

AGENCE FINANCIÈRE DE BASSIN LOIRE-BRETAGNE

Avenue Buffon

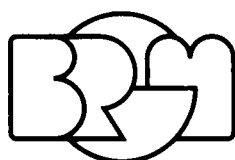
B.P. 6015 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.08.16

MÉTHODES DE RECHERCHE D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU FISSURÉ

Etat des connaissances

par

H. TALBO et P. VAUBOURG



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département hydrogéologie

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 63.80.01

77 SGN 358 HYD

Juillet 1977

R E S U M E

A la demande de l'Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne, le BRGM a fait le point sur l'état des connaissances des méthodes de recherche d'eau souterraine en milieu fissuré.

Ce rapport montre, sur la base d'une expérience acquise aussi bien en France qu'à l'étranger, que, parmi les méthodes classiques et complémentaires de recherche en ce domaine (photo-interprétation, géophysique, forages de reconnaissance), la contribution tant du point de vue technique que coût de la méthode du marteau fond et hors de trou en matière de forage d'eau, de reconnaissance et d'exploitation en milieu fissuré est fondamentale.

S O M M A I R E

	pages
1. INTRODUCTION	1
2. GENERALITES	1
2.1. Définition du milieu fissuré	1
2.1.1. Définition lithologique	1
2.1.2. Définition hydraulique	1
2.2. Problèmes spécifiques à la recherche d'eau souterraine en milieu fissuré	1
2.3. Rappel des méthodes employées avant 1973-1974	2
3. LA FORATION A L'AIR - MARTEAU HORS ET FOND DE TROU	3
3.1. Description du matériel	3
3.2. Les paramètres de la foration	5
3.2.1. en terrain sec	5
3.2.2. en terrain saturé	6
3.3. Avantages et inconvénients techniques comparés du rotary conventionnel à la boue et du marteau fond de trou	6
3.3.1. Rappel des avantages et inconvénients du rotary à la boue	6
3.3.2. Avantages et inconvénients du marteau fond de trou	6
3.4. Nature et qualité des informations acquises par le marteau fond de trou	7
3.5. Coût du forage au marteau fond de trou - Comparaison avec le coût du rotary à la boue	8
3.6. Conclusion	9
4. ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS DANS LES FORAGES REALISES AU MARTEAU FOND DE TROU EN MILIEU FISSURE	9
4.1. Forages implantés au hasard	9
4.1.1. Cas particuliers de la région de St. Malo (35)	10
4.1.2. Variation des débits en fonction de la nature de la formation fissurée	10
4.1.3. Utilisation des forages	11
4.2. Forages implantés après étude	11
4.3. Comparaison des résultats des forages implantés au hasard - forages implantés après étude	11

	pages
5. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU FISSURE	12
5.1. Définition des objectifs	12
5.2. Méthode et coût de la recherche d'eau en milieu fissuré	12
5.2.1. PHASE 1 : géologie et hydrogéologie	12
5.2.2. PHASE 2 : géophysique	13
5.2.3. PHASE 3 : forages de reconnaissance et d'exploitation	15
6. CONCLUSION	17
BIBLIOGRAPHIE	18
ANNEXE I - <i>Caractéristiques techniques du matériel de forage hors et fond de trou disponible sur le marché français.</i>	
ANNEXE II - <i>Prix unitaires (premier semestre 1977) des principaux postes du bordereau des prix d'un cahier des charges de forage d'eau réalisé au marteau fond de trou et rotary à la boue.</i>	

La présente étude, entreprise pour le compte de l'Agence Financière de Bassin Loire-Bretagne (convention n° 77-142 du 6 juin 1977), a pour but de faire le point sur l'état des connaissances des méthodes de recherche d'eau souterraine en milieu fissuré sur la base d'expériences acquises aussi bien en France qu'à l'Etranger. Elle se propose aussi d'en estimer les résultats en France.

1. INTRODUCTION

Les méthodes de recherche d'eau souterraine en milieu fissuré ont d'abord été largement mises en oeuvre en Afrique Occidentale dans le cadre d'opérations d'aménagement d'hydraulique pastorale ou villageoise. En effet, le grande superficie des formations de socle, des conditions climatiques sévères et l'absence ou la pauvreté des ressources en eau de surface ont amené les hydrogéologues à développer assez tôt des méthodes de recherches en eau souterraine dans ces régions.

En France, il était commun d'associer l'eau souterraine aux grands bassins sédimentaires ou alluviaux. De leur côté, les "vieux massifs" avaient la réputation d'offrir peu ou pas d'aptitudes. Comme cela est souvent le cas, de graves difficultés à grandes incidences socio-économiques ont constitué le catalyseur d'une prise de conscience et d'une évolution des attitudes. Chronologiquement, ce furent d'abord la persistance de la sécheresse en Afrique Sahélienne, puis celle subite en France en 1976 qui ont provoqué un brusque développement de l'intérêt porté à la recherche d'eau en milieu fissuré. A cela, il faut ajouter l'évolution parallèle des techniques de recherche, essentiellement en matière de forage.

2. GENERALITES

2.1. Définition du milieu fissuré

Deux définitions peuvent être données aux milieux fissurés, l'une lithologique, l'autre hydraulique :

2.1.1. Définition lithologique

Les milieux fissurés rassemblent toutes les roches non poreuses (sans porosité d'interstice tels que les alluvions, grès etc...), mais qui, à la faveur d'altérations, de fracturations, peuvent acquérir une porosité secondaire. Dans ce groupe de roches, on peut ranger l'ensemble des roches carbonatées (dolomie, calcaire,...), les roches cristallines, volcaniques et métamorphiques. Toutefois, certaines roches à porosité primaire peuvent être également fissurées, telles que le grès, la craie, etc...

2.1.2. Définition hydraulique

Les milieux fissurés sont des milieux continus, anisotropes. Les karsts ne doivent pas être considérés comme des milieux fissurés. Il est usuel de distinguer des formations à "porosité de fissures" (joint porosity) et à "porosité de chenaux".

2.2. Problèmes spécifiques à la recherche d'eau souterraine en milieu fissuré

Les objectifs de la recherche d'eau souterraine en milieu fissuré ne diffèrent pas de ceux poursuivis dans d'autres types de milieux. Il s'agit de trouver en un point ou plusieurs des débits suffisants pour satisfaire une demande.

En milieu fissuré, il est classique de distinguer d'une part les formations d'altération et d'autre part les formations saines.

L'altération fournit en général des matériaux faiblement perméables. Les auteurs s'accordent pour admettre que ces formations, faiblement perméables, ont principalement un rôle d'emménagement.

Les fissures dans la roche saine lorsqu'elles sont ouvertes et non colmatées peuvent créer en un point un milieu fortement perméable. Le rôle d'emménagement de ces fissures est reconnu comme faible.

La recherche en milieu fissuré s'orientera donc principalement vers la localisation des fissures qui constituent "a priori" le milieu le plus perméable. La répartition des fissures dans les milieux fissurés est en général aléatoire. De ce fait, les méthodes classiques de recherche, utilisées en zone sédimentaire, fondées sur l'interpolation des mesures, ne peuvent s'appliquer de la même manière. Les études doivent être très localisées et très détaillées.

2.3. Rappel des méthodes employées avant 1973-1974

Avant 1973-1974, la recherche d'eau en milieu fissuré comprend classiquement trois phases. Dans l'ordre chronologique d'intervention, ces trois phases sont :

- PHASE 1 : géologie - hydrogéologie (examen des photos aériennes, reconnaissance de terrain, etc...).
- PHASE 2 : géophysique (méthodes de la résistivité, et/ou sismique).

Les phases 1 et 2 conduisent à la sélection des sites les plus favorables (bonne fracturation etc...). Toutefois elles n'apportent peu ou pas d'informations sur le rôle hydrogéologique des fractures repérées.

- PHASE 3 : forages de reconnaissance réalisés par les procédés rotary à la boue ou à l'eau claire et au battage destinés à vérifier et à tester les choix des phases 1 et 2.

Ce schéma de recherche en trois phases a donné en général des résultats satisfaisants. Les informations acquises d'intérêt hydrogéologique sont d'assez bonne qualité, mais le coût élevé du mètre foré a sans nul doute été un frein important au développement de la recherche d'eau en milieu fissuré.

L'évolution de la recherche d'eau en milieu fissuré est certes dépendante d'une amélioration de l'acquisition des informations hydrogéologiques, mais surtout de la mise au point d'une technique de forage rapide et peu coûteuse.

La méthode de foration à l'air au marteau fond et hors de trou utilisée depuis longtemps par les géotechniciens et les mineurs a apporté une solution satisfaisante.

Les phases 1, 2 et 3 sont décrites d'une manière détaillée dans le paragraphe 5.2., page 12.

3. LA FORATION A L'AIR - MARTEAU HORS ET FOND DE TROU

3.1. Description du matériel

Le procédé de perforation allie percussion et rotation. Une unité de forage comprend trois organes principaux :

- le marteau fonctionnant à l'air comprimé et imprimant un mouvement de percussion à un taillant,
- le compresseur fournissant l'air sous pression - l'air constitue le fluide de circulation et assure le fonctionnement des organes moteurs,
- une foreuse permettant les manoeuvres du marteau et du train de tiges.

Dans la version "marteau fond de trou", le marteau muni de son taillant est fixé à la base du train de tiges. Dans la version "hors de trou", le marteau reste au jour et est situé en tête du train de tiges. Le taillant est vissé à la base du train de tiges.

La foreuse et le compresseur peuvent être adaptés sur un même véhicule ou sur des véhicules séparés. A l'expérience, il semble que la première solution soit la meilleure.

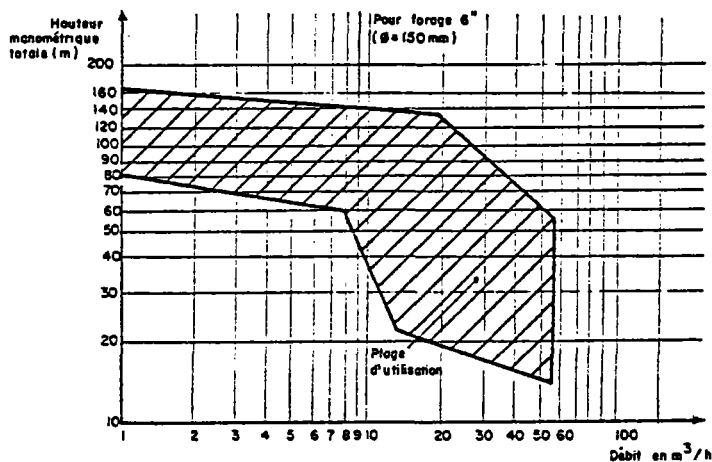
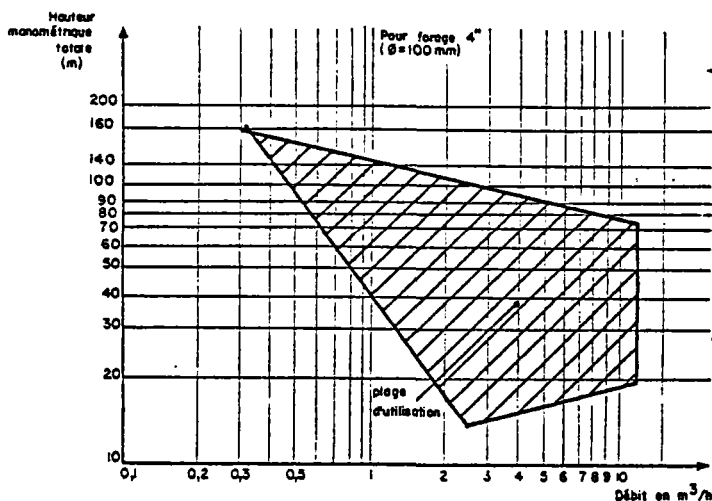
Les performances moyennes (profondeur et diamètres) des marteaux hors et fond de trou sont les suivantes :

Type de marteau	Profondeur moyenne d'investigation(m)	Ø d'investigation courant (mm)	Remarques
Hors de trou	50 - 60	64 - 89	
Fond de trou	80 - 100	105 - 225	les Ø 300-400 mm commencent à être couramment employés

Le marteau hors de trou est moins performant que le marteau fond de trou. Les diamètres 64-89 mm répondent aux problèmes de la reconnaissance, mais sont insuffisants pour des forages d'exploitation. Par contre, les diamètres pratiqués en marteau fond de trou permettent des équipements pouvant recevoir des pompes immergées de Ø 4" et Ø 6", voire même 8". Ces diamètres de pompe permettent de couvrir une gamme de débits - hauteur manométrique assez étendue (voir figure n° 1).

Fig. n°1

Pompes immergées



Les vitesses d'avancement sont fonction des terrains rencontrés. Mais, d'une manière générale, elles sont 5 à 10 fois supérieures à celles enregistrées au rotary à la boue :

- granites sains : 2 à 5 m/h
- calcaires, dolomies : 5 à 15 m/h
- grès durs : 3 m/h
- grès peu consolidés : 10 m/h
- schistes sains : 10 à 20 m/h

Enfin, le marteau fond de trou peut forer en terrain sec comme dans l'eau.

Ces quelques caractéristiques montrent que cette méthode de forage est très performante et qu'elle répond bien à certaines exigences techniques de la reconnaissance d'eau souterraine. Des données techniques portant sur les principaux matériels disponibles sur le marché français sont présentées dans l'Annexe I.

3.2. Les paramètres de la foration

Les paramètres de la foration à l'air sont essentiellement débit d'air et pression. Les compresseurs disponibles sur le marché offrent des gammes de pression de 7 à 20 bars (1 bar = 1,02 kg/cm²) et de débit d'air de 19 à 30 m³/mn.

3.2.1. en terrain sec

Le rôle du facteur pression est d'abord d'assurer le fonctionnement du marteau et autres organes moteurs et ensuite de vaincre les pertes de charge dans les flexibles, tête d'injection, marteau, etc... Les marteaux sont conçus pour fonctionner entre 5 et 18 bars de pression. On constate que l'éventail est large, mais il faut savoir que la vitesse d'avancement et que la capacité de soufflage du marteau croissent avec la pression. Les constructeurs annoncent que la vitesse d'avancement comme la capacité de soufflage sont doublées lorsque la pression passe de 6 à 10,5 bars.

De plus, une bonne capacité de soufflage limite l'usure des taillants. Dans l'espace annulaire tige - trou, la pression est voisine de la pression atmosphérique, et même légèrement inférieure à cette dernière à la sortie des événements du marteau. Cette légère détente favorise le refroidissement des taillants.

La vitesse de remontée de l'air dans l'espace annulaire, fonction directe du débit d'air, conditionne la dimension des cuttings (débris de roche) (loi de STOKES et d'EIFFEL). A titre d'exemple, le tableau ci-dessous donne les vitesses d'air nécessaires pour remonter les cuttings d'une dimension donnée pour des matériaux de densité comprise entre 2,0 et 2,8.

Ø des particules (sphériques) mm	Vitesses d'air en m/s
0,1	0,6
0,5	4,0
1,0	6,0
5,0	15,0
10,0	20,0

Ce tableau permet de comprendre que toute perte partielle d'air en réduisant le débit d'air a pour conséquence directe de réduire la taille des cuttings.

Théoriquement, la méthode de forage à l'air en terrain sec peut permettre d'atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres. Une expérience conduite dans l'Anti-Atlas (Maroc) a montré que l'on pouvait atteindre aisément 250 m en diamètre 6".

3.2.2. en terrain saturé

Les lois qui régissent alors la foration et ses paramètres débit - pression d'air sont celles de l'air-lift.

3.3. Avantages et inconvénients techniques comparés du rotary conventionnel à la boue et du marteau fond de trou

3.3.1. Rappel des avantages et inconvénients du rotary à la boue

L'atout du rotary à la boue est que la foration en terrains non consolidés (sables, alluvions, etc...) ne pose pas de difficulté. Le cake de la boue maintient les parois du forage. Les inconvénients principaux pour la foration en milieu fissuré sont :

- approvisionnement du chantier en eau. En milieu fissuré, les pertes partielles ou totales de circulation sont fréquentes.
- matériel souvent lourd et encombrant ;
- vitesses d'avancement faibles dans les terrains durs ;
- risques de colmatage artificiel par la boue ;
- informations hydrogéologiques moyennement précises.

3.3.2. Avantages et inconvénients du marteau fond de trou

On peut dire que le marteau fond de trou remédie à l'ensemble des inconvénients du rotary à la boue. Par contre, cette méthode est souvent mal adaptée pour la foration en terrains non consolidés.

Les constructeurs ont mis au point des solutions techniques qui apportent le plus souvent satisfaction, sauf peut être pour le marteau hors de trou pour lequel on est souvent obligé de faire appel à une autre technique de forage pour la pose de tubage au droit de la formation non consolidée. ATLAS-COPCO a bien créé le système O.D. (Over Drilling) de tubage à l'avancement pour le marteau hors de trou, mais ce système bien adapté pour les terrains saturés ne l'est guère pour les terrains secs.

Dans le cas du marteau fond de trou, par contre, il existe un procédé de tubage à l'avancement qui se révèle souvent efficace. Ce procédé est connu sous le nom de SATURNE. Dans ce cas, le marteau est équipé d'un taillant spécial muni d'un excentrique dont le rôle est de faire un passage pour le tubage. Deux gammes de diamètre de tubage sont couramment employées : 117-133 mm et 152-168 mm. Le tubage peut en principe être récupéré en fin de travaux. L'expérience a montré que ce procédé était efficace jusqu'à 25 m environ pour franchir les formations bouillantes de surface. Mais il reste toujours le problème des couches bouillantes en profondeur.

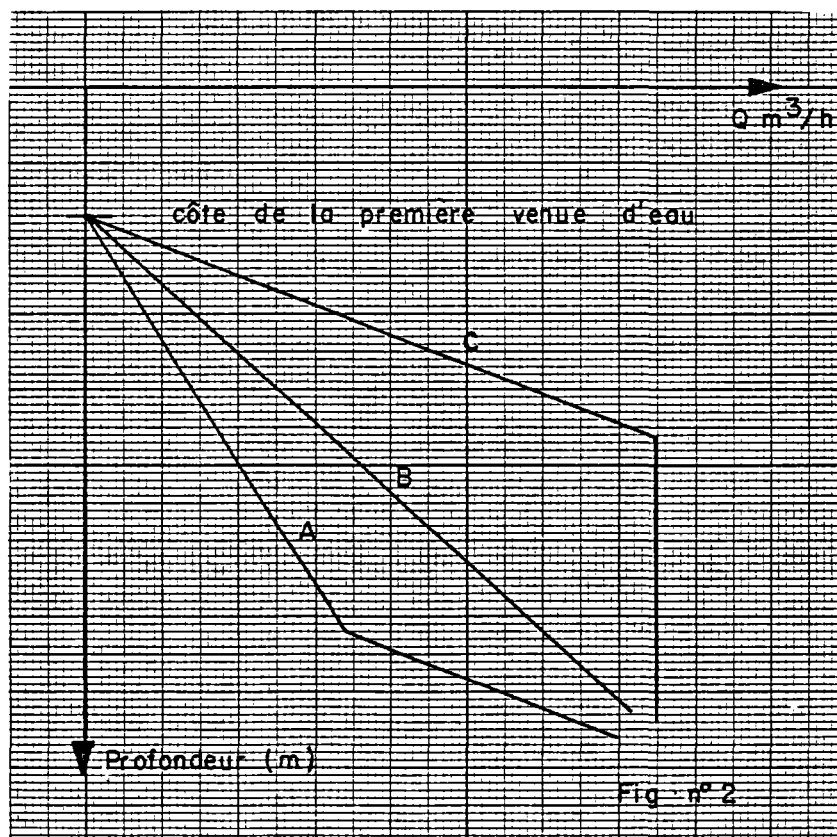
Récemment, sont arrivées sur le marché des machines mixtes rotary à la boue - marteau fond de trou. Ces machines peuvent certainement constituer un outil efficace car elles rassemblent les avantages de l'une et l'autre méthode. L'incidence de l'emploi d'un tel matériel sur le coût du forage est encore mal connue.

Un autre inconvénient du marteau fond de trou se manifeste au passage de formations humides sans être saturées. Les risques de "bouchons" et par suite de coinçage sont importants. On y remédie en réduisant les passes de foration à 0,30 - 0,50 m et en séchant la formation par de fréquents soufflages.

3.4. Nature et qualité des informations acquises par le marteau fond de trou

Les informations, d'intérêt hydrogéologique, acquises au cours de la foration par le marteau "fond de trou" sont sensiblement celles fournies par le rotary mais avec plus de précision et dans un délai plus rapide. Pour les principales, ce sont :

- coupe géologique précise ; les cuttings ne sont pas contaminés par la boue. Pour un débit d'air bien réglé, les vitesses de remontée des cuttings sont beaucoup plus rapides. Des puits creusés au droit de sondages en petits diamètres au Maroc ont montré que la précision de la coupe pouvait être de l'ordre de 0,10 - 0,20 m.
- cote précise de la première venue d'eau ;
- qualité de l'eau ;
- niveau d'eau ;
- évolution des débits en fonction de la profondeur. Ceci est particulièrement intéressant puisque cela permet de voir d'une part si le forage en cours de réalisation est susceptible de satisfaire la demande et d'autre part d'aider dans la prise de décision quant à la poursuite de la reconnaissance. L'expérience acquise dans le Massif Armoricain montre que l'on obtient trois types principaux A, B, C de diagrammes débit - profondeur (voir figure n° 2).



Les débits sont mesurés à partir d'essais à l'émulsion d'air.

- le cas le plus favorable est B. Le débit croît régulièrement avec la profondeur.
- le cas le moins favorable est C. Le débit croît régulièrement jusqu'à une certaine cote, puis il n'y a aucune croissance des débits avec la profondeur.
- le cas intermédiaire est D avec une faible augmentation de débit avec la profondeur, puis une amélioration nette à partir d'une certaine cote.

Ces débits sont évalués par essais à l'émulsion d'air et dans un forage de petit diamètre. Donnent-ils une indication objective sur le débit ponctuel qui sera obtenu sur un forage d'exploitation d'un diamètre supérieur et équipé d'une pompe ? A ce jour, il n'existe aucune véritable statistique permettant d'établir une relation de correspondance. Le seul résultat dont on dispose est basé sur l'expérience. Il semble que les débits à l'émulsion soient en général pessimistes.

A ce niveau, il y a également lieu de souligner que le débit ponctuel instantané obtenu sur un forage d'exploitation ne correspond pas au débit d'exploitation à terme. Ce dernier débit sera fonction de la répartition des fissures dans la zone d'influence du forage d'exploitation.

3.5. Coût du forage au marteau fond de trou - Comparaison avec le coût du rotary à la boue

Nous avons reporté en Annexe II les prix unitaires du premier semestre 1977 des diverses opérations effectuées au marteau fond de trou comme au rotary à la boue. Ces prix 1977 sont des moyennes calculées après enquête auprès des sociétés de forages.

Une estimation du coût d'un forage de reconnaissance au marteau fond de trou et au rotary à la boue pour des spécifications communes est présentée ci-dessous.

Les spécifications du forage de reconnaissance sont :

- profondeur totale : 65 m
- diamètre : 6"
- équipement PVC Ø 120-125 mm (65 m)
- pompage d'essai : 24 heures
- divers : . pour le marteau 5 heures d'émulsion
 . pour le rotary à la boue 12 heures de développement

Les résultats obtenus sont :

	Marteau fond de trou	Rotary à la boue
Foration brute (Amenée et repli + foration)	10 125 (=155/ml) F	45 250 (=695/ml)F
Autres opérations (équipement, pompages, développement ou émulsion)	16 160 F	18 210 F
TOTAL	26 285 (=404/ml) F	63 460 (=976/ml)F

Le coût d'un forage de reconnaissance, tel que défini plus haut, réalisé au rotary à la boue, est deux fois plus grand qu'au marteau fond de trou.

3.6. Conclusion

Le marteau fond de trou présente pour la recherche d'eau souterraine en milieu fissuré des avantages de deux ordres :

- l'un technique : la méthode est rapide et les performances du matériel sont bien adaptées à la recherche d'eau souterraine en milieu fissuré. Les données recueillies sont précises ;
- l'autre financier : le coût d'une reconnaissance au marteau est sensiblement deux fois moindre qu'avec une méthode conventionnelle telle que le rotary à la boue.

Du côté des inconvénients, il faut citer :

- la foration dans les formations bouillantes n'est pas fiable à 100 %, bien que la technique ait évolué ;
- la loi de correspondance entre les débits à l'émulsion et les débits d'exploitation n'est pas connue.

4. ANALYSE DES RESULTATS OBTENUS DANS LES FORAGES REALISES AU MARTEAU FOND DE TROU EN MILIEU FISSURE

Les résultats présentés ci-dessous concernent uniquement des forages réalisés dans le Massif Armoricaïn. L'échantillon de forages pour lesquels on dispose d'informations assez complètes, comporte d'une part des forages implantés au hasard et d'autre part des forages dont l'implantation a fait l'objet d'une étude.

4.1. Forages implantés au hasard

951 fiches de forages sont disponibles, parmi lesquelles 632 contiennent des informations sur les débits instantanés obtenus à l'émulsion d'air.

Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus après classement des débits instantanés indépendamment de toute considération sur la nature de la formation fissurée ou de la localisation des forages.

Débit instantané en m ³ /h	Nombre de forages	% du total
< 1	59	9,3
1 - 5	260	41,1
5 - 10	154	24,4
10 - 15	70	11,1
15 - 20	42	6,6
20 - 30	32	5,1
30 - 40	7	1,1
> 40	8	1,3

Total : 632

Ces données montrent que plus de 75 % des forages implantés au hasard ont un débit inférieur à 10 m³/h. La profondeur moyenne des forages est de l'ordre de 50 m.

4.1.1. Cas particuliers de la région de St. Malo (35)

Une analyse plus détaillée parmi ces 951 forages montre que dans le secteur de St. Malo (35) les résultats sont supérieurs à la moyenne générale.

Débit instantané en m ³ /h	Nombre de forages	% du total
< 1	3	4,5
1 - 5	10	15,0
5 - 10	22	32,5
10 - 15	14	21,0
15 - 20	12	18,0
20 - 30	3	4,5
30 - 40	1	4,5
> 40	2	3

Total : 67

En effet 52 % des forages seulement ont un débit instantané inférieur à 10 m³/h. La nature des raisons justifiant ces résultats plus favorables n'est pas bien connue.

4.1.2. Variation des débits en fonction de la nature de la formation fissurée

Les formations géologiques du Massif Armoricaïn peuvent être schématiquement classées en trois groupes :

- les granites et roches grenues (gneiss - migmatite...)
- les grès
- les schistes.

Le classement des débits instantanés par type de formation fissurée donne les résultats suivants :

Nature de la formation fissurée	Nombre de forages	Débits instantanés en m ³ /h							
		0-1	1-5	5-10	10-15	15-20	20-30	30-40	> 40
Granite	271	% 13,3	45,0	17,7	11,4	6,3	4,8	0	1,5
Schiste	284	% 6,3	36,3	32,0	10,2	6,7	5,3	1,8	1,4
Grès	77	% 6,5	45,4	19,5	13,0	7,8	5,2	2,6	0
	632								

Ce tableau montre que les résultats quelle que soit la formation fissurée considérée restent très comparables. Toutefois les débits paraissent meilleurs dans les schistes que dans les granites.

4.1.3. Utilisation des forages

L'utilisation des forages se répartit comme suit :

Nature de l'utilisation	Nombre de forages	%
Besoins domestiques	108	18
Élevage	230	39
Irrigation	168	28,5
Industrie - commerce	86	14,5

Total : 592

4.2. Forages implantés après étude

Les données disponibles sont bien entendu beaucoup moins nombreuses que dans le cas des forages implantés au hasard. L'échantillon comporte 22 forages. Les débits instantanés obtenus au cours des essais à l'émulsion d'air sont, sauf dans un cas, supérieurs à 10 m³/h et la moyenne est de 43 m³/h, le maximum étant de 140 m³/h. Dans le cas de l'échec, il faut signaler que le forage n'était pas sec mais avait un débit très faible. La profondeur moyenne des forages est de 65 m.

Comme dans le cas des forages implantés au hasard, les débits instantanés sont meilleurs dans les schistes que dans les autres formations.

Nature de la formation	Moyenne des débits instantanés en m ³ /h
Granite	24
Schiste	52
Grès	42
Calcaire	52,5

Les données disponibles exposées ci-dessus semblent donc montrer que les résultats dans le cas de forages implantés après étude sont meilleurs. Toutefois il faut souligner que la taille de l'échantillon n'autorise pas à conclure de manière radicale.

4.3. Comparaison des résultats des forages implantés au hasard - forages implantés après étude

Dans 75 % des cas le débit instantané des forages implantés au hasard est inférieur à 10 m³/h. Par contre, les débits sont bien meilleurs dans le cas de forages implantés après étude, mais les risques d'échecs ne sont pas nuls.

Dans le cas de forages implantés au hasard, il n'y a en général qu'une seule tentative pour un site donné. Par contre des forages de reconnaissance ont systématiquement précédé la réalisation de forages d'exploitation dans le deuxième cas.

Les forages au hasard sont en moyenne moins profonds (50 m) que les forages implantés après étude (65 m).

Les débits instantanés sont supérieurs dans les schistes que dans les granites, gneiss, migmatites. Par contre les débits d'étiage observés dans les bassins schisteux sont plus faibles que ceux mesurés dans les bassins granitiques. Ceci semble prouver que les ressources sont à l'échelle du bassin plus importantes dans le granite que dans les schistes.

5. METHODOLOGIE DE LA RECHERCHE D'EAU SOUTERRAINE EN MILIEU FISSURE

5.1. Définition des objectifs

Au vu de l'analyse comparée des forages réalisés au hasard et après étude, il semble que si un utilisateur désire plus de 10 m³/h, une étude préalable à la réalisation d'un forage d'exploitation s'impose.

5.2. Méthode et coût de la recherche d'eau en milieu fissuré

Comme il a été dit plus haut, la méthode classique de recherche d'eau souterraine en milieu fissuré comprend trois phases successives :

- PHASE 1 : géologie et hydrogéologie,
- PHASE 2 : géophysique,
- PHASE 3 : forages de reconnaissance et d'exploitation.

Les deux premières phases ont pour but principal d'aboutir à la sélection de sites présentant les conditions les plus favorables pour la recherche d'eau souterraine. La troisième phase est destinée à vérifier et à tester l'aptitude hydrogéologique des sites retenus.

5.2.1. PHASE 1 : géologie et hydrogéologie

Au cours de cette phase, les travaux suivants sont engagés :

- Analyse des données existantes : les documents de base sont en général les cartes géologiques (1/80 000 ou 1/50 000) et les cartes topographiques (1/50 000 et 1/25 000). Les données les plus intéressantes sont celles fournies par les forages d'une zone voisine par exemple. Les puits, plus nombreux que les forages, offrent moins d'intérêt car ils ne captent en général que la nappe contenue dans les niveaux d'altération.
- Examen des photos aériennes : l'échelle la plus courante des photos est le 1/30 000. L'examen consiste à repérer les linéaments et les accidents ceci indépendamment de la nature des formations géologiques. Le point d'intersection de plusieurs linéaments ou accidents, au moins deux le plus souvent trois, constitue un site à reconnaître.
- La photo-interprétation est suivie de l'implantation sur le terrain. Au cours de cette opération, on observe, chaque fois que le terrain le permet, l'état d'affleurement des roches, les indices de fracturation (perturbations, filons de quartz, présence de produits de remplissage, etc...), la nature du recouvrement, les conditions morphologiques locales. En résumé, on recherche tout renseignement et indice qui permettront une bonne valorisation des observations faites sur les photos aériennes.

La phase 1 constitue une étape indispensable de la recherche. Elle ne donne toutefois que des informations de surface ou de subsurface. De plus, il s'avère qu'il est souvent délicat de localiser les fractures sur le terrain et que les informations d'ordre hydrogéologique sont inexistantes. En conclusion, les données recueillies en phase 1 sont souvent très fragmentaires, mais l'examen des photos aériennes en particulier constitue le seul moyen pour approcher une bonne implantation.

Le coût de la phase 1 est de l'ordre de 5 000 F HT.

5.2.2. PHASE 2 : géophysique

Il faut rappeler que les zones de fissuration dans les roches saines n'induisent en général que des caractéristiques physiques souvent difficiles à mesurer en géophysique.

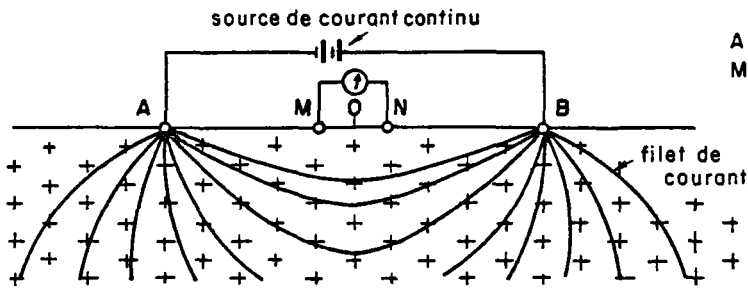
Deux méthodes géophysiques sont le plus utilisées : la sismique et la résistivité, cette dernière étant d'ailleurs fréquemment préférée à la première. En effet, la contribution de la méthode sismique à la reconnaissance des zones de fissuration n'est pas suffisante pour justifier l'emploi de cette méthode coûteuse et plus lourde à utiliser sur le terrain.

Une campagne de résistivité pour la reconnaissance d'un site comprend la réalisation d'un ou deux sondages électriques et de 1 500 à 2 000 m de profil de résistivité.

Un sondage électrique consiste à établir la courbe de variation en fonction de la profondeur de la résistivité apparente des terrains, mesurée en surface à l'aide d'un dispositif à quatre électrodes AMNB (cf. figure 3a). La profondeur d'investigation est réglée en faisant varier la distance entre les électrodes A et B. Un profil de résistivité (cf. figure 3b) donne pour des stations de mesure alignées et régulièrement espacées la valeur de la résistivité apparente mesurée à l'aide d'un dispositif AMNB de longueur constante. Il met en évidence les variations latérales de la résistivité apparente pour une certaine profondeur d'investigation. La réalisation de plusieurs profils permet de dresser une carte de résistivité apparente (cf. fig. 3b) pour une profondeur d'investigation constante. Les cartes de résistivité sont en général très contournées et présentent des anomalies résistantes juxtaposées à des plages conductrices. Les plages de faible résistivité sont souvent allongées suivant une direction correspondant à celle des fractures. L'interprétation des cartes doit se faire avec l'aide des résultats issus de la photo-interprétation et les mesures de terrain doivent si possible être calées par rapport aux conditions géologiques locales. Les informations acquises au cours de la phase géologie sont le plus souvent très insuffisantes ou trop imprécises pour satisfaire aux exigences du calage et en conséquence un forage dit de calage doit être envisagé.

La méthode de résistivité telle que décrite plus haut donne la position des fractures à quelques mètres près, ce qui n'est pas toujours suffisant et souvent pas supérieur au repérage, par un hydrogéologue expérimenté, sur le terrain des fractures déterminées par photo-interprétation. De plus, la géophysique apporte rarement des informations sur l'extension des fractures en profondeur, leur dimension, l'état de broyage de la roche affectée ou le degré de colmatage ou sur la présence éventuelle d'une nappe.

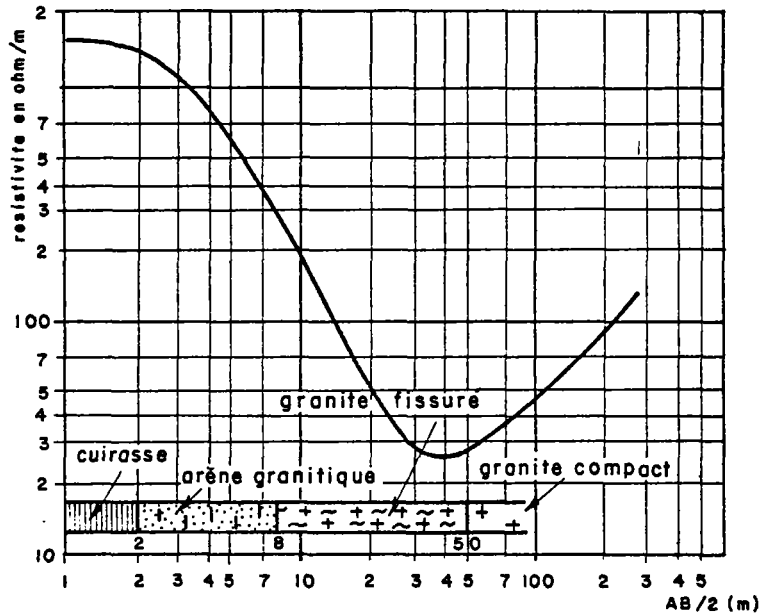
3 a - SONDAGE ELECTRIQUE



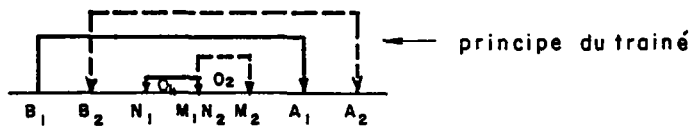
A et B = électrodes d'injection de courant
M et N = " " de mesures

dispositif de terrain

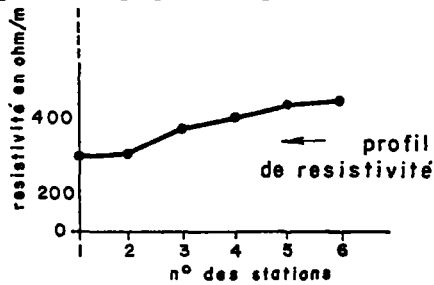
exemple d'interprétation de sondage électrique



3 b- TRAINÉ ELECTRIQUE - PROFIL ET CARTE DE RESISTIVITE

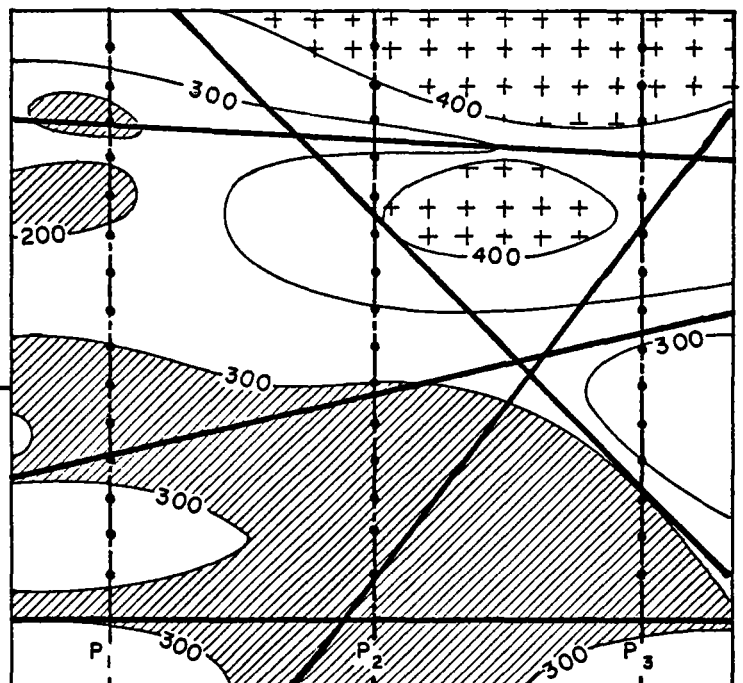


principe du trainé



profil de resistivité

Carte d'isoresistivité



- P₁ profil de resistivité et stations
- 300 courbe d'isoresistivité en ohm/m
- fracture
- zone de faible resistivité < 200 ohm/m
- zone de forte resistivité > à 400 ohm/m

En conclusion, la géophysique peut servir à confirmer le bien fondé de l'interprétation des photos aériennes et aider à une bonne implantation sur le terrain, mais elle ne dispense pas de réaliser des forages de reconnaissance. Elle trouve réellement son utilité lorsque l'examen des photos aériennes ne fournit pas des indices de fracturation suffisants.

Le coût d'une petite campagne de géophysique telle que définie plus haut est :

- deux à trois sondages électriques	:	1 500 F
- 1 500 à 2 000 m de trainé de résistivité	:	10 000 F
- interprétation, rapport	:	1 500 F
		TOTAL.... 13 000 F H.T.

5.2.3. PHASE 3 : forages de reconnaissance et d'exploitation

L'analyse des résultats des techniques d'investigation utilisées en phases 1 et 2 permet de sélectionner les sites qui apparaissent comme les plus favorables du point de vue de la fracturation. Les indications d'ordre hydrogéologique restent cependant inconnues et une troisième phase complémentaire des deux autres est essentielle pour tester le rôle hydrogéologique des sites retenus. Cette phase 3 consiste en la réalisation de forages de reconnaissance et de l'ouvrage d'exploitation.

A ce niveau, il y a lieu de souligner toute l'importance du contrôle et du suivi des travaux de forage par un hydrogéologue compétent pour s'assurer d'une part que les travaux sont réalisés suivant la règle de l'art et d'autre part que les données nécessaires à une bonne interprétation sont correctement recueillies.

Au moment du choix de la méthode pour conduire la reconnaissance, on peut être tenté de penser qu'il est économique de réaliser directement les forages de reconnaissance en un diamètre suffisant qui permet l'équipement du meilleur d'entre eux en forage d'exploitation sans avoir recours à une opération de foration supplémentaire. A l'examen, cette solution est finalement plus coûteuse comme le montre la comparaison entre les deux schémas A et B de conduite du programme de reconnaissance ci dessous :

<u>Schéma A</u>	<u>Schéma B</u>
Reconnaissance au marteau Ø < 100 mm	Reconnaissance au marteau Ø 150 mm
↓	↓
Sélection du meilleur forage en fonction de l'objectif	Equipement direct du meilleur forage répondant à l'objectif
↓	↓
Forage de l'ouvrage d'exploitation Ø 150 mm	Essai de pompage
↓	
Essai de pompage	

Pour l'une et l'autre hypothèse, les quantités de travaux sont :

- une seule amenée et repli
- 500 m de reconnaissance
- forage d'exploitation Ø 150 mm profondeur totale 65 m
- équipement PVC tube plein et tube crépiné Ø 120 - 125 mm
- essai de pompage 24 heures.

En supposant que l'on soit obligé d'avoir recours à l'ensemble du programme de reconnaissance pour réaliser les objectifs, les coûts arrondis à la centaine de francs supérieure sont :

Schéma A : 66 300 F H.T.

Schéma B : 82 000 F H.T.

Ces chiffres montrent que l'on a intérêt à suivre la procédure décrite en A (1). Le coût correspondant du contrôle et du suivi des travaux pour les schémas A et B est estimé à 27 000 F H.T. Le contrôle et suivi des travaux couvrent également la surveillance de l'essai de pompage, son interprétation et la rédaction du rapport final.

Le coût total de l'opération est présenté ci-dessous :

	<u>Schéma A</u>	<u>Schéma B</u>
	(F)	(F)
- <u>Phase 1</u> : étude des données existantes, photo-interprétation, implantation	5 000	5 000
- <u>Phase 2</u> : étude géophysique (facultative)	13 000	13 000
- <u>Phase 3</u> : 3a - forages de reconnaissance + 1 forage d'exploitation	66 300	82 000
3b - contrôle et suivi des travaux	27 000	27 000
	<hr/>	<hr/>
	111 300 H.T.	127 000 H.T.

Une campagne du type B au rotary à la boue coûterait environ 260 000 F H.T., soit plus du double du prix au marteau.

(1) surtout qu'il existe toujours un risque d'échec

6. CONCLUSION

Les principaux facteurs de l'évolution des méthodes de recherche en eau souterraine en milieu fissuré sont :

- la prise de conscience de l'intérêt hydrogéologique des formations du socle (granites, migmatites, gneiss, calcaires, schistes, etc...) ;
- l'évolution tant du point de vue technique que rapidité de l'acquisition des données grâce au marteau fond et hors de trou. Il faut toutefois savoir que cette technique ne constitue pas l'outil universel en la matière (cf. formations bouillantes de surface) ;
- la réduction considérable en valeur absolue du coût de la reconnaissance par forage. La reconnaissance par le marteau fond de trou coûte en moyenne deux fois moins que par une méthode conventionnelle de forage (rotary à la boue).

Des indéterminations importantes restent encore à lever, parmi les principales, il faut signaler :

- le problème de l'estimation du débit d'exploitation des forages ;
- l'évaluation des ressources en eau.

Enfin les données statistiques disponibles sur le débit des forages réalisés en milieu fissuré montrent qu'environ 25 % des forages implantés sans étude, quelle que soit la formation fissurée considérée (granite ou schiste...) ont un débit supérieur à 10 m³/h. En ce qui concerne les forages implantés après étude, les débits obtenus sont dans la plupart des cas supérieurs à 10 m³/h. Toutefois des échecs, même après une implantation et une reconnaissance soignées, bien que peu fréquents sont encore possibles.

BIBLIOGRAPHIE

- BISCALDI (R.) 1967 .- Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique occidentale .- *C.I.E.H., rapport B.R.G.M. DAK 67 A 14:*
- SEMA (1967) .- Etude des facteurs de succès des forages d'eau en région cristalline.
- PLOTE (H.) et MARTIN (G.) 1974 .- Recherches hydrogéologiques dans les cercles de Kayes et Yellimane (Mali). Hydrogéologie de détail - Géophysique - Campagne de forage .- *Rapport B.R.G.M. 74 DAK 002.*
- MARTIN (G.) 1974 .- Note sur la méthode de forage au marteau fond de trou. Application aux recherches hydrogéologiques .- *B.R.G.M., note inédite.*
- PLOTE (H.) 1975 .- Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air dans la Betana (Province de Tarfaya) .- *Rapport inédit.*
- VAUBOURG (P.) 1975 .- Etude hydrogéologique de la plaine de Tiznit. Campagne de reconnaissance par la méthode des sondages à l'air .- *Rapport inédit.*
- BEL (F.) 1975 .- Note sur la technique de forage à l'air appliquée aux recherches d'eau souterraine. Expérience marocaine actuelle .- *Note inédite.*
- PLOTE (H.) 1975 .- Résultats de la campagne de sondages à l'air dans l'Anti-Atlas occidental région d'Igherm (Province d'Agadir) .- *Rapport inédit.*
- PAULVE (E.) 1975 .- Résultats de la campagne de sondage à l'air de reconnaissance sur le plateau des Akhsass dans l'Anti-Atlas occidental .- *Rapport inédit.*
- BEL (F.) 1975 .- Utilisation de la foration à l'air pour la recherche d'eau souterraine au Maroc .- *Note inédite.*
- BENAMOUR (A.) 1975 .- Utilisation de la géophysique pour la recherche des eaux souterraines dans les régions de socle cristallin .- *C.I.E.H.*
- BENAMOUR (A.) 1975 .- Présentation de matériel de forage .- *C.I.E.H.*
- BERGER (J.) et ENGALENC (M.) 1975 .- Hydrogéologie et géophysique appliquées à la recherche d'eau souterraine dans les roches cristallines fracturées. - *CI.E.H., GEOHYDRAULIQUE.*
- GUIRAUD (R.) et LENCK (P.) 1975 .- Sur l'intérêt hydrogéologique majeur des zones de failles dans le socle métamorphique et éruptif de l'Afrique occidentale .- *C.I.E.H., Faculté des Sciences Abidjan, Firaco).*
- SOLAGES (S.) 1975 .- Etude comparative de deux modes de forages en Haute-Volta. - *C.I.E.H., GEOHYDRAULIQUE.*

- TALBO (H.) 1975 .- L'eau souterraine dans le Massif Armoricaïn. Etat des connaissances - perspectives .- *B.R.G.M., note inédite.*
- VAUBOURG (P.) 1975 .- Etude théorique sur la foration à l'air. Comparaison avec des observations de terrain .- *B.R.G.M., note inédite.*
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976 .- Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air dans la région de Bou Arfa - Figuig (Province de Figuig .- *Rapport inédit.*
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976 .- Recherche d'eau souterraine par sondage à l'air dans la région de Khenifra pour l'A.E.P. de cette ville.- *Rapport inédit.*
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976 .- Reconnaissance hydrogéologique par sondages à l'air du plateau des Mouissate aux environs de Sidi Tiji (Province de Safi) .- *Rapport inédit.*
- DOMINICI (R.) et HENG (B.) 1976 .- Recherche d'eau souterraine par sondages à l'air de reconnaissance dans la région de Tamlelt et Bel Raiada (Province de Figuig) .- *Rapport inédit.*
- BUARD (C.) 1976 .- Campagne complémentaire de la plaine de Tiznit .- *Rapport inédit.*
- PLOTE (H.) 1976 .- Résultats de 19 sondages à l'air réalisés pour l'alimentation en eau potable de Tamanar (Province d'Essaouina) .- *Rapport inédit.*
- DUROZOY (G.) et TALBO (H.) 1976 .- Première approche de l'estimation des réserves dans les roches anciennes .- *Rapport B.R.G.M. 76 SGN 483 BPL.*
- TALBO (H.) 1976 .- Eaux souterraines du Massif Armoricaïn .- *Note inédite.*
- ARCHAMBAULT (J.), BOURGUET (L.), LAMBLIN (J.M.) 1977 .- Ressources en eau des terrains anciens. Données techniques et économiques pour servir à leur mise en valeur .- *Note inédite.*
- BRESSON (G.) 1977 .- Technique et utilisation du marteau fond de trou pour la recherche et l'exploitation des eaux souterraines .- *Note inédite.*
- Documentation technique sur la matériel de forage au marteau fond et hors de trou : ATLAS COPCO ; STENUICK - FRANCE.

ANNEXE I

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DU MATERIEL DE FORAGE HORS
ET FOND DE TROU DISPONIBLE SUR LE MARCHE FRANCAIS

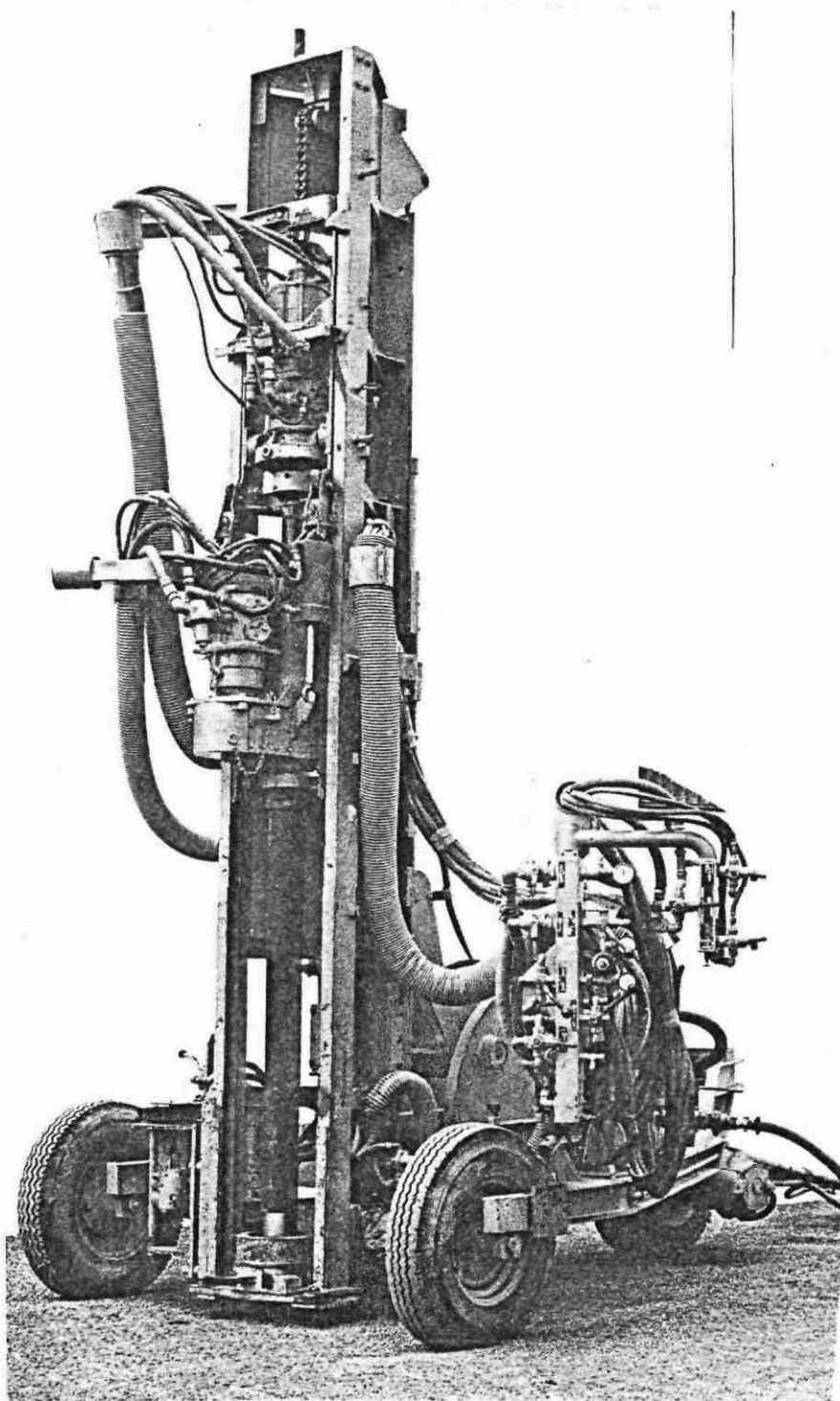
FOREUSES HORS ET FOND DE TROU

A/ FOREUSE HORS DE TROU



Cette machine peut être également utilisée avec un marteau fond de trou

B/ FOREUSE FOND DE TROU



C/ PRINCIPALES FOREUSES DISPONIBLES SUR LE MARCHÉ

C.1. Foreuses marteau fond de trou

Marque	Type	Observations (principalement performances) Ø et profondeur
ATLAS COPCO	AQUADRILL	Ø 160 mm jusqu'à 80 m
	ROC 601-00	Ø 160 mm jusqu'à 100 m
	MOBIL DRILL B80	Ø 160 mm jusqu'à 100 m
STENUICK	HS 66 D	Ø 216 mm jusqu'à 100 m
INGERSOLL RAND	CRAWLAIR LM 300	Ø 160 mm jusqu'à 100 m
FORACO	TECHNO SI 566	Ø 160 mm jusqu'à 100 m Ø 200 mm jusqu'à 60 m

C.2. Foreuses mixtes marteau fond de trou - rotary à la boue

Marque	Type	Observations (principalement performances) Ø et profondeur
ATLAS COPCO	ROTAMEC	marteau : Ø 302 à 381 mm jusqu'à 100 m rotary : jusqu'à 300 m même diamètre
INGERSOLL RAND	CYCLONEDRILL TH 60	marteau : Ø 200 mm jusqu'à 170 m Ø 250 mm jusqu'à 100 m rotary : jusqu'à 500 m

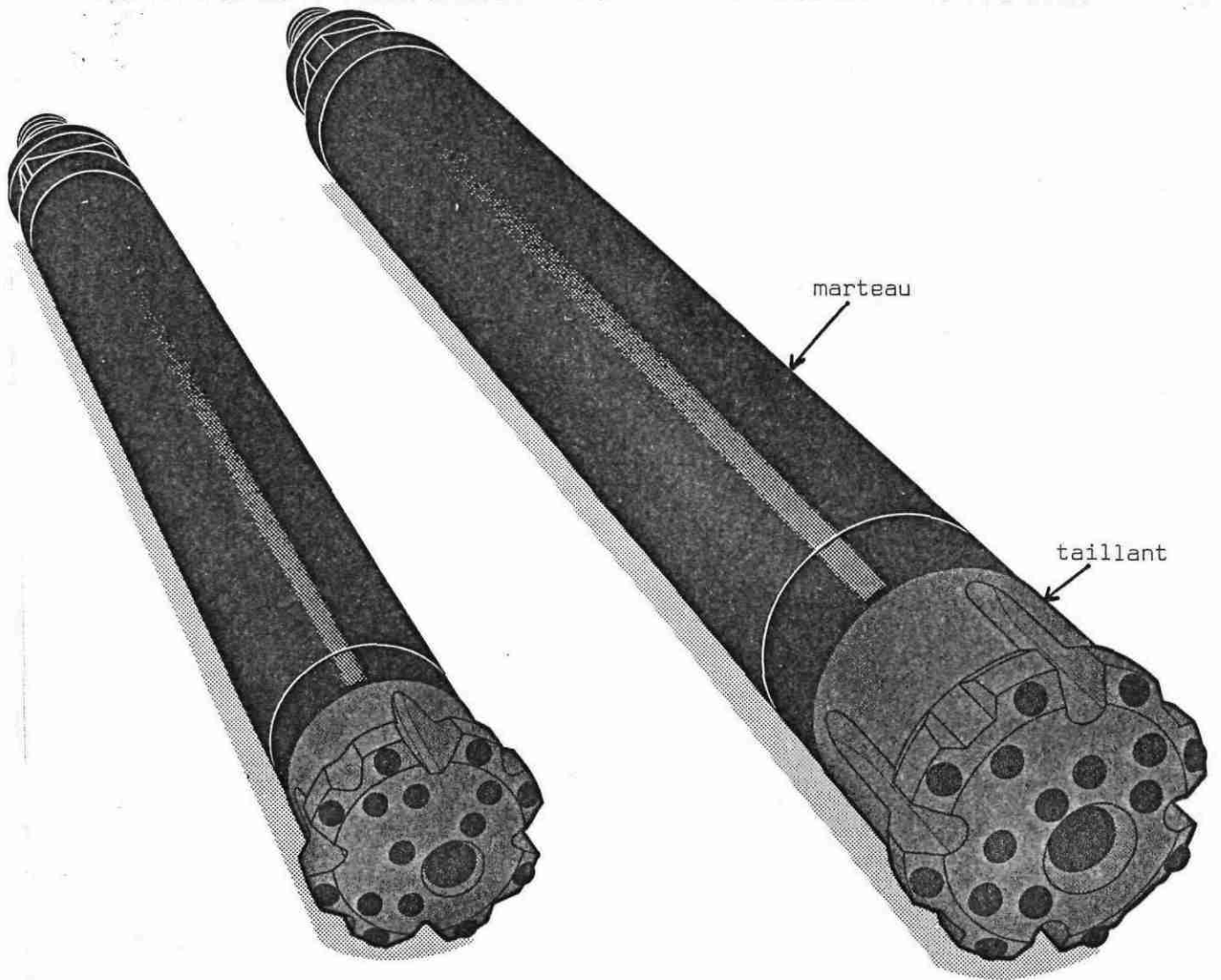
COMPRESSEURS

Marque	Type	Pression en bars	Volume d'air m ³ /mn
ATLAS COPCO	PRH 700	10,5	19
	PNS 1200	20	36
INGERSOLL RAND	DX LH 850 S	10,5	24,1
	D 750 S	17,5	21,2
BAUER	DSF 12 H 13	13	24
	DSF 14 H 20	20	27
HOLMAN	Rotair IOMP	10,5	28,5

1 bar = 1,02 kg/cm²

MARTEAUX FOND DE TROU

PRESENTATION D'UN MARTEAU



TAILLANTS

Il existe deux types de taillants :

- les taillants à boutons pour les terrains durs
- les taillants en croix pour les terrains plus tendres



Taillants à boutons

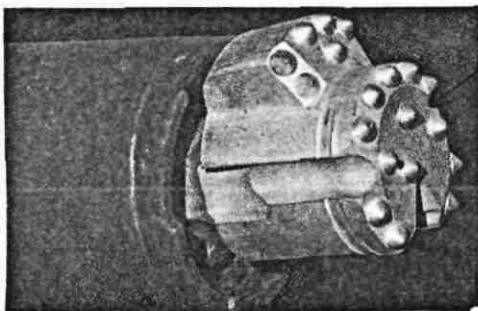
Taillants en X

A/ PRINCIPAUX TYPES DE TAILLANTS SUR LE MARCHÉ (SANS TUBAGE A L'AVANCEMENT)

Marque	Type	Ø des taillants en mm
ATLASCOPCO	COP 4	105 à 152
	COP 6	152, 165, 216
INGERSOLL RAND	-	152, 160, 203
MISSION		191, 225
		302, 381
STENVICK		160 à 220
HOLMAN		102, 110

B/ TAILLANT AVEC TUBAGE A L'AVANCEMENT

taillant avec excentrique



Deux gammes courantes de Ø sont employées :

- Ø 117 - 133 mm
- Ø 152 - 168 mm

tubage à l'avancement

ANNEXE II

PRIX UNITAIRES (PREMIER SEMESTRE 1977) DES PRINCIPAUX POSTES DU
BORDEREAU DES PRIX D'UN CAHIER DES CHARGES DE FORAGE D'EAU
REALISE AU MARTEAU FOND DE TROU ET ROTARY A LA BOUE

PRIX UNITAIRES - ROTARY A LA BOUE

(moyennes établies après enquête auprès de 3 Sociétés d'importance régionale)

- ces prix sont valables pour le premier semestre 1977
- ces prix sont H.T.

N° du prix	Désignation du prix	Unité	Prix unitaire F
1	Amenée et replis - Installation	forfait	16 000
2	Foration toutes sujétions comprises terrain dur Ø 6"1/4	ml	450
3	Fourniture et mise en place tube PVC plein et crépiné		
3a	Ø 120 - 125 mm	d°	marteau fond de trou (prix n° 3a)
3b	Ø 152 - 160 mm	d°	marteau fond de trou (prix n° 3b)
4	Développement (pyrophosphaste, air lift ou pompe). Pose-dépose matériel	h	275
5	Essai de pompage (pose-dépose pompe, évacuation énergie)	h	540

PRIX UNITAIRES - MARTEAU FOND DE TROU

(moyennes établies après enquête auprès de 4 Sociétés)

- ces prix sont valables pour le premier semestre 1977
- ces prix sont H.T.

N° du prix	Désignation du prix	Unité	Prix unitaire F
1	Amenée et replis - Installation	forfait	2 000
2	Foration toute sujétion comprise		
2a	Ø < 100 mm (~ 4")	m1	75
2b	Ø 100 à 150 mm (~ 6")	m1	125
2c	Ø > 150 mm	m1	200-300
3	Fourniture et mise en place tube PVC plein et crépiné		
3a	Ø 120 - 125 mm	m1	30
3b	Ø 152 - 160 mm	m1	45
4	Essai à l'émulsion	heure	250
5	Essai de pompage à la pompe	d°	Rotary à la boue (prix n° 5)