

VILLE DE BORDEAUX

Régie Municipale du Gaz

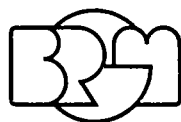
Société bordelaise de réalisations urbaines

**Projet de chauffage par géothermie
de la cité de la Benauge**

ÉTUDE DE LA RESSOURCE ET DE SON CAPTAGE

par

J. CHAMAYOU, J.-C. MARTIN, J.-P. PLATEL et J.-L. TEISSIER



Service géologique régional « Aquitaine »

Avenue Docteur-Albert-Schweitzer

33600 PESSAC

Tél. (56) 80.69.00 - Téléc 550485

- I N T R O D U C T I O N -

Le volet "Ressource" de l'étude du projet de chauffage de la Cité de la Benauge au moyen de l'énergie géothermique a été demandé au Service géologique régional Aquitaine du B.R.G.M. par la Société Bordelaise de Rénovations Urbaines agissant pour le compte de la Régie municipale du gaz de la ville de Bordeaux.

Comme pour l'opération géothermique de Mériadeck, le choix de la ressource s'est porté sur la nappe contenue dans les magasins carbonatés et détritiques datés du Cénomano-Turonien.

Au droit de la cité de la Benauge, cet aquifère, compris entre 750 et 1 000 m de profondeur, doit pouvoir fournir, au moyen d'un forage, 120 m³ à l'heure d'eau douce, à une température de 45° C ceci permettant d'assurer une économie en énergie primaire de l'ordre de 2 000 TEP par an.

Ce rapport, après l'étude détaillée du contexte géologique, analyse les paramètres hydrogéologiques, définit les caractéristiques techniques de l'ouvrage de captage projeté ainsi que son coût.

o o o o o o o

C H A P I T R E I

PRESENTATION TECHNIQUE DU PROJET

Ce chapitre concernant la définition exacte du mineur du distributeur de chaleur sera effectué avec le bureau d'étude associé au montage de ce dossier.

oooooo

2 - PRESENTATION DU PROJET

2.1 - Situation géographique

La cité de la Benauges à Bordeaux est située en rive droite de la Garonne au pied des coteaux de Cenon, en bordure de la voie ferrée Bordeaux - Paris, et de la voie rapide Joliot-Curie (cf. plan de situation figures 1 et 2). L'altitude moyenne au sol est de 10 NGF. L'emplacement exact du forage reste à préciser à proximité immédiate de la cité (parking de la rue de la Benauges, par exemple).

2.2 - Choix de la ressource et définition de ses caractéristiques -

2.2.1 - Principaux réservoirs aquifères présents

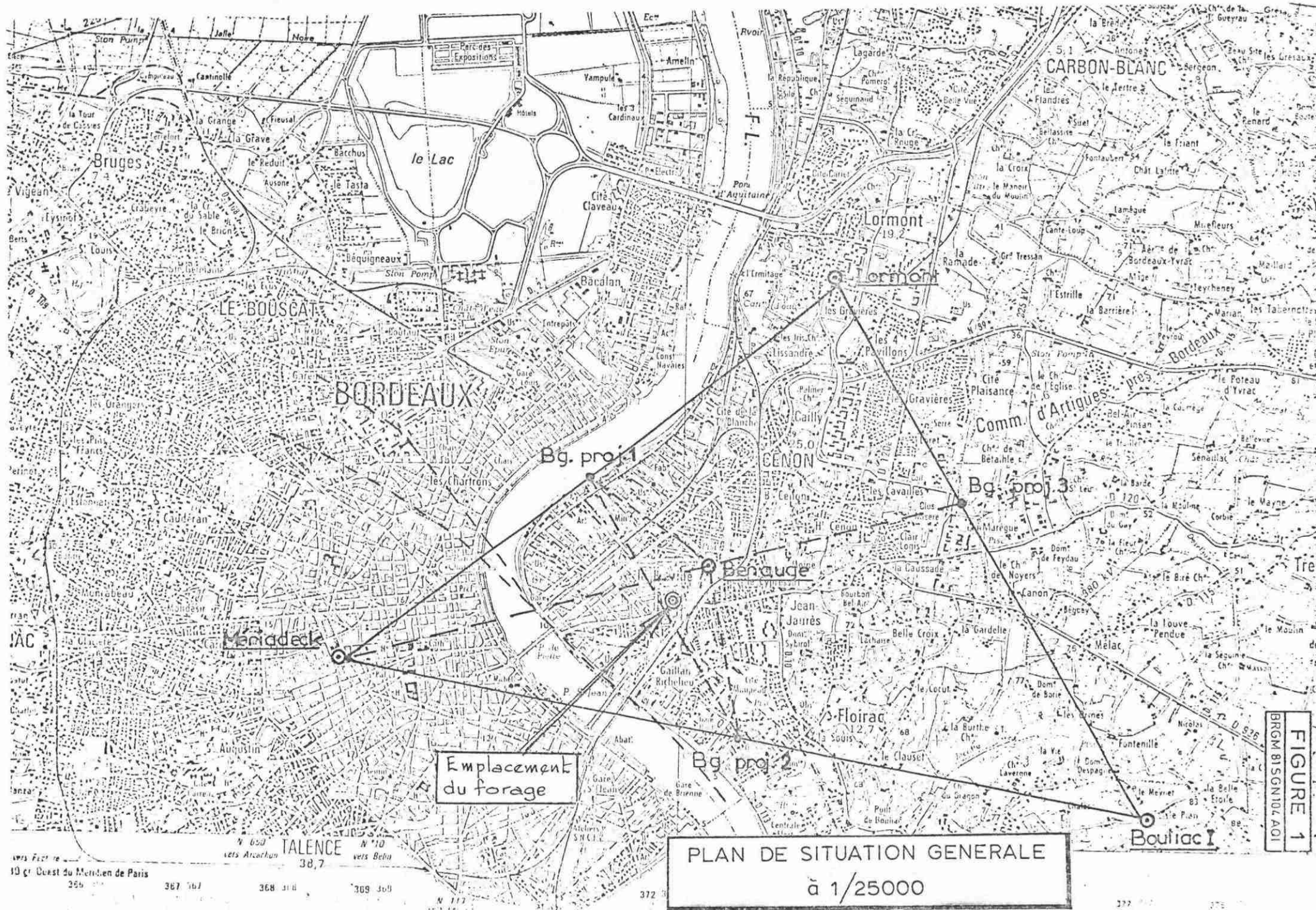
Nous analyserons les données disponibles concernant les principaux niveaux aquifères de 250 à 2 500 m de profondeur, reconnus par les forages pétroliers ou captés sur les forages d'alimentation en eau potable, industrielle ou géothermique.

Il s'agit de bas en haut, de la série géologique suivante :

- Des calcaires, grès et sables de l'Eocène qui constituent l'aquifère le plus exploité pour l'alimentation en eau potable de la région bordelaise. Bien connu, il ne pose pas de problème particulier de captage, mais la température de l'eau n'y est que de 15 à 20° C.

- Des sables et des argiles de l'Eocène inférieur et du Paléocène et des calcaires du sommet du Crétacé supérieur qui forment un niveau aquifère parfois important. Il a été reconnu et capté par le forage de Pessac-Stadium de 561 à 592 m, avant approfondissement.

Au forage géothermique de Bordeaux-Mériadeck, le toit du calcaire crétacé rencontré à 592 m, est fissuré et aquifère jusqu'à 620 m de profondeur. Au-dessus, une série sableuse a été reconnue de 550 m environ à 592 m de profondeur. Ce sable grossier est interstratifié avec des niveaux plus argileux. Les diagraphies ne mettent pas en évidence de coupure imperméable entre ces deux niveaux lithologiques qui constituent un seul ensemble aquifère.



Emplacement
du forage

PLAN DE SITUATION GENERALE
à 1/25000

FIGURE 1
BRGM 81SGN104.A01

Sur le forage de Pessac-Stadium, le débit maximal obtenu lors des essais était voisin de 139 m³/h pour un rabattement de 38 m, ce qui correspond à un débit spécifique de 3,6 m³/h par mètre de rabattement. L'eau est à une température de 35° 4. Le gradient géothermique est donc proche de 4° C pour 100 m pour cet aquifère.

Après approfondissement jusqu'à 700 m de profondeur, le niveau capté de 580 à 621 m a fourni un débit de 135 m³/h (s = 40 m pour 48 h) d'une eau à une température voisine de 35° C.

- Les calcaires et calcaires dolomitiques du Cénomano-Turonien et les sables du Cénomanién inférieur constituent un aquifère qui a été capté à Lormont-Génicart de 840 à 1 012 m, à Ambès E.D.F. de 1 000 m à 1 064 m à St-Estèphe de 846 à 983 m à des fins d'eau potable ou industrielle et à Mériadeck de 926 à 1 127 m à des fins géothermiques.

Nous analyserons plus en détail cet aquifère dans le chapitre suivant.

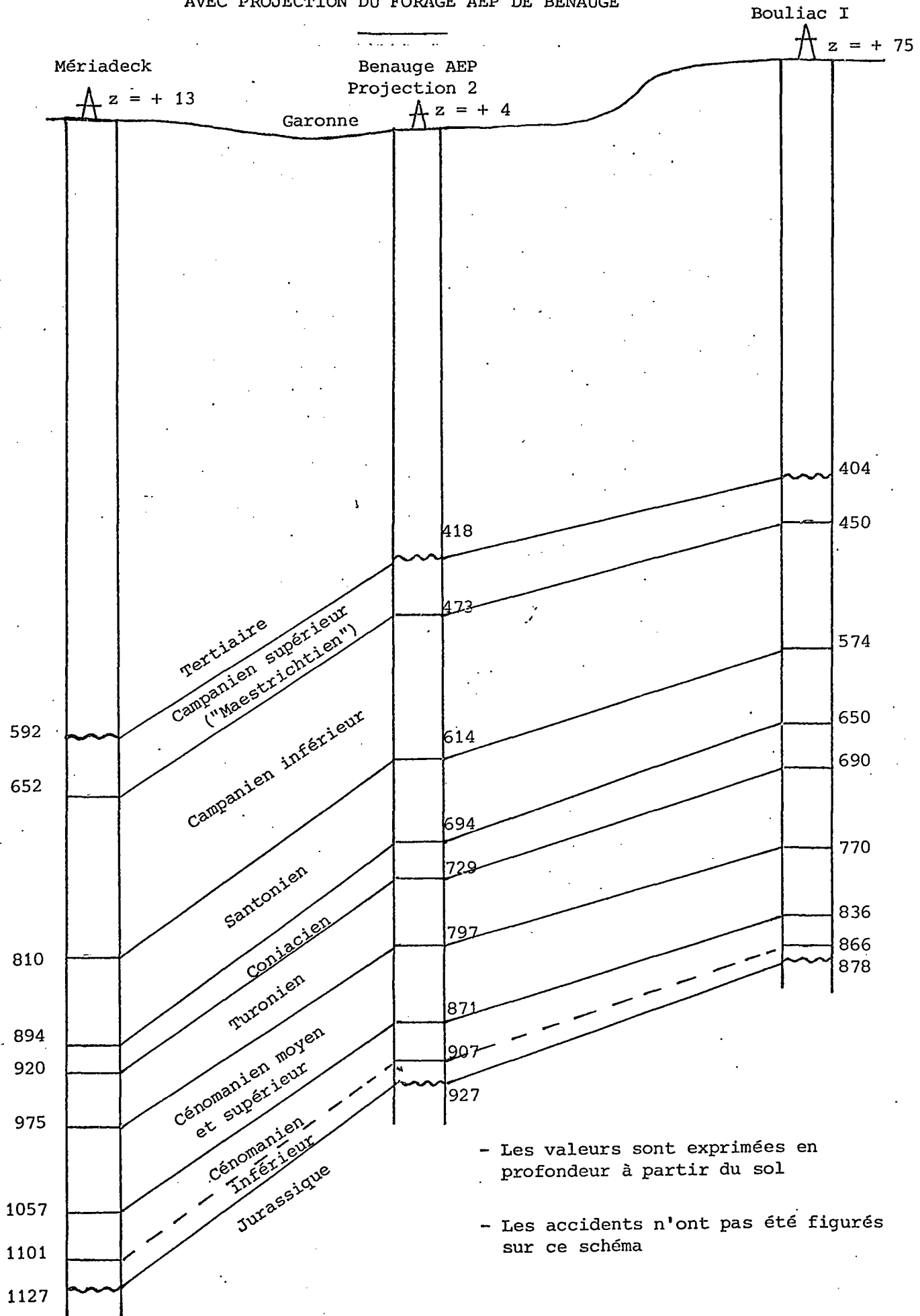
- Les dolomies du Jurassique supérieur ("Dolomie de Mano") qui ont une épaisseur supérieure à 200 m à St-Jean-d'Illac s'amenuisent et disparaissent avant le centre de Bordeaux. Le forage de Mériadeck a montré l'absence de cette dolomie sous la ville de Bordeaux et très vraisemblablement plus à l'Est entre ce point et Bouliac.

Ce réservoir ne doit donc plus exister à la Benauge.

- Les "calcaires à filaments" du Dogger sont peu épais à St-Jean-d'Illac (30 m) de 2 117 m à 2 145 m ; plus épais à Bouliac (80 m), ils sont interstratifiés dans des niveaux plus argileux de 1 490 à 1 610 m. A l'intérieur de cet ensemble, les géologues pétroliers distinguent quatre niveaux réservoirs : A, B, C, D parfois subdivisés en sous-unités, mais aucune d'elles ne présente dans le secteur de porosité importante. Un test à Bouliac entre 1 471 et 1 487 m n'a pas donné d'eau (test sec pendant 35 minutes).

- Les "dolomies de Carcans" ont également une faible puissance : 23 m à St-Médard de dolomies microcristallines contenant de l'eau peu chargée, 3 m à Bouliac de calcaires dolomitiques peu poreux : 43 m à St-Jean-d'Illac où un test de 30' n'a permis de recueillir que 40 l d'eau à 0,9 g/l de salinité en NaCl.

CORRELATIONS DES FORMATIONS CRETACEES
ENTRE LES FORAGES DE BOULIAC I ET DE MERIADECK
AVEC PROJECTION DU FORAGE AEP DE BENAUGE



Il ne semble pas que l'on puisse fonder de grands espoirs de production à partir de ce niveau pas plus que dans celui des calcaires à filaments.

- Les petits niveaux sableux ou gréseux interstratifiés dans les argiles du Trias ont été recoupés de 2 427 à 2 509 m à St-Jean-d'Illac 1. Le test effectué sur ce forage n'a permis de récupérer en 45 minutes que 80 litres de boue polluée par de l'eau salée (2,3 g/l de NaCl). Par rapport aux données des forages plus éloignés, la salinité totale des eaux de ce niveau est sans doute comprise entre 50 et 70 g/l et la productivité vraisemblablement faible.

Si l'on élimine pour des raisons de faible productivité les réservoirs profonds, le niveau aquifère le plus intéressant pour l'utilisation à des fins géothermiques est celui du Cénomano-Turonien, atteint à une profondeur de 750 m et capté sur une épaisseur de 200 m environ. Un forage profond de 1 000 mètres permettrait donc de recouper la série calcaréo-gréseuse et sableuse avant de reconnaître sur quelques mètres, le calcaire sous-jacent du Jurassique.

2.2.2.- Caractéristiques de l'aquifère du Cénomano-Turonien

L'aquifère du Cénomano-Turonien est connu et capté à Lormont-Génicart (803-7-398), à Ambès E.D.F. F.2 (779-6-80), à St-Estèphe (754-8-9) et à Mériadeck. Ses caractéristiques piézométriques, hydrauliques et chimiques peuvent être interpolées à la Benauge, vu la proximité de ces deux premiers ouvrages par rapport au forage projeté.

2.2.2.1 - Piézométrie

La cote piézométrique de la nappe, sur le forage de Lormont a varié de + 33 à + 34 NGF sous l'effet des marées d'une part et de l'exploitation du forage d'Ambès d'autre part. Les mesures actuelles montrent un niveau évoluant peu, au tour de 34 NGF.

A St-Estèphe, la cote au repos était de + 24 NGF. A Ambès, la cote piézométrique de la nappe mesurée lors des essais était de l'ordre de + 24,50 NGF.

A Mériadeck, le niveau piézométrique de la nappe se stabilise à 27,5m au-dessus du sol, soit à la cote $(13,5 + 27,50 = + 40,50 \text{ NGF})$

Il est vraisemblable qu'un forage à La Benaugue aurait une cote piézométrique équilibrée entre + 35 NGF et + 37 NGF compte tenu de l'écoulement général de la nappe du Crétacé supérieur entre Mériadeck et Lormont. Le forage serait donc artésien et aurait une charge au sol de l'ordre de 3 bars.

2.2.2.2 - Caractéristiques hydrauliques

Au cours des essais de pompage effectués sur le forage de LORMONT, le 17 mars 1969, pendant 22 heures 20, un débit de 195 m³/h avait été obtenu pour un rabattement de 77,80 m, ce qui correspond à un débit spécifique de l'ordre de 2,50 m³/h par mètre de rabattement.

A Ambès, le débit obtenu était plus faible : 90 m³/h pour un rabattement de 101 m et 106 m³/h pour un rabattement de 155 m, soit un débit spécifique de l'ordre de 0,7 m³/h par mètre de rabattement.

A Mériadeck, le débit spécifique est de 0,80 m³/h/m (115 m³/h pour un rabattement total de 141 m).

2.2.2.3 - Température de l'eau du Cénomano-Turonien

Les mesures effectuées le 18 mars 1969 en fin d'essai de débit, sur le forage de la Z.U.P. de Lormont, ont montré que la température de l'eau du Cénomano-Turonien était de 45°5 C, le forage étant crépiné entre 840 et 1 049 m de profondeur. Si l'on rapporte cette température à une profondeur correspondant au milieu de la partie crépinée soit à 950 m, et que l'on déduise une température moyenne de 12° C (température moyenne sol), on calcule un gradient géothermique moyen de 3,4° C pour 100 m.

Sur le forage d'Ambès, la température de l'eau était comparable et de 45° 5 C, le niveau capté se situant entre 1 010 et 1 060 m ; le gradient moyen rapporté à 1 035 m est de l'ordre de 3,3° C pour 100 m.

A Mériadeck, le gradient géothermique est plus élevé, de l'ordre de 3,73°C pour 100 m, en pompage (53°C en tête de puits).

A la Benauge, nous adopterons une valeur intermédiaire, soit 3,5° C pour 100 m au sol, ce qui laisse espérer une température de l'ordre de 45° C (toit des sables à 940 m).

2.2.2.4 - Caractéristiques hydrochimiques de l'eau du Cénomano-Turonien

Nous reproduisons ci-après les principaux résultats des analyses chimiques réalisées sur des échantillons d'eau prélevée sur le forage de la Z.U.P. de Lormont au mois d'Avril 1969 et ceux d'une première analyse effectuée sur le forage géothermique de Mériadeck avant la traversée du Cénomaniens sableux.

	LORMONT	MERIADECK
- Résistivité en ohms par cm	1 134	1 487
- Résidu sec à 105-110° C	620 mg/l	480 mg/l
- pH	7,52	7,56
- Degré hydrotimétrique total	16,2	14,15
- " " permanent	11,4	-
- " " calcique	9,5	-
- " " magnésien	6,7	6,65
- Titre alcalimétrique complet	15,75	13,25
- CO ₂ libre (détermination sur place)	4 mg/l	-
- CO ₂ équilibrant (calculé à 45° C)	4 mg/l	-
- CO ₂ agressif	néant	-
- Calcium	38 mg/l	30,00
- Magnésium	16,2 mg/l	16,20
- Sodium	138 mg/l	98,20
- Potassium	22,5 mg/l	14,80
- Chlorures en Cl ⁻	140,2 mg/l	90,52
- Sulfates en SO ₄ ²⁻	128 mg/l	110,00
- Bicarbonates HCO ₃ ⁻	192,15 mg/l	161,65
- Silice en SiO ₂	25,3 mg/l	16,84
- Manganèse	néant	-
- Fer total	0,37 mg/l	-
- Fluor	2,8 mg/l	-

La qualité de l'eau ne pose donc pas de problème particulier pour son rejet en surface après utilisation.

2.2.3 - Coupe géologique prévisionnelle du forage géothermique de la Benauge

Les forages de référence les plus proches utilisés pour établir les prévisions et entourant le site sont :

- le forage d'eau de la Benauge (803-7-42)
- le forage d'eau de Lormont (803-7-398)
- le forage pétrolier de Bouliac (803-7-169)
- le récent forage géothermique de Bordeaux-Mériadeck.

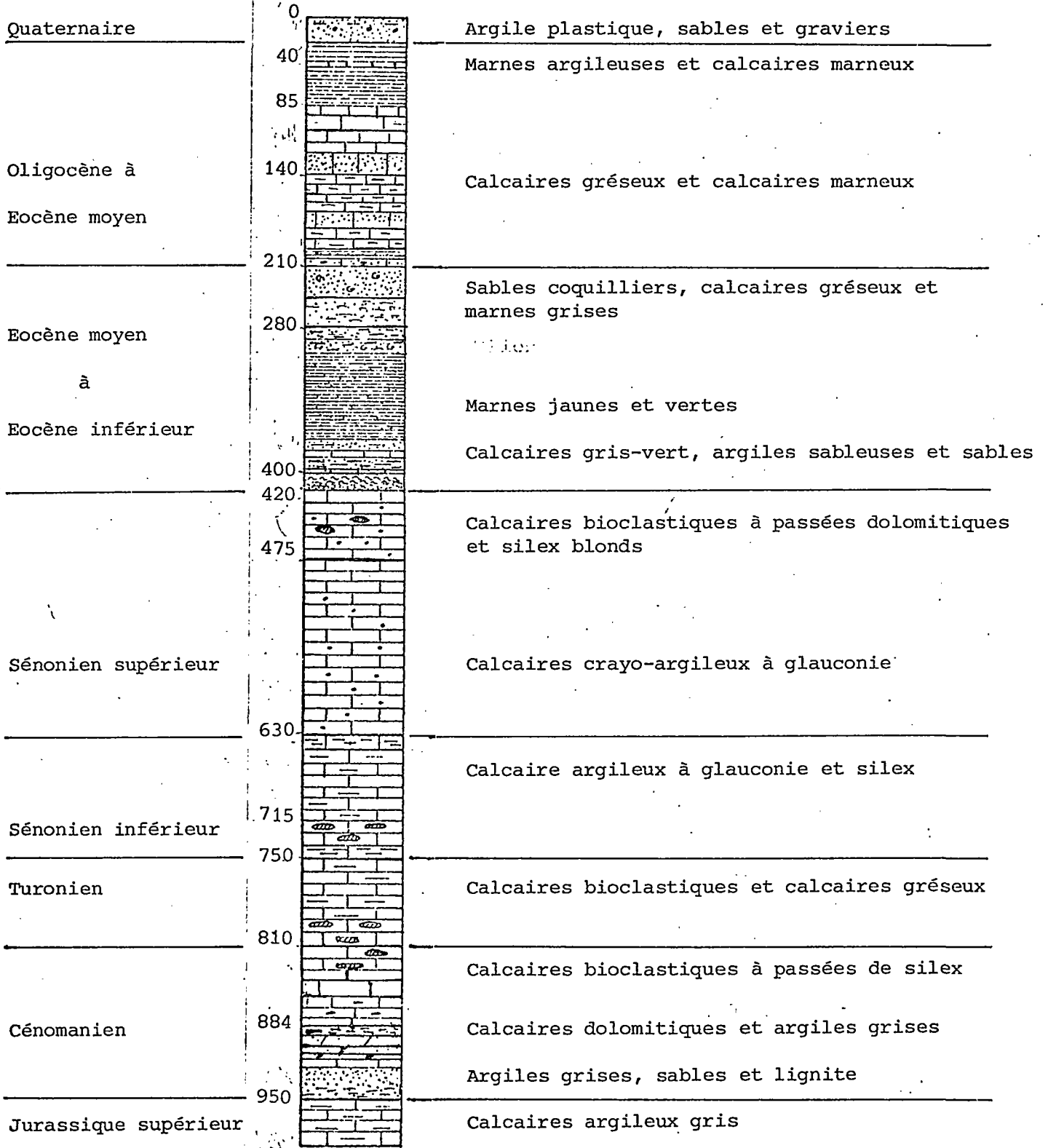
La coupe prévisionnelle du Tertiaire est presque calquée (cf. fig. sur celle des terrains traversés par le forage de la Benauge qui a touché le toit du Crétacé supérieur à 418 m de profondeur. Quant à celle des terrains crétacés, elle a été établie à partir des trois autres forages ayant tous atteint le toit du Jurassique.

La méthode d'interpolation est basée sur la construction de trois coupes longitudinales reliant ces trois forages deux à deux, et sur lesquelles a chaque fois été projeté le forage de la Benauge avec le toit vrai du Crétacé dans ce sondage. Un exemple en est donné sur la figure 3 indiquant les corrélations géologiques entre les forages de Bouliac I et de Bordeaux-Mériadeck. A partir de ces coupes, deux autres coupes longitudinales orientées NO-SE et ENE-OSO, se recoupant au droit de la Benauge, ont permis d'établir la coupe prévisionnelle des terrains crétacés. L'ensemble de la construction tient également compte de l'important accident structural qui sépare le site de la Benauge de celui de Mériadeck.

De 0 à 20 m :	Argile plastique, sable et graviers	(QUATERNAIRE)
20 à 85 m :	Marnes argileuses et calcaires marneux	(OLIG. INF. à EOC. SUP.)
85 à 210 m :	Calcaires gréseux et calcaires marneux	(EOC. SUP. et MOYEN)
210 à 280 m :	Alternance de sables coquilliers, de calcaires gréseux et de marnes grises	(EOCENE MOYEN SABLEUX)
280 à 375 m :	Marnes jaunes ou verdâtres	
375 à 420 m :	Alternance de calcaires gris-vert et d'argiles finement sableuses et de sable	(EOCENE INFÉRIEUR)
420 à 475 m :	Calcaires bioclastiques à passées dolomitiques et silex blonds	(SENONIEN SUPÉRIEUR)
475 à 630 m :	Calcaire cryo-argileux à glauconie	

630 à 750 m : Calcaire argileux à glauconie et silex dans la base	(SENONIEN INFÉRIEUR)
750 à 810 m : Calcaires bioclastiques et calcaires gréseux	(TURONIEN)
810 à 885 m : Calcaires bioclastiques à passées de silex	
885 à 925 m : Calcaires dolomitiques et argiles grises	(CENOMANIEN)
925 à 950 m : Argiles grises, sables et lignite	
à partir de 950 m : Calcaires argileux gris	(JURASSIQUE SUPÉRIEUR)

COUPE GEOLOGIQUE PREVISIONNELLE
DU FORAGE GEOTHERMIQUE DE LA BENAUGE



2.2.4 - Evaluation des conditions hydrauliques d'exploitation
des ouvrages

2.2.4.1 - Hypothèses adoptées

Hypothèse 1 : L'aquifère concerné est du type en charge supposé constitué d'un milieu poreux homogène, isotrope et d'extension infinie.

Hypothèse 2 : Valeur des paramètres hydrodynamiques
 Coefficient d'emmagasinement : $S = 7.10^{-5}$
 Transmissivité (T) :

Deux valeurs extrêmes ont été retenues :

- une valeur forte : $T = 1,5.10^{-3}$ m²/s ou m³/s/m (129,6 m²/j) obtenue sur le forage de la ville de Lormont - n° B.R.G.M. : 803-7-398.
- une valeur faible : $T = 0,5.10^{-3}$ m²/s (43,2 m²/j) obtenue sur le forage d'Ambès E.D.F. (n° B.R.G.M. : 779-6-80) (valeur obtenue d'après calcul).

Dans les calculs dont les résultats figurent sur le tableau suivant nous avons donc retenu les hypothèses suivantes :

Forage	Transmissivité (m ² /j)
Lormont	$1,5.10^{-3}$
Mériadeck	$0,5.10^{-3}$ *
La Benaugue	$1,5.10^{-3}$ (hypothèse forte)
	$0,5.10^{-3}$ (hypothèse faible)

* Cette valeur a été admise en attendant le dépouillement des essais et la réalisation de nouvelles mesures de remontée en pression après fermeture de la vanne.

Hypothèse 3 : Répartition des débits sur chaque forage.

a) 150 m³/h durant 220 j, ce qui correspond à un rabattement maximum en fin de saison de chauffe.

b) 100 m³/h de pompage en débit fictif continu durant 20 ans.

c) 120 m³/h durant 220 j.

d) 80 m³/h de pompage en débit fictif continu durant 20 ans.

Les débits des différents forages varient simultanément de la même façon et sont identiques entre eux dans les différents cas.

Hypothèse 4 : Aucune réinjection de l'eau dans l'aquifère n'est envisagée.

Le rabattement au droit du forage de La Benaugé résulte du rabattement propre du puits auquel s'ajoute l'influence des forages de Lormont et de Mériadeck.

Distance Lormont - Benaugé : 3 850 m

Distance Mériadeck - Benaugé : 3 600 m

2.2.4.2 - Le calcul des rabattements est fait en régime transitoire pour les quatre débits envisagés.

Calcul des rabattements dus à chacun des ouvrages sur le forage de la Benauge

L'équation du régime transitoire en nappe captive dans les conditions citées précédemment peut s'écrire par la formule de THEIS :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

$$\text{avec : } W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy$$

dans laquelle :

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t}$$

s : le rabattement en mètres mesuré à une distance r, du puits de pompage.

Q : le débit constant de pompage, en m³/jour.

S : le coefficient d'emmagasinement sans dimension.

T : la transmissivité de l'aquifère en m²/jour.

t : le temps, en jours, depuis le début du pompage.

Le tableau de la page suivante indique synthétiquement les résultats des différents calculs.

A ces valeurs, nous devons ajouter les pertes de charge dans la crépine du forage. En première approximation, nous pouvons la négliger, car elle représente 2 à 5 % des rabattements.

Les deux hypothèses (forte et faible) aboutissent à des résultats qui sont d'un rapport voisin de 1 sur 3, c'est-à-dire sensiblement identique au rapport des transmissivités de nos deux hypothèses.

RABATTEMENTS THEORIQUES SUR LE FORAGE DE LA BENAUGE

TRANSMISSIVITE	DEBIT (m3/h)	DUREE	INFLUENCE LORMONT (m)	INFLUENCE MERIADECK (m)	RABATTEMENT PROPRE AU PUITS (m)	RABATTEMENT TOTAL (m)
HYPOTHESE FORTE : $1,5 \times 10^{-3}$ (m ² /s)	150	220 j	9,3	21,2	55,3	85,8
		1 an	6,9	16,4	37,7	61
		5 ans	9,1	23,4	40,1	72,6
		10 ans	10,3	26,5	41,1	77,9
		20 ans	11,2	29,6	42,0	82,8
HYPOTHESE FAIBLE : $0,5 \times 10^{-3}$ (m ² /s)	100	220 j	9,3	21,2	159,2	189,7
		1 an	6,9	16,4	108,3	131,6
		5 ans	9,1	23,4	115,4	147,9
		10 ans	10,3	26,5	118,5	155,3
		20 ans	11,2	29,6	121,6	162,4

TRANSMISSIVITE	DEBIT (m3/h)	DUREE	INFLUENCE LORMONT	INFLUENCE MERIADECK	RABATTEMENT PUITS (m)	RABATTEMENT TOTAL (m)
HYPOTHESE FAIBLE $0,5 \cdot 10^{-3}$ (m ² /s)	80	220 j	7,4	17,0	127,4	151,8
		1 an	5,5	13,1	86,6	105,2
		5 ans	7,3	18,7	92,3	118,3
		10 ans	8,2	21,2	94,8	124,2
		20 ans	9,0	23,7	97,3	130

NB. Ces calculs demanderont à être ajustés en fonction du débit d'utilisation du forage après l'enquête des besoins raccordables.

2.3 - Programme de forage, d'équipement et d'essais

2.3.1 - Objectif du forage

L'objectif principal du forage est constitué par les niveaux du Cénomano-Turonien (Crétacé) comprenant :

- . au sommet, 175 mètres (de 750 à 925 m de profondeur) de calcaires à perméabilité d'interstices pouvant éventuellement être fissurés.
- . à la base, 25 mètres de sables et grès peu consolidés, intercalés de lits argileux à lignites, ensemble présentant une perméabilité d'interstices (entre 925 et 950 m de profondeur).

Par référence au forage de Bordeaux-Mériadeck, la productivité de ce niveau détritique avoisine 70 à 75 % de la productivité de l'ensemble du magasin.

Par référence aux forages de Lormont et de Mériadeck, le niveau piézométrique de la nappe devrait s'établir à + 30 m au-dessus du sol.

2.3.2 - Programme de forage et d'équipement jusqu'au toit du réservoir cénomano-turonien

a) Avant-puits

Un avant-puits profond de 40 mètres environ sera foré par un atelier au battage et équipé d'un tubage de \varnothing 18" 5/8 (tôle roulée ou soudée de 5 mm d'épaisseur) servant de tube-guide et permettant une reprise du forage avec un outil de \varnothing 17" 1/2. Ce tube-guide devra être parfaitement vertical, l'espace annulaire étant cimenté sur toute sa hauteur par l'entrepreneur.

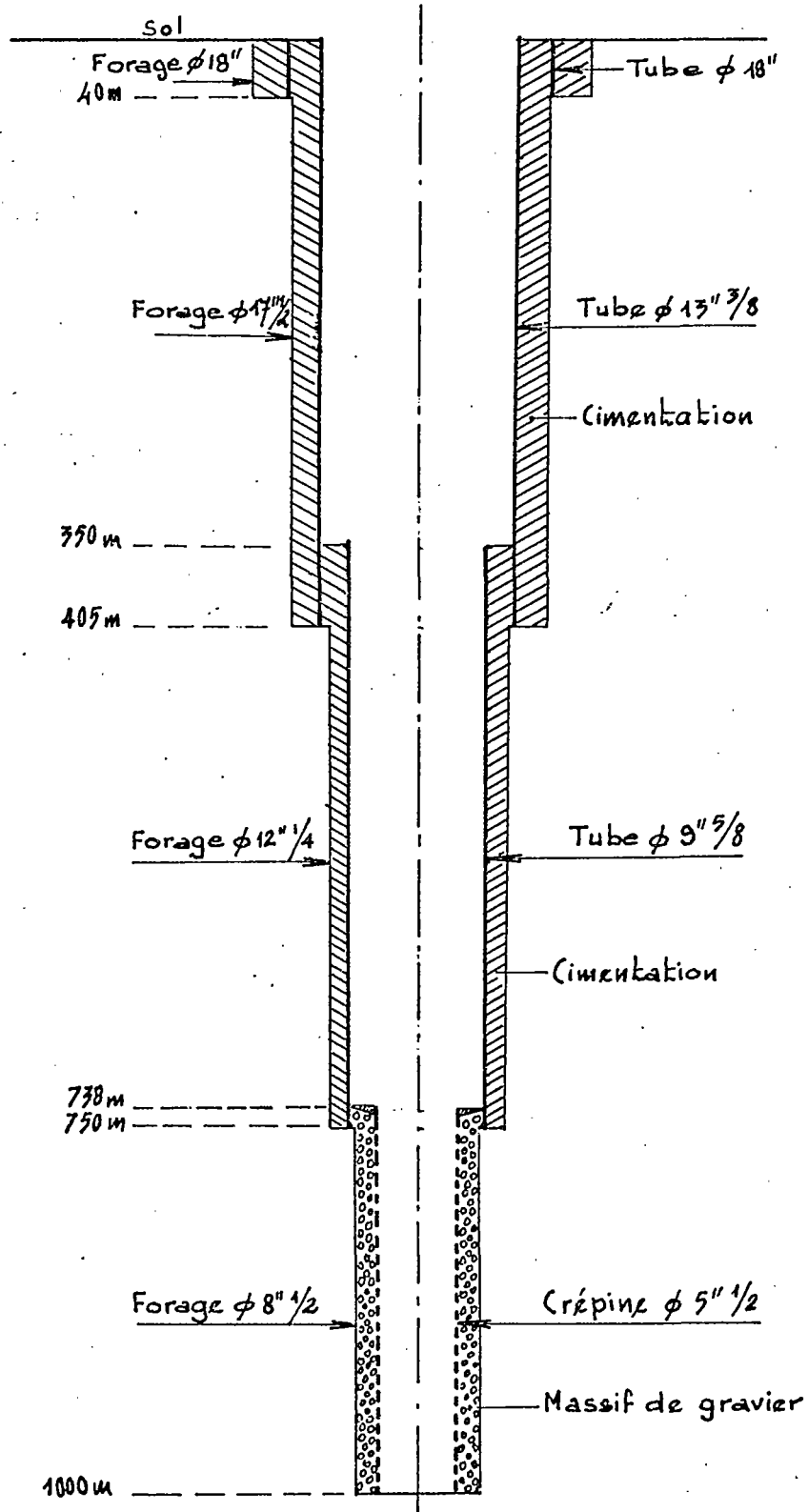
b) Forage en \varnothing 17" 1/2 et tubage en 13" 3/8

Le forage au trépan de \varnothing 17" 1/2 sera conduit jusqu'à pénétration de 15 mètres environ dans les argiles gréseuses du Paléocène, vers 400 m de profondeur. L'ordre d'arrêt sera donné par le géologue de chantier de façon à éviter de pénétrer dans les formations calcaires sous-jacentes du Sénonien où existent des risques d'absorption de boue importants (pertes de circulation) pouvant être préjudiciables à la bonne cimentation du tubage 13" 3/8.

La Benaugue

COUPE TECHNIQUE PREVISIONNELLE

à 1/5000



Après contrôle du puits à l'outil \varnothing 17" 1/2 surmonté de stabilisateurs et après exécution de diagraphies (diamètreur - déviation ou diamètreur-gamma-ray) la colonne 13" 3/8 sera mise en place jusqu'au fond et cimentée par refoulement jusqu'en surface. Un contrôle de cimentation par thermographie sera réalisé si le laitier de ciment ne remonte pas au jour. Dans un tel cas, une cimentation complémentaire sera effectuée.

Une fois la prise du ciment assurée (soit après 24 heures d'attente au maximum), le forage sera repris en \varnothing 12" 1/4 jusqu'au-dessus du toit du réservoir principal (calcaires du Turonien) en évitant de trop pénétrer dans ce réservoir où des pertes de circulation de boue peuvent se produire ; la cote d'arrêt, vers 750 mètres de profondeur, sera fixée par le géologue de chantier. Après contrôle du puits à l'outil surmonté de stabilisateurs, on réalisera ensuite les diagraphies suivantes : diamètreur-déviation ou diamètreur-gamma-ray.

A la cote atteinte par le forage, sera mis en place le tubage 9" 5/8. Cette colonne remontera jusqu'en surface ; on y aura intercalé, vers 50 m, au-dessus du sabot du 13" 3/8, un stage cémenter (chemise pour cimentation en deux étages) afin d'éliminer le surplus éventuel de laitier de ciment au niveau de la chambre de pompage ou bien afin d'effectuer une cimentation complémentaire de la colonne 9" 5/8 si la première cimentation s'avérait incomplète .

Après 48 heures d'attente de prise du ciment, temps pendant lequel l'entrepreneur montera et testera ses équipements de sécurité contre les éruptions (B.O.P. et hydrill), on procédera au contrôle de la cimentation (diagraphie par CBL-VD) au cas où la cimentation ne se serait pas déroulée parfaitement (sinon le contrôle serait reporté avec les diagraphies suivantes).

2.3.3 - Programme de forage du réservoir et complétion du puits

Le forage sera repris à l'outil de \varnothing 8" 1/2 avec une boue légère à la bentonite et sous contrôle permanent d'un détecteur de gaz jusqu'à la base des niveaux détritiques du Cénomaniens ; l'arrêt du forage sera décidé par le géologue de chantier au vu des premières passées calcaréo-argileuses du Jurassique. On réalisera alors les diagraphies suivantes : diamètreur, microlog, microlatérolog, gamma-ray et thermométrie de fond et, éventuellement, le CBL-VD

jusqu'en surface s'il n'a pas été effectué précédemment.

Après contrôle du trou à la boue bentonitique légère, ce fluide de circulation sera remplacé par une boue aux biopolymères.

Après brossage du trou dans sa partie carbonatée et passage d'un outil à jets au droit des assises détritiques, la complétion du puits sera effectuée de la manière suivante :

- descente d'une crépine de type "huile et gaz" dont le slot (dimension des ouvertures) sera fonction de la granulométrie des terrains traversés (partie détritique) suspendue au sein du tubage 9" 5/8 par un liner-hanger adapté à la mise en place d'un massif de gravier à granulométrie adaptée aux terrains et au slot de la crépine.

2.3.4 - Programme de stimulation, de développement et d'essais

a) Programme de stimulation de développement

Après pose de la crépine et mise en place du massif de gravier, la boue aux biopolymères sera soit chassée à l'eau claire, soit traitée à l'eau oxygénée. Il sera ensuite procédé à un premier développement à l'émulseur (pompage à l'air comprimé ; air-lift) suivi d'un pompage de référence.

Si les assises carbonatées se sont révélées être fissurées (après examen du pénétrolog, de l'observation de pertes de boue partielles ou de l'étude d'une carotte prise dans ces horizons), il sera procédé à un ou plusieurs traitements à l'acide (acide chlorhydrique ou acide sulfamique) chaque traitement étant suivi d'un nettoyage à l'émulseur et d'un pompage d'essai de référence.

Ces opérations seront renouvelées en fonction des résultats constatés : augmentation ou stagnation du débit spécifique (m³/h par mètre de rabattement).

b) Programme des essais

Après développement et traitements du puits, un groupe moto-pompe immergé sera mis en place, le choix de l'immersion et celui de la puissance du groupe étant fonction des résultats obtenus à l'issue des pompages à l'émulseur.

Le programme de pompage comportera :

- Un développement complémentaire à la pompe par augmentation progressive du débit sur une durée de 30 à 40 heures, jusqu'au débit maximum possible de l'ouvrage.
- Des essais de pompage par paliers de débits croissants d'une durée unitaire de deux heures, séparés d'arrêts intercalaires de même durée. Ces essais permettront, à la fois, de calculer les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage (pertes de charge) et de définir son débit critique (choix du débit pour les pompages de longue durée).
- Des pompages de 72 heures à débit constant, en vue d'étudier l'évolution du niveau dynamique de la nappe sous l'effet du pompage en fonction du temps. Le dépouillement des mesures obtenues permettra la construction des courbes des rabattements en fonction du temps et de calculer ainsi la perméabilité de l'aquifère capté en régime transitoire.
Pendant ce pompage, outre les mesures de débit et de rabattement, seront effectués des relevés périodiques de la température de l'eau en tête du forage, soit manuellement, soit à l'aide d'un thermomètre enregistreur. A la fin de ces essais, un prélèvement d'eau sera effectué par un laboratoire agréé à fin d'analyses physico-chimiques.
- Observation de la remontée du niveau de la nappe à l'issue du pompage en continu durant 48 heures, avec mesures du débit artésien dès que le niveau d'eau atteint la surface du sol.
- Programme d'essais complémentaires
Dans la mesure où le forage serait insuffisamment développé, un programme complémentaire de développement et d'essais pourra être réalisé, hors programme.

De même, si pour des raisons d'étude, un essai prolongé était souhaité par l'Administration, un programme complémentaire serait alors établi.

2.3.5 - Devis estimatif prévisionnel de la réalisation du forage

(coût Mai 1981)

RUBRIQUES	ENTREPRISE DE FORAGE	SOCIETES DE SERVICE ET FOURNITURES
Avant-puits 0 - 40 m	151 000	
Forage ϕ 17" 1/2 et ϕ 12" 1/4 de 40 à 750 m avec pose de casing ϕ 13" 3/8 de la surface à 400 m et ϕ 9" 5/8 de la surface à 750 m	1 513 000	
Forage en ϕ 8" 1/2 de 750 à 1 000 m		
Complétion et opérations de stimulation	682 000	
Développement complémentaire et pompages d'essai	155 000	
Total partiel hors taxes	2 501 000 F	
Achat tubages ϕ 13"3/8 et 9" 5/8 et transport		353 000
Colonne ϕ 5" 1/2 de complétion et liner-hanger		320 000
Plateforme et pare-bruits		400 000
Diagraphies		165 000
Cimentations et fournitures (sabot, DV)		132 000
Coupe-tube		33 000
Location d'un carottier et d'une couronne diamantée		60 000
Conseil boue		10 000
Décharge bourbier		16 000
Fourniture du tubing		27 000
Tête de puits		50 000
Pompe d'exploitation		330 000
Contrôle d'exécution du forage		77 000
Surveillance géologique		94 000
Tests et pompages d'essai ; interprétation		100 000
Etude d'impact		22 000
Total H.T.		4 690 000
Imprévus 15 %		703 500
Estimation maîtrise d'oeuvre : 7,75 % du total général avec imprévus		417 996
Total général H.T.		5 811 496