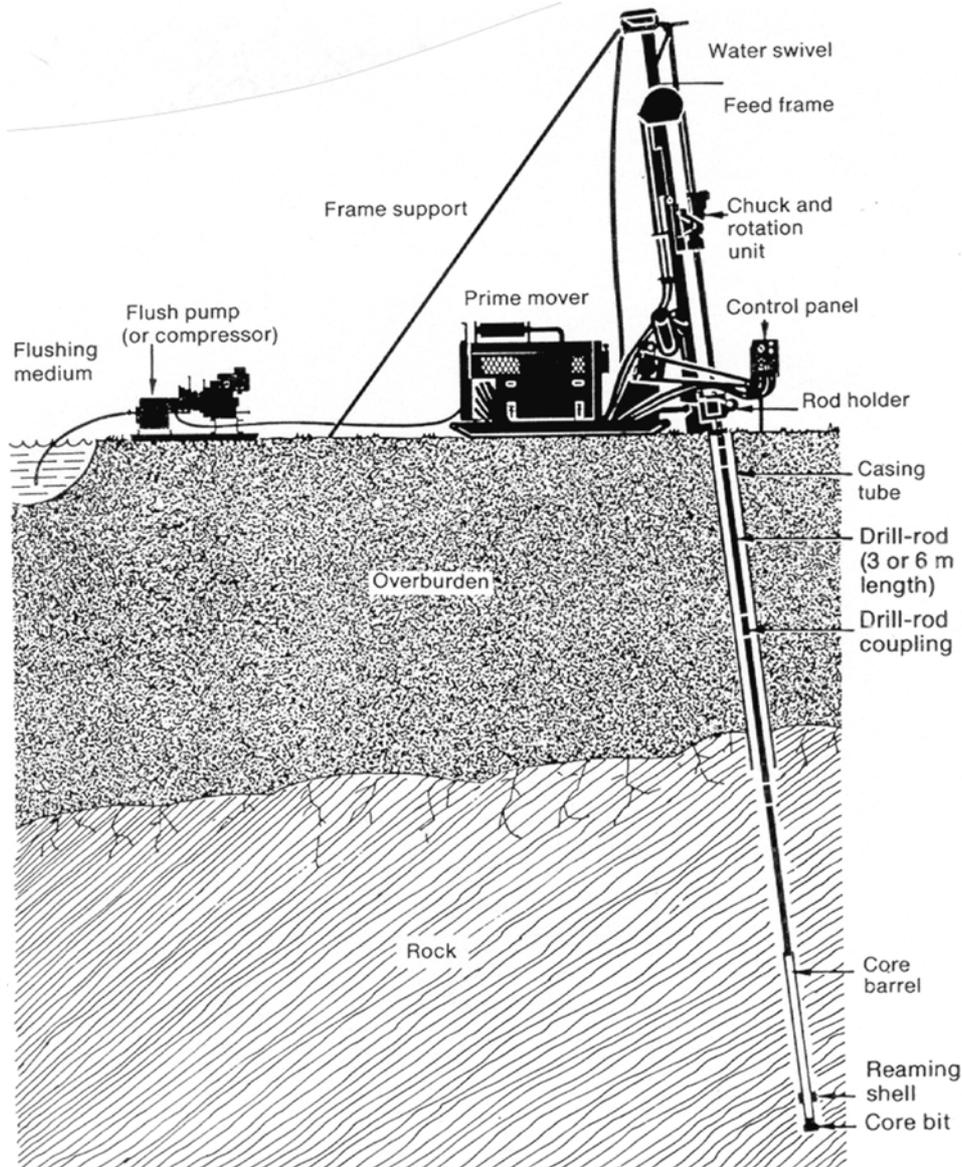


Figure 2.17. : Agrégat de sondage. Documentation Atlas Copco.

Le sondage avance par passes. Une passe est la foration du contenu du carottier, avec des vitesses de rotation de l'ordre de 1 tour par seconde environ. La plupart des machines ont une tête de rotation munie d'un marteau hors-trou qui permet battage et rotation à la fois (avancement en « roto-percussion »). Une fois le carottier rempli, on sort le carottier en démontant le train de tiges, pour recueillir la carotte. On avance le tubage au niveau atteint puis on procède à la seconde passe. Dans des terrains à faible difficulté, un sondage carotté avance d'une dizaine de mètres en 1 jour environ.

Le sondage est effectué à sec dans les terrains qui ne nécessitent pas un refroidissement de la couronne ou qui contiennent naturellement suffisamment d'eau. Lorsque le sondage est sur du rocher dur, l'eau doit être injectée dans les tiges pour refroidir l'outil (forage à l'eau) au moyen de la pompe à haute pression.

Exercice 2.1. (hors cahier) : Sondage à Villars sous Yens

2.5.2. Les carottiers

Le carottier est un tube d'une longueur généralement de 3 m qui est fixé en tête du train de tige pour recueillir la carotte. Son diamètre est généralement supérieur à celui des tiges. Sa fonction est d'abord celle de porter la couronne de découpe du terrain (voir § 2.5.3). Derrière l'outil, on place un extracteur qui doit assurer le détachement de la carotte du terrain non encore découpé et son maintien dans le tube pendant la manœuvre. Ce sont des extracteurs à lames ressort pour les terrains meubles : en forme de couronne ouverte vers le haut, les lames s'écartent pour laisser passer la carotte. Lorsque le sondeur fait la manœuvre de retrait, les lames pénètrent dans la base de la carotte et la sectionnent. En rocher, l'extracteur est une bague incomplète qui s'écarte au passage ascendant de la carotte. Au retrait, la bague s'appuie contre la paroi intérieure du tube qui est légèrement conique. Ceci a pour effet de fermer la bague autour de la base de la carotte ce qui permet de la détacher.

Trois principaux types de carottier sont utilisés (fig 2.18).

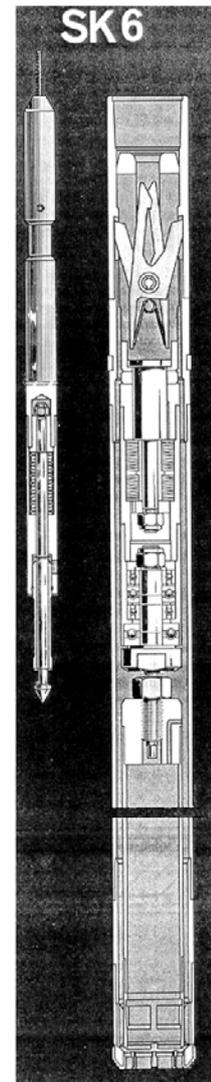
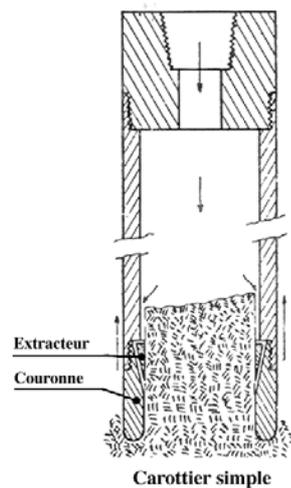


Figure 2.18. : Les trois types de carottiers.

Carottier simple

C'est un tube unique, épais et robuste, qui porte l'outil de coupe à son extrémité. Le terrain isolé par la couronne pénètre progressivement dans ce logement. L'eau en pression injectée par les tiges pénètre directement au haut du carottier pour venir refroidir la couronne. Ce type de carottier est principalement utilisé pour les terrains meubles. Il présente toutefois deux défauts importants : la carotte tend à tourner avec la rotation du tube et l'eau d'injection délave le matériel recueilli. La qualité de l'échantillon s'en ressent dans le cas de terrains peu cohésifs. D'une manière générale, les terrains grossiers aquifères qui sont échantillonnés (graviers et sables) ont l'air plus «propres» (donc plus pauvres en fines) que ce n'est le cas in-situ par le fait que les fines ont été assimilées à la boue du sondage. Il y a lieu de se méfier de ce biais systématique lorsque l'on essaie d'estimer la perméabilité du couche graveleuse sur la base des carottes.

Carottier double

Pour pallier à ces deux défauts, on a développé des doubles carottiers dans lesquels un tube mince est logé à l'intérieur du tube porteur de l'outil. Ce tube intérieur est monté sur roulements à bille ce qui évite sa rotation. L'eau sous pression est acheminée à l'outil par l'espace entre les deux tubes. Il résulte des ces améliorations une qualité d'échantillons nettement supérieure. Le double carottier est généralement utilisé en rocher, surtout lorsqu'il est assez fragile.

Carottier à câble (wire line drilling)

La nécessité de démonter le train de tige pour extraire la carotte et de le remonter pour continuer le sondage implique des manœuvres longues et coûteuses à partir d'une certaine profondeur. Pour des sondages dépassant 50 à 100 m, on utilise des carottiers à câble couplés à des tiges creuses de même diamètre que le carottier. Le tube carottier (qui est ici un double carottier) peut être extrait au travers des tiges par un crochet de pêche de la carotte. Le gain de temps est considérable. Les tiges ne sont démontées que pour changer l'outil de coupe. Le défaut est la nécessité d'utiliser des foreuses très puissantes qui ont le couple suffisant pour faire tourner les tiges. En effet, l'espace annulaire entre la paroi du forage et les tiges est très faible ce qui occasionne de gros efforts de frottement. Le poids du train de tige est également élevé. Il en résulte des coûts plus élevés. Les machines sont plus difficiles à installer dans des sites reculés. Les caractéristiques de diamètre des carottiers sont données à la figure 2.19. Celles des carottiers à câble série Q sont données au tableau 2.1

CASING TUBES				HOLE DIAMETER MM	CORE BARRELS		DRILL RODS		
Outer Inner Ø mm	Outer Ø mm	Inner Ø mm	Mass kg/m		Type	Core Ø mm	Outer Ø mm	Coupling Inner Ø mm	Mass kg/m
	143	134	16.3	146	T6-146	123	NWY NW HW	31.7 34.9 60.3	7.9 8.1 12.6
					SK-6	102	140	125	24.3
	128	119	14.4	131	T6-131	108	NWY NW HW	31.7 34.9 60.3	7.9 8.1 12.6
HW 114.3 101.5	113	104	12.7	116	T6-116	93	NWY NW HW	31.7 34.9 60.3	7.9 8.1 12.6
NW 88.9 76.2	98	89	10.4	101	T2-101 T6-101	84 79	NWY NW	31.7 34.9	7.9 6.1
	84	77	7.0	86	T2-86 T6-86	72 67	NWY 50 NW	31.7 22 34.9	7.9 7.3 8.1
BW 73.0 60.3	74	67	6.1	76	T2-76 T6-76	62 57	50 NW NWY	22 34.9 31.7	6.9 8.1 7.9
	74	67	6.1	75.8	NSK	47.7	NQ ² NSK ²	-	7.7
					TNW	61.8	NW	34.9	8.1
	64	57	5.2	66	T2-66 T6-66	52 47	50 53'	22 22	7.3 4.0
AW 57.1 48.4	-	-	-	60	BST	35.6	BQ ² BST ²	-	6.0
					TBW	45.2	BW BW ¹	19 19	6.0 4.2
	54	47	4.4	56	T2-56 TT-56	42 45.5	50 53'	22 22	7.3 4.0
	-	-	-	48	AST	25.6	AQ ² AST ²	-	4.7
					TAW	33.5	AW AW ¹	15.9 15.9	6.7 2.5
				46	T2-46 TT-46	32 35.6	42 43'	22 22	4.6 2.5

¹ aluminium rods
² wire-line

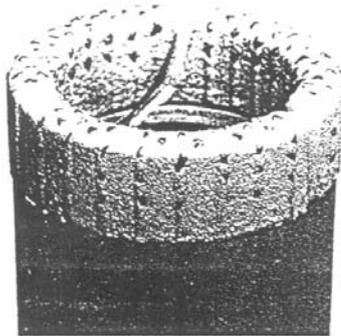
Figure 2.19. : Diamètre des carottiers usuels (core barrels), diamètre des tubages et diamètre du trou. Les tubages sont télescopiques. Documentation Atlas Copco

	couronne	couronne	aléueur	sabots tiges	sabots tiges
Désignation	d ext	d int	d	d ext	d int
	mm	mm	mm	mm	mm
AQ	46.7	27.0	48.0		
BQ	59.5	36.4	60.0		
NQ	75.3	47.6	75.7	75.3	60.5
HQ	95.6	63.5	96.1	91.8	76.3
PQ	122.2	85.0	122.6	117.5	100.2

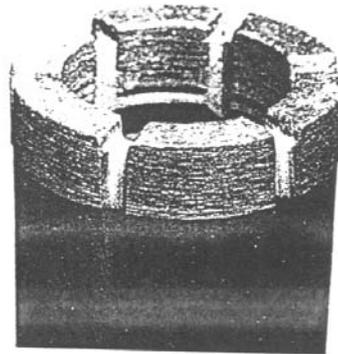
Tableau 2.1. : Diamètres des couronnes placées sur les carottiers à câble de la série Q. Le diamètre extérieur d'une couronne de désignation inférieure peut juste passer à l'intérieur des tiges de la désignation supérieure. Données Diamant Boart.

2.5.3. Les outils de coupe

Le découpage de la carotte se fait par des couronne à haute dureté. Trois types différents de couronne sont utilisés (fig 2.20).



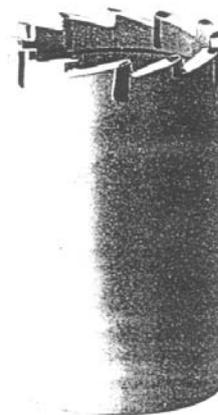
Surface set bits
(couronnes à pierres serties)
Diamy



Impregnated bits
(couronnes à concrétions)
Diaborit



Reaming shells
(manchon aléueur)



Couronnes au carbure de tungstène (sols et roches tendres)

Figure 2.20. : Les trois types de matériel abrasif pour les courones de carottiers et un manchon aléueur. Documentation Craelius.

Couronnes de imprégnation de diamants

De fins débris de diamants issus de l'industrie du diamant sont mélangés dans un alliage métallique tendre. L'usure du métal met en contact la roche avec de nouveaux débris de diamant pris dans la pâte. Ce matériel permet une meilleure abrasion et convient à la foration de roches mi-dures à dures (voir fig 2.21). Il autorise des vitesses de rotation élevées.

Couronnes à diamants sertis

La couronne de métal tendre contient de gros diamants isolés qui ressortent à sa surface. L'abrasion est ici maximale et permet la foration des roches les plus dures (voir fig 2.21). La vitesse de rotation doit rester très réduite. Le coût de ces couronnes est très élevé.

Ces trois types de matériel sont utilisés aussi sur des manchons d'alésage pour agrandir le diamètre du trou (fig 2.20).

2.5.4. Le télescopage des tubages

En terrain meuble et dans certaines roches instables, il est nécessaire de tuber le sondage. Ceci est effectué en faisant suivre le carottier par un tubage métallique légèrement plus grand que le carottier, permettant ainsi à ce dernier de pouvoir coulisser librement dans le tubage. La base du premier élément de tubage est munie d'un sabot qui possède une couronne avec prismes Widia. Le tubage est descendu par rotation après la foration d'une passe et le retrait du carottier (voir Exercice 2.1).

Lorsque le couple nécessaire pour descendre le tubage dépasse celui de la machine, il est faut réduire le diamètre du tubage et par conséquent celui du carottier. On place donc dans le premier tubage de grand diamètre un tubage légèrement plus étroit qui permet de continuer le sondage. C'est le télescopage. Puis un troisième et ainsi de suite (voir fig 2.19). On obtient ainsi un tubage fait de tubes emboîtés, les larges restant proches de la surface, les plus étroits étant les plus profonds.

2.5.5. La cimentation des tubages

Les tubages métalliques utilisés dans les sondages de reconnaissance (casing) sont provisoires. Ils sont retirés en fin de sondage, une fois l'équipement mis en place. Il est des cas cependant où il est nécessaire de conserver un tubage de manière durable et où il faut garantir l'absence d'espace entre le tubage et le terrain (par exemple pour éviter des court-circuits hydrogéologiques ou des venues de gaz). Il faut alors procéder à la cimentation du tubage. Celle-ci est faite sous l'eau avec un ciment hydraulique selon la procédure suivante (fig 2.22). Le coulis de ciment est descendu par une conduite provisoire qui atteint le fond du forage à cimenter. Le tube est ensuite fermé et le tubage est mis en pression. Le ciment migre de l'intérieur du tubage à l'extérieur en passant sous le sabot et en remontant dans l'intervalle entre le terrain et le casing. La pression est maintenue jusqu'à la prise du ciment.

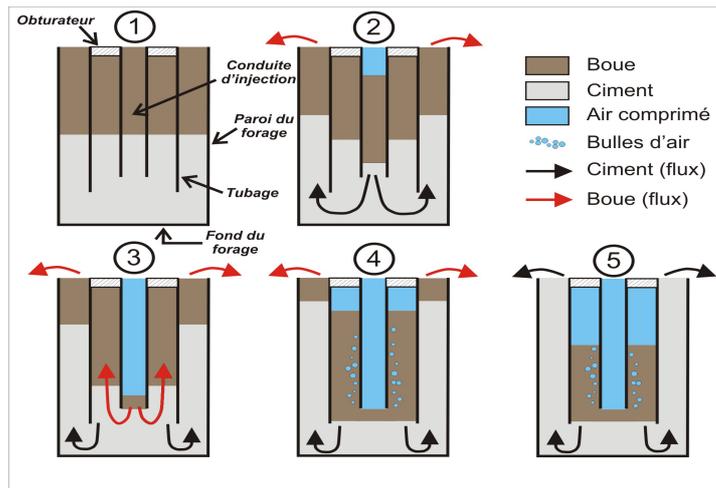


Figure 2.22. : Une des méthodes recommandées pour la cimentation des tubages de forage. Le ciment doit toujours être mis en place de bas en haut pour éviter des irrégularités. Placement d'une colonne de cimentation avec packer en haut de la colonne contre le tubage. Le pied de la colonne est légèrement en retrait du sabot du tubage. Le ciment est déversé dans la colonne et remonte dans et hors du tubage. Avant la prise, on injecte dans la colonne de l'eau ou de l'air sous l'espace entre le

2.5.6. Les sondages obliques

On est appelé à faire des sondages dans des positions souvent différentes de la verticale. Ce peut être en raison de la position subverticale de couches géologiques (fig 2.23) ou simplement en fonction de la géométrie de sous-sol ou de fondations. En milieu urbain, les sondages sont souvent dans des positions particulières. La plupart des machines permettent maintenant de très grand degrés de liberté dans le positionnement de l'axe du sondage. La position non verticale nécessite des moteurs puissants pour assurer la rotation et les manœuvres en raison des frottements. Des déviations assez importantes sont à prévoir.

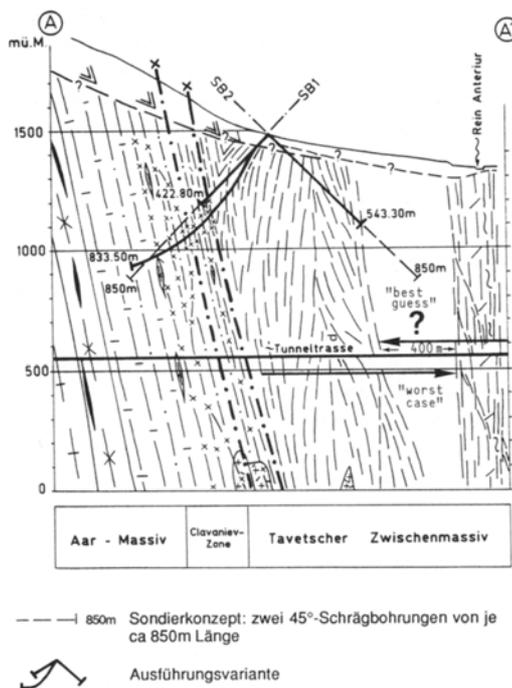


Figure 2.23. : Exemple des deux sondages obliques de Sedrun pour reconnaître les séries subverticales du massif du Tavetsch sur l'axe du tunnel de base du Gotthard. Tiré de Schneider.

2.5.7. Le prélèvement d'échantillons

Le prélèvement d'échantillons pour une identification et des essais en laboratoire se doit de respecter le mieux possible les conditions en place. Pour tronçons de carotte que l'on a choisi de tester, on isole l'échantillon au sortir du carottier dans un papier en aluminium puis en l'immergeant dans un bain de paraffine. Le terrain conserve ainsi son intégrité mécanique et sa teneur en eau. On pourra ainsi mesurer in vitro les trois paramètres fondamentaux sur les parts relatives de solide, d'eau et d'air : le poids spécifique apparent humide, le poids spécifique du squelette et la teneur en eau. Ces trois mesures permettent ensuite de déduire tous les autres facteurs décrivant ces parts, comme le poids spécifique apparent sec, la porosité, la teneur en eau etc (voir cours de Géologie de l'ingénieur de 3^e année UNIL). Divers essais en laboratoire peuvent également être effectués sur ces échantillons : granulométrie, limites d'Atterberg, perméabilité, résistance au cisaillement etc.

2.5.8. Les observations utiles du sondeur

Le chef sondeur rédige un rapport journalier de sondage dans lequel il note toutes les manœuvres de carottiers et du tubages. Il décrit également dans des termes pragmatiques les terrains rencontrés ainsi que ses observations sur les venues d'eau ou les pertes d'eau. Il rapporte les prises d'échantillons et les éventuels essais qui lui ont été demandés. Il mentionne aussi les zones où il rencontre des difficultés à recueillir une carotte (récupération), les instabilités du fond de forage etc. Il reporte en général le niveau d'eau dans le forage en début de poste.

Le rapport est donc un document hautement intéressant pour le géologue et qui lui est indispensable pour rédiger son propre profil géologique. Il est utile que la Direction des travaux communique exactement au sondeur ce qu'il doit noter, notamment sur les essais effectués ainsi que sur l'équipement du sondage. Il est vivement recommandé d'exiger qu'un rapport téléphonique journalier soit fait à la Direction des travaux afin que le géologue puisse être présent sur le chantier aux moments les plus judicieux (voir Exercice 2.1).

2.6. Les sondages par carottier battu

Une alternative très intéressante au sondage carotté en rotation est le sondage carotté battu par un mouton hors-trou (fig 2.24). Ce système offre l'avantage du pénétromètre (comptage du nombre de coups pour descendre d'une tranche de 10 cm) et d'un carottage d'excellente qualité en terrains meubles, par l'absence du dérangement dû à la rotation de l'outil. On utilise des carottiers doubles à deux héli-cylindres, qui s'ouvrent longitudinalement. On accède ainsi à l'échantillon avec le minimum de perturbation pour l'entrer et pour le sortir.

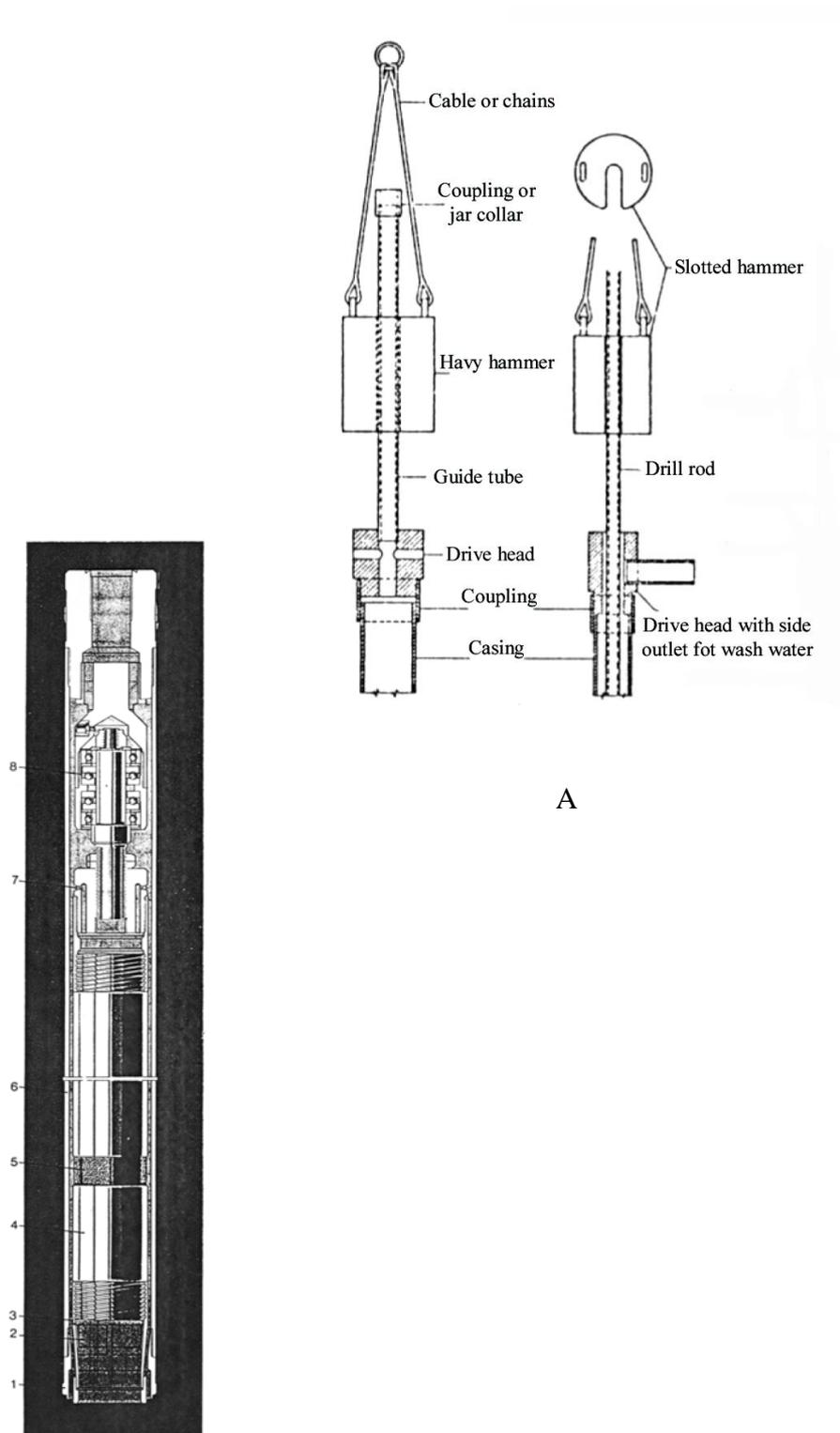


Figure 2.24. : A : dispositif de battage au mouton. B : Carottier double hémi-cylindrique   trousses coupante repoussant le terrain vers l'extérieur, pour le prélèvement de la carotte sans devoir la chasser du tube par l'extrémité.

Cette technique est sans conteste la meilleure en terrains meubles pour collecter les échantillons les moins remaniés. Elle est inadaptée aux terrains riches en blocs, aux moraines très dures et bien entendu au rocher. Elle est utilisée surtout dans les reconnaissances pour fondation en terrain meuble.

2.7. Les forages au marteau

La plupart des forages en destructif à faible profondeur sont faits par roto-percussion. Pour les forages de petit diamètre, le marteau est placé en tête de train de tiges. Pour ceux qui dépassent 90 mm de diamètre, on peut placer le marteau en fond de trou, ce qui améliore la transmission de la force d'impact sur le rocher. On utilise de l'air, de l'eau ou de la boue pour évacuer les débris à la surface.

2.7.1. Marteau hors-trou

Les forages de quelques centimètres de diamètre sont extrêmement fréquents pour les travaux de minage, que ce soit en front de carrière ou pour le minage des fronts d'attaque dans les tunnels. Dans ce dernier cas, ce sont des foreuses à multi-bras orientables que l'on appelle «Jumbo» (fig 2.25). On les utilise aussi beaucoup pour les travaux de boulonnage en travaux souterrains. Les marteaux sont hydrauliques et ont de très grands rendements d'avancement. Les jumbo les plus modernes forent plus de 200 m à l'heure par opérateur.

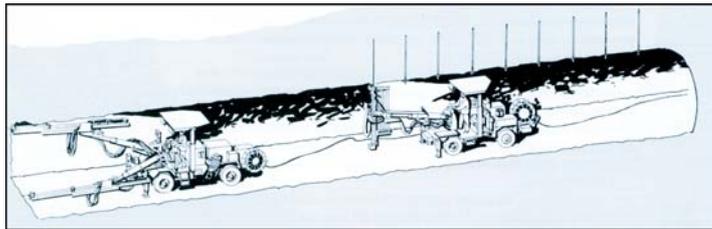


Figure 2.25 A

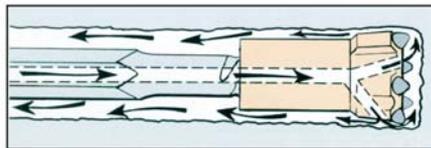


Figure 2.25 B

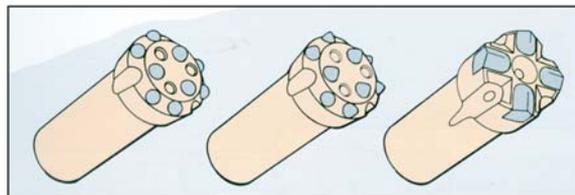


Figure 2.25 C

Figure 2.25. : A : Jumbos équipés de marteaux hydrauliques hors-trou. Le jumbo de gauche procède à la foration des trous de minage du tunnel. Le second stabilise la voûte par une opération de boulonnage. B : l'air pénètre par les barres et est évacué vers l'extérieur du trou. C : les taillants sont soit des plaquettes de carbure de tungstène, soit des boutons sphériques ou de forme balistique. Documentation Atlas Copco.

2.7.2. Marteau fond-de-trou

Lorsque le diamètre est suffisant, on place le marteau directement derrière l'outil, d'où l'appellation « fond de trou ». Ceci permet d'éviter la déperdition d'énergie par flambage des tiges. L'outil de démantèlement du terrain est un plateau muni de boutons en carbure de tungstène.

La possibilité de tuber à l'avancement la partie du forage en terrains meubles fait de cette technique la plus pratiquée à moyenne profondeur (fig 2.26).

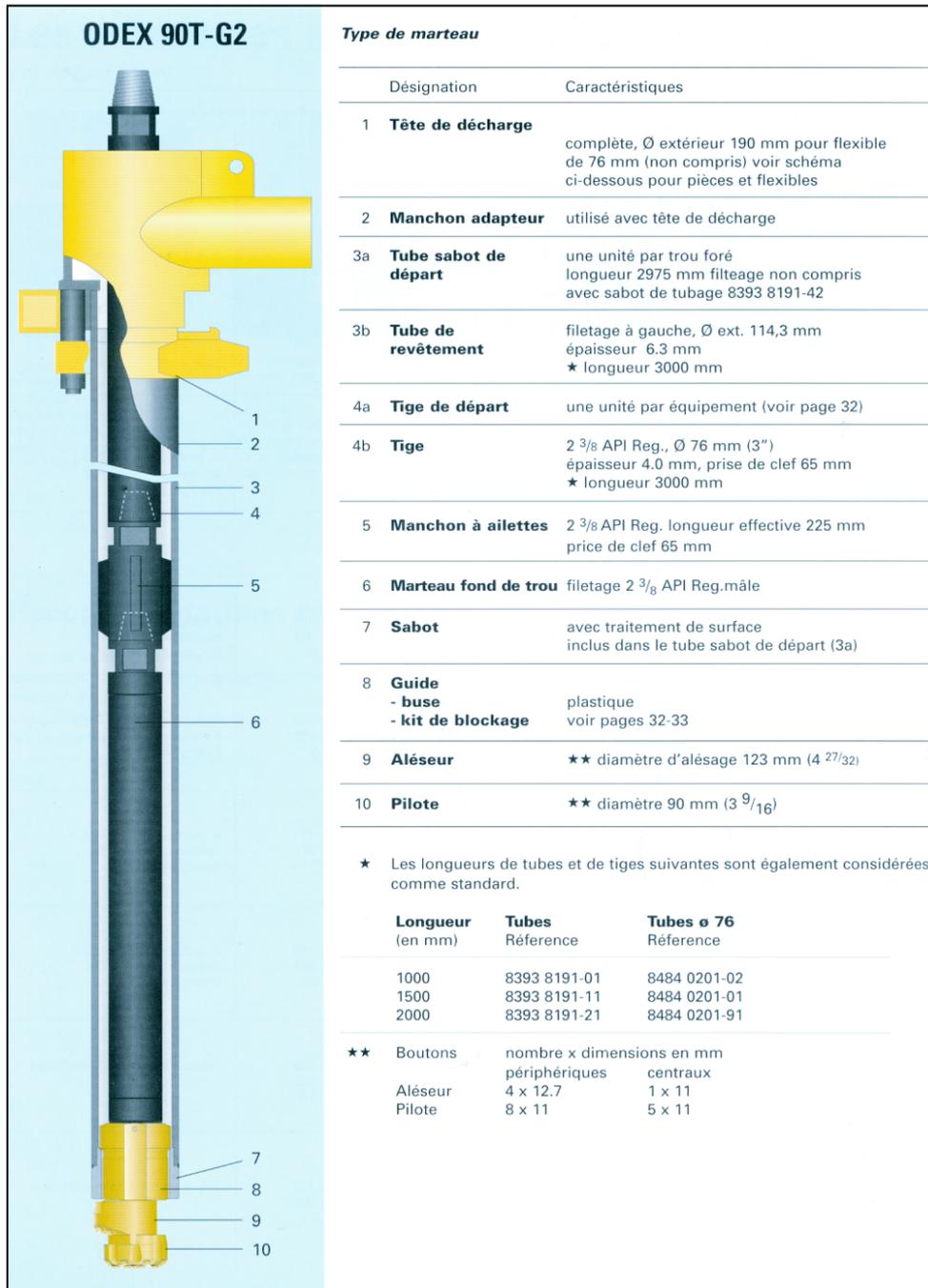


Figure 2.26. : Marteau fond de trou de type Odex comprenant un excentrique d'alésage et un tubage suivant l'aléueur. Pour ressortir l'outil en laissant le tube en place, une simple anti-rotation esquivé l'excentrique et le tout remonte dans le tubage. Documentation Atlas Copco.

Avec la technique Odex, l'outil peut être retiré laissant le tubage en place au droit des terrains meubles (fig 2.27)

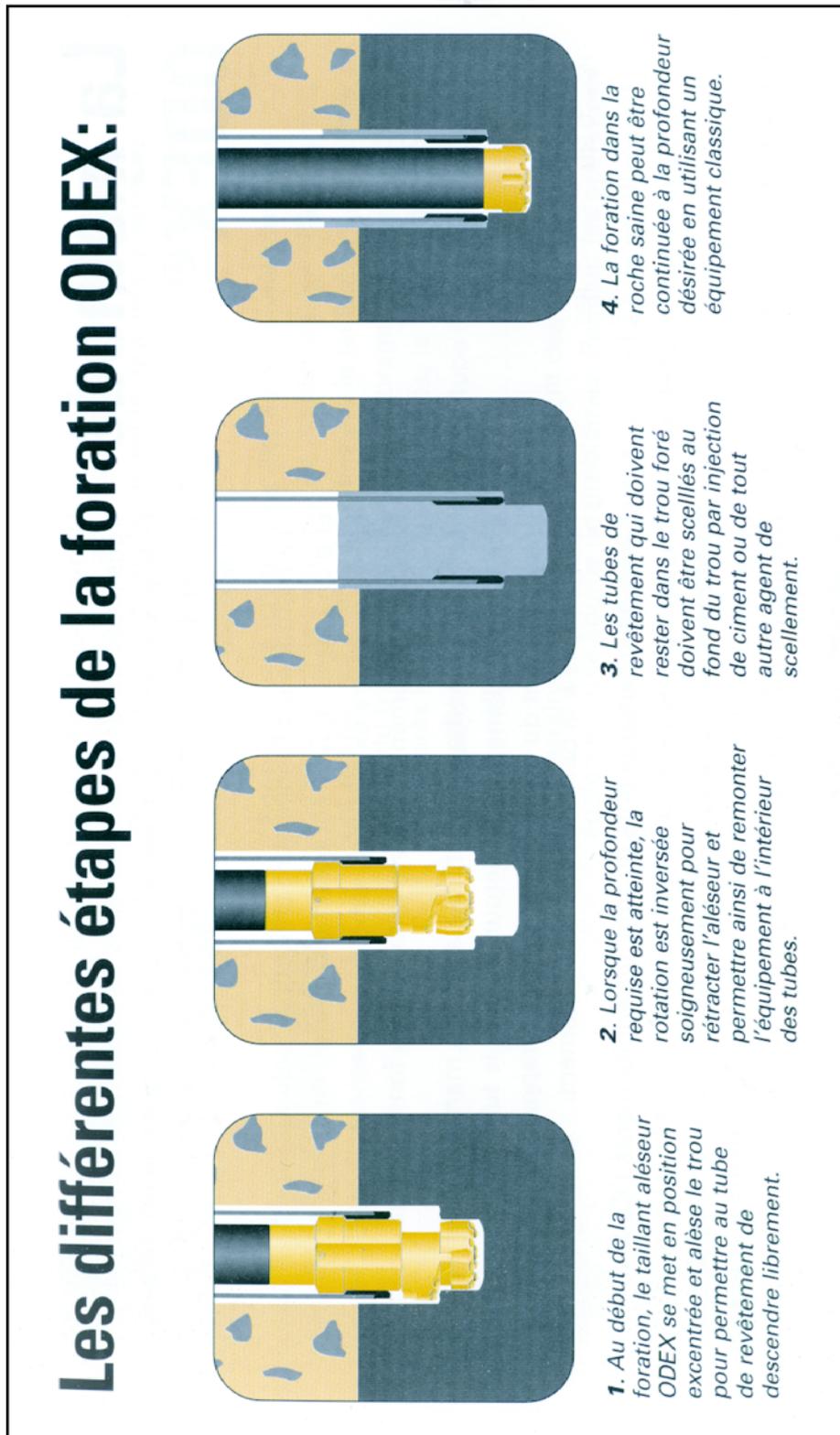


Figure 2.27. : Les 4 étapes du forage avec le système Odex. Documentation Atlas Copco.

Les marteaux fond-de-trou avec tubage existent pour des diamètres allant de forage allant de 120 à 300 mm (fig 2.28).

La gamme ODEX G2					
Dimensions en mm (*)					
Marteau adapté	Tiges de forage	Diamètre du pilote	Diamètre alésé	Dimensions de tubes préconisées	
				Tubes à souder	Tubes filetés
ODEX pour marteaux hors du trou					
ODEX 76	R38	70	96	ϕ extérieur = max. 89 ϕ intérieur = min. 78 épaisseur = min. 4.5	ϕ extérieur = max. 88.9 épaisseur = 5.5 filetage à droite
ODEX 90	R32 R38 T38	90	123	ϕ extérieur = max. 115 ϕ intérieur = min. 102 épaisseur = min. 5	ϕ extérieur = 114.3 épaisseur = 6.3 filetage à gauche
ODEX 115	T45 T51	115	152	ϕ extérieur = max. 142 ϕ intérieur = min. 128 épaisseur = min. 5	ϕ extérieur = 139.7 épaisseur = 5.8 filetage à gauche
ODEX pour marteaux fond de trou					
ODEX 90 COP 32, 34 MACH 303* IR 3.5*	76	90	123	ϕ extérieur = max. 115 ϕ intérieur = min. 102 épaisseur = min. 5	ϕ extérieur = 114.3 épaisseur = 6.3 filetage à gauche
ODEX 115 COP 34, 42, 44 DHD 340A, DH4 A 34-15, SD4 SECOROC 4"	76 89	115	152	ϕ extérieur = max. 142 ϕ intérieur = min. 128 épaisseur = min. 5	ϕ extérieur = 139.7 épaisseur = 5.8 filetage à gauche
ODEX 140 COP 44, 52, 54 DHD 350R, DH5 A 43-15, SD5 SECOROC 5"	89	140	181	ϕ extérieur = max. 171 ϕ intérieur = min. 157 épaisseur = min. 5	ϕ extérieur = 168.3 épaisseur = 6.3 filetage à gauche
ODEX 165 COP 54, 62, 64 DHD 360, SF6, DH6 A 53-15, SD6 SECOROC 6	114	165	209	ϕ extérieur = max. 196 ϕ intérieur = min. 183 épaisseur = min. 5.5	ϕ extérieur = 193.7 épaisseur = 6.3 filetage à gauche
ODEX 190 COP 62, 64, 84L DHD 360, SF6, DH6 A 53-15, SD6, A63-15 SECOROC 8"L	114	190	237	ϕ extérieur = max. 222 ϕ intérieur = min. 205 épaisseur = min. 6.3	Tubes vissés non disponibles
ODEX 240 COP 84L, 84HP DHD 380, A 63-15 SD-8 *) = non standard	114	240	306.5	ϕ extérieur = max. 273 ϕ intérieur = min. 260 épaisseur = min. 6.3	Tubes vissés non disponibles

Figure 2.28. : Les différents diamètres de forage possibles avec les marteaux hors-trou et fond-de-trou de Atlas Copco.

La technique au marteau fond-de-trou nécessite de gros générateurs d'air comprimé pour alimenter le marteau pneumatique. Comme la pression de l'air à la sortie du marteau doit être supérieure à la pression d'eau dans le forage, on peut difficilement travailler sous une charge supérieure à 200 m d'eau environ.

Le forage au marteau fond de trou est peu déviant. Il est beaucoup utilisé dans la construction des captages à drains rayonnants ou pour relier des fonds de puits de drainage par un exutoire gravitaire unique. Dans ce dernier cas, le contrôle de la déviation est primordial.

2.8. Les forages au rotary

Cette technique dérivée de l'industrie du pétrole s'impose pratiquement pour les terrains profonds où le sondage carotté s'avère trop coûteux et où le marteau fond de trou devient inopérant. L'avancement est réalisé par rotation au moyen d'outils destructifs : tricônes pour roches dures, trépan à lames pour roches tendres (fig 2.29). Le trou n'est pas tubé. Les débris sont évacués par une circulation puissante de boue à base de bentonite thixotropique à haute viscosité (smectite traitée industriellement). La boue en surcharge par rapport à la pression des eaux souterraines crée en s'infiltrant dans la roche un cake sur les parois du trou, ce qui tend à tenir les parois mais aussi à les imperméabiliser.

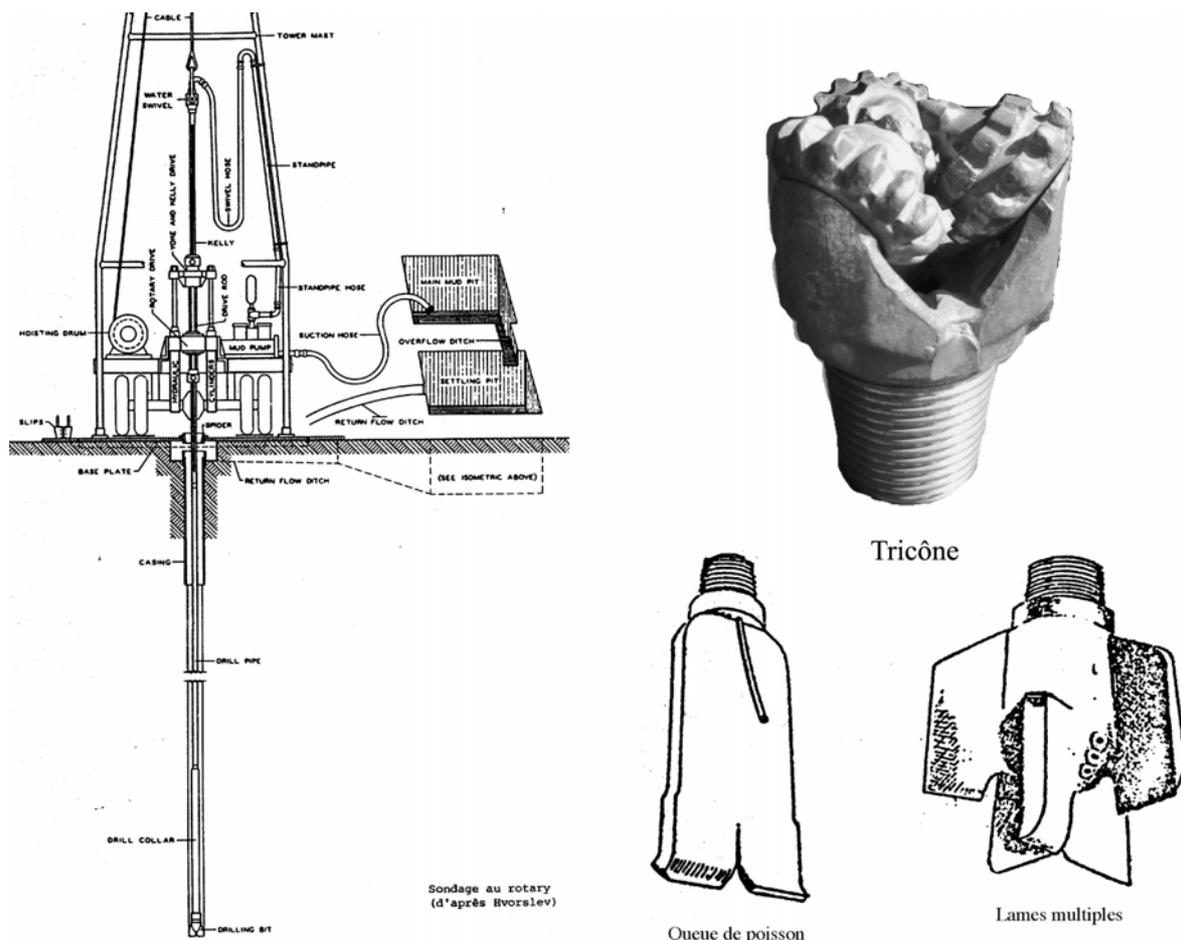


Figure 2.29. : Agrégat de forage au rotary et exemple d'outils de coupe pour terrains meubles (lames) et rocher (tricône). Tiré en partie de Hvorslev.

Les fonctionnalités de la boue sont multiples (fig 2.30). Le choix de la boue qui répond à tel contexte géologique, hydrogéologique et hydrochimique est très délicat. La boue est constamment surveillée en cours de forage pour observer toute modification non souhaitable de sa composition (viscosité, densité, chimie).

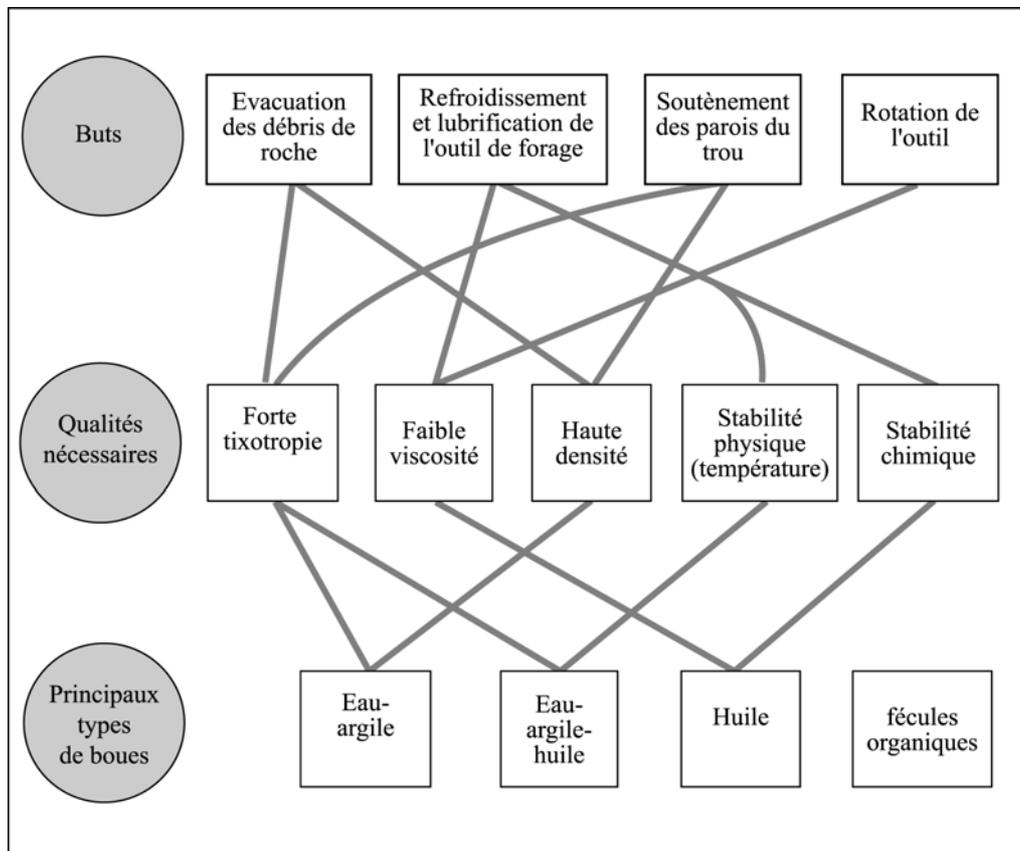


Figure 2.30. : Les différents types de boues de forage et leurs propriétés. Les boues contenant de l'huile ne sont pratiquement pas utilisées en géologie de l'ingénieur pour des raisons environnementales

La technique de forage au rotary à la boue est très performante et rapide. Elle présente toutefois quelques désavantages :

- L'identification géologique est mauvaise, surtout dans les terrains granulaires (voir § 3.2)
- Désavantage lié à la boue. Celle-ci, en plus du cake, pénètre sur une certaine distance dans les pores des formations aquifères créant un colmatage (fig 2.31). Ceci est très gênant pour toutes les applications hydrogéologiques, notamment pour des essais de pompage. Avant un tel test, il faut arriver efficacement à décolmater ces pores ce qui n'est pas toujours facile. Une fois un tube perforé mis en place, les opérations de décolmatage vont consister à créer une alternance de dépressions par air lift et de mises en pression pour déstabiliser les particules de boue dans les pores. On essaie de remplacer les boues à l'argile par des boues aux fécules organiques, par exemple la boue REVERT de Johnson. Celles-ci offrent des possibilités intéressantes : biodégradabilité, modification des propriétés de la boue en cours d'opération (fig 2.32). Mais elles assurent assez mal la stabilité du trou. Lorsque l'on a des doutes sur la stabilité du trou, on mélange un peu de bentonite dans la boue organique.
- Instrumentation du trou difficile sans tubage : par exemple création de bouchons d'étanchéité autour d'un équipement.

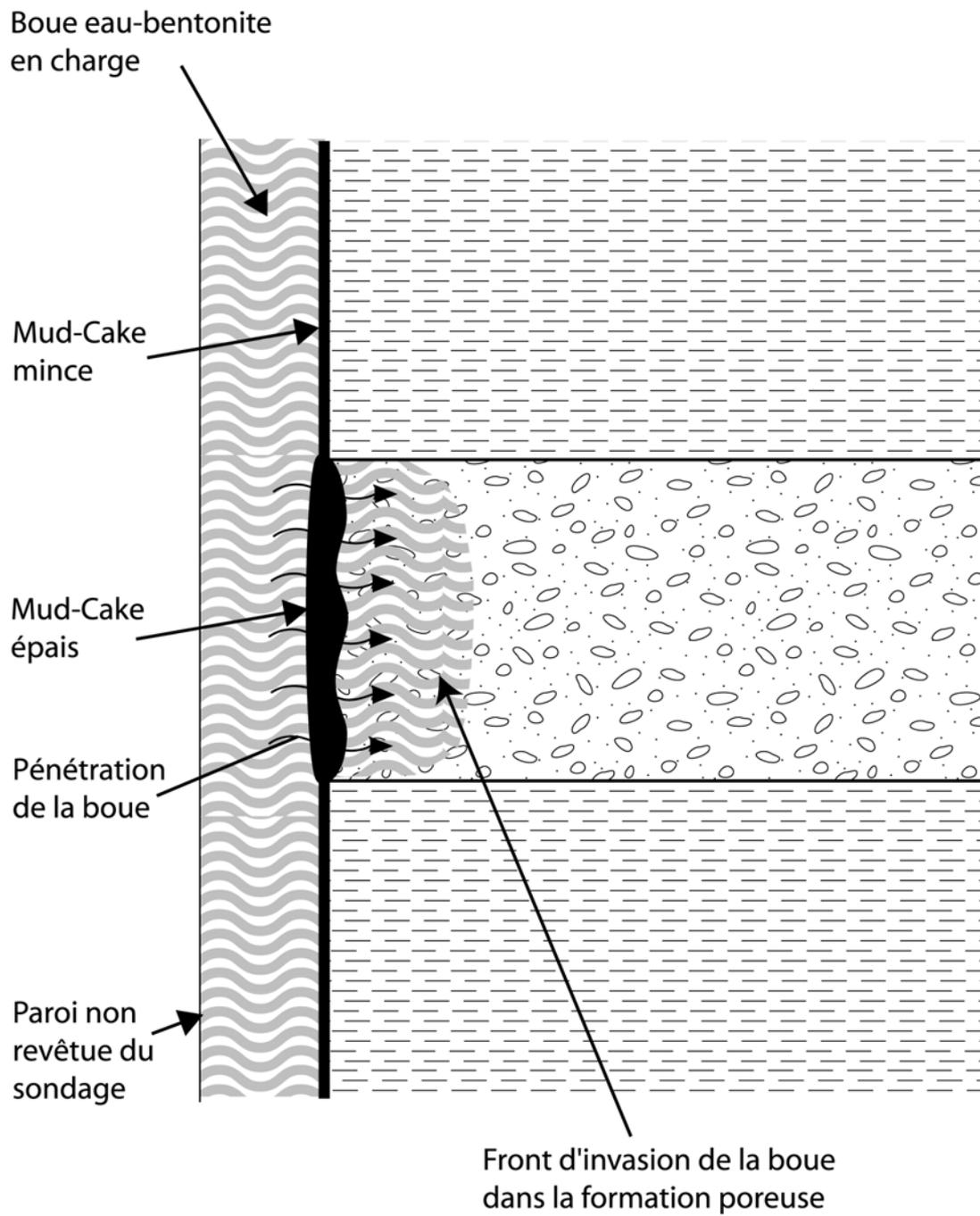
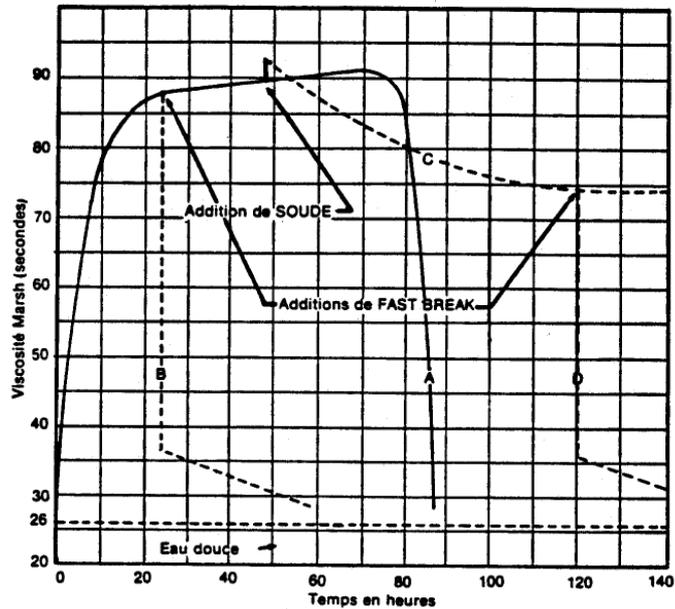


Figure 2.31. : Invasion des formations poreuses par la boue et formation du mud-cake



La viscosité d'une boue au REVERT peut être, à volonté, prolongée par des additions de soude ou brusquement rompue par des additions de Fast Break (boue à 8 kg de REVERT par m³)

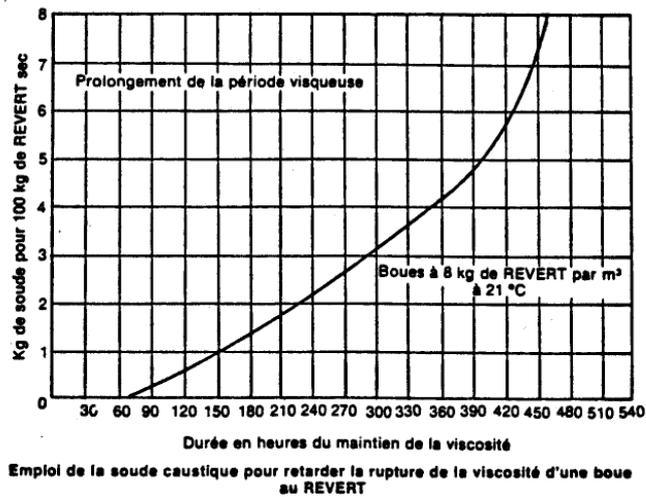


Figure 2.32. : Comportement de la boue organique REVERT en fonction des additifs mélangés à la boue. Graphique montrant l'évolution de la viscosité d'une boue (8 kg/m³ à 21°C) au cours du temps (ligne A pleine). L'acquisition de la viscosité pleine prend quelques heures. La boue perd naturellement sa viscosité après 80 heures par minéralisation de la féculé par les bactéries. L'ajout d'un produit dénommé Fast Break fait chuter immédiatement la viscosité (lignes B et D) par destruction chimique irréversible de la féculé. Au contraire, l'ajout de soude caustique bactéricide prolonge la durée de la phase visqueuse de la boue (ligne C) en retardant sa minéralisation biochimique. Documentation Johnson

La société Stump SA a développé une technique de sondage au rotary tubé à circulation inverse (fig 2.33). Le sondage contient deux tubes coaxiaux : l'un qui sert de tubage, l'autre qui remonte le matériel. L'air est injecté dans l'espace annulaire et remonte par le tube intérieur. Les cuttings sont récupérés et sédimentés dans une colonne qui est sensée donner un profil géologique du sondage (fig 2.33).

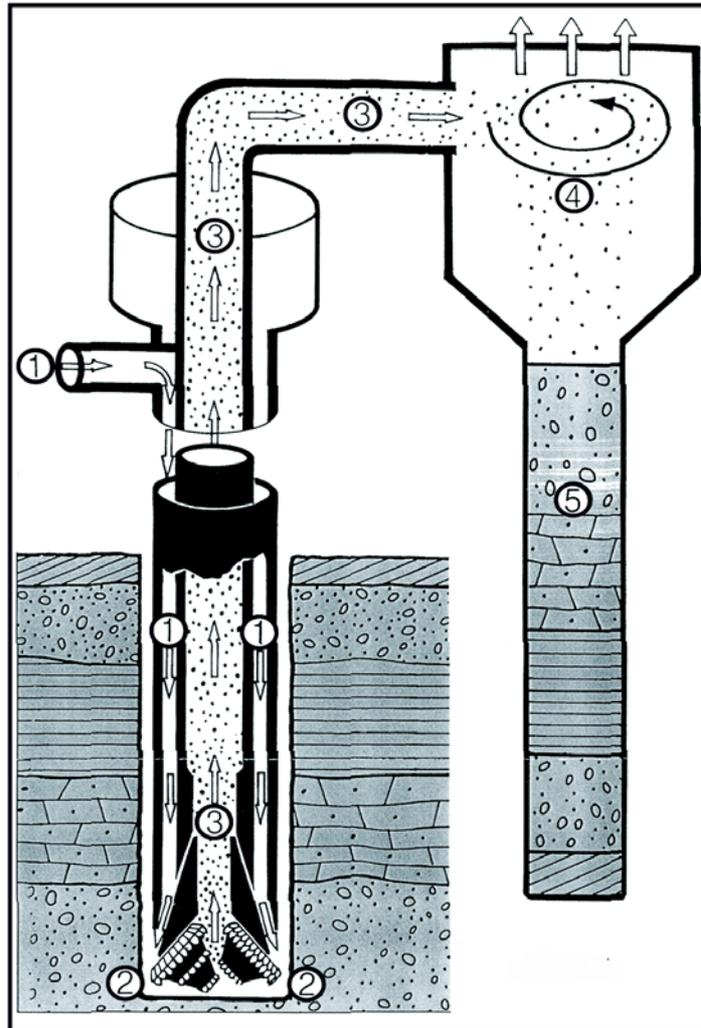
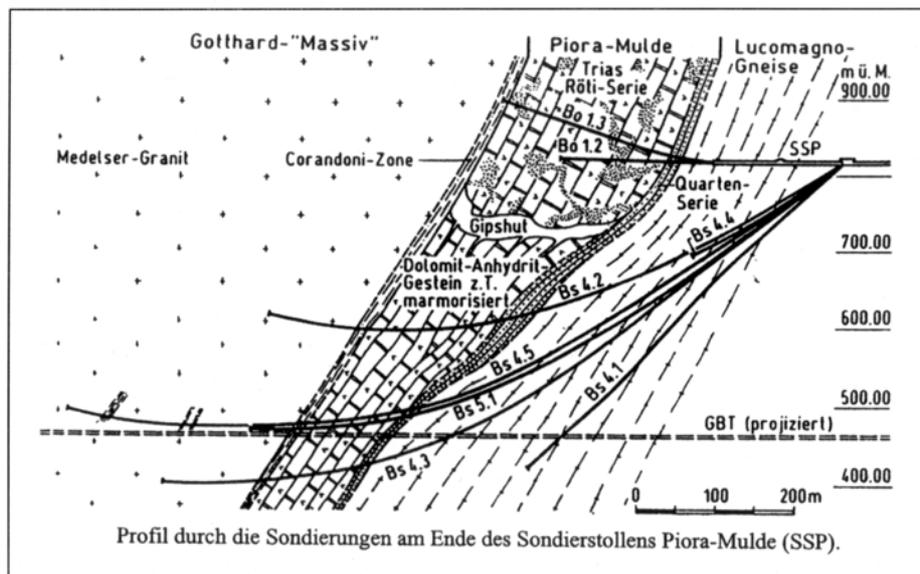


Figure 2.33. : Système rotary tubé à circulation inverse (Reverse Circulation) de Stump SA. 1 : injection de l'air comprimé. 2 : trépan rotatif refroidi par l'air. 3 : entraînement des cuttings par l'air dans le tube intérieur. 4 : cyclone séparant les cuttings de l'air. 5 : colonne en plastique transparent pour la sédimentation des cuttings. Documentation Stump.

2.9. Les sondages déviés

Le pilotage des forages profonds a fait de grand progrès ces dernières décennies. De plus en plus d'applications ont utilisé cette technique. En géologie de l'ingénieur, on arrive maintenant à commencer un sondage verticalement et à le faire ensuite obliquer de 90° pour qu'il suive le tracé horizontal prévu pour un tunnel. Un bel exemple de cette technologie est l'étude du franchissement de la Piora Mulde sur l'axe du tunnel de base du Gothard (fig 2.34).



GOTHARD BASIS TUNNEL - ZONE DE PIORA - FORAGES D'EXPLORATION

Figure 2.34. : Sondages déviés de la Piora Mulde, tunnel de base du Gothard. Les sondages sont effectués obliquement à partir de la galerie de reconnaissance et sont déviés pour suivre le parcours du futur tunnel quelque 350 m au-dessous.

Les expériences faites dans les Alpes franco-italiennes avec des sondages dirigés très profonds pour le projet de tunnel du Mont-Cenis laissent toutefois un certain doute sur le rapport coût performance de tels sondages dirigés. Leur coût a été tellement élevé que l'on se demande s'il n'aurait pas été plus judicieux de procéder directement à une galerie de reconnaissance.

2.10. Les puits

Nous terminons cette revue des techniques de sondage par des excavations de plus grand diamètre : les puits. Ceux-ci sont moins fréquemment utilisés comme méthode de reconnaissance que des sondages de petit diamètre. Cependant, en pratique, il arrive que l'on reconnaisse le sous-sol d'une zone par cette technique, soit que l'on ait pas jugé utile de faire déjà des sondages ordinaires, soit que les diamètres exigés nécessitent tout de suite de telles creuses, soit encore que l'on veuille observer en détail la géologie en profondeur et que le géologue puisse le faire en descendant dans le puits.

2.10.1. Les puits tubés

Ce sont les puits effectués généralement pour la prospection hydrogéologique et dans lesquels on réalise des essais de pompage à gros débit. En terrains quaternaires, ces ouvrages de diamètre en général supérieur à 1 m sont creusés par la technique Bénoto. On descend un tubage par un

système de louvoyant hydraulique qui s'appuie sur une lourde excavatrice à câble (fig 2.35). Parallèlement, la machine excave le terrain dans le tubage avec un grappin cylindrique à coquilles. Dans les terrains compacts, on s'aide d'un lourd trépan qui est lâché répétitivement depuis le haut du tubage sur le fond. On télescope le tubage tous les 25 m environ. Le puits une fois excavé est muni de son équipement, puis le tubage est retiré.

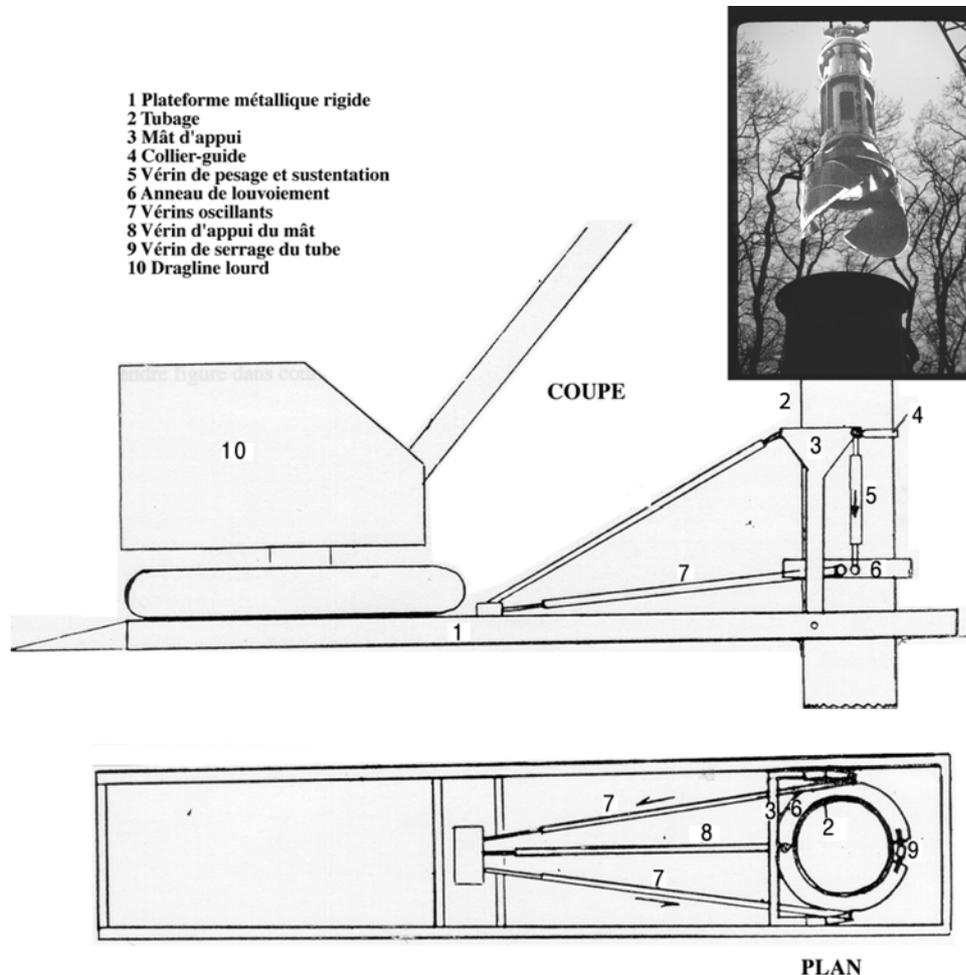
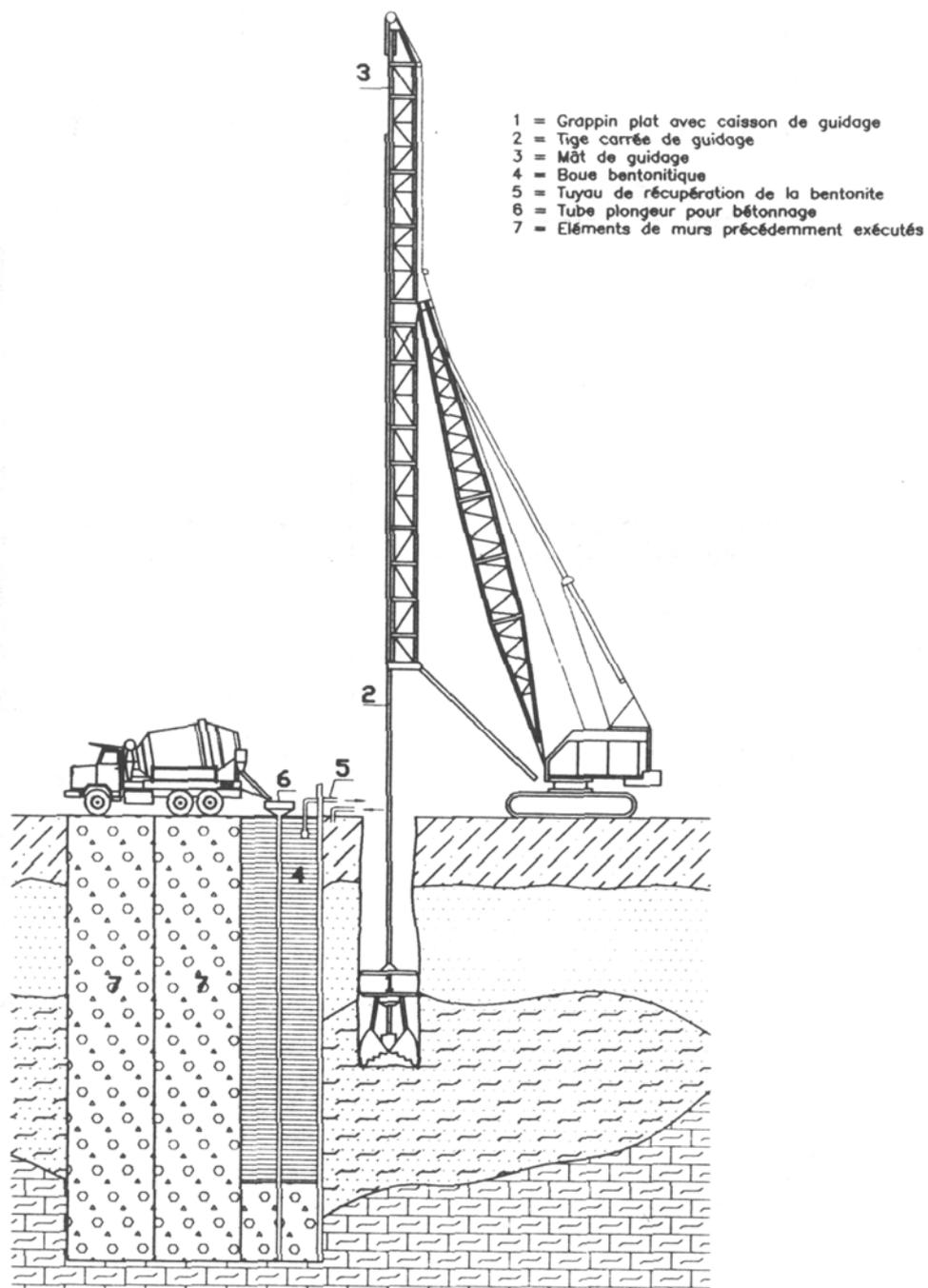


Figure 2.35. : Creusement des puits tubés par la technique Benoto.

2.10.2. Les puits non-tubés

Le creusement de puits sans tubage fait appel à des techniques de forage de pieux de fondation et des parois moulées (fig 2.36). L'excavation est faite par une excavatrice à grappin ou une grosse tarière dans un bain de bentonite. La boue est maintenue en surcharge comme dans les sondages au rotary. L'appui de la boue et la formation du cake maintient les parois du trou. Il est possible de prendre des échantillons dans le grappin ou la tarière et les étudier après lavage de la boue. Ces puits sont plus des techniques de construction que de reconnaissance. Toutefois il est utile de les utiliser aussi comme tels pour mettre en évidence des variations structurales qui n'ont pas pu être mises en évidence par les sondages d'étude.



Paroi moulée dans le sol (phases d'exécution)

Figure 2.36. : Le creusement de puits sous bentonite est exécuté comme l'excavation d'une paroi moulée telle que représentée ici. Le grappin et le guide de puits sont simplement cylindriques au lieu d'être rectangulaires. Le bétonnage peut être remplacé par une colonne filtrante ou tout autre équipement. Tiré de Kurtz.

2.10.3. Les puits de grand diamètre

Des puits de reconnaissance de plus de 2 m de diamètre sont effectués par les méthodes d'excavation traditionnelle pour pouvoir examiner mieux que dans un sondage les conditions géologiques. C'est le cas en particulier dans des glissements de terrain où le géologue doit pouvoir investiguer des plans de glissements très ténus et fragiles qu'une sondeuse n'arriverait pas forcément à conserver. Le puits est alors creusé à sec (pompe en fond de puits) au grappin, par minage du rocher (fig 2.37). Il est bétonné par segment en place après le relevé du géologue. Cette technique n'est possible que dans des terrains peu sensibles à la liquéfaction et peu aquifères.

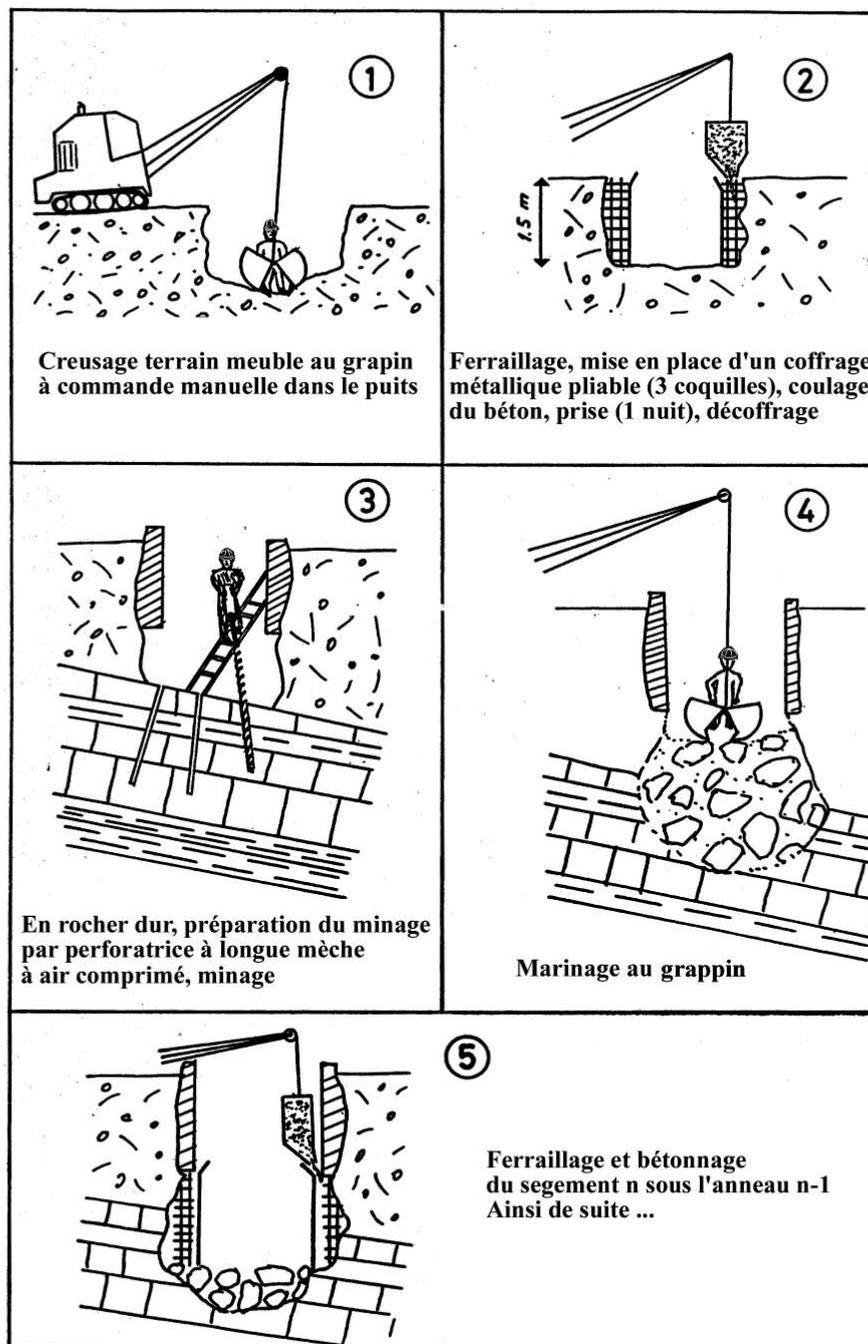


Figure 2.37. : Creuse des puits de gros diamètre en milieu peu aquifère.

Cette technique a été utilisée pour la reconnaissance du glissements de Converney sur l'auto-
route du Léman (fig 2.38).

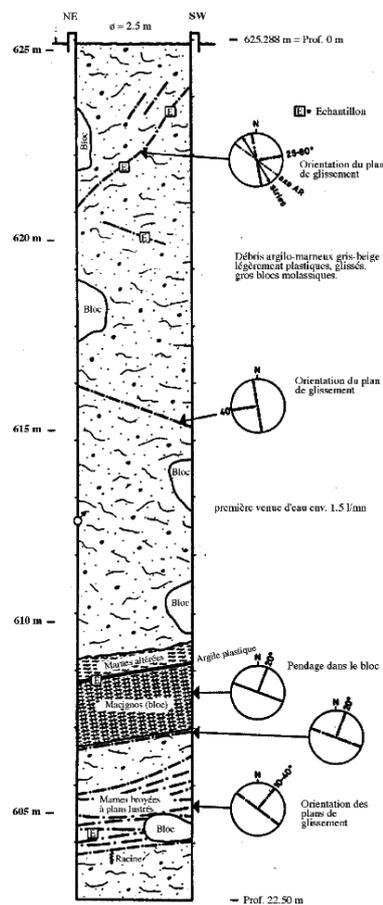
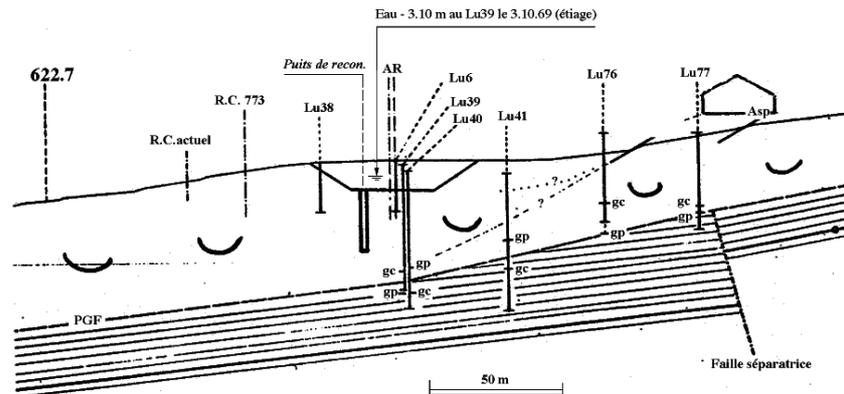


Figure 2.38. : Puits de reconnaissance dans le glissement de Converney, autoroute du Léman, communes de Belmont et Lutry. Le relevé géologique de détail effectué durant la creuse a permis de comprendre la structure du glissement, l'orientation des surfaces de glissement etc

2.11. Synthèse comparative des techniques de sondage

Il est possible maintenant de faire un bilan des principales caractéristiques des diverses techniques décrites dans ce cours, de tirer les avantages et désavantages de chacune d'entre elles. Cette synthèse est donnée dans le tableau 2.2

Sondages destructifs			Sondages carottés			Tarières	Pénétromètre	Fouilles à la pelle mécanique	Sondage de reconnaissance en génie civil : + = oui - = non B = bon S = satisfaisant M = mauvais I = impossible
au rotary	par chasse d'eau	par percussion	par rotation	par poussage	par percussion				
+	-	+	+	-	-	-	-	-	Possibilité de forer des roches cohérentes
M	M	M	B	B	B	S	I	B	Identification géologique directe
I	I	I	S	B	B	I	I	I	Structure géologique
M	M	B	B	B	B	S	B	B	Précision sur la profondeur des contacts
I	I	S	B	B	B	S	I	B	Echantillons pour analyse granulométrique
I	I	I	S	B	B	M	I	B	Echantillons pour perméamètre
Le + Lu	Le + Lu	Le + Lu	Le + Lu	Le	Le	P	P	P	Essai d'eau en forage (P = Porchet, Le = Lefranc, Lu = Lugeon)
+	+	+	+	+	+	+	-*	-	Possibilités de diagraphies géophysiques
900-300	100-600	100-600	60-170	60-150	60-170	40-500	40	1000-2000	Diamètres usuels (mm)
>500	500	2000	100	30	50	30	10	5	Profondeur maximale courante (m)
-	-	+	+	+	+	+	+	+	Sondage à sec
+	+	+	+	-	-	(+)	-	-	Sondage à l'eau
+	(+)	-	-	-	-	-	-	-	Sondage à la boue
B	S	B	S	I	M	M	I	B	Capacité de forer les graviers grossiers
S	S	S	S	S	S	S	B	B	Accessibilité sur le terrain
M	S	S	B	B	B	B	B	S	Incidence sur l'environnement
>100	50-500	500-2000	5-100	5-30	5-50	5-30	0-10	0-5	Domaine de rentabilité (m)
50'000 (300 m)			2'500 (50 m)	2'500	2'500	2'000	200	200	Coût de l'installation du chantier ¹ (profondeur maximale)
7'000 (300 m)			1'000	1'000	1'000	500	100	0	Coût de l'installation sur le forage ¹ (profondeur maximale)
200 / 50 : 400 200 / 100 : 500 200 / 200 : 800 200 / 300 : 1'000 petite machine : 140 / 20 : 110			140 / 15 : 250 120 / 50 : 500 100 / 100 : 1'000		140 / 15 : 250 120 / 50 : 500	200	100	30	Coût du mètre de forage ¹ (diamètre / profondeur : prix)
	Méthode ancienne	Méthode ancienne					* sauf pénétromètre à électrodes		Remarques : ¹ Prix approximatifs en FS.-

Tableau 2.2. : Synthèse comparative des différentes techniques de sondages.

Ce tableau donne également des ordres de grandeur de prix pour les méthodes les plus utilisées, ce qui permettra de connaître immédiatement l'ordre de grandeur du coût entreprise d'une campagne de sondage.

3. Le relevé géologique exhaustif des échantillons

L'accent principal de ce chapitre est mis sur l'examen des échantillons non remaniés, donc les carottes. Nous tenons cependant à donner également quelques notions sur le relevé géologique dans le cas des sondages destructifs. En effet, dans certains pays les sondages carottés sont très peu utilisés au profit des sondages destructifs.

3.1. Sondages carottés

Nous produisons en annexe à ce cours un livret-guide sur le relevé des sondages carottés. L'ensemble des points à considérer y figure de manière condensée et résumée. Il est l'instrument de base de l'exercice de relevé sur carottes contenu dans ce cours (exercice 4.3 St-German).

Dans le présent chapitre, nous traitons de manière plus complète les facteurs propres aux identifications en sondage ainsi que les précautions indispensables à un relevé de qualité.

3.1.1. A connaître avant de faire le relevé

Il est fondamental que le géologue qui procède au relevé de carottes de sondage soit conscient d'un certain nombre de difficultés qui sont propres à la technique de sondage et dont l'ignorance peut le conduire à des observations incomplètes voire à des interprétations erronées.

Pellicule remaniée autour de la carotte

Dans les terrains meubles contenant de l'argile ou des limons, la carotte est emballée dans une matrice boueuse qui oblitère complètement la nature du terrain carotté (fig 3.1). Cette matrice provient du cisaillement qui se produit au contact de la carotte et du tube carottier. Son épaisseur dépasse fréquemment un centimètre. La coupe géologique paraît a priori parfaitement monotone.



Figure 3.1. : Photo d'une carotte dans une série glacio-lacustre à laminations millimétriques des Losiardes, Claie-aux-Moines. La carotte non pelée est recouverte de boue et les laminations sont complètement masquées. On observe également sur le bord des laminations les crochets de déformation dus à la pénétration dans le carottier.

Le premier travail consiste à peler la carotte avec un couteau afin d'arriver en contact avec le terrain véritable.

C'est là que ressortent toutes les caractéristiques précieuses servant à l'identification du terrain. Combien de kilomètres de carottes ont été relevées sans cette précaution élémentaire ? Combien de mesures au pénétromètre de poche ont-elles été faites dans cette couche sans signification ? Il est difficile de chiffrer l'ampleur de ce gaspillage d'information mais notre expérience montre qu'il est très important.

Déformation artificielle des structures sédimentaires meubles

La couronne en tête du carottier use effectivement les roches et en évacue les débris sur les côtés. Dans les terrains meubles faiblement résistants, la couronne agit en fait comme un coin qui pousse le matériel de part et d'autre. Les prismes Widia étant disposés à l'extrémité extérieure du tube porteur de la couronne, la majeure partie du terrain est poussée vers l'intérieur, donc vers le carottier. Comme le diamètre du carottier est légèrement inférieur à celui de la couronne, le bord du terrain est replissé en forme de soucoupes convexes dans le carottier (fig 3.1).

Lorsque le sondeur extrait le carottier du sondage, la manœuvre exerce un effet de succion et de pompage de l'eau souterraine. Dans le cas de sédiments peu perméables, le gradient de potentiel au fond du sondage est extrêmement élevé car la chute de potentiel se fait sur une très petite zone. La poussée hydrostatique et les forces de percolation peuvent entraîner ainsi des déformations de la structure naturelle du sédiment. Lorsque ceux-ci sont cohésifs, c'est une déformation plastique sous la forme de plis (fig 3.2). Lorsque ce sont des sables fins ou des limons sans argile, on obtient souvent une rupture par claquage du fond du sondage et une destruction complète des structures sédimentaires.

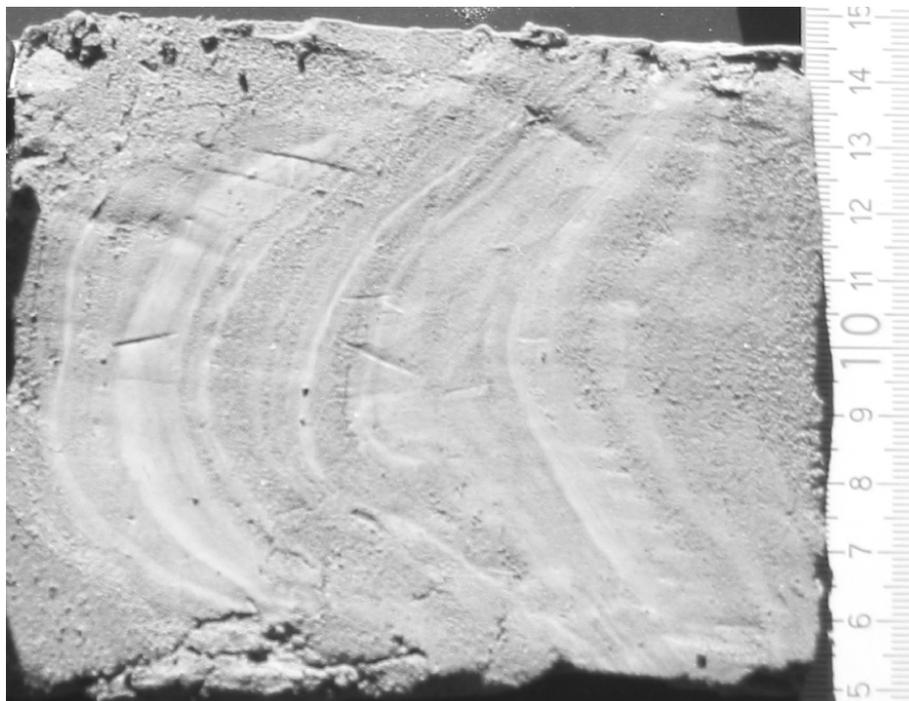


Figure 3.2. : Déformation des strates de sable et de limons argileux dues au soulèvement des couches devant le carottier. Série deltaïque du delta de la Chambronne, projet de stockage géothermique SPEOS.

Le géologue devra donc être capable de différencier les structures naturelles et les artefacts dus à la technique de sondage.

Relation longueur de la passe – longueur de la carotte

Une seconde conséquence de la diminution de diamètre entre l'outil de coupe et le carottier est l'allongement artificiel de la carotte. La carotte compense en longueur la perte ce qu'elle a perdu en section. Une faible diminution de diamètre se répercute au carré sur la section et implique une déformation non négligeable qui peut atteindre jusqu'à 10% environ sur la longueur. Les sondeurs ne tiennent généralement pas compte de ce phénomène et s'ingénient à faire en sorte que la carotte ne soit pas plus longue que la passe. Pour ce faire, ils resserrent les échantillons dans les caisses, ou pire, jettent la partie supérieure de la carotte qui dépasse la longueur de la passe. Sauf si on leur demande de respecter scrupuleusement les longueurs réelles des carottes. Cette difficulté montre bien que si l'on veut effectuer un carottage ultra-précis et fidèle d'une série sédimentaire meubles, par exemple pour un sondage palynologique, on doit utiliser d'autres techniques de sondage, notamment le battage avec carottier à trousse coupante tournée vers l'extérieur (voir § 2.6).

Récupération de la carotte dans des terrains peu cohésifs

Le maintien de la carotte dans le carottier lors du retrait des tiges est parfois difficile lorsque le matériel est très meuble et non lié (sables, graviers, limons fluents). L'extracteur ne suffit plus à ce maintien et il arrive que le carottier soit vide en arrivant au sol. Pour améliorer cette sécurité, le sondeur procède dans les terrains graveleux à la confection d'un « bouchon » : arrivé à la cote voulue, il laisse tourner les tiges pour augmenter la température de la base de la carotte. Elle tend ainsi à se déshydrater et à se solidifier. La carotte peut ainsi être remontée sans problème. Dans les caisses, ces bouchons se présentent comme une séquence beaucoup plus compacte, à texture imbriquée, qui est purement artificielle. Il faut donc tenir compte des passes effectuées (dans le rapport de sondeur) pour faire un relevé correct des échantillons collectés.

Dans les sondages en rocher, les zones broyées sont souvent mal récupérées malgré le double carottier. C'est le cas notamment des roches très fortement broyées telles que les kakirites. Ces roches sont tellement fragiles qu'elles se fragmentent en petites particules au contact de l'outil. C'est un signe très important pour les travaux souterrains et il convient de noter sur les sondages une estimation du pourcentage de matériel récupéré.

Extraction de la carotte du carottier

Dans les terrains cohérents (sédiments argileux, moraine de fond), le carottier tenu obliquement livre successivement des tronçons de carotte qui tiennent d'elles-mêmes. La sortie des éléments de carottes se fait par frappe au marteau sur le carottier. On évitera dans la mesure du possible de les pousser hors du tube avec la pompe, ce qui peut donner lieu à des vidanges intempestives difficilement contrôlables. Le bon sondeur placera ces tronçons directement dans la caisse de carotte disposée parallèlement au carottier, pour éviter toute permutation des segments et de les placer la tête en bas. D'autres les collectent dans un sceau de maçon puis les placent d'une manière plus ou moins fantaisiste dans les caisses. La vidange du carottier dans le cas de graviers meubles aquifères est particulièrement difficile à maîtriser. Souvent le carottier se vide d'un coup dans un sceau. Le matériel est ensuite réparti dans les caisses au droit de la longueur de la passe.

On le voit, la notion d'échantillon non remanié est peu respectée dans de telles circonstances. Le soin avec lequel les sondeurs procèdent à cette opération est très variable, qui a une incidence importante sur le relevé géologique. Nous disposons heureusement de sondeurs dans les sociétés réputées, qui sont connus ad personam comme étant des professionnels de très haute confiance. Il arrive qu'une Direction des travaux exige dans le contrat que ce soit tel sondeur qui soit aux commandes. Quoi qu'il en soit, le géologue est tenu de fixer des exigences de qualité qu'il doit vérifier soigneusement.

Disquage des carottes

L'utilisation d'un simple carottier dans des matériaux meubles très cohérents ou en rocher par très résistant provoque un débitage artificiel du terrain que l'on appelle disquage. La carotte est fractionnée en une série de disques d'épaisseur centimétrique par la rotation de l'outil. L'examen des surfaces de contact montre des formes convexes perpendiculaires à l'axe du sondage, surface marquée de stries de rotation. Une bonne pratique de sondage permet de minimiser cet effet parasite. Il faut noter qu'à grande profondeur (sondages à partir de plusieurs centaines de mètres), un disquage apparaît suite à la décompression de la roche autour du sondage.

3.1.2. Identification géologique

L'identification géologique est faite comme sur affleurement. Pour l'identification des roches, nous faisons référence aux cours de pétrographie du cursus. Pour les terrains quaternaires, nous faisons référence au cours de géologie de l'ingénieur de 3^e année. Rappelons qu'il est nécessaire non seulement d'en faire une description granulométrique mais aussi d'identifier le milieu de formation (voir livret-guide en annexe). Les structures identifiables sur carottes sont ici fondamentales (fig 3.3).

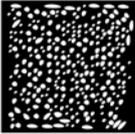
	Description	Environnement de formation	
	Striated angular pebbles texture	Lodgment till	
	Shear texture	Infra-morainic shearing pillow	Legend :
	Isotropic texture	Waterlain till	 gravel, cobble
	Laminated texture with drop-stones	Glacio-lacustrine	 sand
	Thickly bedded laminations texture	Lacustrine	 silt
	Finely bedded laminations texture	Lacustrine	 clay
	Turbiditic texture (balls, slumps,...)	Lacustrine	

Figure 3.3. : Les textures des terrains quaternaires visibles sur carottes et les milieux de formation correspondants.

3.1.3. Le Rock Quality Designation (RQD)

L'état de débitage du rocher peut être facilement mesuré par un sondage carotté. On utilise pour cela le système standardisé du RQD (fig 3.4). Il exprime la longueur totale des carottes dont la longueur dépasse 10 cm par rapport à la longueur de la passe :

$$RQD(\%) = 100 \cdot \sum_1^n l_i / L_p$$

avec l_i = longueur de la carotte i faisant plus de 10 cm de long
 L_p = longueur de la passe.

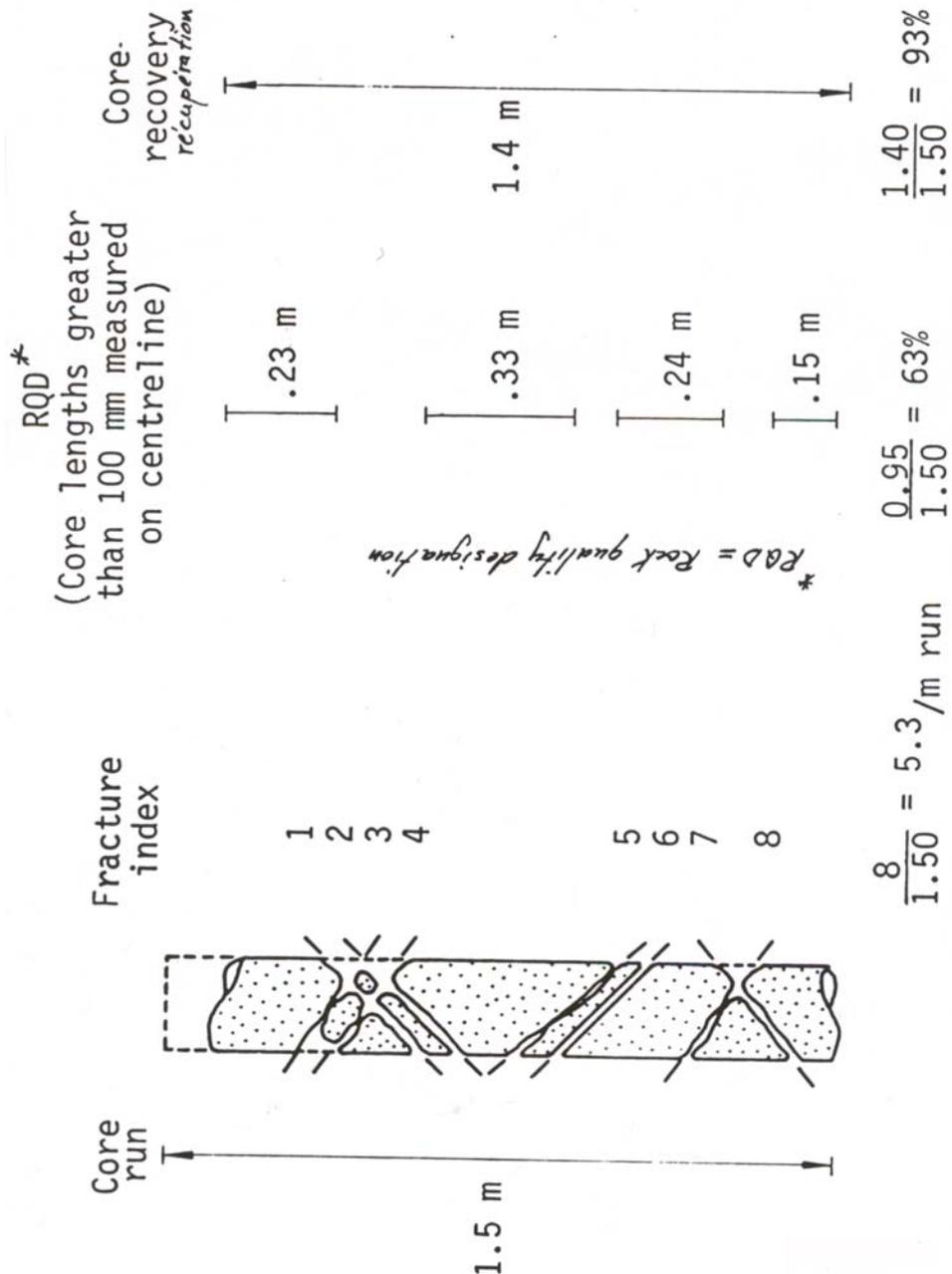


Figure 3.4. : Exemple de mesure du Rock Quality Designation (RQD).

Nous avons vu dans le cours de géologie de l'ingénieur de 3^e année que le RQD se corrèle assez bien avec d'autres caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression simple. Il faut savoir que le RQD dépend beaucoup de la manière dont le sondage a été conduit. Un sondage effectué en donnant priorité à l'avancement aura des RQD plus bas qu'un sondage dans la même formation fait avec soin. Ce fait n'est pas si grave si l'on considère la mesure du RQD comme une indication approximative de la qualité du rocher.

3.1.4. Essais de terrain

Un certain nombre d'essai de terrain sur les carottes permet de compléter le levé géologique d'une part et de diminuer le nombre d'échantillons testés en laboratoire. Ils contribuent à diminuer la part subjective de la description et à saisir la variabilité des caractéristiques au sein d'un sondage et entre plusieurs sondages d'un même chantier. Ils ne sont pas là pour supprimer les essais plus précis faits en laboratoire mais pour mieux les valoriser dans le contexte géologique à étudier. Il est recommandé de consulter aussi les cours des modules de mécanique des sols et des roches.

3.1.4.1. Le pénétromètre de poche

L'essai consiste à enfoncer dans un terrain meuble de granulométrie fine une pointe cylindrique calibrée. L'effort que l'on doit exercer sur la pointe pour la faire pénétrer d'une certaine longueur est mesuré sur un ressort en compression. Cet essai est assimilé mécaniquement à un essai de compression simple car les bords du cylindre ne sont pas contraints. La mesure sur le ressort est graduée directement en résistance à la compression q_u , en kN/m^2 (fig 3.5).

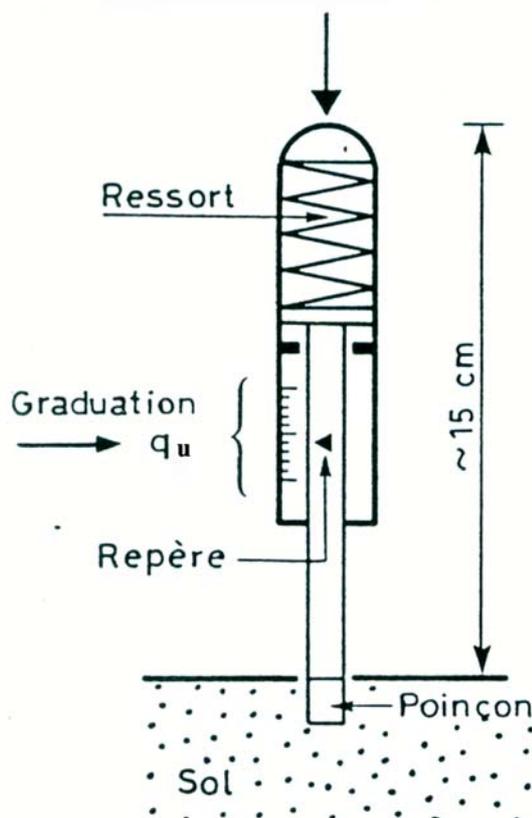


Figure 3.5. : Schéma d'un pénétromètre de poche.

Cet essai permet de définir la consistance des terrains fins (tableau 3.1).

Mesure au pénétromètre de poche		Consistance
q_u	q_u	
kN/m^2	kg/cm^2	
<25	<0.25	très molle
25-50	0.25-0.5	molle
50-100	0.5-1	moyenne
100-200	1.0-2.0	ferme
200-400	2.0-4.0	très ferme
>400	>4.0	dure

Tableau 3.1 : Mesure au pénétromètre de poche et qualification de la consistance des terrains fins.

Cet essai est destiné uniquement aux terrains meubles présentant une cohésion. Il y a lieu d'éviter la présence de galets qui peuvent fausser la mesure.

3.1.4.2. Le scissomètre de poche

Une ailette calibrée est plantée dans la carotte (fig 3.6). Elle est munie d'un ressort de torsion. On exerce un couple de torsion sur le ressort jusqu'à ce que les pales arrachent le terrain et que la sonde puisse tourner. La valeur maximale S du couple est assimilable à la résistance au cisaillement dans le cas d'une contrainte normale nulle.

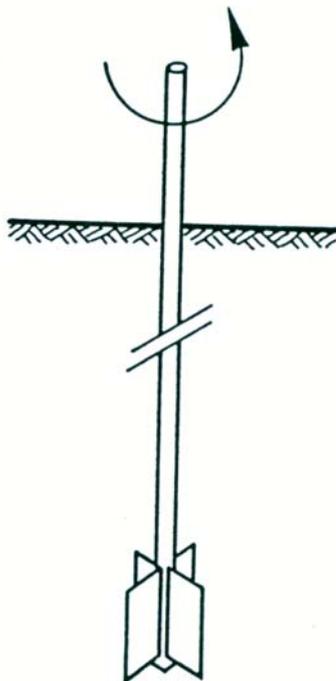


Figure 3.6. : Essai au scissomètre de poche.

Constitution de la droite de Mohr-Coulomb avec les mesures au pénétromètre et au scissomètre

Mesure au pénétromètre :

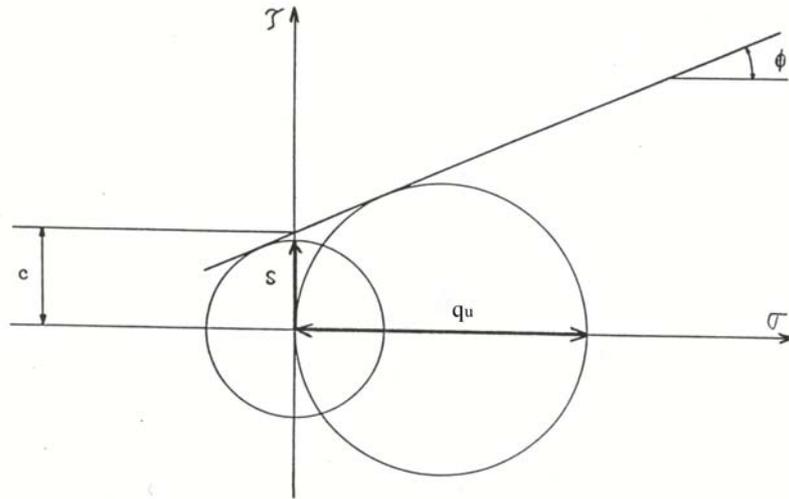
Sur le diagramme de Mohr, on dessine un cercle sur l'axe des contraintes normales passant par 0 et q_u (fig 3.7).

Mesure au scissomètre :

La mesure S est reportée sur l'axe des ordonnées. On peut tracer un cercle centré sur l'origine des axes et de rayon S.

Droite de Mohr-Coulomb

La droite est obtenue par la tangente des deux cercles. Sa pente est égale à l'angle de frottement interne f . L'ordonnée à l'origine est la cohésion c .



- q_u = lecture au pénétromètre
 - S = lecture au scissomètre
 - σ = axe des contraintes normales
 - τ = " " " tangentielle
 - c = cohésion
 - ϕ = angle de frottement interne
- } ordres de grandeur

Figure 3.7. : Diagramme de Mohr approximatif, sur la base des essais au pénétromètre et au scissomètre de poche sur carottes.

Ces déductions sont approximatives en raison des conditions sommaires d'exécution des essais. Elles doivent être vérifiées par des essais en laboratoire.

3.1.4.3. L'essai Franklin (ou brésilien)

Les essais de résistance mécanique des roches sont communément effectués uniquement en laboratoire. L'essai Franklin constitue une des rares exceptions. Grâce à un matériel portable très simple, on peut effectuer un grand nombre de mesures de résistance sur les carottes de rocher, sans devoir transporter une grande quantité d'échantillons en laboratoire.

L'essai Franklin consiste à créer la rupture d'une carotte en exerçant une contrainte normale à l'axe du sondage, appliquée par deux pointes en compression (fig 3.8). L'effort est effectué par une pompe hydraulique manuelle. C'est en fait un essai de résistance à la traction, comme si la carotte était étirée dans l'axe du sondage. Comme il existe une assez bonne corrélation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression, on obtient des valeurs fort utiles pour caractériser la variabilité de la qualité du rocher dans un sondage.

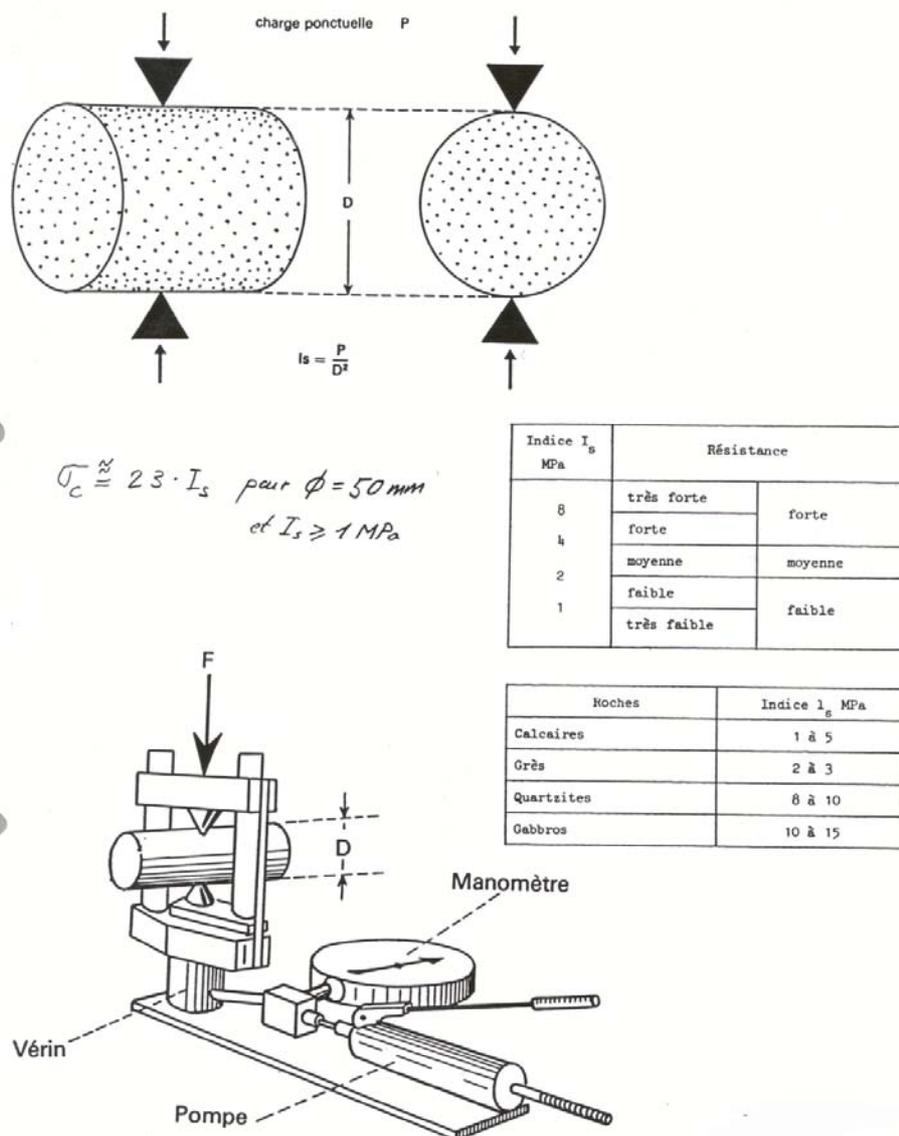


Figure 3.8. : Schéma de l'essai Franklin et relation avec la résistance à la compression simple. Tiré de Fourmaintraux.

3.2. Sondages destructifs

Les sondages destructifs donnent la possibilité d'une identification approximative des terrains rencontrés. Les schémas de la figure 3.9 donnent les recommandations principales pour effectuer de tels relevés.

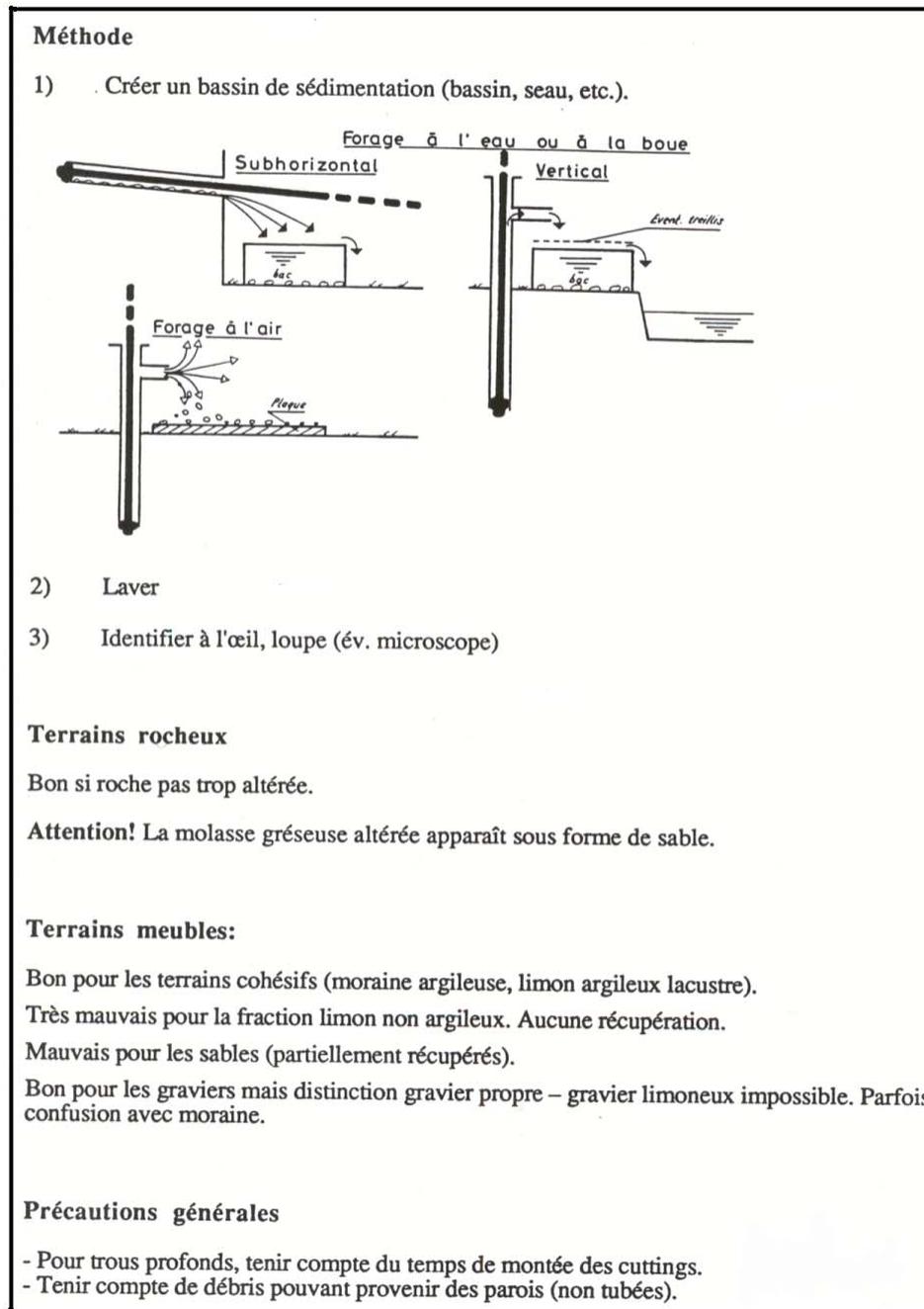


Figure 3.9. : Relevé des cuttings lors de sondages en destructif. Schéma de collecte des cuttings et recommandations générales.

Il faut prendre particulièrement garde au fait que la matrice fine est difficile à juger dans de tels sondages. Le cas de la pose de piézomètres dans une zone prévue pour l'extension d'une exploitation de graviers est typique. Le maître d'ouvrage avait choisi de les faire poser dans un forage à marteau fond de trou avec tubage système Odex. Les cuttings ramenés par l'air étaient des galets fragmentés. Le sondeur avait noté « gravier » sur son rapport de sondage. Des niveaux piézométriques anormalement élevés nous ont interpellés. Une fouille de vérification au droit du forage a été faite à la pelle mécanique. Elle a montré que le soit-disant gravier n'était en fait qu'une moraine contenant des galets et des blocs. La matrice fine de la moraine avait été totalement invisible dans les cuttings. Le projet d'extension a été aussitôt abandonné.

4. Essais en forage et équipement

Ce chapitre traite des essais effectués en cours d'exécution du sondage, après l'achèvement du sondage mais à trou nu et finalement de l'équipement du sondage et des essais qui y sont menés. Ces essais concernent surtout le comportement hydrogéologique des terrains et leur propriétés géotechniques.

4.1. Essais en cours de foration

Une série d'essais peut être faite au fur et à mesure de l'avancement du sondage. Ce sont soit des essais en fond de trou, soit qui portent sur la passe de forage fraîchement sondée. Ils sont un complément utile au relevé des échantillons. Les essais une fois le forage terminé ne remplacent généralement pas ces essais à l'avancement.

4.1.1. Essai Lefranc et dérivés

Les essais Lefranc et ceux qui en sont dérivés testent la perméabilité de terrains meubles saturés en eau. L'essai consiste à abaisser par une pompe ou à la soupape le niveau d'eau dans le sondage puis à étudier sa reconstitution (fig 4.1). On peut également faire le même essai par infiltration d'eau à la place de l'abaissement de la nappe. L'essai se fait généralement sur une passe fraîchement sondée, sous le tubage qui maintient les terrains situés plus haut. On peut également tester la perméabilité du terrain ponctuellement au niveau du sabot du tubage. Le contact avec le terrain se fait alors uniquement par le fond du trou.

Le calcul de la perméabilité est basé sur la loi de Darcy. Son expression est similaire à l'équation du perméamètre à charge variable (fig 4.1). Un facteur empirique intervient dans l'équation pour tenir compte de la géométrie de la passe testée

Essai LEFRANC

Essai de perméabilité en forage (à charge variable)

Déroulement de l'essai:

Après avoir retiré le tubage sur quelques mètres, on abaisse le niveau à la soupape ou par pompage jusqu'à P_0 , ou on relève par amenée d'eau dans le tubage (voir dessin).

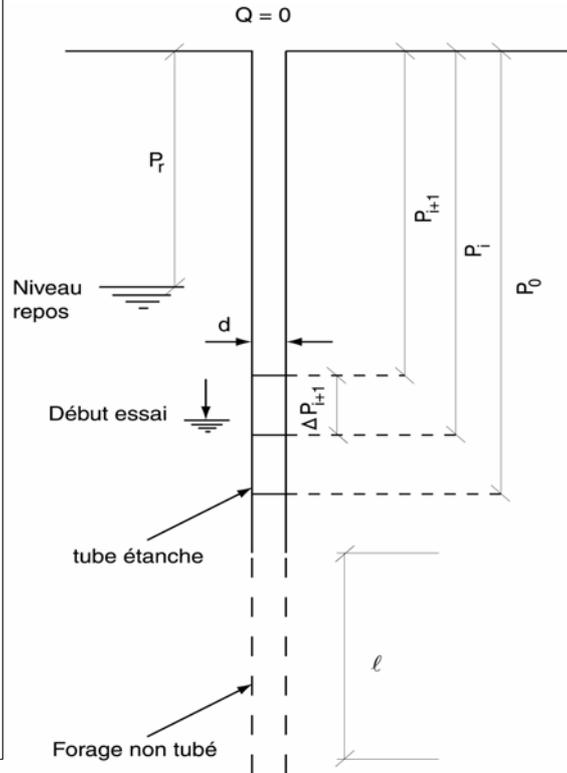
Dès ce moment t_0 , on laisse la nappe remonter (ou redescendre), et on mesure le niveau tous les $t_{i+1}-t_0$ minutes.

Variables:

- d =diamètre du forage*
- l =longueur de la passe
- P_r =profondeur de l'eau au repos
- P_0 =profondeur de l'eau en fin d'abaissement
- P_i =profondeur de l'eau au temps i
- t_0 =temps du début de l'essai
- t_i =temps de la mesure i
- Unités pour le calcul: m et s

*Note: l'équation prévoit un seul diamètre pour la passe testée et le tubage dans lequel le niveau est mesuré. Choisir plutôt le diamètre interne du tubage où a lieu la mesure

Calcul: tiré de " L'Entreprise n°32, 09.08.1968, pg 13.



$$K = \frac{G}{\Delta t} \cdot \ln \frac{P_i - P_r}{P_{i+1} - P_r} \quad \text{Calcul sur les états } i \text{ et } i+1 \text{ successifs}$$

avec

pour $l \neq 0$ (passe non revêtue du trou)

pour $l = 0$ (écoulement par fond)

$$G = \Pi \cdot \frac{d^2}{4} \sqrt{2\Pi \cdot d + l}$$

$$G = \Pi \cdot \frac{d^2}{4} \sqrt{2.85 \cdot d}$$

Tableau des mesures (en tête: $d=$, $l=$, $P_r=$, $P_0=$):cas où les mesures sont données en profondeurs

$t_{i+1}-t_0$	P_{i+1}
1 mn	13.80 m
2 mn	13.62 m
5 mn	13.14 m

Exemple de calcul numérique (Essai au sondage FR1, glissement de la Frasse)

Unités pour l'introduction des données pour programme HP: m et mn

Ex: $d = 0.05$, $l = 2$, $P_r = 6$, $P_0 = 14$

$t_{i+1}-t_0$	1 mn	2 mn	5 mn
P_{i+1}	13.80	13.62	13.14
K_{i+1}	$3.58 \cdot 10^{-7}$	$3.30 \cdot 10^{-7}$	$3.07 \cdot 10^{-7}$

Etc..

A la fin $K_{moy} = \dots$

Figure 4.1 : Principe des essais Lefranc et dérivés.

Une difficulté technique réside dans le risque d'éboulement des parois de la passe testée, surtout par le test en abaissement de nappe. Une erreur sur le facteur géométrique implique un résultat passablement faussé. On peut neutraliser ce risque en descendant dans le sondage un tube crépiné en face de la passe à tester, le temps de l'essai. On peut également remplir la passe de gravier lavé, gravier qui sera foré au redémarrage du sondage. Une telle mesure est vivement recommandée.

Les essais par abaissement de nappe sont préférables à ceux par recharge car ils ne comportent pas le risque de colmatage. En effet, un sondage est toujours un milieu assez boueux et les particules en suspension, principalement des argiles, peuvent facilement boucher les pores de la formation à la paroi du trou. Les modifications du niveau de la nappe doivent rester modestes (si possible moins de 1 m) pour rester proche des conditions des équations utilisées pour le calcul de la perméabilité.

Les perméabilités obtenues par les essais Lefranc doivent être considérées comme des valeurs d'index, c'est-à-dire des valeurs qui peuvent être assez inexactes en valeur absolue mais qui permettent des comparaisons entre différentes passes d'un sondage ou entre les différents sondages d'une campagne de reconnaissance.

Exercice 4.1 sur l'essai Lefranc : cas du sondage FR1 dans le glissement de la Frasse.

4.1.2. Essai Lugeon

L'essai Lugeon est dû à Maurice Lugeon, professeur de géologie à l'Université de Lausanne vers le milieu du XX^e siècle et pionnier de la géologie de l'ingénieur. Maurice Lugeon a beaucoup travaillé sur la géologie des barrages où l'on doit vérifier la perméabilité de la fondation du barrage et effectuer des rideaux d'étanchéité en injectant le rocher par des forages. L'essai Lugeon est l'équivalent de l'essai Lefranc en infiltration mais pour les formations rocheuses. Les mises en charge sont aussi plus élevées pour obtenir des débits d'infiltration mesurables dans des roches peu perméables. Les injections de coulis de ciment à faire dans les sondages testés seront du reste aussi réalisées à haute pression. Autre différence avec l'essai Lefranc : on considère la charge constante au cours de l'essai.

L'essai porte sur la passe ou une série de passes fraîchement forées et non revêtues (fig 4.2). Le tronçon testé est limité par le fond du trou et un packer ou par deux packers (le deuxième cas sera traité plutôt dans les essais trou nu une fois le sondage terminé, voir § 4.2). Le packer est fixé à une colonne qui alimente le segment en eau. Cette colonne est liée à une pompe d'injection qui met l'eau en pression dans la colonne et dans le segment. On mesure le débit injecté pendant une dizaine de minutes et la charge hydraulique sur le segment. Cette dernière est mesurée par un manomètre en tête de colonne, valeur à laquelle il faut ajouter la pression due à la colonne d'eau.

Le résultat de l'essai Lugeon s'exprime sous la forme d'une Absorption unitaire exprimée en Unité Lugeon :

1 Unité Lugeon = 1 Lugeon = 1 l/mn par mètre de segment test avec charge de 10 bars

Mais on peut calculer aussi le résultat de l'essai par une perméabilité de Darcy en appliquant à la géométrie de l'essai Lugeon l'équation de Dupuit pour les puits (fig 4.2). On fait pour cela

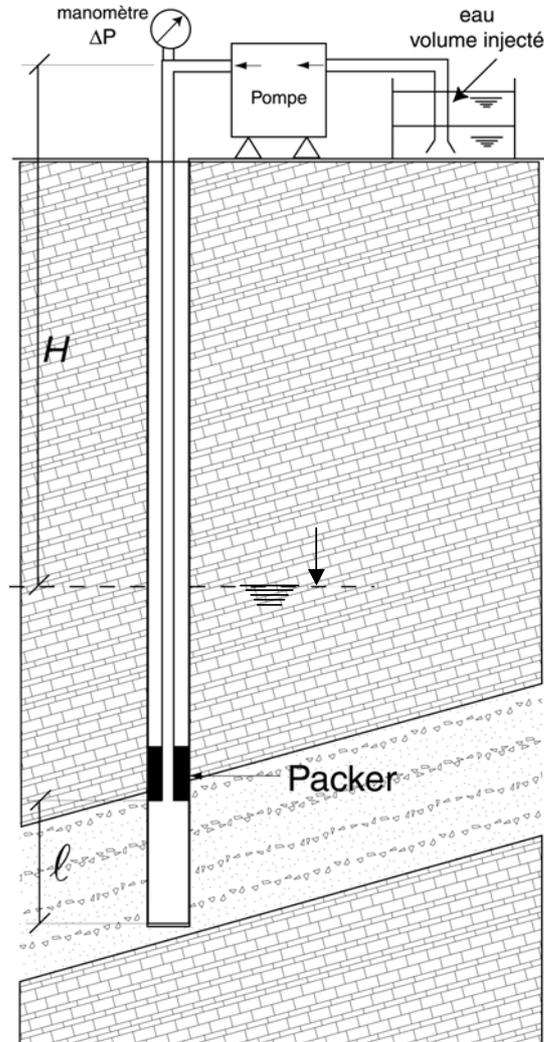
l'hypothèse assez peu vraisemblable que le segment testé correspond à un aquifère captif de la même épaisseur. En d'autres termes, on considère qu'il n'y a pas d'écoulement qui provient du rocher en dessous de la base du segment et en dessus du packer. C'est donc l'équation de Dupuit en nappe captive qui est utilisée.

Essai Lugeon

Essai de perméabilité à charge constante

Dans un forage non tubé, on isole une longueur de rocher l par 1 ou 2 packers. On mesure la profondeur de la nappe au repos (H jusqu'au manomètre en surface). On injecte ensuite de l'eau sous pression ΔP constante durant plusieurs minutes. Le volume d'eau ΔV injectée à la fin de l'essai permet de calculer le débit moyen Q . On répète l'essai par paliers ascendants puis descendants.

r = rayon du forage (zone d'essai),
 R = rayon d'action, Unités: m, s,
 (réf: Castany II, pg 177)



$$K = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Q}{l} \cdot \frac{\ln(R/r)}{\Delta P + H}$$

Equation = cas particulier de l'équation de Dupuit en puits pour une nappe captive, en remplaçant e par l et ΔH par $H + \Delta P$

Exemple numérique: $r=0.1$ m, $l=3$ m, $H=10$ m, $R=200$ m

ΔP	$\Delta P + H$	Q	Q	K
bars	m	l/mn	m ³ /s	m/s
1	20	15.6	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$5.24 \cdot 10^{-6}$
4	50	19.5	$3.25 \cdot 10^{-4}$	$2.62 \cdot 10^{-6}$
9	100	30	$5 \cdot 10^{-4}$	$2.02 \cdot 10^{-6}$

Figure 4.2. : Principe des essais Lugeon.

Correspondance entre l'Absorption unitaire et la perméabilité de Darcy

Nous avons calculé la correspondance entre les Unités Lugeon et la perméabilité de Darcy pour des conditions courantes :

- Forage de diamètre 100 et 200 mm
- Rayon d'action de 10 m et 100 m (R est difficile à estimer dans de tels essais)

Les autres paramètres sont fixés de la manière suivante :

Débit : $Q = -1$ l/mn (signe négatif en raison de l'inverse d'un pompage)

Rabattement : $\Delta h = -100$ m (signe négatif en raison de l'inverse d'un abaissement de nappe)

Epaisseur : $e = 1$ m

La perméabilité calculée pour les 4 variantes avec les données fixes et les 2 données variables donne une moyenne de $k = 1.6 \times 10^{-7}$ m/s (tableau 4.1). Donc, on peut dire en tenant compte des fortes incertitudes sur la méthode calcul que

$$1 \text{ Unité Lugeon} \Rightarrow \text{environ } 10^{-7} \text{ m/s}$$

Rayon du forage	Rayon d'action	Perméabilité de Darcy
r	R	K
(m)	(m)	(m/s)
0.1	10	1.20E-07
0.1	100	1.80E-07
0.05	10	1.40E-07
0.05	100	2.00E-07
Moyenne		1.60E-07

Tableau 4.1 : Traduction de 1 Unité Lugeon en terme de perméabilité de Darcy pour des sondages courants.

En pratique, on répète l'essai sur une passe pour différentes pressions d'injection. Communément, on procède à 3 paliers à pression croissante puis on répète les 2 paliers intermédiaires en réduisant la pression : par exemple paliers à 2, 5, 10 puis 5 et 2 bars à nouveau. Cette manière de faire permet de mettre en évidence des non linéarités et des hystérésis qui nous renseignent sur les conditions d'écoulement des eaux dans le massif (fig 4.3).

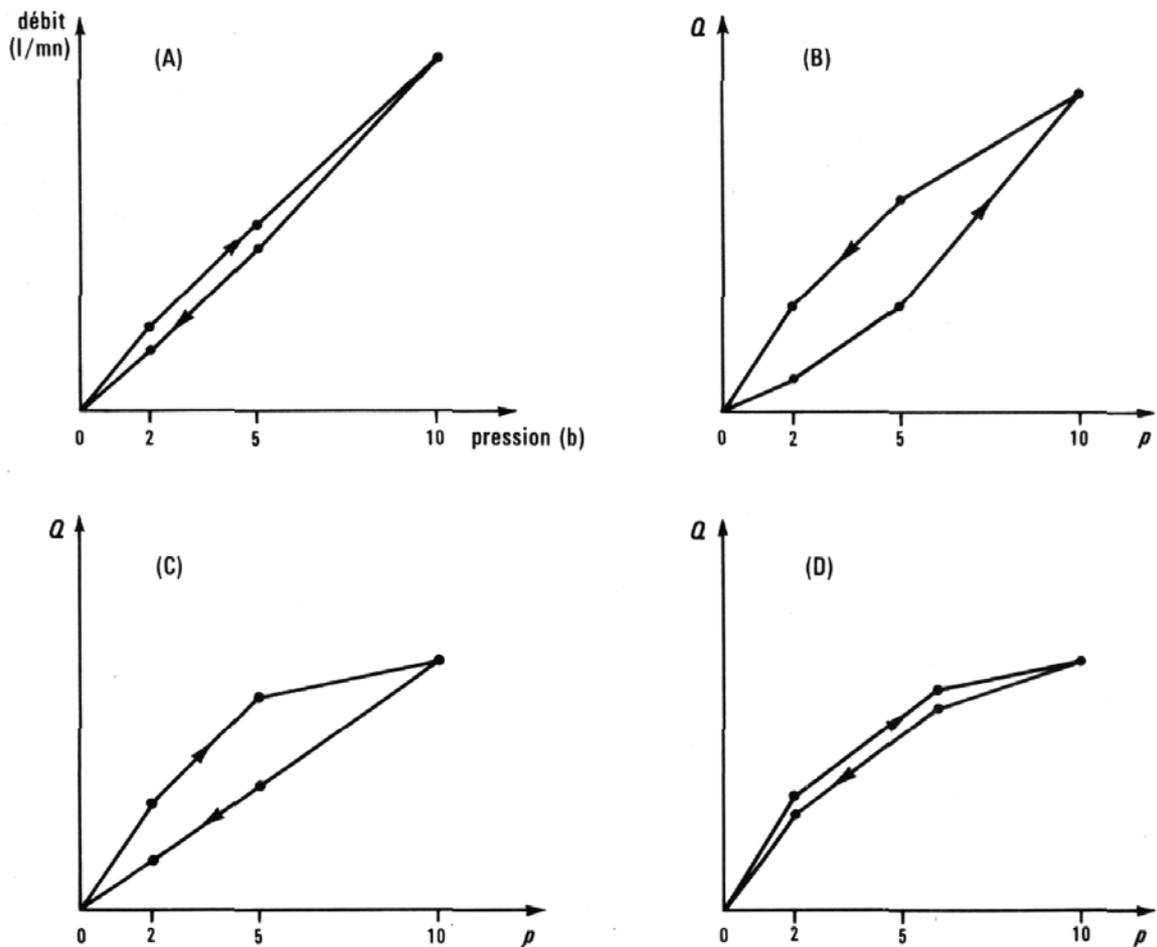


Figure 4.3. : Graphiques typiques obtenus par des essais Lugeon. Tiré de Letourneur.

Exercice 4.2 : Essais Lugeon

Déterminer les phénomènes qui expliquent les 4 graphiques typiques des essais Lugeon (voir fig 4.3).

Réponses :

Cas A :

.....

Cas B :

.....

Cas C :

.....

Cas D :

.....

Comme pour les essais Lefranc, les résultats des essais Lugeon doivent être considérés comme des valeurs d'index (voir § 4.1.2), en raison du calcul simpliste de l'essai.

4.1.3. Essai SPT (Standard Penetration Test)

Nous avons vu au § 2.2.2 les reconnaissances par pénétration d'une pointe depuis la surface du sol dans le terrain (pénétromètre). Nous avons vu également le même type d'essai au pénétromètre de poche sur les carottes de sondage (§ 3.1.4.1) où c'est un mini-cylindre qui est enfoncé dans l'échantillon. Dans l'essai SPT, c'est une mesure de pénétration d'un carottier SPT normé dans le fond d'un sondage (fig 4.4).

Ce carottier de faible diamètre (diamètre intérieur de 35 mm) est fendu longitudinalement pour faciliter l'extraction de la carotte. Il est enfoncé par battage en mesurant le nombre de coups de mouton pour le descendre de 10 cm, comme dans le sondage carotté par battage décrit au § 2.6.

On déduit de la résistance à la pénétration la notion de compacité des terrains grossiers (voir cours de Géologie de l'ingénieur de 3^e année).

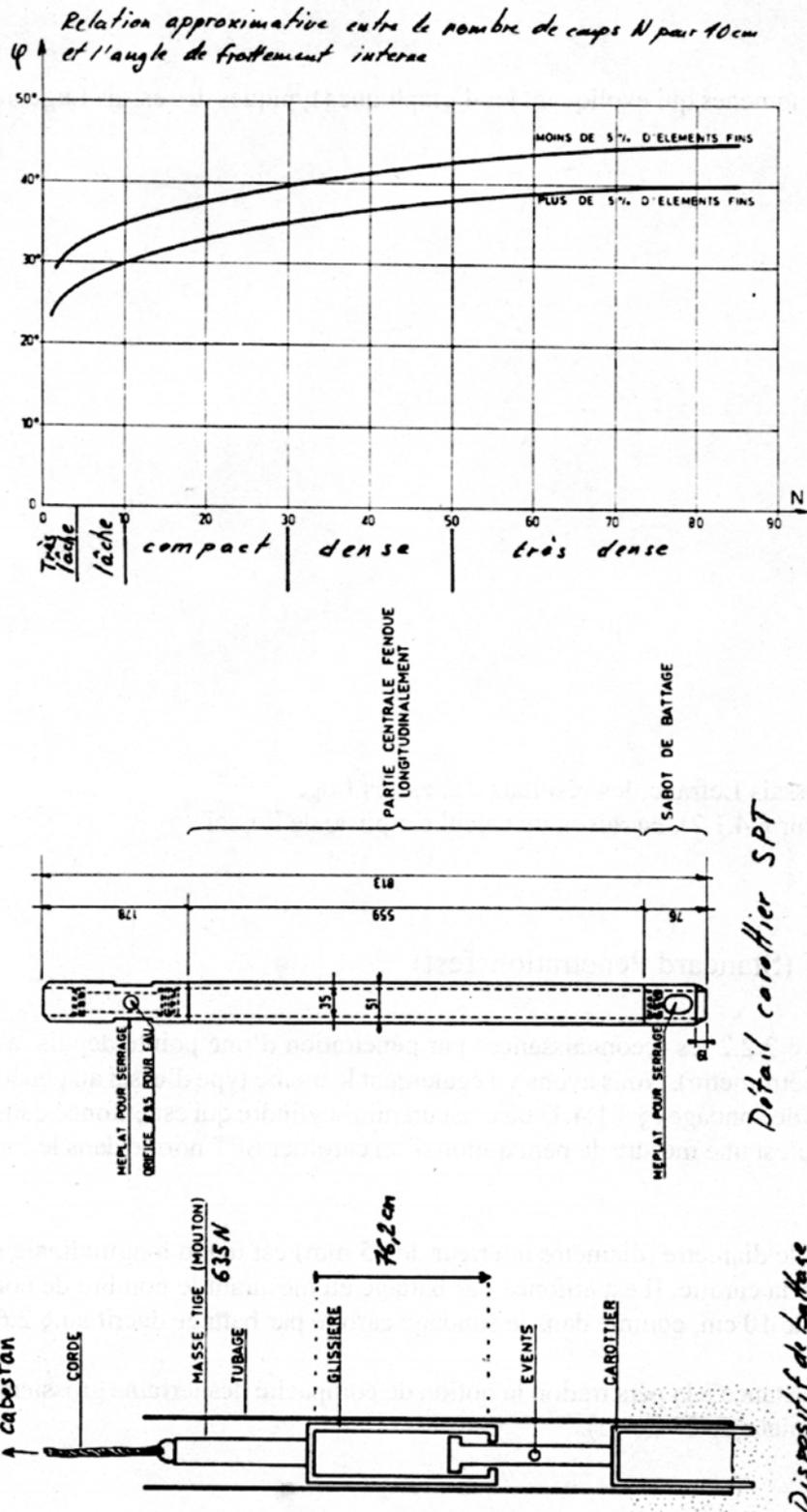


Figure 4.4. : Le Standard Penetration Test SPT. Dispositif de battage au mouton. Géométrie du carottier standard SPT. Définition de la compacité des terrains grossiers (de très lâche à très dense) sur la base de la résistance à la pénétration. Corrélation avec l'angle de frottement interne du terrain pour des formations à moins ou à plus de 5% d'éléments fins.

L'essai SPT est utilisé régulièrement pour le dimensionnement de la portance des fondations. Il trouve une application moins courante pour l'instant dans le microzonage sismique où le pénétromètre SPT est utilisé pour déterminer indirectement la vitesse des ondes de cisaillement S d'un terrain. La vitesse des ondes S est en effet un paramètre déterminant pour qualifier la vulnérabilité des terrains aux chocs dynamiques et elle est difficilement mesurable directement.

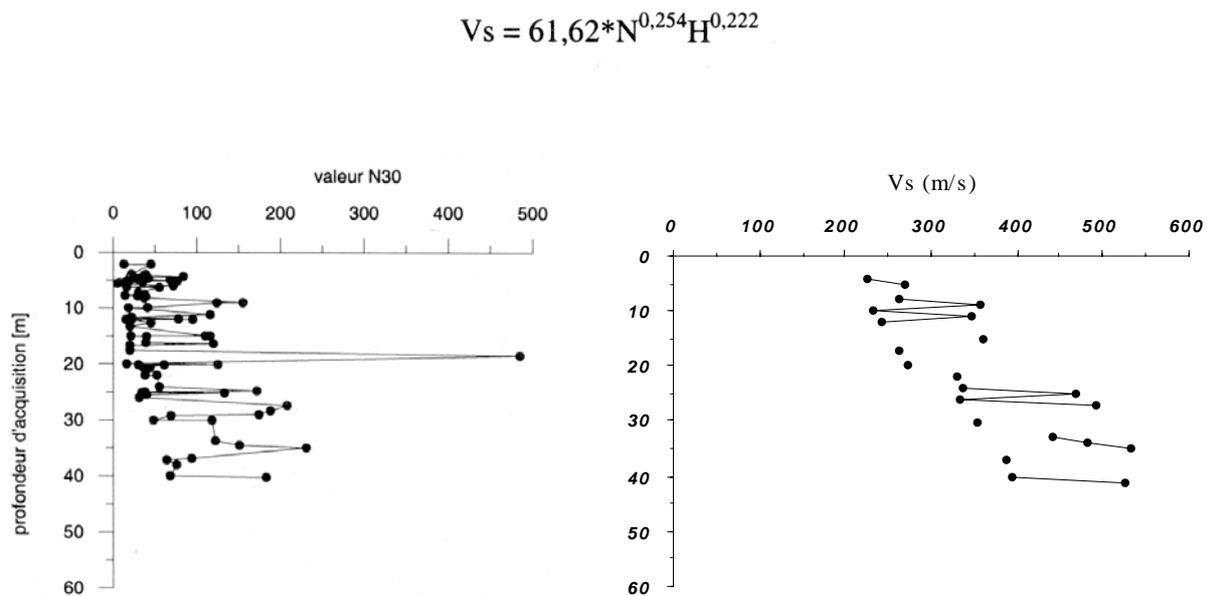


Figure 4.5. : Valeurs N-SPT mesurées en fonction de la profondeur dans la région de Sion. Relation empirique de Ohta & Goto entre la vitesse de l'onde secondaire et le paramètre N.

4.1.4. Essai pressiométrique

Le principe de l'essai pressiométrique est de tester la relation contrainte déformation du terrain à la paroi du forage. Techniquement, on descend en face de la zone à tester du sondage non revêtu une sonde pressiométrique (fig 4.5) qui va appuyer contre la paroi et déterminer sa déformation. La cellule est un cylindre en caoutchouc qui est rempli d'eau sous pression. Dans le pressiomètre Ménard, cette cellule dilatable de mesure est comprise entre deux packers à air comprimé (cellules de garde) qui fixent la cellule aux parois du forage et isolent le segment à tester.

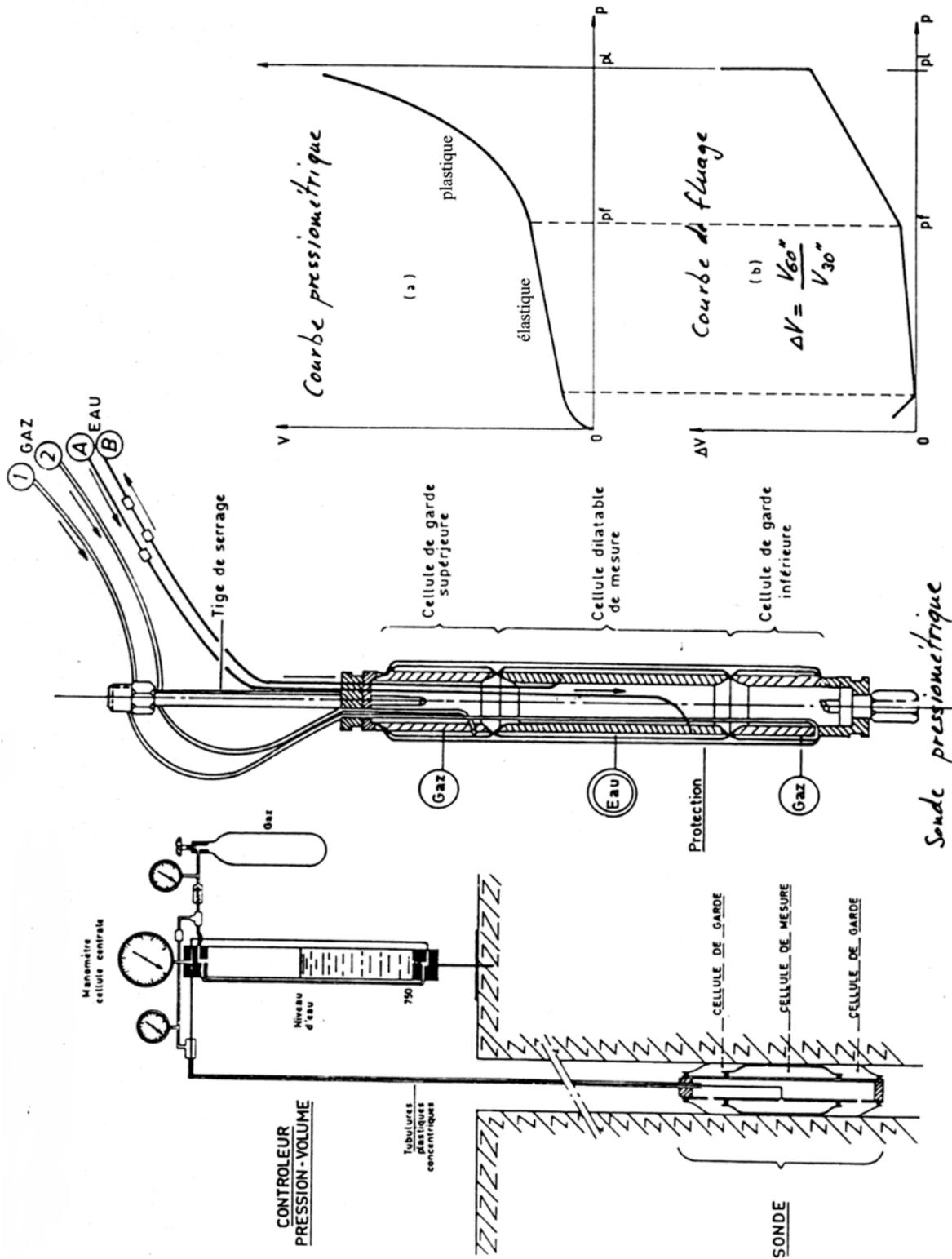


Figure 4.6. : Essai pressiométrique. Cas du pressiomètre Ménard.

On procède à l'essai en faisant croître la pression d'eau dans la cellule par paliers. Une mesure de la variation du volume d'eau V dans le système d'alimentation de la cellule par rapport au volume à l'état non gonflé indique de combien la cellule s'est déformée pour la pression p du palier. Ce gonflement permet de calculer une moyenne de la déformation radiale de la paroi au droit de la cellule. On répète l'essai pour plusieurs paliers de pression croissante. On trace de la sorte la courbe pressiométrique, soit la fonction pression – volume qui montre la relation contrainte – déformation du terrain. La courbe est faite de 3 tronçons :

- Domaine des très faibles pressions : la croissance du volume est très importante pour de faibles croissances de la pression. Cette partie de la courbe est représentative du terrain décomprimé artificiellement par le sondage.
- Domaine des pressions moyennes : la courbe passe à une droite. C'est une déformation élastique du terrain.
- Domaine des hautes pressions : à partir d'une pression p_f , la fonction redevient courbe. De faibles accroissements de pression provoquent une forte croissance de la déformation. C'est la zone de plastification du matériel. A la fin de cette zone, pour une pression p_l , le matériel se rompt complètement.

En fait, on peut préciser ce passage de l'état élastique à l'état plastique en mesurant le volume à chaque palier après 30 secondes et 60 secondes. La différence de volume ΔV entre ces deux mesures montre le comportement rhéologique du matériel. La fonction ΔV – pression (courbe de fluage) appuie la courbe pressiométrique proprement dite.

Le comportement du terrain dans l'essai pressiométrique est très similaire à celui observé dans des essais mécaniques sur échantillon, comme la résistance à la compression. L'avantage de l'essai pressiométrique est la mesure du terrain en place. Ceci supprime le risque de remaniement dû à l'échantillonnage. L'essai porte sur un plus grand volume de terrain. Il est donc plus représentatif. Le pressiomètre est remplacé maintenant de plus en plus par le dilatomètre qui livre le même genre d'information mais de manière plus précise.

4.1.5. Essai dilatométrique

L'essai au dilatomètre est très semblable au pressiomètre. Là également, on dispose une sonde dilatable qui est placée dans un segment du sondage non revêtu. On mesure la relation pression déformation comme dans le pressiomètre. On revanche, la dilatation moyenne est remplacée par une mesure de l'écartement réel de la paroi du forage par des micromètres mécaniques très précis (fig 4.7). Cette mesure est faite à mi hauteur de la sonde. Ces appareils modernes envoient leurs mesures par câble directement à un ordinateur qui traite les courbes pression – dilatation. De telles mesures peuvent être faites dans des sondages très profonds.

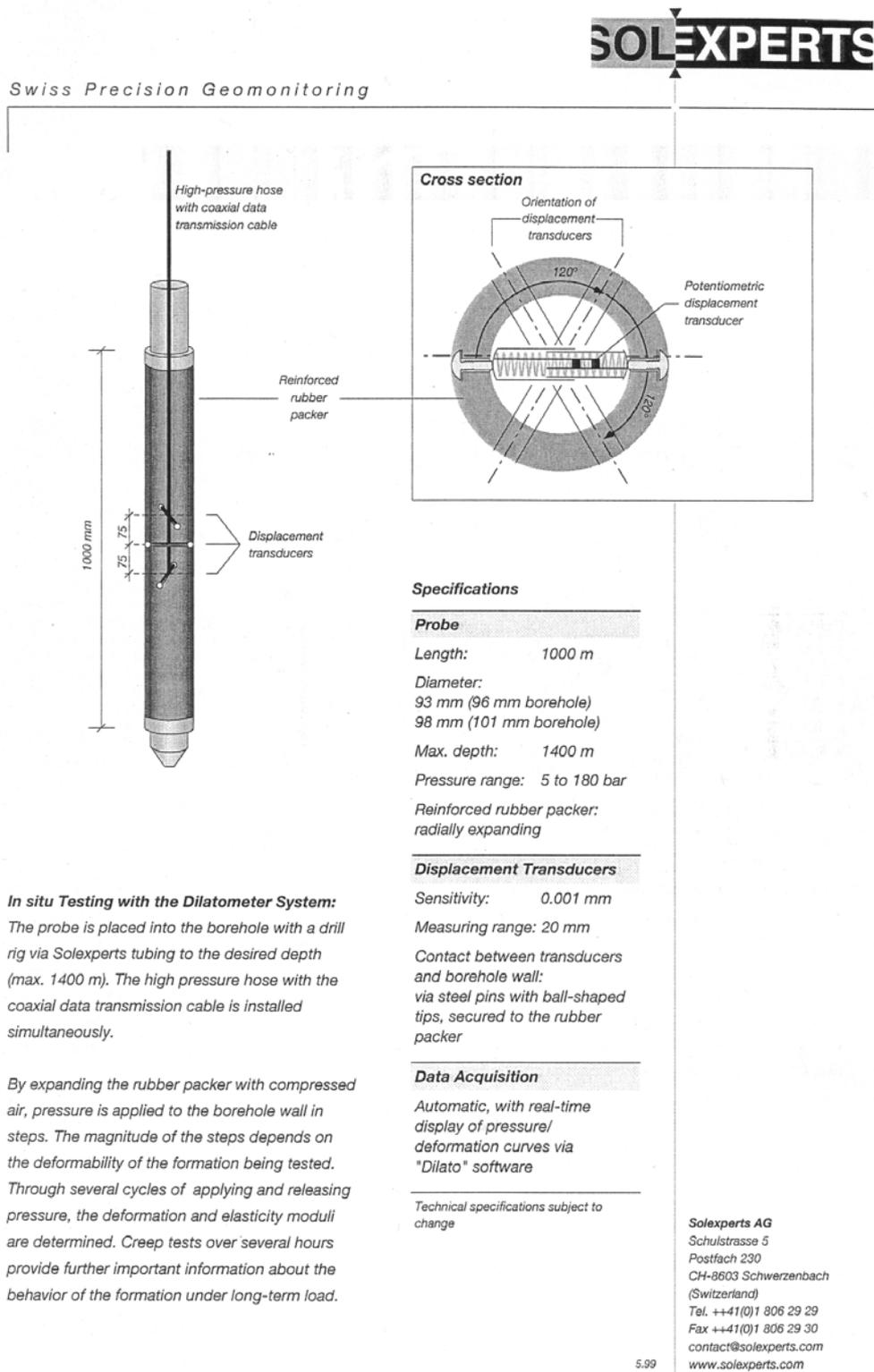


Figure 4.7. : Dilatomètre Solexperts. La mesure de la dilatation est faite dans 3 directions du plan perpendiculaire à l'axe du forage. Précision de 1 micron. Dilatation possible au maximum 2 cm Documentation Solexperts

4.2. Essais trou nu en fin de foration

De nombreux essais hydrogéologiques et géophysiques sont exécutés à trou nu, avant la mise en place éventuelle d'un équipement.

4.2.1. Essai d'eau par packers

Les essais de pompage dans les forages équipés d'une crépine donnent une perméabilité moyenne sur toute la hauteur de la nappe souterraine. Il est souvent utile de déterminer la perméabilité de la roche localement ou par segments. Nous avons vu qu'on peut utiliser les essais Lugeon en cours de forage (voir § 4.1.2). On peut également le faire une fois le forage terminé de manière systématique (segment après segment) ou seulement dans certaines zones du forage, par exemple au droit d'une partie fissurée ou karstique. Ceci nécessite la mise en place de deux packers pour isoler la zone désirée (fig 4.7).

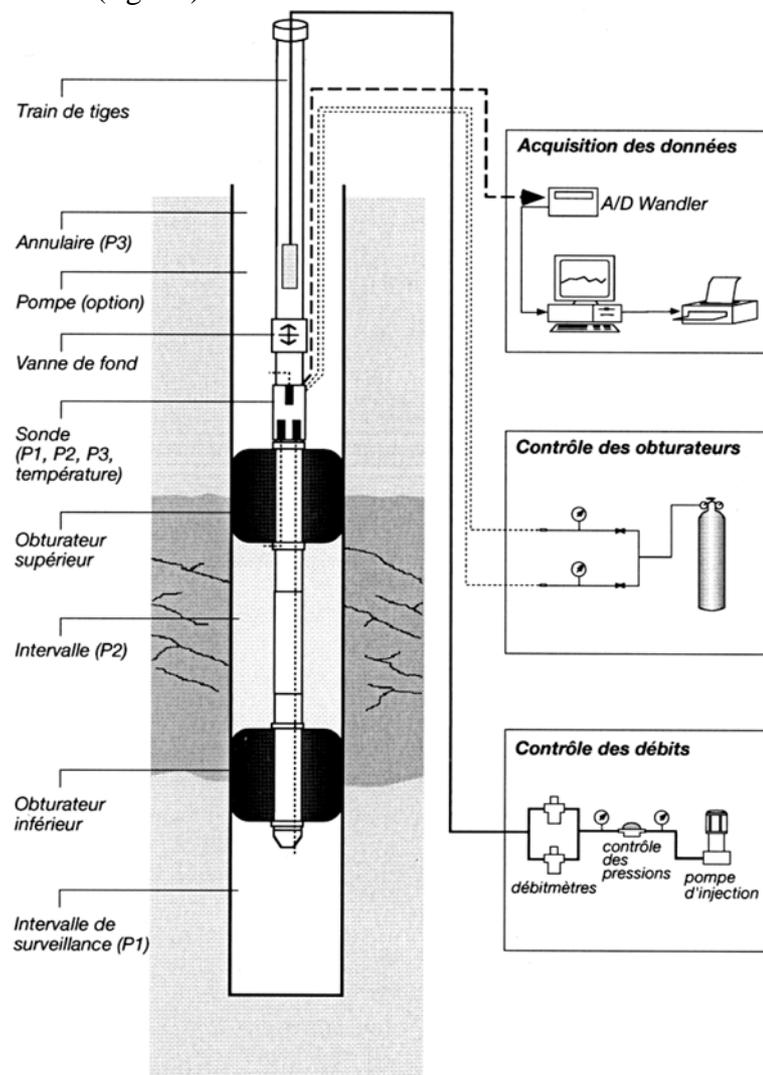


Figure 4.8. : Mesures de la perméabilité des roches entre 2 packers Solexperts. Les sondes de pression P1 et P3 permettent de contrôler l'étanchéité des deux packers (si la pression d'eau dans ces sondes évolue avec l'essai, c'est la preuve que des by-pass existent au droit des packers, par exemple par la présence d'une fissure verticale franchissant le packer). La sonde P2 mesure la pression dans le segment testé. Documentation Solexperts.

Une partie des diagraphies sont utilisées en géologie de l'ingénieur. La plupart d'entre elles nécessitent de travailler à trou nu. La prospection de sites pour le stockage de déchets nucléaires a fait beaucoup appel à ces méthodes, notamment dans des sondages profonds pour la recherche de sites pour les déchets à haute radioactivité (fig 4.10).

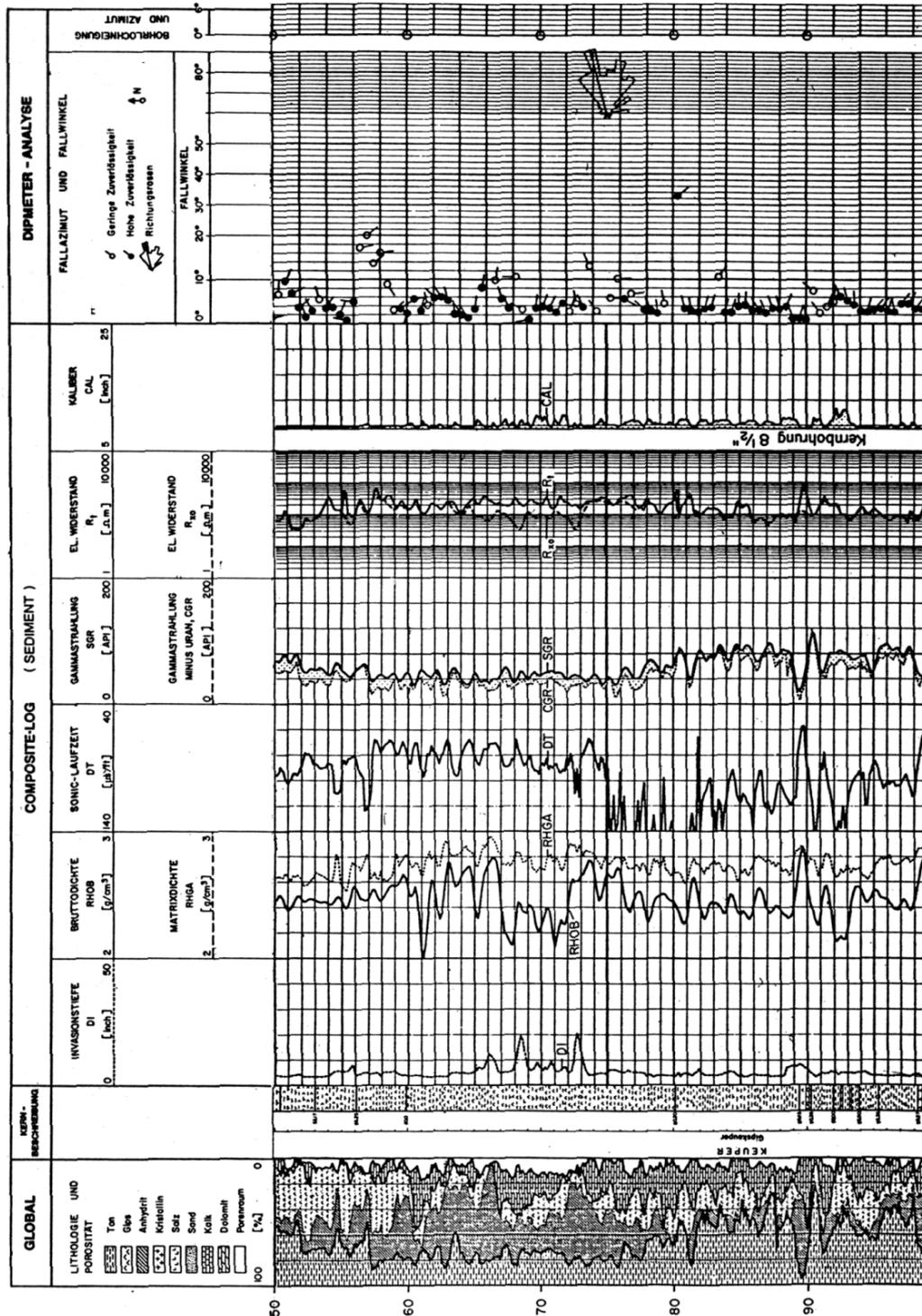


Figure 4.10. : Exemple de diagraphie composite pour l'étude de sites de stockage de déchets nucléaires. Cas du sondage de Böttstein qui a visé stocker les déchets en profondeur dans les granites du Massif de la Forêt Noire du Nord de la Suisse. Dans la présente figure, c'est la couverture sédimentaire du Keuper qui est l'objet d'un log composite qui comprend : la profondeur d'invasion de la boue (DI), le poids spécifique (RHOS), la vitesse sismique (DT), l'émission Gamma (SGR), la résistivité électrique (Rt) et le diamètre du trou (CAL). S'ajoute à ce log la pétrographie et la mesure du pendage. Doc NAGRA.

Il est souvent de première importance de mettre en évidence la fracturation de la roche, donc sa structure. Lorsque l'on a affaire à un sondage carotté, on n'est pas forcément en mesure de déterminer l'orientation absolue des discontinuités. Lorsque l'on a sondé en destructif, on ignore tout de cette structure. C'est la raison pour laquelle s'est développée l'imagerie de la paroi des forages en trou nu. L'imagerie optique est difficile en raison de la présence de boue dans le forage. L'imagerie sismique ou sonique est plus performante dans un tel milieu. Des Sonic Televiewers sont capables de reconstituer une image structurale de la paroi comme si on pouvait la voir in-situ (fig 4.11). Le principe est un scanning des vitesses sismiques de la roche aux parois. Ces variations de vitesses sont visualisées avec des couleurs artificielles ou des degrés de gris. Les rais sismiques de balayage sont repérés par rapport au pôle magnétique pour avoir une orientation absolue.

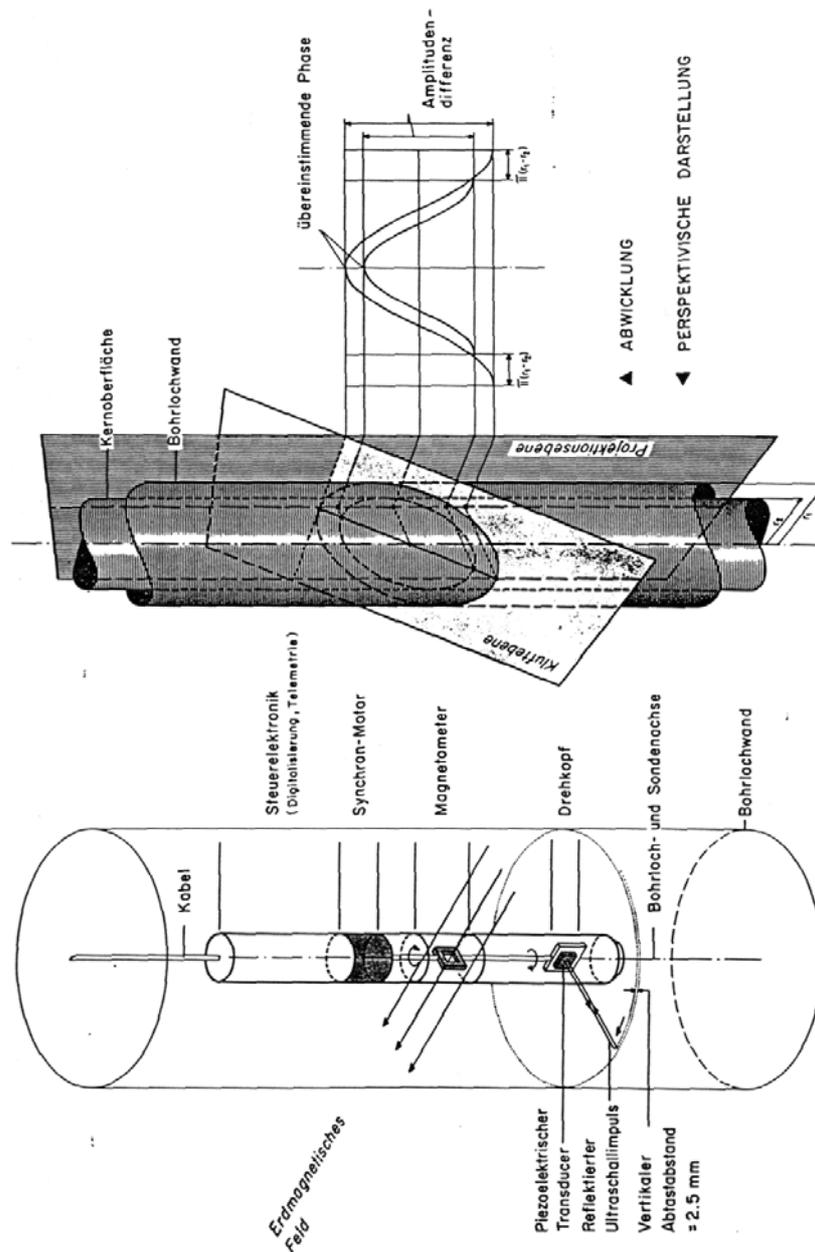


Figure 4.11. : Principe de l'imagerie de la structure du rocher aux parois d'un forage par la méthode Sonic Televiewer. D'après NAGRA.

La comparaison de l'image sonique et de la carotte est particulièrement convaincante pour un exemple dans les granites de la Forêt Noire (fig 4.12).

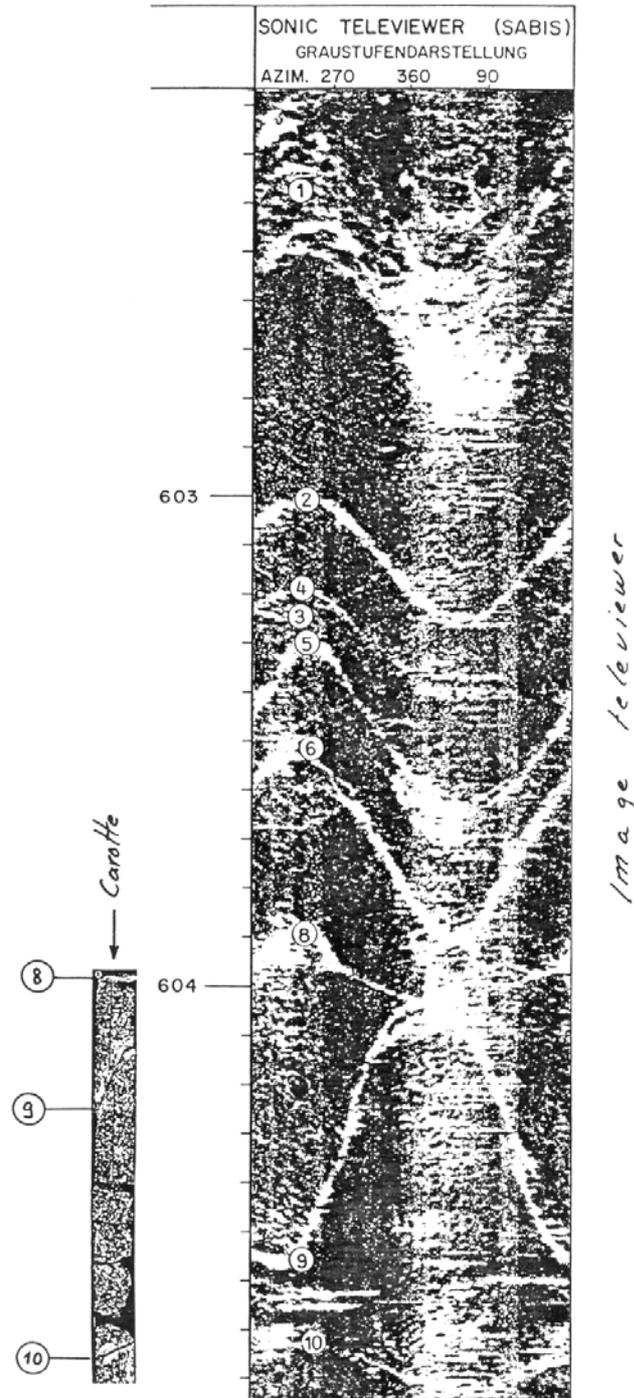


Figure 4.12. : Exemple de résultat du Sonic Televiewer SABIS dans les granites de Böttstein et comparaison avec la carotte. D'après NAGRA.

4.3. Equipement du forage

Le but premier d'un sondage de reconnaissance est généralement l'observation du terrain par le carottage. Cependant, dans beaucoup de cas, on utilise le sondage effectué pour y placer un équipement ou un instrument qui doit livrer des informations au-delà de l'opération de sondage proprement dite. Comme ces équipements doivent être utilisables de manière durable et que l'on peut craindre un éboulement des parois avec le temps, on place généralement un tube qui garantira la stabilité du trou et la viabilité des sondes. Les équipements portent essentiellement sur des applications hydrogéologiques ou des mesures de déformation.

4.3.1. Piézomètres

La mesure d'un niveau de nappe souterraine dans un sondage peut être effectuée de la manière la plus simple possible dans un tube perforé qui retient le terrain mais laisse pénétrer l'eau de la nappe dans le tube. Le niveau mesuré dans le tube sera, si la configuration hydrogéologique est simple et si le niveau est assez stable, le niveau de la nappe. Divers types de tubes existent, qui varient essentiellement par la forme et la taille des ouvertures et l'indice d'ouverture (fig 4.13). Ils existent pour différents diamètres.

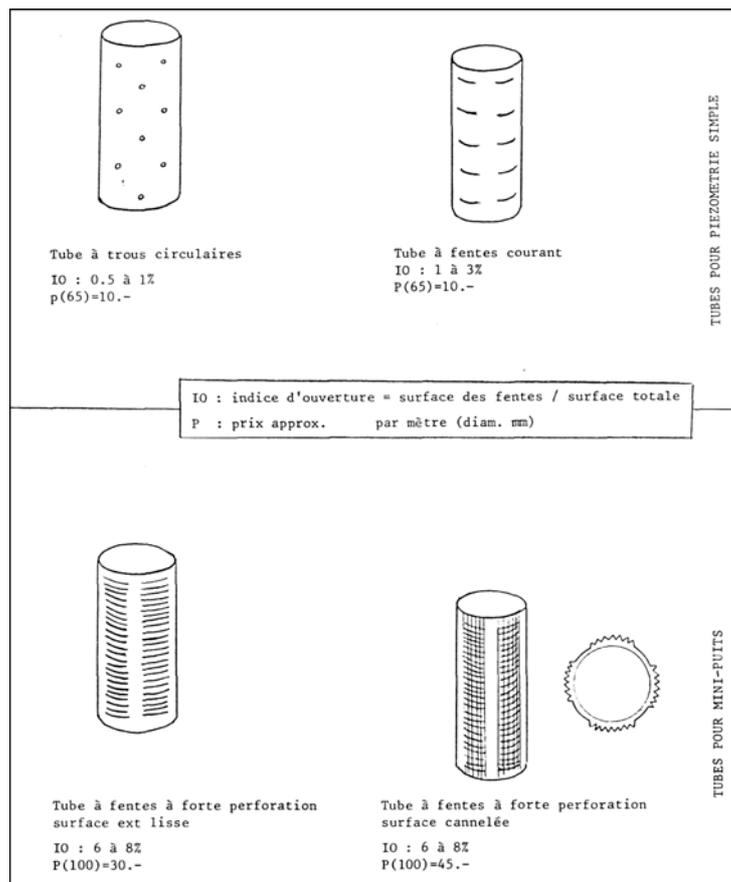


Figure 4.13. : Tubes piézométriques en PVC. Les piézomètres où l'on ne fait que des mesures de niveau sont très sommaires. Les piézomètres dans lesquels on procède à des essais de pompage (mini-puits) nécessitent des indices d'ouverture plus importants. L'usage de surfaces cannelées permet d'éviter que des grains en contact avec le tube ne ferment une partie de la fente.

Un principe fondamental est à respecter le mieux possible : toute mesure de pression dans une nappe souterraine doit être faite de manière ponctuelle. C'est-à-dire qu'un piézomètre devrait théoriquement n'être perforé que sur quelques centimètres de longueur.

En pratique, dans la plupart des problèmes à résoudre où les gradients de potentiel ne sont pas trop élevés, on place des piézomètres ouverts sur toute la hauteur saturée d'un aquifère considéré. Le tube sera perforé ainsi sur plusieurs mètres et plein sur le reste de la longueur. Cependant, un équipement piézométrique doit absolument être adapté à la configuration hydrogéologique du terrain. En particulier, dans le cas de plusieurs aquifères superposés qui peuvent avoir des potentiels différents, on place un seul tube par aquifère et on doit veiller à étancher l'espace annulaire entre les parois du sondage et le tube par un bouchon d'étanchéité en argile ou par des packers (fig 4.14).

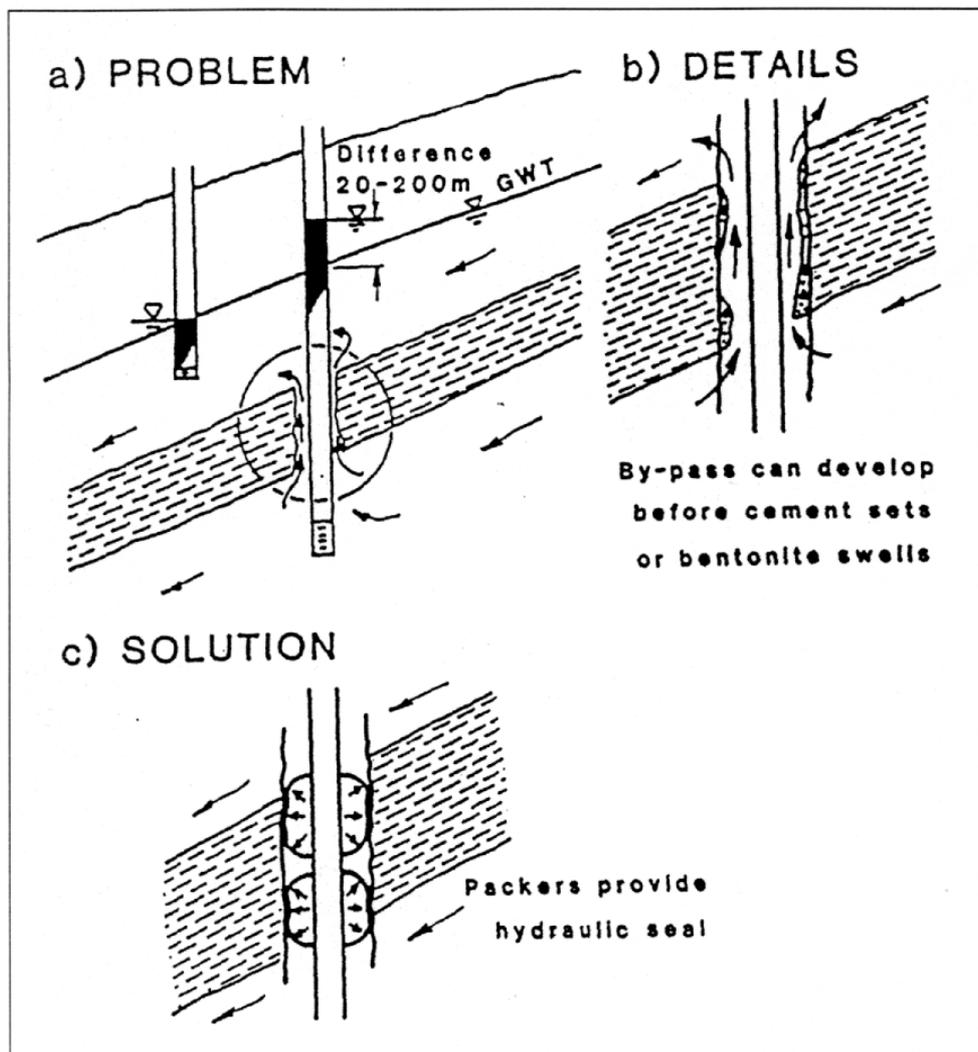


Figure 4.14. : Isolation de deux nappes à potentiel différent par une étanchéité derrière le tube piézométrique. Lorsque le courant est important, des cheminements préférentiels peuvent se créer dans un bouchon en coulis de ciment par délavage avant la prise. Dans le cas d'un bouchon de bentonite, un cheminement peut se faire avant le gonflement. Dans de tels cas, la solution du packer est plus sûre mais elle n'est pas durable. Pour un piézomètre qui doit demeurer en place, le bouchon d'argile est la meilleure solution, surtout si l'argile est mise en place dans un trou tubé. Le retrait du tubage ne se fait que lorsque l'argile s'est bien stabilisée. Les bouchons au coulis de ciment sont à éviter car ils ne sont pas déformables. Schéma tiré de Patton.

La figure 4.15 montre qu'une mauvaise étanchéité contre les eaux de surface induit des artefacts lors de la mesure du niveau piézométrique. L'application de ces principes à des configurations hydrogéologiques complexes nécessite parfois des dispositifs compliqués (fig 4.16).

Comportement d'un piézomètre sans bouchon d'argile.
Piézomètre CGG2 à Villars-sous-Yens

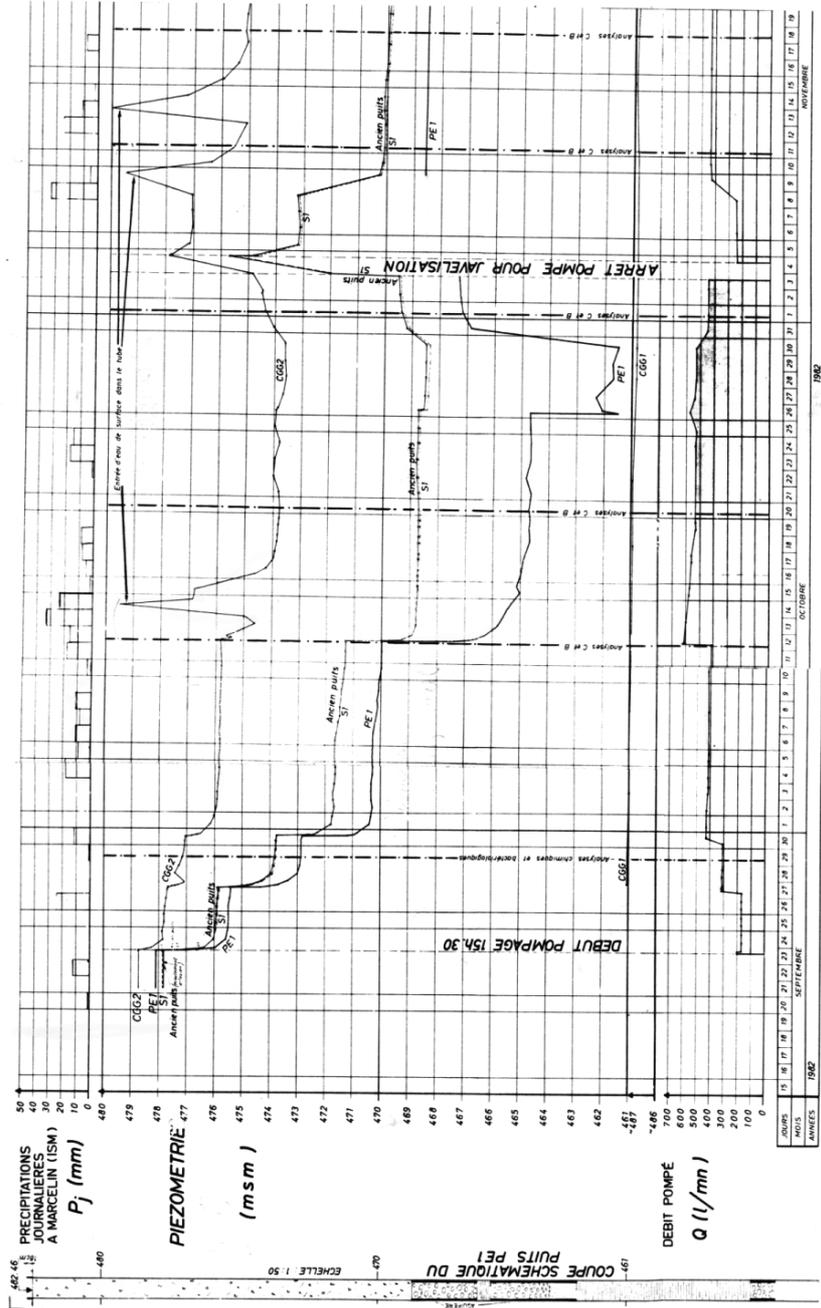


Figure 4.15. : Artefact de la réponse d'un piézomètre sans protection contre les eaux de surface. Cas du forage CGG2 à Villars-sous-Yens dans lequel un piézomètre a été placé. Le forage était un forage rotary à la boue bentonite non tubé. Les courbes de ce piézomètre montrent des rehaussements du niveau de la nappe qui sont totalement factice du 13 au 16 octobre 1982 si on les compare avec des autres piézomètres correctement équipés (par exemple S1). Ces mesures sont la résultante de la pénétration d'eau de ruissellement dans l'espace annulaire entre le sondage et le tube pizométrique.

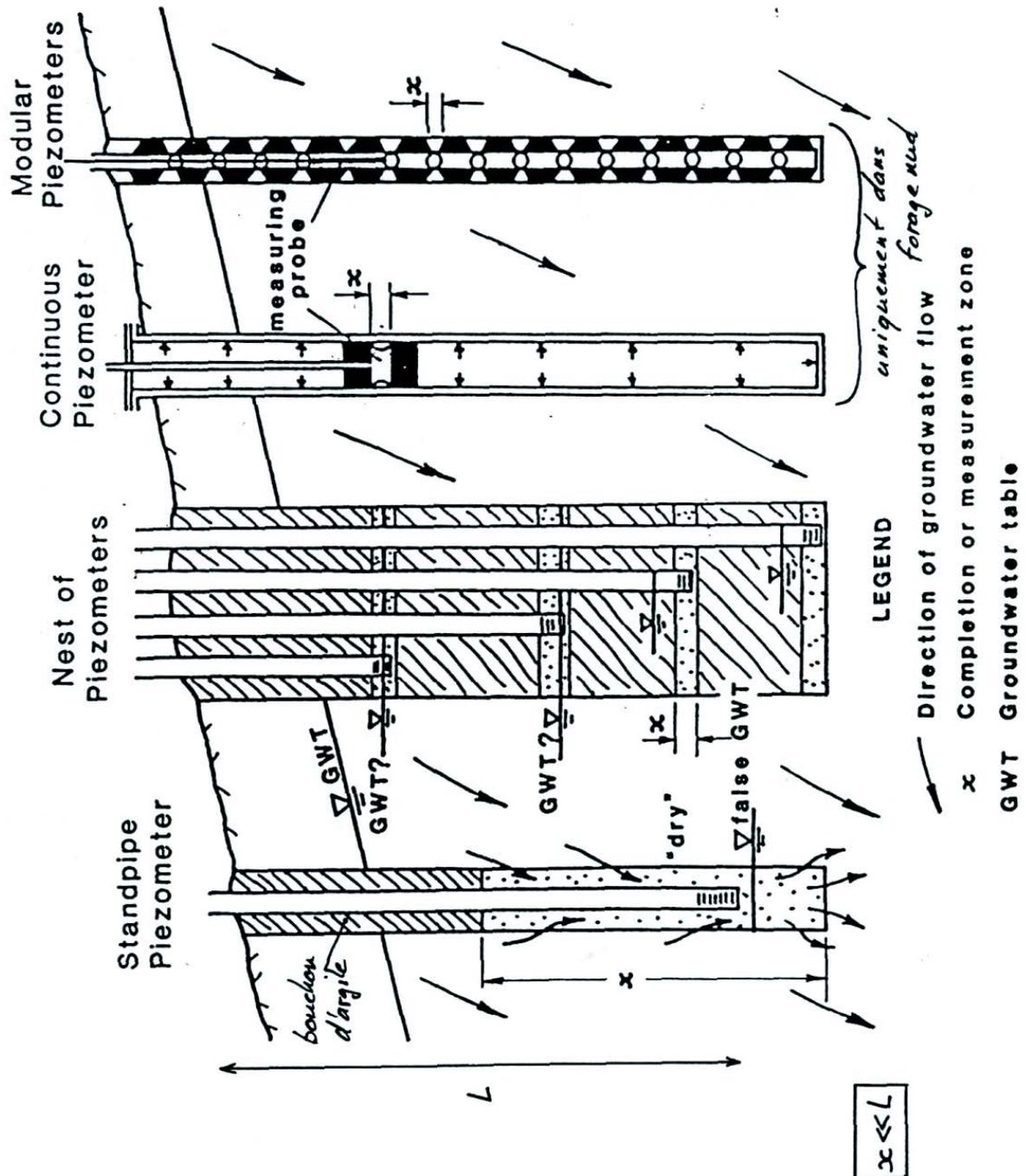


Figure 4.16. : Equipement piézométrique d'un sondage. Du piézomètre simple aux différentes formes de piézomètres à segments de mesure multiples. De gauche à droite : piézomètre unique – piézomètres multiples – piézomètre continu – piézomètre modulaire. Les deux derniers dispositifs sont en contact direct avec la paroi du sondage; ils mesurent la charge au droit d'orifices qui sont ouverts un à un par le passage de la sonde. D'après Patton.

4.3.2. Sondes à pression hydrostatique

La mesure de la pression hydrostatique dans un sondage peut être faite par un ou plusieurs piézomètres comme on vient de le voir. Elle peut être fait aussi par une mesure de pression, sans que celle-ci n'ait à se concrétiser par une colonne physique d'eau (fig 4.17). Cette mesure de pression peut être directe : par un capteur qui transmet mécaniquement la poussée qu'il subit. Elle peut être indirecte lorsque l'effet de la pression induit une réponse non mécanique.

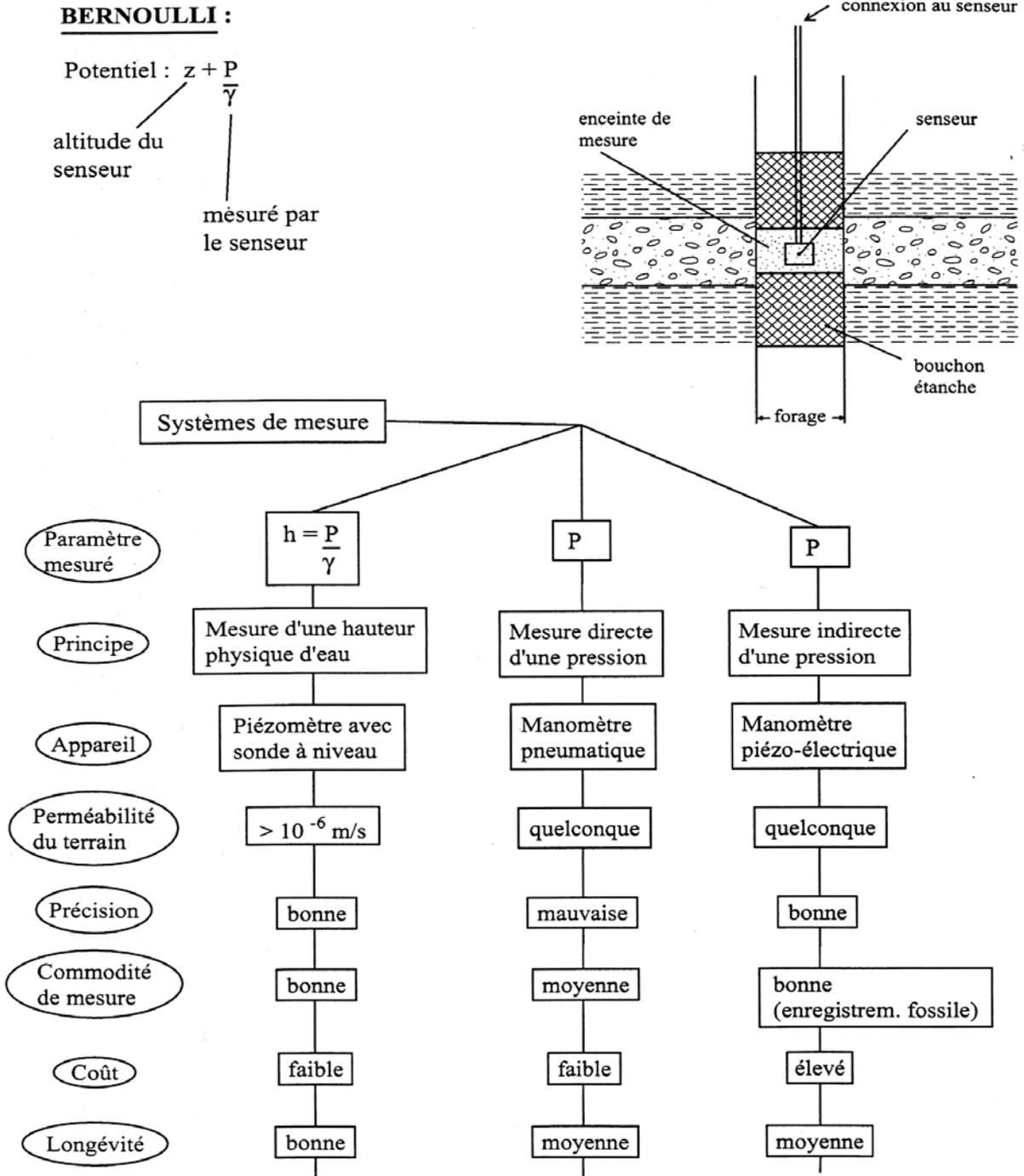


Figure 4.17. : Mesure de la pression hydrostatique en forage. Trois moyens de mesure : 1 : mesure de la pression par le poids de la colonne d'eau dans un piézomètre. 2 : mesure directe de la pression par un manomètre pneumatique. 3 : mesure de la pression par un manomètre piézo-électrique.

Les sondes à pression fournissent une solution élégante pour la mesure de variations de la pression hydrostatique dans des milieux à basse perméabilité. En effet, matérialiser la pression par une colonne d'eau nécessite que le terrain doit être capable instantanément de fournir l'eau qui doit venir dans le piézomètre. Cet équilibre n'est pas possible si la perméabilité est faible et si le tube est de diamètre important. Les sondes mécaniques (pneumatiques) ont été la solution unique jusque dans les années huitante. Dès le développement des cristaux piézo-électriques, elles ont été peu à peu remplacées par les sondes électriques qui sont plus précises, plus pratiques à mesurer et à enregistrer et de coût moins élevé (fig 4.18).

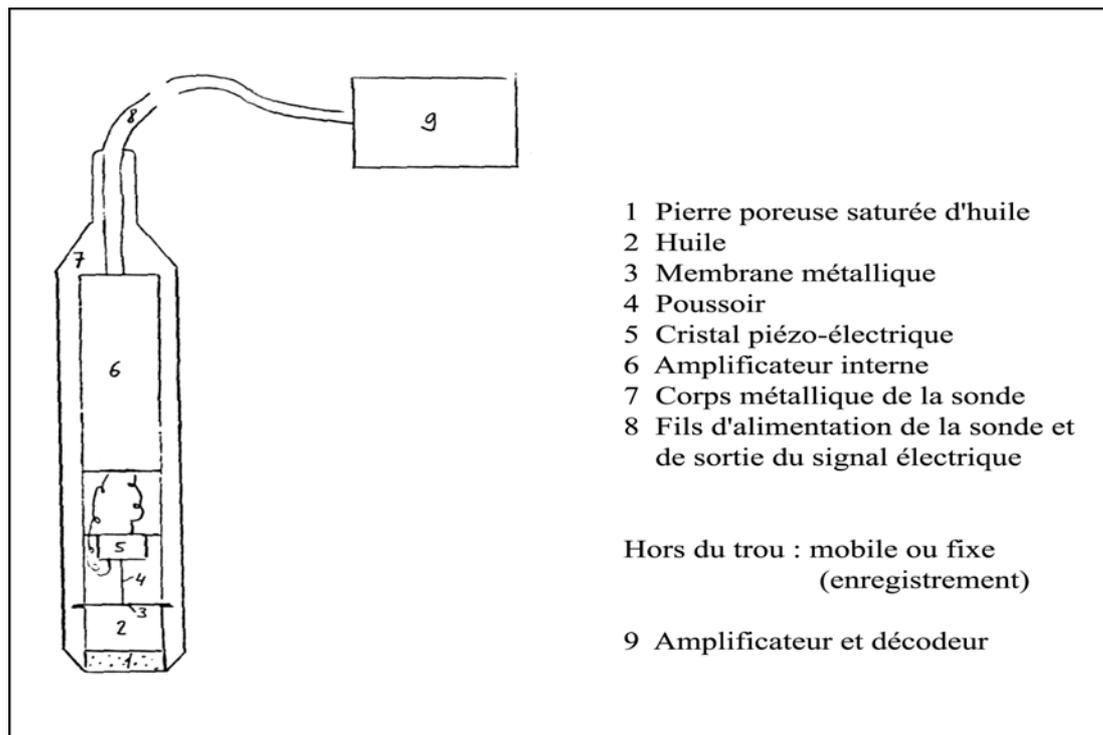


Figure 4.18. : Sonde à pression piézo-électrique. Schéma de principe : la pression de l'eau appuie sur une membrane par l'intermédiaire d'une pierre poreuse. La membrane met en pression un cristal piézo-électrique qui voit sa résistivité modifiée. Ceci entraîne une modification de courant dans un circuit électrique. Ce signal est facile à traiter et à envoyer par câble à la surface. La précision des sondes actuelles est de l'ordre du centimètre sur un intervalle de un mètre. Un data logger peut enregistrer sans problème les variations temporelles.

4.3.3. Inclinomètres

Plusieurs techniques permettent de mesurer la déformation d'un sondage au cours du temps. Ceci est utile pour toute une série de situations en géologie de l'ingénieur : glissements de terrain, tassement etc.

Une des techniques les plus utilisées est l'inclinométrie. Son principe est la mesure de la déformation angulaire continue de l'axe d'un sondage au cours du temps. Un tube en plastique spécial à 4 rainures orthogonales est scellé par du coulis de ciment dans le sondage. On descend dans ce tube la sonde inclinométrique qui est constitué d'un cylindre en deux segments qui possède aux extrémités et au centre deux roulettes guides. Ces roulettes suivent deux rainures opposées et permettent de descendre la sonde jusqu'au fond du sondage. L'angle que font les deux segments de la sonde est enregistré au fur et à mesure de la descente. On obtient ainsi la déflexion axiale projetée dans le plan déterminé par les roulettes. L'opération est ensuite répétée dans les deux autres rainures et la composante de la déflexion est mesurée à son tour. Ces directions sont référées par rapport au nord. On obtient ainsi la position de l'axe du tube dans l'espace au moment de la mesure. La mesure faite directement après la pose du tube sert de référentiel zéro. La mesure est répétée plus tard, en fonction de la vitesse supposée des déformations. La différence de la position de l'axe au temps i et celle au temps 0 donne le mouvement de l'axe du tube, donc du terrain autour du tube (fig 4.19).

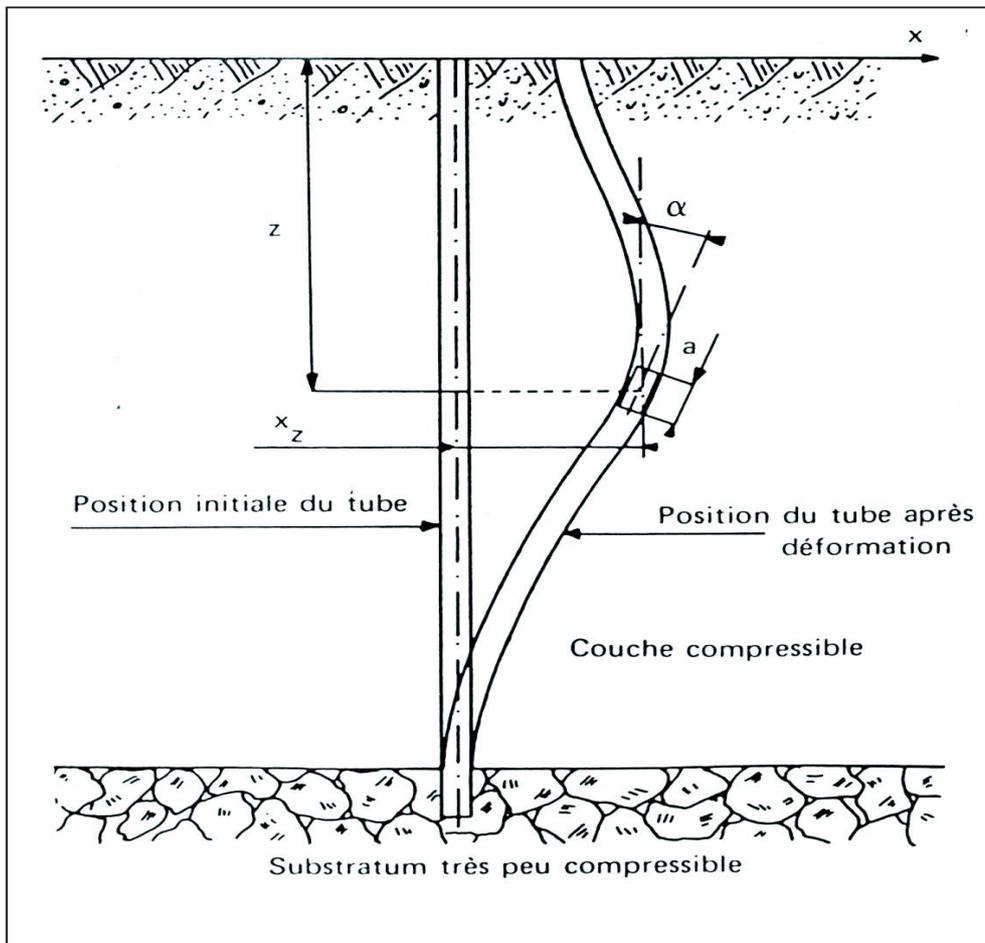


Figure 4.19. : Inclinomètre dans un terrain meuble sur rocher, terrain qui a subi un tassement. Le tube se déforme par flambage pour absorber la réduction de la distance entre le sol et le rocher.

Une des premières applications des inclinomètres est l'étude des versants en glissement. La mesure inclinométrique permet d'identifier très précisément les surfaces de cisaillement, leur profondeur, si elles sont diffuses ou tranchées (fig 4.20). La répétition des mesures autorise le calcul de vitesses moyennes sur un espace de temps.

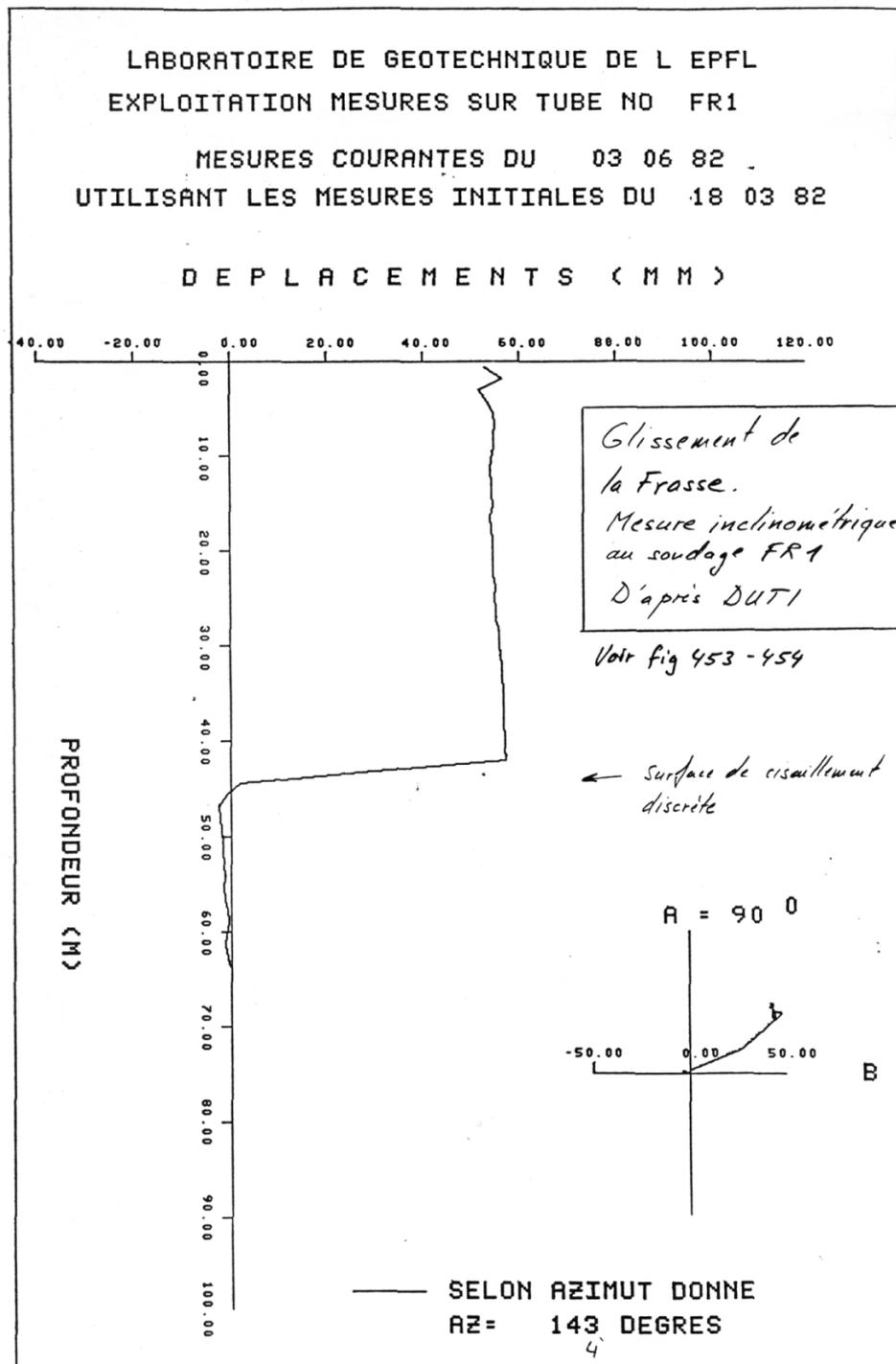


Figure 4.20. : Mesures inclinométriques dans le glissement de la Frasse (Vaud). La surface de glissement est nettement visible à 43 m de profondeur. Le cisaillement se fait pratiquement sur une seule surface. La masse glissée elle-même se déplace sans cisaillement en son sein. D'après DUTI. Le vecteur déplacement calculé par la résultante des deux composantes orthogonales permet de fixer l'azimut du déplacement de manière très précise également.

Lorsque les glissements sont très rapides, les tubes inclinométriques sont vite cisailés à tel point que la sonde ne peut plus les parcourir.

L'utilisation d'un sondage de reconnaissance, en particulier dans le domaine de la stabilité des versants, peut être un véritable dilemme : l'équipe-t-on d'un inclinomètre ou d'un piézomètre ? Les deux informations sont fondamentales dans de telles situations. Le coût d'un deuxième sondage peut être prohibitif. La pose d'un équipement mixte inclinomètre – piézomètre peut résoudre un tel dilemme si la configuration géologique et hydrogéologique le permet et si le diamètre du sondage est suffisant (fig 4.21).

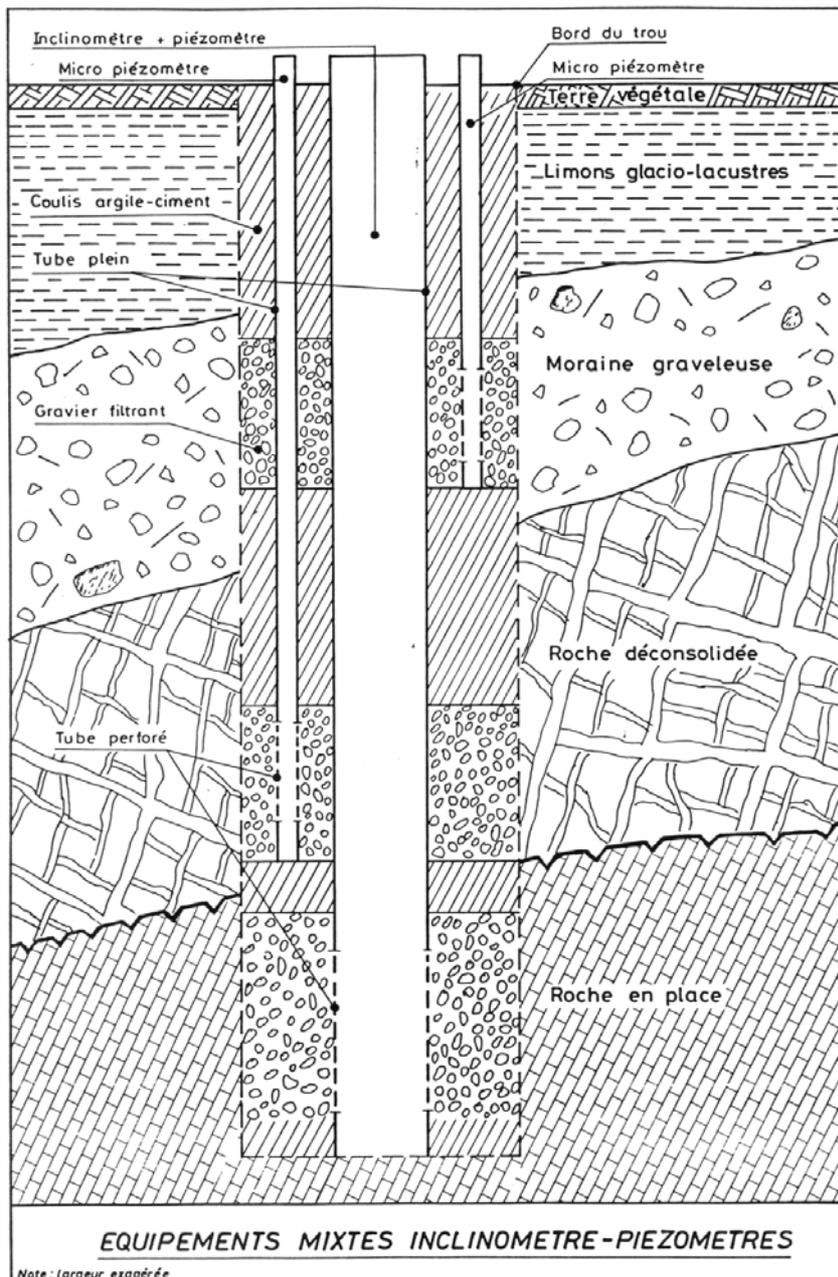


Figure 4.21. : Equipement mixte inclinomètre - piézomètre. A la base du sondage, où le diamètre est le plus petit, le tube inclinométrique est perforé pour travailler comme piézomètre profond. Plus haut, si nécessaire, on la place d'installer des piézomètres de petit diamètre en raison du diamètre plus grand dû au télescopage des tubages. Les différents piézomètres sont isolés par le coulis du tube inclinométrique.

4.3.4. Extensomètres

Les extensomètres mesurent des variations de distance le long de l'axe d'un sondage ou de part et d'autre des lèvres d'une fissure, par différents moyens physiques (acoustique, électrique, fibres optiques). Les points de mesure sont scellés à différentes profondeurs dans un coulis remplissant le sondage. Plusieurs systèmes d'équipement sont possibles : 1 ou plusieurs points de scellement, bandes de cisaillements etc. (fig 4.22).

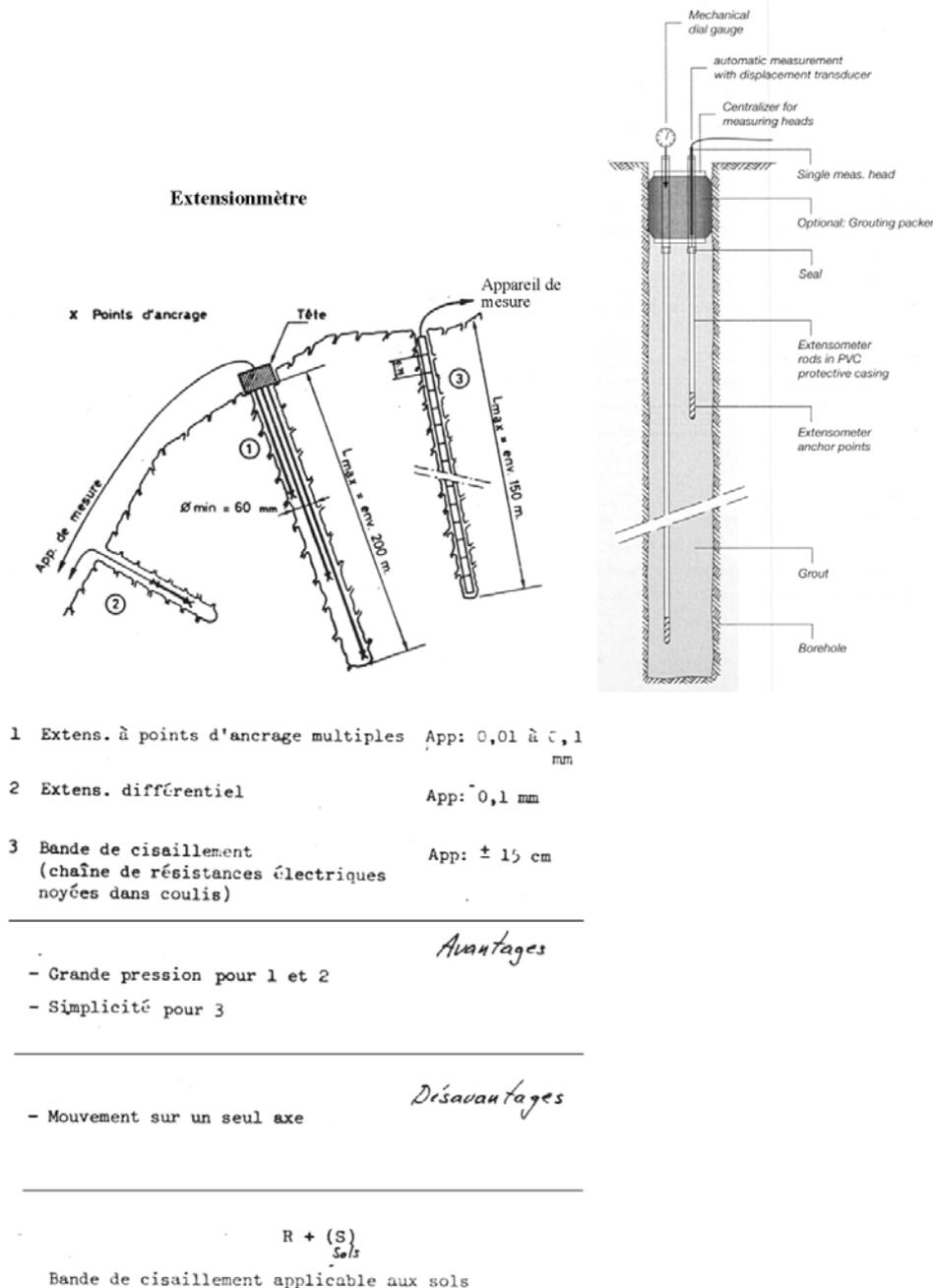


Figure 4.22. : Extensomètres. Schéma de l'installation. Tiré de Disly. Schéma de l'extensomètre de Solexperts.

Les extensomètres sont très utiles pour observer des mouvements dans les falaises instables. Lorsqu'un panneau de roche tend à basculer, la tension de l'extensomètre augmente. Un relâchement de la tension se produit dans les zones d'affaissement.

4.3.5. Déflectomètres

Le déflectomètre se rapproche de l'inclinomètre. Il mesure la déformation angulaire de l'axe d'un sondage. Il est composé d'une série de segments articulés qui sont mis en place dans le sondage (fig 4.23). Chaque genou est équipé d'un capteur de rotation des tiges qui livre de manière continue l'angle de déflexion dans l'espace. On peut ainsi enregistrer les déformations tout au long de l'axe du sondage.

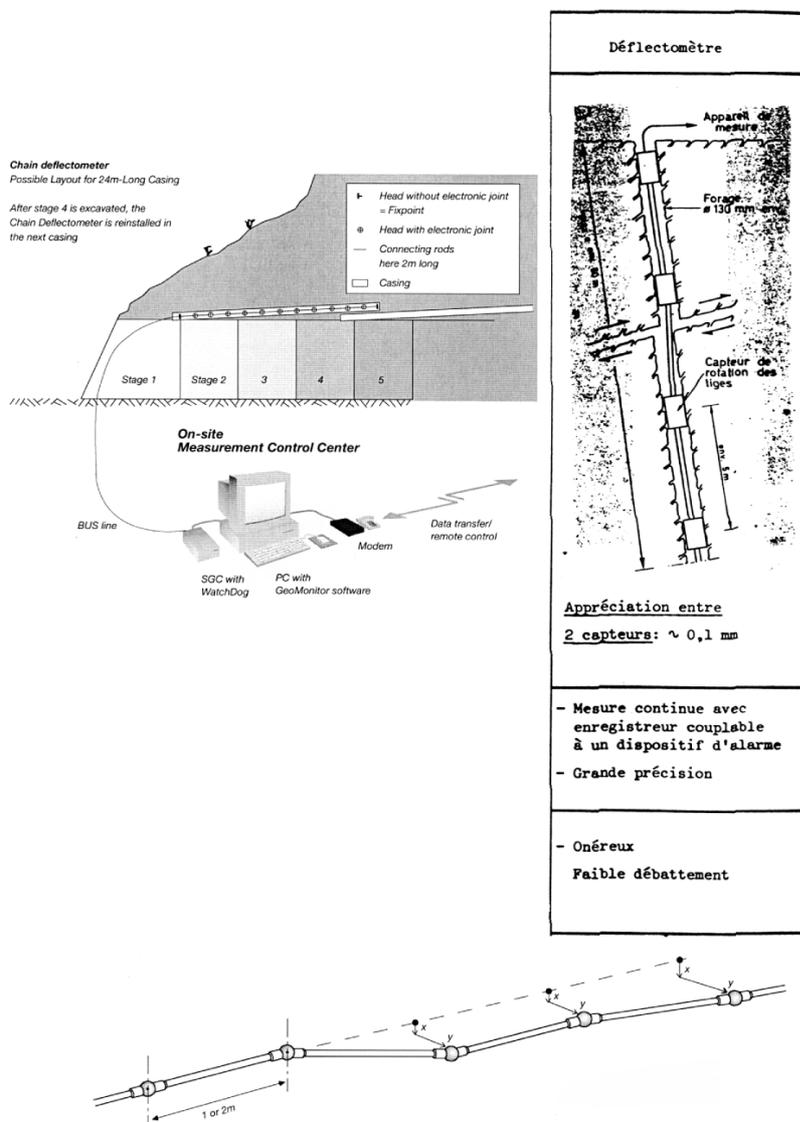


Figure 4.23. : Le déflectomètre. Géométrie du système. Application dans la mesure d'un cisaillement sur une surface. Autre application dans la surveillance de la déformation de la calotte d'un tunnel au fur et à mesure de son avancement. D'après Disly et Solexperts.

Les déflectomètres sont souvent utilisés pour équiper de manière permanente un des forages implantés dans une masse instable. Il sert d'outil de surveillance du mouvement.

4.3.6. Sondes de déformation de sondages

Les sondes les plus récentes de mesure de déformation d'un sondage (ou « déformètres ») sont des instruments d'une très grande précision qui peuvent coupler un extensomètre et deux inclinomètres orthogonaux (fig 4.24). Ces sondes sont mobiles et permettent de mesurer des déformations infimes de longueur et d'angle dans l'espace entre deux campagnes de mesure. On peut également laisser une sonde en place et enregistrer les mouvements dans un secteur particulier, par exemple au droit d'une zone de cisaillement.

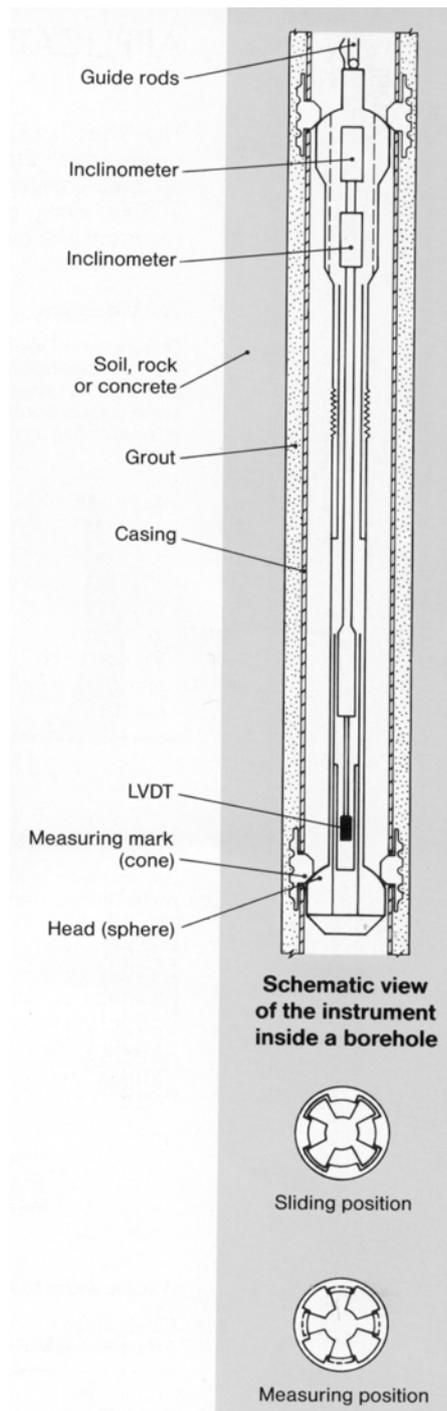


Figure 4.24. : Déformètre glissant TRIVEC de Solexperts. Le sondage est équipé d'un tube spécial qui comporte des attaches métalliques tous les mètres. Le tube est scellé au coulis de ciment dans le sondage. La sonde mobile est accrochées entre deux étages d'attaches, dans une position de fixation très précise qu'elle retrouvera à chaque campagne de mesure. Elle mesure avec un extensomètre la distance entre les attaches supérieures et inférieures. Avec deux inclinomètres orthogonaux l'angle dans l'espace du segment testé. On décroche la sonde et on l'accroche au segment suivant. La répétition des campagnes de mesure permet de voir l'évolution du sondage dans l'espace et dans le temps. Pour garantir une bonne reproductibilité des mesures, la sonde est étalonnée sur un cadre en invar, peu sensible à la température. LVDT = Linear Displacement Transducer. Document Solexperts.

4.4.2. Courantométrie de forage

Cette technique moderne s'est beaucoup développée en hydrogéologie, que ce soit dans le domaine des hautes ou des basses perméabilités. Elle nécessite l'usage d'un moulinet de forage (flowmeter) qui permet de mesurer le débit vertical dans le sondage à différentes profondeurs. De la différence de débit vertical entre deux points, on tire le débit radial de la tranche, duquel on déduit sa perméabilité.

L'agrégat de courantométrie est composé de plusieurs parties (fig 4.26).

Le moulinet :

Le moulinet est similaire à un moulinet de rivière mais avec une géométrie propre au travail en forage. Son diamètre permet de travailler dans des tubes de 100 mm, diamètre correspondant du reste au minimum nécessaire pour placer une pompe de forage ordinaire. Il possède un seuil de réponse très bas ($v > 5 \text{ mm/s}$). Il est capable de mesurer des courants ascendants ou descendants. Il est suspendu à un câble porteur et envoie par ce câble à un moniteur en surface un signal correspondant à la vitesse de rotation de l'hélice.

Le moniteur :

Cet appareil permet de traiter le signal venant du moulinet et de l'enregistrer. La commande de la profondeur est faite par un treuil spécial à diagraphies qui garantit un déroulement à vitesse régulière pour les mesures de logging (mesures par balayage de la profondeur). Le moniteur enregistre les mouvements du treuil.

L'agrégat de pompage :

C'est un dispositif de pompage classique légèrement adapté à la mobilité de la manœuvre. Il est fait d'une pompe immergée pour les nappes profondes et d'une pompe aspirante quand le niveau d'eau est proche de la surface. La crépine de la pompe est placée toujours le plus haut possible dans le forage (fig 4.26) pour garantir la zone d'accès du moulinet la plus grande possible (le moulinet ne peut croiser la pompe en raison de l'exiguïté des forages).

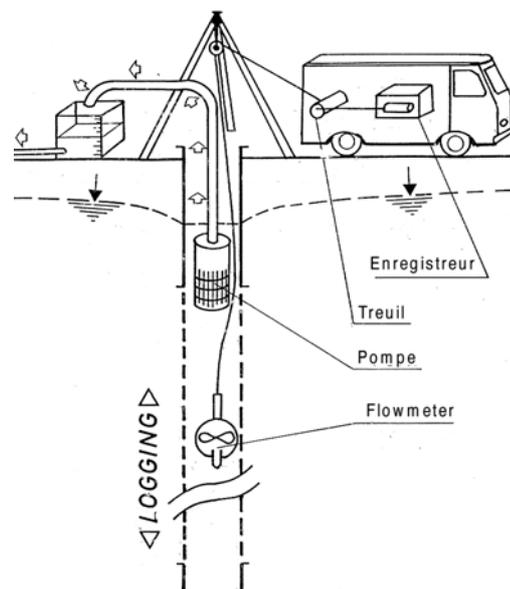


Figure 4.26. : Equipement de courantométrie de sondage.

L'essai de courantométrie comprend 3 étapes :

Étape I : mesures de débit sans pompage

Dans de nombreuses configurations hydrogéologiques et tout spécialement dans les zones de recharge ou d'exutoire, des horizons aquifères ont des potentiels hydrauliques différents. Lorsqu'un forage muni d'un tube perforé traverse ses séries, il est parcouru par un courant "au repos" qui est la résultante de l'équilibrage des potentiels. Le forage crée ainsi un court-circuit hydrogéologique.

Le moulinet mesure les courants soit à des profondeurs discrètes, soit en balayage continu (logging). On en tire par une courbe d'étalonnage les débits entrant ou sortant du sondage pour les différentes tranches d'aquifères considérées (par exemple tranches de 1m).

Au-delà de sa contribution à la mesure de la perméabilité, cette première étape est très importante pour la compréhension des conditions hydrogéologiques du secteur, notamment sur l'indépendance hydrogéologique de formations et sur la répartition des potentiels naturels.

Étape II : Mesures en condition de pompage

On place la pompe légèrement au-dessous du niveau hydrostatique, suffisamment pour qu'elle ne dénoie pas pendant l'essai. On pompe ensuite avec un débit approprié aux performances du sondage. On attend que des conditions d'équilibre du débit et du rabattement soient atteintes. On répète alors l'opération de mesure de l'étape I.

Étape III : traitement des résultats

Sur la base des mesures de débit vertical au repos, on calcule de débit radial q pour les différentes tranches i d'aquifère (fig 4.27).

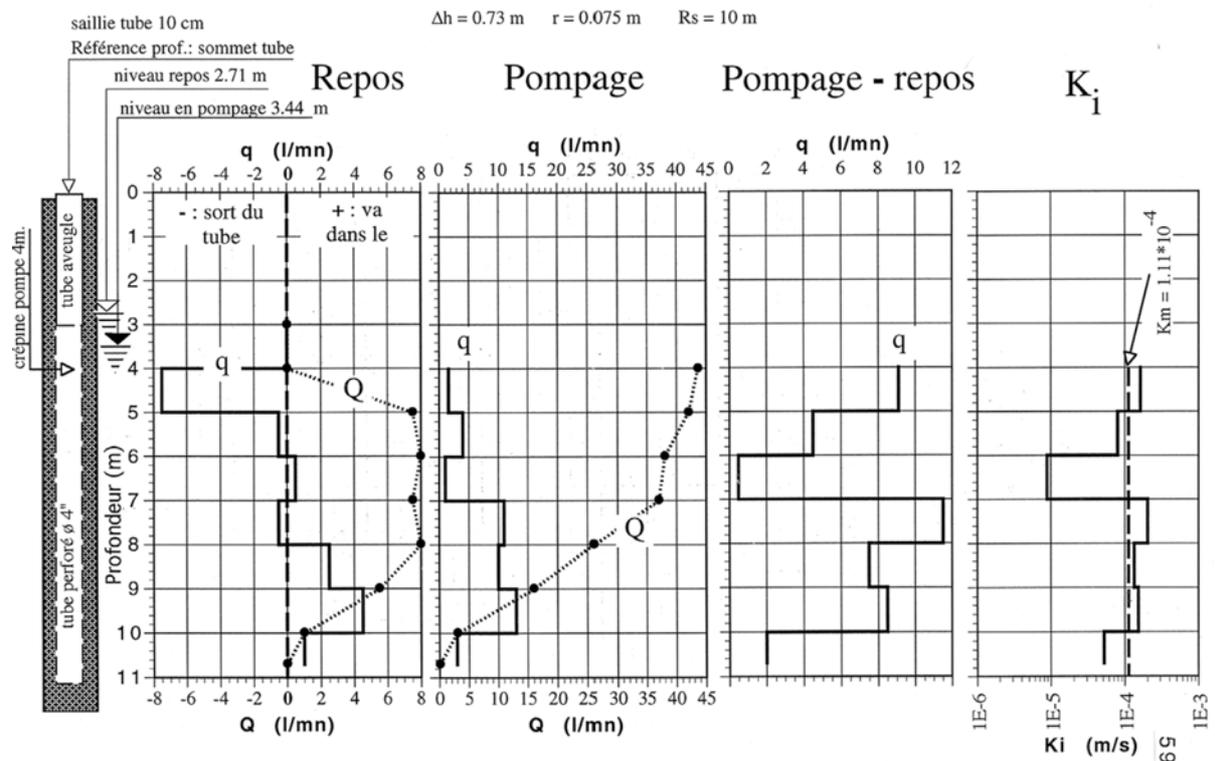


Figure 4.27. : Calcul des mesures au flowmeter.

Pour la tranche i allant de la profondeur avec P_1 à P_2 avec $P_2 > P_1$

$$q_i = Q_{P_1} - Q_{P_2}$$

avec

Q_{P_1} = débit vertical en haut de la tranche i

Q_{P_2} = débit vertical en bas de la tranche i

Ainsi, lorsque le débit croît de P_2 à P_1 , q_i est positif. De l'eau entre dans le forage entre P_2 et P_1 . Si q_i est négatif, de l'eau quitte de forage au droit de la tranche.

On fait de même pour les mesures en condition de pompage. On obtient pour chaque tranche une valeur de débit radial qui est la somme des effets "au repos" et du pompage.

Pour ne tenir compte que de l'effet du pompage, on doit déduire le débit "au repos" de celui mesuré en condition de pompage.

On calcule ensuite la perméabilité de la tranche i en appliquant l'équation de Dupuit en assimilant la tranche à une nappe captive d'épaisseur e_i . On utilisera le rabattement mesuré pendant le pompage pour toutes les tranches.

$$K_i = \frac{q_i}{2\pi e_i \Delta h} \ln(R/r)$$

On obtient ainsi le profil de perméabilité du forage. On calcule enfin la perméabilité moyenne du sondage en pondérant les effets des n couche

$$K_m = \frac{\sum_{l=i}^n k_l e_l}{\sum_{l=i}^n e_l}$$

La mesure de courantométrie permet ainsi de déterminer quelles sont les productivités des différentes parties de l'aquifère. Ce sera très utile pour fixer la profondeur des puits à construire. Par exemple, lorsqu'un gisement se compose de deux horizons aquifères, l'un près de la surface, l'autre nettement plus profond : il faut connaître la productivité de l'horizon profond pour décider si on construit un puits coûteux pour exploiter les deux niveaux.

Exercice 4.3 : Flowmeter dans le contexte de la décharge de la Lonza à Gamsen (Valais).

4.4.3. Logging hydro-physique

Dans certaines configurations hydrogéologiques, on est intéressé à connaître des variations spatiales de la composition des eaux qui alimentent un sondage. Un essai de pompage standard livre une perméabilité moyenne, mais aussi une composition de l'eau moyenne. Il est possible avec des capteurs spécifiques de faire un logging hydrochimique enregistrant la variations des paramètres en fonction de la position dans le sondage (fig 4.28).

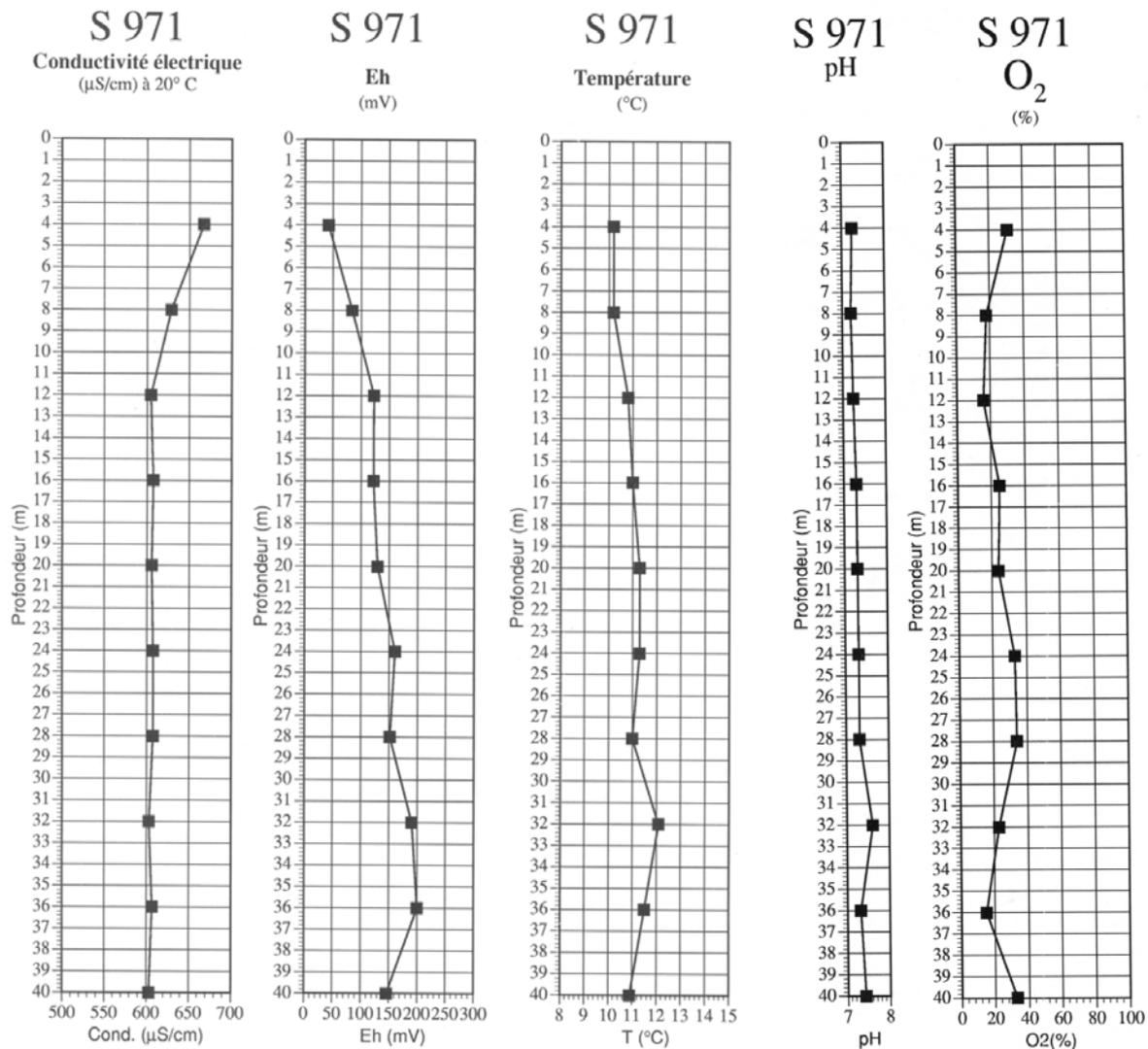


Figure 4.28. : Logging hydrochimique. Cas de la nappe du delta de la Gérine à Cully. Cette étape présente des zones à fort déficit en oxygène qu'il est nécessaire de tester par un logging de la qualité des eaux.

Un autre cas classique est la détection de venues riches en sulfates dans un sondage où ce sont des eaux bicarbonatées calciques qui sont recherchées. Une sonde conductivité électrique permet de détecter la profondeur de ces venues indésirables.

4.4.4. Essais de traçage

Un sondage peut être le moyen d'injecter des traceurs artificiels directement en profondeur, afin de tester la liaison entre les eaux souterraines et des exutoires régionaux. Un cas typique en géologie de l'ingénieur est l'utilisation de ce genre de test pour déterminer le devenir des pertes par les fondations d'un barrage.

Conclusion

Les différentes formes et techniques de sondage sont un apport fondamental dans les reconnaissances in-situ. Elles doivent être intégrées dans la conception générale des reconnaissances in-situ qui fait intervenir aussi la cartographie géologique de surface à l'échelle de détail et les différentes méthodes géophysiques. Elles apportent les garanties nécessaires pour que le projet d'ingénierie puisse voir le jour avec le minimum de risques géologiques. C'est la mission première de la géologie de l'ingénieur.