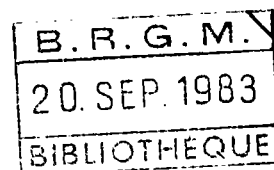
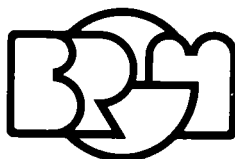


VILLE DE BOISSY-SAINT-LÉGER

A 3 E

ÉTUDE GÉOLOGIE - FORAGE D'UN PROJET GÉOTHERMIQUE
SUR LA COMMUNE DE BOISSY-SAINT-LÉGER
(ZAC de la HAIE GRISELLE)



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département géothermie et hydroénergie

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 563 GTH

Août 1983

S O M M A I R E

| | Pages |
|--|--------------|
| RESUME | |
| I - INTRODUCTION..... | 1 |
| II - PRESENTATION GEOLOGIQUE DU SITE..... | 5 |
| II.1. Cadre structural..... | 5 |
| II.2. Présentation des différents aquifères..... | 5 |
| II.3. Choix des aquifères à étudier..... | 9 |
| III - COUPE GEOLOGIQUE PREVISIONNELLE..... | 10 |
| III.1. Objectif..... | 10 |
| III.2. Documents utilisés..... | 10 |
| III.3. Présentation des résultats..... | 11 |
| III.4. Incertitude sur les cotes..... | 11 |
| IV - ETUDE DE L'AQUIFERE DU LUSITANIEN..... | 12 |
| IV.1. Description du réservoir..... | 12 |
| IV.2. Caractéristiques hydrogéologiques..... | 13 |
| V - ETUDE DE L'AQUIFERE DU DOGGER..... | 21 |
| V.1. Description de la roche réservoir..... | 21 |
| V.2. Caractéristiques hydrogéologiques..... | 23 |
| VI - ANALYSE DU RISQUE GEOLOGIQUE..... | 31 |
| VII - CARACTERISTIQUES D'EXPLOITATION..... | 32 |
| VII.1. Principes généraux..... | 32 |
| VII.2. Exploitation de l'aquifère du Lusitanien..... | 35 |
| VII.3. Exploitation de l'aquifère du Dogger..... | 46 |
| VIII - PROGRAMME DE FORAGE..... | 62 |
| VIII.1. Lusitanien..... | 62 |
| VIII.2. Dogger..... | 62 |

| | Pages |
|--|--------------|
| IX - ESTIMATIONS PREVISIONNELLES DU COUT DES TRAVAUX..... | 63 |
| IX.1. Lusitanien..... | 64 |
| IX.2. Dogger..... | 64 |
| X - ESTIMATION DES COUTS D'EXPLOITATION..... | 64 |
| X.1. Coûts d'entretien..... | 64 |
| X.2. Renouvellement des équipements et interventions spécifiques..... | 65 |
| X.3. Résumé des coûts d'entretien et de renouvellement..... | 66 |

R E S U M E

La présente étude constitue la partie sous-sol de l'étude de faisabilité d'un projet visant à chauffer par géothermie la ZAC de LA HAIE GRISELLE à BOISSY SAINT LEGER.

Cette étude comprend l'analyse des caractéristiques hydrogéologiques des deux aquifères les plus importants : LUSITANIEN et DOGGER.

Puis ont été définies les caractéristiques d'exploitation de deux doublets visant chacun des 2 aquifères.

Pour finir, cette étude présente les programmes et devis relatifs aux forages à réaliser pour capter les différents horizons producteurs.

I - INTRODUCTION

Dans le cadre général de la région parisienne, la planche 1 situe le site de BOISSY SAINT LEGER, les autres réalisations géothermiques, les forages pétroliers et les forages d'eau profonds intéressants pour l'étude.

Les forages géothermiques exploitant les eaux du Dogger les plus proches, ORLY, MONTGERON, CLICHY SOUS BOIS et LA COURNEUVE sont distants de, respectivement 6,5, 7, 17 et 21 kilomètres.

Seuls les forages géothermiques d'ACHERES et CERGY ont exploré le réservoir du Trias.

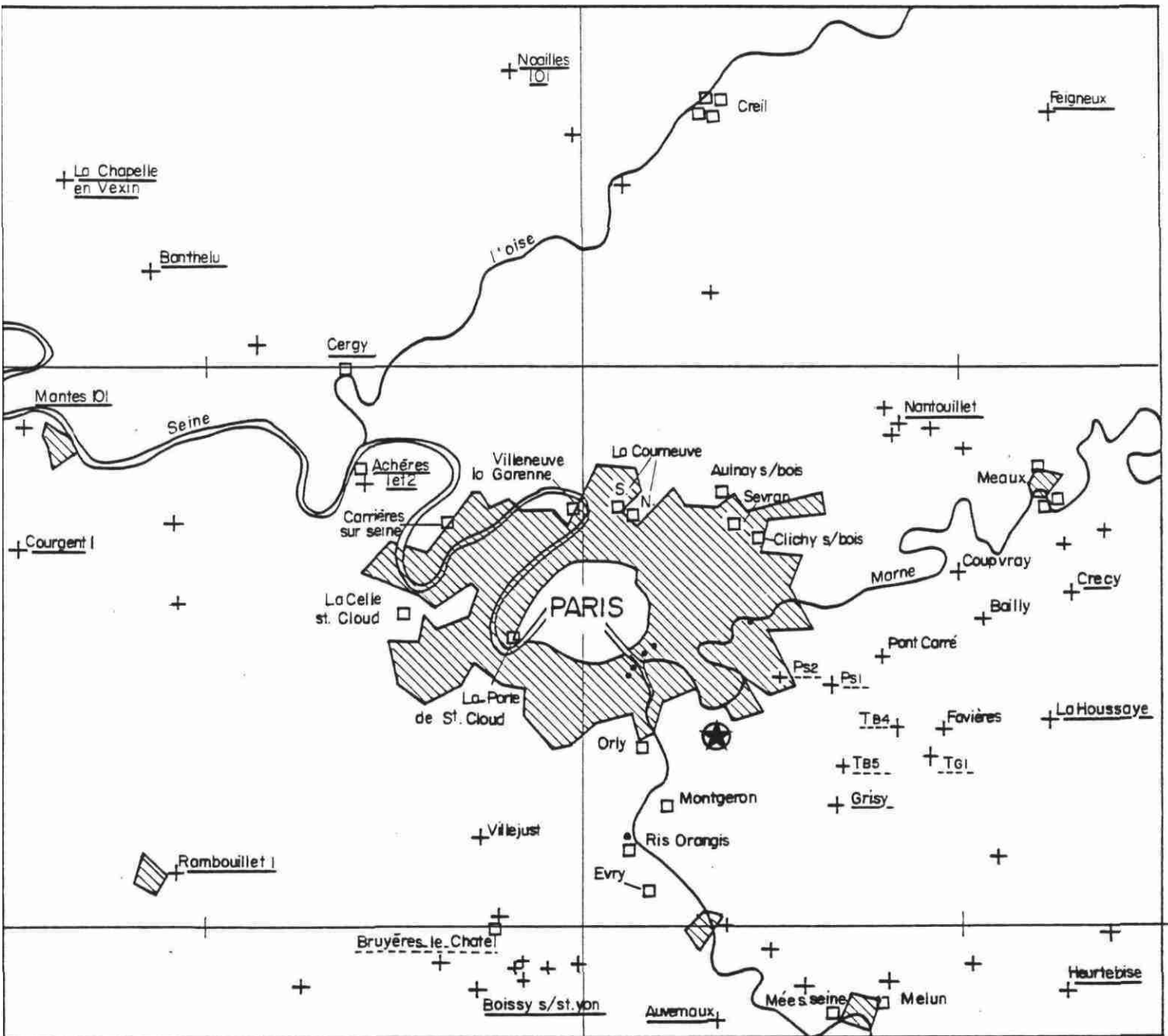
L'emplacement prévu pour la plateforme de forage se situe en bordure de la route nationale (RN 19) (cf. planche 2) au Nord-Ouest de la ZAC de la Haie Griselle (cf. planche 3). Les coordonnées LAMBERT 1 zone Nord de ce site sont :

$$x = 611\ 800$$

$$y = 116\ 690$$

L'altitude du sol est de + 38 (NGF)*.




(*) NGF : Nivellement général de la France. La plan de référence ou altitude 0 est le niveau de la mer.



 **PROJET ETUDIÉ**

FORAGE GEOTHERMIQUE

- au Wealdien
- au Dogger
- ayant reconnu le Trias

-  Bruyères-le-Chatel
-  Sevran
-  Cergy

FORAGE PETROLIER

- Core drill peu profond + Ps 1
- au Dogger + Couprvray
- au Trias + Grisy

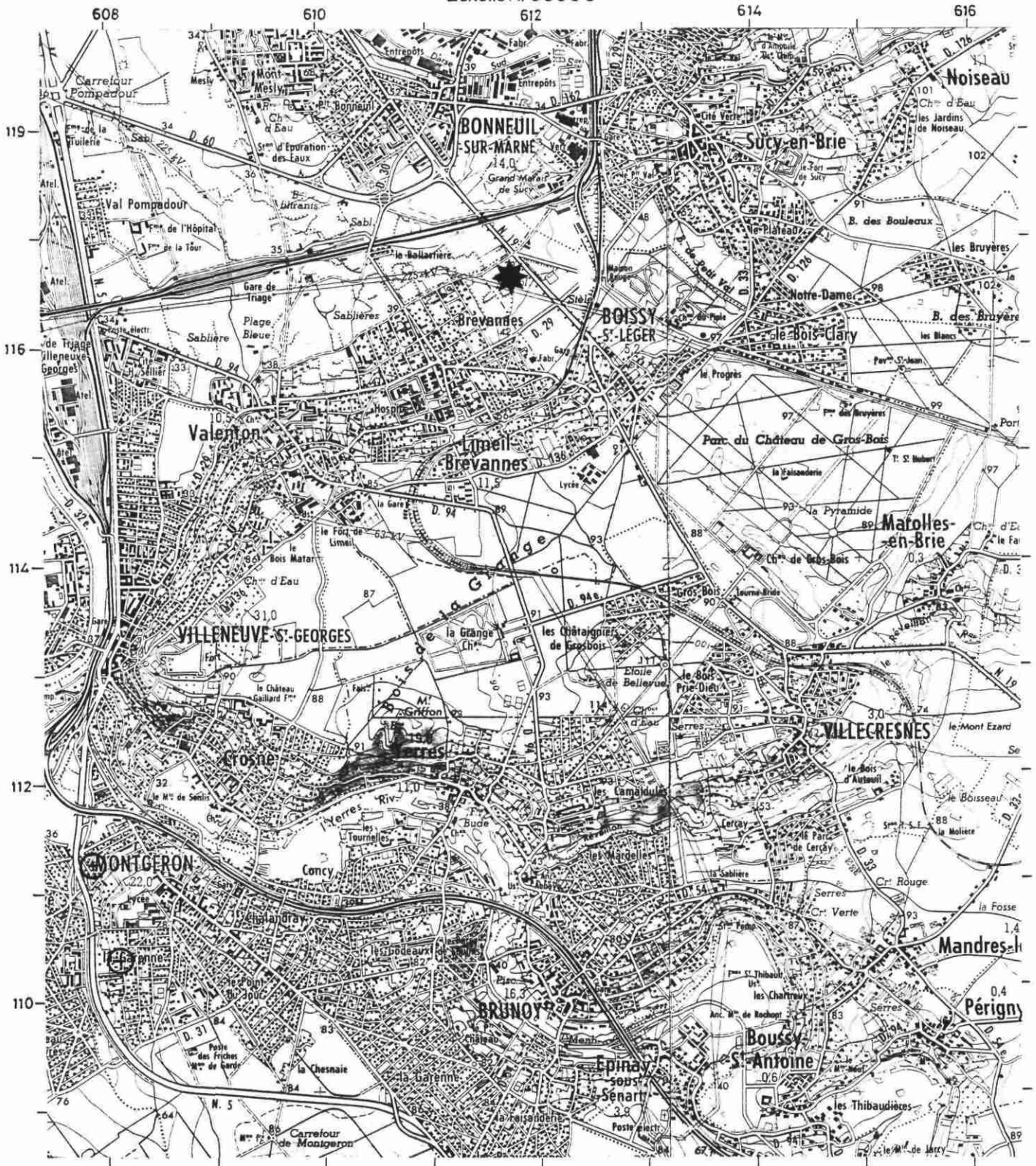
FORAGE D'EAU PROFOND

- a l'Albien ●

IMPLANTATION DES FORAGES

PLAN DE SITUATION

Echelle: 1/50000



- ★ Site de forage de BOISSY-SAINT-LEGER
- ⊕ Forage géothermique de MONTGERON
Impact au niveau du Dogger

II - PRESENTATION GEOLOGIQUE DU SITE

Le Bassin Parisien est constitué par un ensemble de terrains sédimentaires déposés au long des ères secondaires et tertiaires, reposant sur un socle cristallophyllien ou granitique. Les terrains disposés en couches régulières et superposées, plongent vers le centre du Bassin (sous la Brie) où leur épaisseur atteint son maximum (3 000 mètres). BOISSY SAINT LEGER est situé à l'aplomb de la remontée occidentale des terrains de la fosse de la Brie.

II.1. Cadre structural

La région parisienne est affectée de quelques déformations et discontinuités structurales (planche 4 - Fig. 1).

Le site de BOISSY SAINT LEGER est situé à la base du flanc Sud de la prolongation de la structure anticlinale de Beynes Meudon.

A 6 kilomètres à l'Est du site étudié, sur le permis de recherche pétrolière de BRIE, la société ESSOREP a réalisé une étude sismique qui met en évidence l'existence au niveau du Dogger (Courbe 1 700 de la planche 3 - Fig. 2) d'une dépression, dont la fermeture ouest, située à l'extérieur du permis, n'est pas précisée.

Ainsi la structure géométrique du Dogger à l'aplomb de BOISSY SAINT LEGER n'est pas parfaitement connue.

Les couches sédimentaires plongeraient vers le Sud Est avec une pente de 17/1 000.

II.2. Présentation des différents aquifères

La série sédimentaire renferme un grand nombre de formations aquifères dont les principales caractéristiques lithologiques, hydrogéologiques et thermiques sont résumées planche 5. Depuis la surface du sol nous rencontrons les aquifères suivants :

- Sables et calcaires de l'Eocène

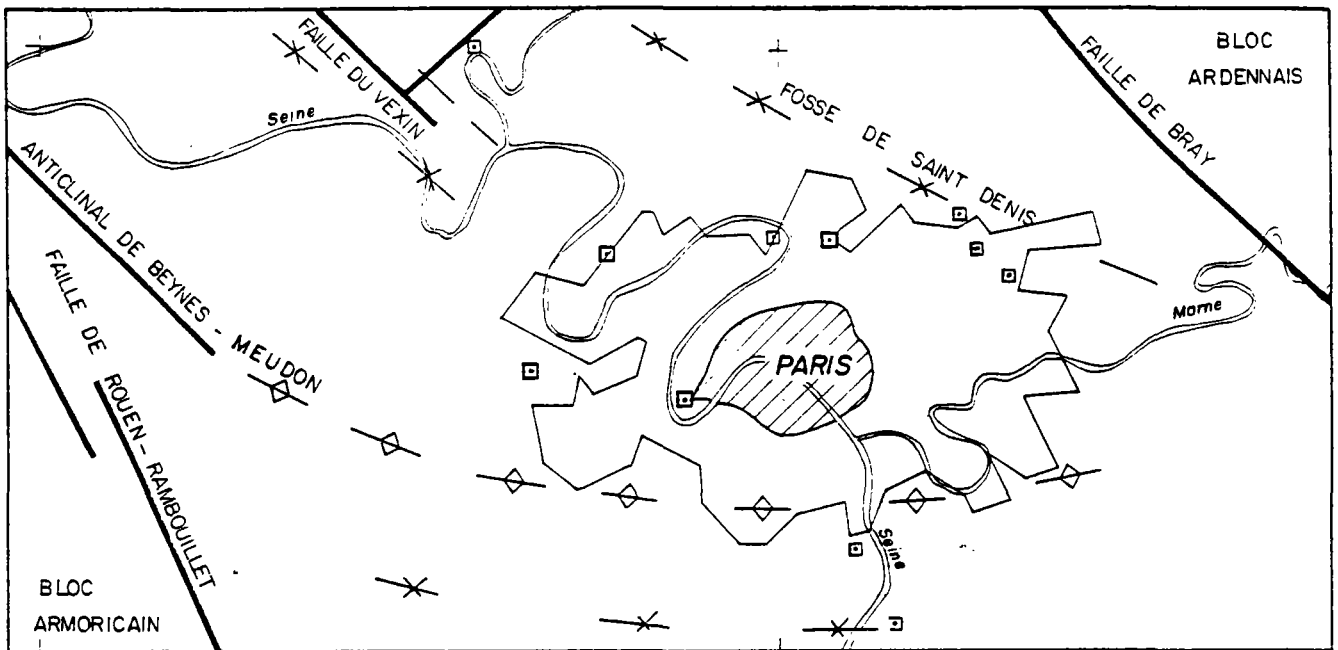
Ils contiennent une nappe superficielle fortement exploitée pour l'alimentation industrielle ou agricole.

- Craie du Crétacé Supérieur

Elle ne présente des caractéristiques aquifères que lorsqu'elle est suffisamment fissurée. D'autre part la température des eaux de la craie est trop faible pour qu'une opération de basse énergie soit envisagée.

CADRE GEOLOGIQUE

Figure 1

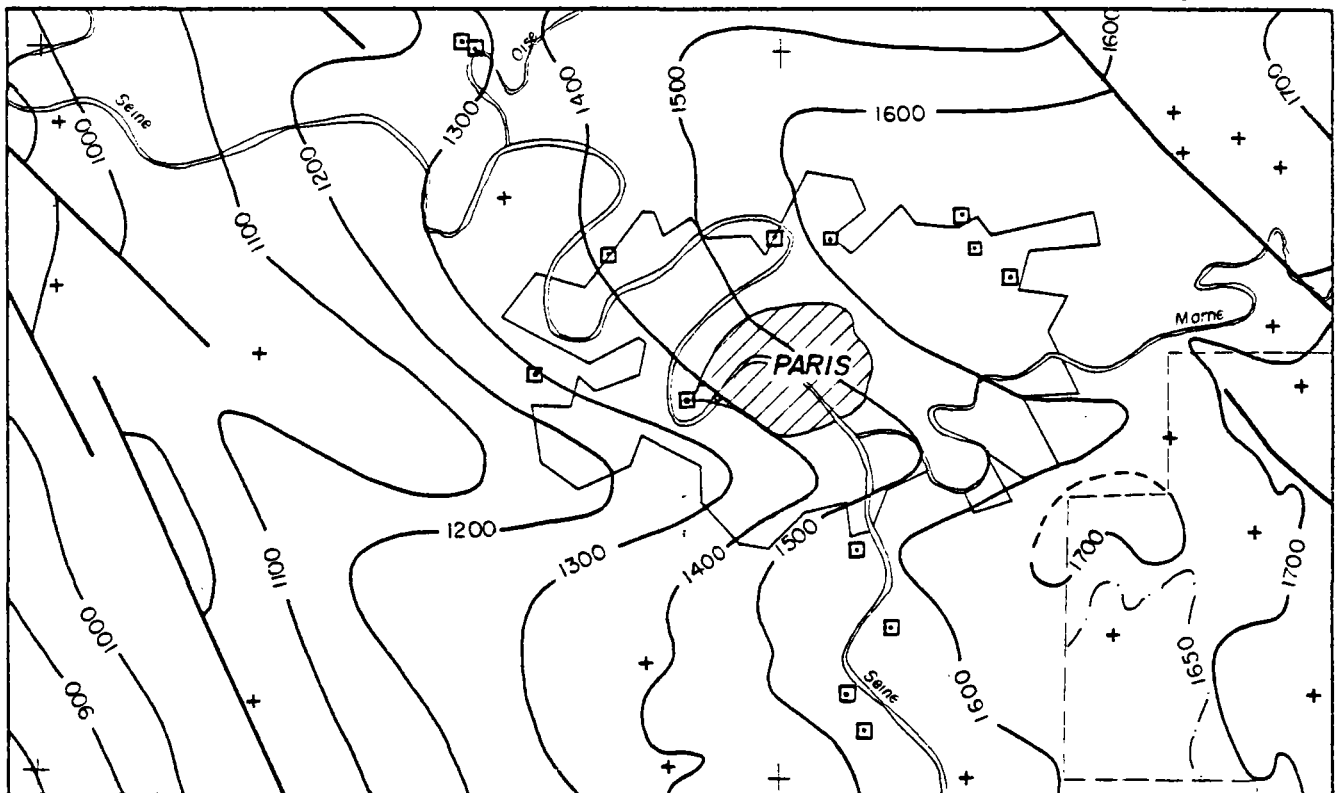


Echelle : 1/500.000

- ⊕ Site étudié
- Forage géothermique
- Faille
- ◇ Axe anticlinal
- ✕ Axe synclinal

ISOBATHES AU TOIT DU DOGGER

Figure 2



Echelle : 1/500.000

- Accident tectonique
- ⊕ Site étudié
- Forage Géothermique
- + Forage Pétrolier
- Isobathes au toit du Dogger (cote NGF)
- ⌊ Permis Pétrolier de BRIE

COUPE GEOLOGIQUE SCHEMATIQUE

| ETAGE GEOLOGIQUE | LITHOLOGIE DES RESERVOIRS | PERMEABILITE | | | TEMPERAT APP. | OBSERVATIONS |
|------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--|
| | | Nulle | Faible | Bonne | | |
| TERTIAIRE | | | | | | |
| SENONIEN TURONIEN | Craie | | ^ ^ ^ ^ ^ ^ | | | |
| CENOMANIEN | | — — — — — — | | | | |
| ALBIEN | Sable | | | • • • | 35 | Productivité importante exploitation réglementée Aquifère peu connu |
| NEOCOMIEN | Sable | | | • • • | 42 | |
| PURBECKIEN | Dolomie | | /// | | | |
| PORTLANDIEN | | — — — — — — | | | | |
| KIMMERIDGIEN | | — — — — — — | | | | |
| LUSITANIEN | Calcaire oolithique ou crayeux | | • ^ • ^ • ^ | • • • • • • | 65 | Aquifère dont la productivité varie |
| OXFORDIEN CALLOVIEN | | — — — — — — | | | | |
| DOGGER | Calcaire oolithique, graveleux | — — — — — — | | • • • • • • | 73 | Bonne productivité |
| LIAS | | — — — — — — | | • • • | | |
| TRIAS | Grès, grès argileux | | — — — — — — | • • • | 88 | Température intéressante. Productivité mal connue |

- Sables de l'Albien

Profonds de 723 mètres, leur température est voisine de 35° C. Cet aquifère est exploité par de nombreux forages en région parisienne pour l'eau potable. La climatisation de la Maison de la Radio est assurée par une exploitation de la nappe de l'Albien dont les calories sont extraites au moyen de pompe à chaleur. Il faut noter de plus que cette nappe d'eau douce est protégée et que son exploitation est soumise à une réglementation rigoureuse.

Au début du siècle cet aquifère a été surexploitée en région parisienne et à partir de 1935 la politique suivie par le Service des Mines durant les demandes d'autorisation de forage, fut donc de refuser toute exploitation nouvelle dans le but de limiter le volume global des prélèvements.

Le problème de l'éventualité de l'exploitation de l'Albien à des fins géothermales est posé auprès de l'administration et une réponse devrait être apportée d'ici quelques mois.

- Sables de la base du Crétacé (Wéaldien)

Situés à quelques 150 mètres au dessous des sables de l'Albien, ils sont plus hétérogènes et leur température reste inférieure à 45° C. Cette formation a donné des débits supérieurs à 100 m³/h à BRUYERES LE CHATEL et PLAISIR. Cet aquifère a aussi été testé au forage de la Maison de la Radio.

- Calcaires du Lusitanien

Ils renferment de l'eau à 65° C environ vers 1 260 mètres de profondeur. Ce réservoir reste peu exploré car il ne constitue en région parisienne, ni un objectif pétrolier ni un aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable. Il a toutefois été testé au forage géothermique de ORLY où il produit 150 m³/h d'eau à 60° C. Par contre au forage de RIS ORANGIS, très proche d'Orly sa productivité est pratiquement nulle. Il convient donc de le considérer comme un objectif géothermique possible mais risqué.

- Calcaires du Dogger

Profonds de 1 653 mètres les calcaires poreux du Dogger peuvent fournir une eau dont la température est voisine de 73° C. Cet aquifère est bien connu en région parisienne où il est déjà exploité par de nombreuses réalisations géothermiques.

- Calcaires du Lias

Les formations du Lias ne semblent pas présenter des niveaux poreux d'épaisseur suffisante pour qu'une exploitation géothermique soit envisageable

- Grès du Trias

Ils constituent le réservoir le plus profond de la zone d'étude (1 990 mètres). Ce réservoir a été reconnu à Cergy Pontoise et a donné des résultats très moyens.

Compte tenu des problèmes rencontrés lors de la réinjection, il n'est pas possible d'envisager actuellement l'exploitation du TRIAS.

II.3. Choix des aquifères à étudier

L'examen des aquifères présents à l'aplomb de BOISSY SAINT LEGER (cf planche 5) montre que deux aquifères peuvent constituer des objectifs géothermiques intéressants :

- les calcaires du Lusitanien assez mal connus mais dont la productivité peut être localement très intéressante ;
- les calcaires du Dogger dont la productivité est bien connue et contenant un fluide géothermal à température élevée.

III - COUPE GEOLOGIQUE PREVISIONNELLE

III.1. Objectif

La coupe géologique prévisionnelle a pour but de permettre l'élaboration du programme de forage et de son coût en vue de la réalisation de l'étude économique finale.

Elle indique toutes les informations indispensables pour le programme de forage :

- nature géologique des roches ;
- épaisseur des couches ;
- niveaux aquifères ;
- présence d'éléments influant sur la technique de forage : lignite, silex... ;
- risque de pertes de boues.

Les incertitudes sur certaines cotes sont indiquées lorsqu'elles correspondent à des phases majeures du forage (changement de diamètre...).

III.2. Documents utilisés

- la carte géologique au 1/50 000 (feuille LAGNY et BRIE COMTE ROBERT)
- les documents de synthèse :
 - . Atlas des nappes aquifères de la région parisienne - BRGM 1971
 - . Contribution à l'étude de l'Albien - Thèse de Lauvergeat - 1967
 - . Etude hydrogéologique de la nappe de l'Albien en région Ile de France - Ed. BRGM - 81 SGN 600 IDF - Ch. FREY - 1981
 - . Potentiel géothermique du Bassin Parisien - Action Concertée DGRST/BRGM/ELF AQUITAINE n° 74.7 - 0990 - Ed. BRGM - B. HOUSSE et Ph. MAGET - 1976
 - . Carte ELF AQUITAINE - F. HERITIER et J. VILLEMIN - 1971 - Mise à jour à partir des coupes de forages récents.

Les coupes géologiques des forages d'eau profonds (à l'Albien) :

| | | | |
|----------------|-----|----|-----|
| IVRY SUR SEINE | 183 | 7D | 75* |
| NOISY LE GRAND | 184 | 5 | 13 |
| VIRY CHATILLON | 219 | 7 | 73. |

Les coupes géologiques des forages géothermiques au Dogger :

ORLY, MONTGERON, RIS ORANGIS, EVRY, CLICHY SOUS BOIS, SEVRAN, AULNAY SOUS BOIS, LA COURNEUVE, VILLENEUVE LA GARENNE, PORTE DE SAINT CLOUD.

Les coupes de forages de calage sismique "core drill" :

| | |
|-------------------|------------|
| PONTAULT COMBAULT | PS1 et PS2 |
| FEROLLES ATILLY | TB5 |
| GRETZ | TG1 TG4. |

Les coupes des forages pétroliers ;

| | | | |
|-----------|-------------|----------|-----------|
| COUPVRAY | W 14/1826** | BAILLY | W 14/1434 |
| PONTCARRE | W 14/2352 | FAVIERES | W 14/2043 |
| GRISY | W 14/3403 | | |

III.3. Présentation des résultats

Les données de forages et les travaux de synthèse géologique et géophysique nous ont permis d'établir la coupe géologique prévisionnelle (planche 6) à l'aplomb du site de BOISSY SAINT LEGER.

Il conviendra d'étudier ultérieurement le comportement géotechnique des terrains de surface qui doivent servir d'assise à la plateforme de forage.

III.4. Incertitude sur les cotes

Les marges d'erreur sur les cotes fondamentales sont :

| | |
|------------------------------------|--------|
| - toit de la craie | ± 10 m |
| - toit des sables de l'Albien | ± 20 m |
| - toit des calcaires du Lusitanien | ± 25 m |
| - toit des calcaires du Dogger | ± 30 m |

Les marges d'erreur sur les cotes sont relativement importantes du fait de l'éloignement des forages de référence et de la position structurale particulière du site étudié (base de flanc anticlinal - existence d'une dépression située à 6 km à l'Ouest du site et dont la fermeture n'est pas précisée).

(*) Indice de classement dans la banque des données du sous-sol du Service Géologique National.

(**) Indice du classement DHYCA (Direction des Hydrocarbures)

IV - ETUDE DE L'AQUIFERE DU LUSITANIEN

Le Lusitanien désigne classiquement -dans le Bassin Parisien- une épaisse assise essentiellement calcaire, comprise entre les marnes du Callovo-oxfordien et celles du Kimmeridgien.

L'aquifère du Lusitanien ne présente pas d'indice pétrolier dans la région et n'a fait l'objet que de peu d'analyses ou de tests de productivité. D'autre part il n'est pas exploité pour l'alimentation en eau. Ce réservoir exploré au forage géothermique d'Orly a montré localement une productivité importante. Un autre test du Lusitanien vient d'être réalisé au forage géothermique de RIS ORANGIS, situé à 10 kilomètres au Sud d'Orly. La productivité du Lusitanien est nulle en cet endroit. Le réservoir demeure assez mal connu en région parisienne.

IV.1. Description du réservoir

Les marnes de l'Argovien et du Kimmeridgien constituent respectivement le mur et le toit de l'aquifère contenu dans les calcaires du Lusitanien (Sequanien et Rauracien).

Le réservoir consiste en une succession de faciès calcaires oolithiques, graveleux, bioclastiques, micritiques, gréseux et parfois argileux. L'argilosité des calcaires, évaluée à partir de diagraphies (radioactivité naturelle, résistivité et polarisation spontanée), est importante dans la partie supérieure (SEQUANIEN) et décroît fortement dans la partie inférieure (RAURACIEN).

Les faciès les plus poreux et vraisemblablement producteurs sont situés dans le Rauracien. Ce sont ces niveaux qui ont été testés à ORLY.

Le schéma suivant résume les principaux éléments concernant l'aquifère du Lusitanien.

| STRATIGRAPHIE | LITHOLOGIE | RESERVOIR |
|---------------|-------------------------------|------------------------|
| Kimmeridgien | Marnes | Toit du réservoir |
| SEQUANIEN | Calcaire et calcaire argileux | Peu poreux et argileux |
| Lusitanien | RAURACIEN | Très poreux |
| ARGOVIEN | Marne | Mur du réservoir |
| Oxfordien | Marne | |

IV.2. Caractéristiques hydrogéologiques

IV.2.1. Profondeur

La cote du toit des calcaires du Lusitanien est évaluée à - 1 220 m \pm 25 NGF ce qui correspond à une profondeur de 1 258 \pm 25 mètres (cf. coupe géologique prévisionnelle).

Les premiers niveaux potentiellement réservoirs sont situés à 70 mètres sous le toit du Lusitanien.

IV.2.2. Épaisseur

Le tableau ci-dessous présente les données disponibles pour l'évaluation des épaisseurs à l'aplomb de BOISSY SAINT LEGER.

| FORAGES | EPAISSEUR TOTALE DES CALCAIRES | EPAISSEUR UTILE POTENTIELLE D'APRES DIAGRAPHIES | POROSITE MOYENNE SUR LA HAUTEUR UTILE |
|-------------------|-----------------------------------|---|---|
| AULNAY SOUS BOIS | 198 | 84 | 0,14 |
| CLICHY SOUS BOIS | 206 | 45 | 0,15 |
| EVRY | 177 | 50 | 0,16 |
| ORLY | 180 | | |
| LA COURNEUVE NORD | 187 | 66 | 0,15 |
| BAILLY | 138 | 54 | 0,16 |
| GRISY | 171 | 25 | 0,14 |
| FAVIERES | 152 | 20 | 0,15 |
| PONTCARRE | 142 | 57 | |
| COUPVRAY | 225 | 55 | 0,15 |
| LA CELLE ST CLOUD | 193 | 26 | 0,17 |
| RIS ORANGIS | | | |

A l'aplomb de la région parisienne, l'épaisseur totale des calcaires du Lusitanien croît d'Est en Ouest et décroît quand on s'approche de l'axe de l'anticlinal de BEYNES MEUDON. L'épaisseur totale des calcaires du Lusitanien peut être estimée au droit de BOISSY SAINT LEGER à 170 ± 20 mètres.

L'épaisseur utile potentielle correspond uniquement à l'épaisseur cumulée des faciès non argileux et poreux identifiés par interprétation des diagraphies électriques, sismiques et nucléaires effectuées dans les forages les plus proches. Notons qu'aucune diagraphie de porosité n'a été effectuée sur les puits d'Orly, Montgeron et Ris Orangis. Les données disponibles font apparaître au Sud de BOISSY SAINT LEGER (forage de Grisy Favières) une zone où l'épaisseur utile est faible (de l'ordre de 25 mètres). Sur les autres forages de la région parisienne l'épaisseur utile est généralement supérieure à 50 mètres. Les niveaux potentiellement producteurs sont situés essentiellement dans le Rauracien. On retiendra pour le site de BOISSY SAINT LEGER une épaisseur utile potentielle de 35 ± 20 mètres.

La hauteur productrice est habituellement déterminée à partir des enregistrements de débitmètre effectués dans les puits géothermiques lors d'essais de production. Elle correspond à l'épaisseur cumulée des niveaux producteurs. Aucune mesure de débitmètre n'ayant été réalisée au Lusitanien en région parisienne*, il est difficile d'estimer ce paramètre.

Par analogie avec le Dogger (dont les faciès sont semblables au Lusitanien) et par référence au forage géothermique de REIMS nous retiendrons comme hypothèse de hauteur productrice, la valeur de 10 ± 8 mètres.

IV.2.3. Porosité

La porosité se définit comme le rapport entre le volume des vides contenus dans la roche (et donc susceptible de contenir de l'eau) et le volume total de la roche. Elle peut être mesurée de façon directe sur échantillon, quand le réservoir a été carotté ou de façon indirecte par interprétation des diagraphies.

La porosité permet d'évaluer le volume de fluide pouvant être présent dans la roche. Elle ne définit pas l'aptitude du fluide à se déplacer dans le terrain. Elle est nécessaire pour effectuer les calculs thermiques sur lesquels repose la détermination de la distance entre puits.

(*) Au forage géothermique de REIMS MURIGNY où le Lusitanien a été exploré, la hauteur productrice mesurée au débitmètre représente 30 % de la hauteur utile potentielle déterminée par interprétation des diagraphies.

Le Lusitanien n'a pas été carotté dans la région.

Compte tenu des valeurs de porosité relevées sur les forages voisins, nous retiendrons pour le projet de BOISSY SAINT LEGER une valeur de $15 \pm 3 \%$.

IV.2.4. Transmissivité

La transmissivité se définit comme le produit de la hauteur productrice par la perméabilité moyenne sur cette hauteur. Elle peut s'exprimer en Darcy mètre.

Ce paramètre est fondamental pour évaluer la productivité d'un réservoir. Son évaluation est fondée sur les résultats obtenus lors de l'interprétation d'essais de production et de test pétrolier de type DST (test en trou ouvert).

Etant donné la rareté des tests de formation et des essais de production réalisés au Lusitanien l'estimation de la transmissivité à BOISSY est délicate.

Un test de formation (de type DST) a été réalisé au forage pétrolier de COUPVRAY. Sa hauteur testée (20 mètres) se trouve au sommet du Séquanien dans la partie qui n'est pas la partie la plus favorable sur le plan de la productivité. 2,23 m³ d'eau salée ont été recueillis pour une durée d'ouverture de 43 minutes. L'enregistreur de pression a mal fonctionné et, de ce fait le test est ininterprétable.

Un essai de production au Lusitanien a été réalisé après perforation du tubage au forage géothermique d'Orly. La transmissivité calculée s'élève à 95 Darcy mètres.

Un test vient d'être réalisé au Lusitanien à RIS ORANGIS (10 km au sud d'Orly). La productivité du Lusitanien est nulle à cet endroit.

Ces éléments peu nombreux montrent la grande variabilité d'un point à un autre de la productivité du Lusitanien et d'autre part nous oblige à considérer avec beaucoup de prudence les prévisions de productivité effectués sur cet aquifère.

On retiendra donc comme valeurs de transmissivité :

- une hypothèse moyenne de 40 Darcy-mètre
- une hypothèse basse de 5 Darcy-mètre
- une hypothèse haute de 95 Darcy-mètre.

IV.2.5. Piézométrie - Pression de gisement - Pression statique en tête de puits

La pression de gisement est habituellement connue par des mesures directes dans les forages pétroliers ou géothermiques. Nous ne disposons dans la région de BOISSY SAINT LEGER que de rares mesures.

A Orly la pression de gisement statique extrapolée est de 144,07 kg/cm² à 1 310 mètres de profondeur ce qui correspond à une pression en tête de puits de 12 kg/cm² et un niveau piézométrique de + 160m NGF*.

On peut retenir pour le site de BOISSY SAINT LEGER, en l'absence d'autres indications, une pression de gisement du même ordre de grandeur. Cette pression de gisement correspond à une pression statique en tête de puits de production de 12 ± 4 kg/cm².

IV.2.6. Température

Plusieurs types de données sont disponibles pour évaluer la température des aquifères profonds au droit du site de BOISSY SAINT LEGER. Ce sont :

- température de boue de forages ;
- température relevée lors de tests en trou ouvert (DST) sur les forages pétroliers et sur les forages géothermiques ;
- température relevée lors d'essai de mise en production d'un aquifère pendant une longue durée ;
- enregistrement en continu de la température sur toute la hauteur du puits quand celui-ci a atteint l'équilibre thermique.

Les mesures issues des forages géothermiques sont les plus fiables. Les mesures de température réalisées sur l'aquifère du Lusitanien sont peu nombreuses. En région parisienne la température des eaux du Lusitanien n'a été mesurée qu'une seule fois en production, au forage d'Orly où, au toit du réservoir, les eaux étaient à 60° C. La température des eaux du Lusitanien a par ailleurs été mesurée lors de thermométries enregistrées en continu sur toute la hauteur des puits à Aulnay Sous Bois, La Courneuve Sud, Cergy et Fontainebleau.

(*) Ce niveau piézométrique est calculé en considérant que la colonne d'eau dans le puits est à la température de production.

Par ailleurs, la synthèse des données de température recueillies sur les forages géothermiques lors d'essais au niveau du Dogger indique des valeurs de gradient géothermique moyen entre le sol et cet aquifère comprise entre 2,8 et 4,0° C/100 mètres ; la valeur la plus probable au niveau de BOISSY SAINT LEGER étant de 3,7° C/100 mètres (cf. paragraphe n° V.3.6.).

La comparaison des gradients géothermiques moyens entre le Dogger (G1) et le sol d'une part et entre le Lusitanien et le Dogger (G2) d'autre part est possible à Orly et sur les puits où ont été réalisés des thermométries en continu. Le rapport entre ces deux grandeurs (G1/G2) est constant et voisin de 0,65.

En tenant compte de ces éléments on peut estimer la température des eaux au toit du réservoir du Lusitanien (1 330 m) à :

- . 65° C hypothèse moyenne
- . 60° C hypothèse basse
- . 70° C hypothèse haute.

La perte thermique qui se produit entre le toit du réservoir et la tête de puits sera étudiée au paragraphe VII.2.3.

IV.2.7. Hydrochimie

La composition chimique des eaux du Lusitanien est le plus souvent traduite en équivalent NaCl et exprimée en grammes par litre. Les mesures de salinité des eaux du Lusitanien disponibles dans la région étudiée sont rares :

- COUPVRAY 4,7 g/l de NaCl
- AUVERNAUX 4,1 g/l de NaCl - 10 g/l de salinité totale
- ACHERES 3,4 g/l de NaCl - 5,4 g/l de salinité totale
- ORLY 6,0 g/l de NaCl - 9,8 g/l de salinité totale.

La teneur en NaCl du Lusitanien à BOISSY SAINT LEGER serait de l'ordre de 6 ± 3 g/l. La salinité globale serait voisine de 10 ± 3 g/l.

Les diagrammes d'analyse d'eau pour différents puits (planche 7) montrent la nette prédominance des ions : Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} sur les autres ions.

IV.2.8. Conclusion

La planche 8 présente les principales caractéristiques hydrogéologiques du Lusitanien.

Il convient de ne pas perdre de vue la grande incertitude qui est liée à l'estimation de productivité de ce réservoir.

IV.2.9. Documents utilisés pour l'étude du Lusitanien

- . Synthèse géologique du Bassin de Paris - Ed. BRGM - 1980.
- . Potentiel géothermique du Bassin Parisien - Action Concertée DGRST/BRGM/ELF AQUITAINE - 1976.
- . Test du Lusitanien sur le forage de production - Doublet géothermique d'Orly - Comité Géothermie / GEOTHERMA 1981.

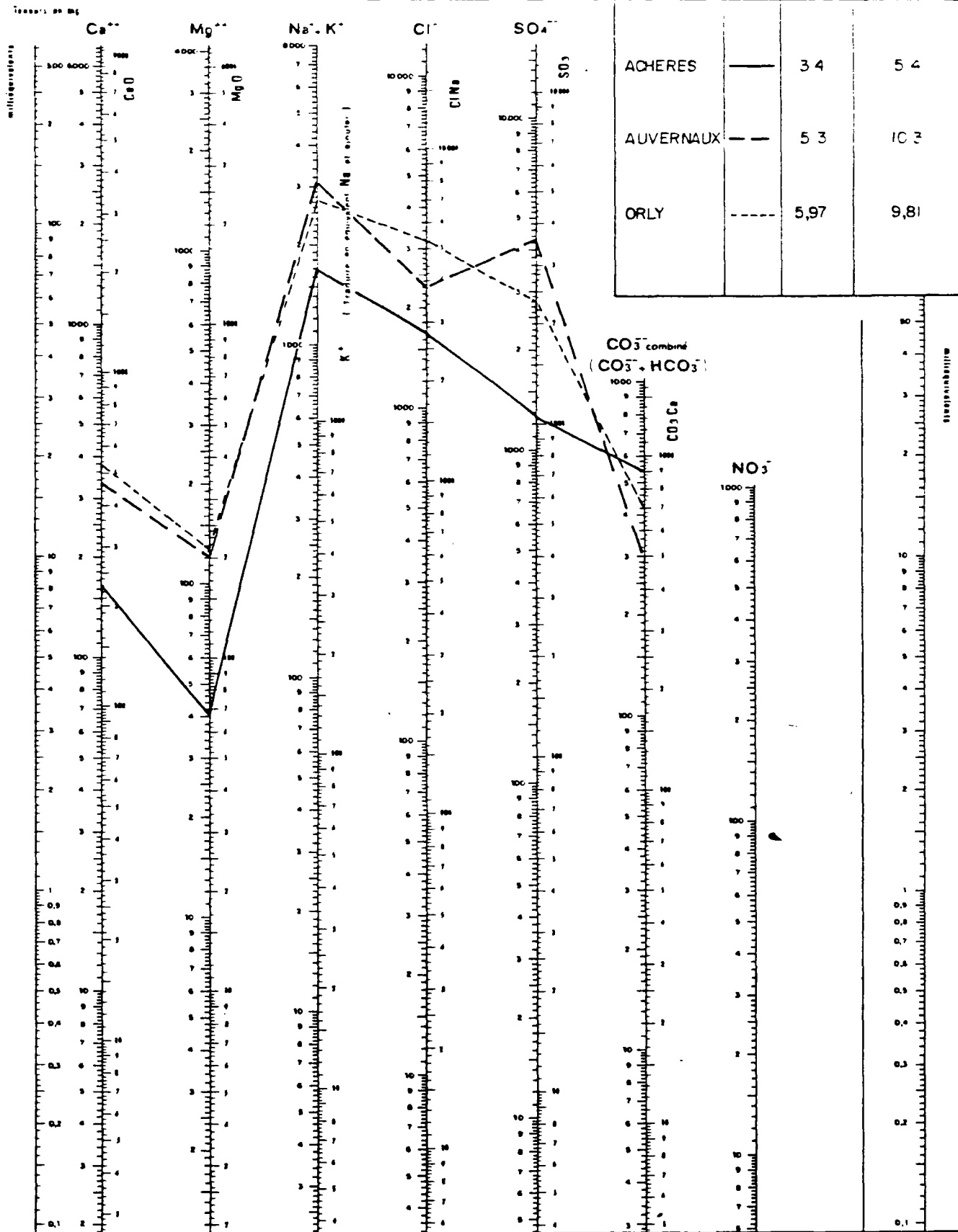
E. P. C. M.
HYDROGÉOLOGIE

DIAGRAMME
D'ANALYSE D'EAU

C. BARRIS, H. BONDOLLET
D. F. BÉRAUD, C. F.

FORAGES Figures

| FORAGES | Figures | NO | NO |
|-----------|---------|------|------|
| ACHÈRES | — | 3,4 | 5,4 |
| AUVERNAUX | — | 5,3 | 10,3 |
| ORLY | - - - | 5,97 | 9,81 |



milligrammes

milligrammes

milligrammes

CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

IMPLANTATION (nom du site)

Coordonnées : x ≈ 611.8 y ≈ 116.69

Cote sol : + 38 m (NGF)

FORMATION CONSIDEREE :

Calcaires du LUSITANIEN

STRUCTURE DU RESERVOIR

Cote du toit (NGF) : - 1 220 ± 25 m

Profondeur du toit : 1 258 ± 25 m

Hauteur utile potentielle : 35 ± 20 m

Hauteur productrice : 10 ± 8 m

Hauteur totale : 170 ± 20 m

Profondeur totale des forages : 1 428 ± 45 m

CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR

Porosité : 15 ± 3 %

Transmissivité : 40 Dm (valeurs extrêmes 5 Dm et 95 Dm)

Pression statique en tête de puits de production : + 12 ± 4 kg/cm²

Niveau piézométrique : + 160 ± 40 m (NGF)

CARACTERISTIQUES DU FLUIDE

Température au toit de l'aquifère : 65 ± 5° C

Salinité totale : 10 ± 3 g/l

V - ETUDE DE L'AQUIFERE DU DOGGER

V.1. Description de la roche réservoir

L'aquifère visé se trouve dans les formations carbonatées du Jurassique moyen ou Dogger (Bajocien - Bathonien). Les marnes du Callovien et de l'Aalénien constituent respectivement le toit et le mur du réservoir.

V.1.1. Paléogéographie du Dogger

Les calcaires se sont déposés au Bajocien et au Bathonien dans un environnement paléogéographique que l'on peut schématiser de la façon suivante (voir planche 9 - Fig. 1).

On distingue d'Ouest en Est :

- . une zone externe ouverte de milieu marin, profond où se sont déposés des sédiments de basse énergie (marnes essentiellement) ;
- . une barrière plus ou moins émergée, exposée à l'action des vagues où se sont déposés des faciès de moyenne et haute énergie (calcaires oolithiques et bioclastiques) ;
- . une zone interne de lagon avec des dépôts de calcaires de faible énergie (calcaires micritiques, sublithographiques).

Ce système sillon marneux-barrière-lagon a occupé le bassin parisien pendant une grande partie du Dogger (planche 9 - Fig. 2). Il s'est légèrement déplacé pendant cette période, ce qui explique qu'à la verticale d'un site donné on puisse trouver, par exemple, des faciès caractéristiques de dépôts de barrière et de lagon.

V.1.2. Identification et lithologie du réservoir

La distribution verticale des faciès caractéristiques des milieux de dépôts, précédemment décrits, joue un rôle important dans la localisation des niveaux producteurs* :

- . les faciès de barrière (calcaire oolithique bioclastique) sont généralement poreux et perméables et constituent de bons réservoirs ;
- . les faciès de lagon (calcaire micritique) sont généralement peu poreux ;
- . les faciès marneux ne sont pas des faciès réservoirs.

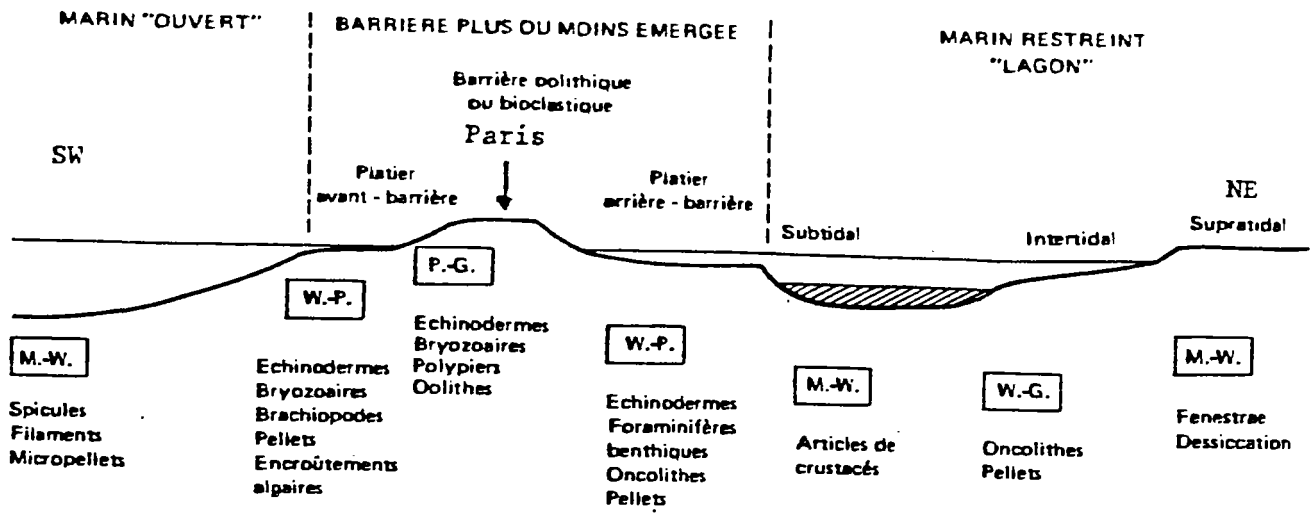
(*) Notons que l'existence de fractures dans les faciès calcaires peut modifier la distribution des niveaux producteurs.

SEQUENCE PAYSAGE UTILISEE DANS L'INTERPRETATION DU
DOGGER DU BASSIN DE PARIS

(Localisation des principaux faciès en termes de milieux de dépôts)

(R. CUSSEY, 1973)

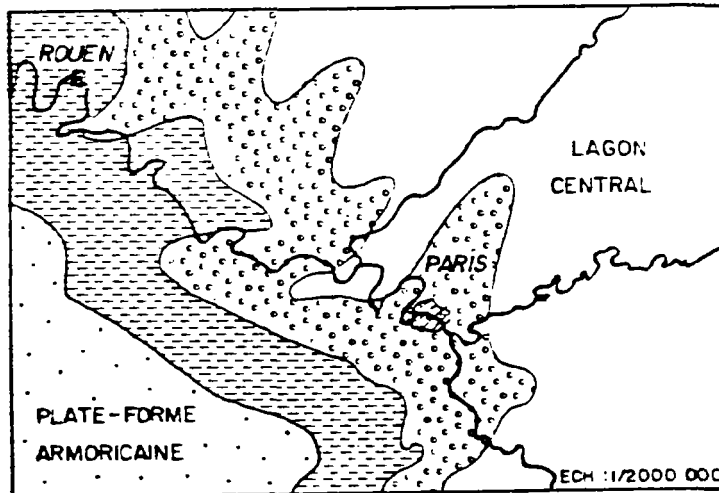
Figure 1






Texture (Classification DUNHAM) - **M** mudstone
 - **P** packstone
 - **W** wackestone
 - **G** grainstone.

Figure 2

ECORCHE DES FACIES AU SOMMET DU BATHONIEN



D'après Synthèse Géologique du Bassin Parisien - 1981

-  Sillon marneux - Mer ouverte
-  Barrière - (Calcaire polithique et bioclastique)
-  Lagon - (Calcaire sublithographique à pellets)

Dans la région de BOISSY, le Dogger est vraisemblablement constitué de plusieurs niveaux réservoirs comme l'illustre la planche 10, soit de haut en bas :

- . un réservoir principal (R-C + R1), constitué par un puissant ensemble carbonaté (faciès de barrière) allant de la base du Bathonien à la base du Callovien et qui présente une porosité forte mais irrégulière ;
- . un réservoir secondaire (R2) localisé au toit du Bajocien moins épais à plus faible porosité ;
- . un réservoir annexe (R3) d'épaisseur réduite et peu poreux.

Le réservoir principal est le plus intéressant pour l'exploitation. La transmissivité du réservoir secondaire est faible.

V.2. Caractéristiques hydrogéologiques

V.2.1. Profondeur

La cote du toit des calcaires du Dogger est évaluée à - 1 615 mètres (NGF) , soit une profondeur de 1 653 mètres (cf. coupe géologique prévisionnelle) ; l'incertitude étant évaluée à \pm 30 mètres.

V.2.2. Epaisseur

Le tableau ci-dessous présente les données disponibles pour l'évaluation des épaisseurs à BOISSY SAINT LEGER.

| FORAGES * | EPAISSEUR TOTALE EN METRES | EPAISSEUR UTILE EN METRES | EPAISSEUR PRODUCTRICE EN METRES | POROSITE MOYENNE SUR LA HAUTEUR PRODUCTRICE |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---|
| AULNAY SOUS BOIS | 138 | 70 | 27 | 0,17 |
| CLICHY SOUS BOIS | > 113 | 70 | 14 | 0,13 |
| EVRY | 97 | 31 | 14 | 0,17 |
| LA COURNEUVE SUD | 157 | 80 | 25 | 0,16 |
| _GRISY | 144 | 66 | | |
| FAVIERES | 150 | 70 | | |
| MONTGERON I | > 96 | 41 | 17 | 0,14 |
| LA COURNEUVE NORD | > 125 | > 60 | 27 | 0,17 |
| ORLY (I) ** | | (43) | (14) | (0,12) |

(*) Les forages pétroliers de Bailly et Coupvray n'ont atteint que le sommet du Dogger.

(**) Données de chantier.

L'épaisseur totale des calcaires correspondant aux symboles R-C + R1 + C a été estimée à 140 ± 10 mètres. Cette valeur correspond à la hauteur maximale de la série à capter. Aux forages voisins d' Orly, Montgeron et Evry toute la production se fait dans la moitié supérieure du réservoir calcaire. Lors du forage du second puits il sera possible de réduire la hauteur de la série à capter.

L'épaisseur utile correspond uniquement aux faciès oolithiques, graveleux, poreux ; elle est évaluée à partir des diagraphies électriques soniques et nucléaires effectuées dans les forages de la région. A Boissy Saint Léger, la hauteur utile serait de 60 ± 10 mètres.

La hauteur réellement productrice, déterminée à partir des enregistrements au débitmètre dans les puits géothermiques n'est qu'une fraction de la hauteur utile. Elle est comprise dans les forages de la région entre 45 % et 20 % de la hauteur utile. On retiendra à Boissy Saint Léger une valeur moyenne de 30 % ce qui correspond à une hauteur productrice de 18 ± 10 mètres. Notons que la production n'est pas uniformément répartie sur la hauteur productrice ; en particulier au forage de Montgeron I la moitié de la hauteur productrice fournit plus de 70 % du débit.

V.2.3. Porosité

La porosité se définit comme le rapport entre le volume des vides contenus dans la roche (et donc susceptible de contenir de l'eau) et le volume total de la roche. Elle peut être mesurée de façon directe sur échantillon, quand le réservoir a été carotté, ou de façon indirecte par interprétation des diagraphies différées.

La porosité permet d'évaluer le volume de fluide pouvant être présent dans la roche. Elle ne définit pas l'aptitude du fluide à se déplacer dans la roche. Elle est nécessaire pour effectuer les calculs thermiques sur lesquels reposent l'évaluation de la distance entre puits de production et puits d'injection.

Aulnay Sous Bois est le seul forage géothermique de la région parisienne où le réservoir du Dogger ait été carotté. Toutes les autres mesures de porosité proviennent de l'interprétation des diagraphies.

Compte tenu des porosités relevées sur les forages de référence on retiendra pour le site de BOISSY SAINT LEGER une porosité de 14 ± 2 %.

V.2.4. Transmissivité

La transmissivité se définit comme le produit de la hauteur productrice par la perméabilité moyenne sur cette hauteur. Elle peut être exprimée en Darcy mètres (d.m.). Ce paramètre est fondamental pour déterminer la productivité d'un réservoir.

L'évaluation de la transmissivité est fondée sur les résultats obtenus lors de l'interprétation des diagraphies (détermination de la hauteur productrice) et surtout lors de l'interprétation des essais de production réalisés sur les forages géothermiques. Les données issues des essais de formation dans les forages pétroliers (DST) ne sont guère utilisables en regard des résultats obtenus sur les forages géothermiques.

Les transmissivités du Dogger relevées sur les forages géothermiques voisins de Boissy Saint Léger sont les suivantes :

| | |
|--|-----------------|
| - AULNAY SOUS BOIS (GAY 1 et GAY 2) | 44 et 36 d.m. |
| - CLICHY SOUS BOIS (GCLY 1 et GCLY 2) | 31 et 34 d.m. |
| - LA COURNEUVE SUD (GLCS 1 et GLCS 2) | 14,6 et 33 d.m. |
| - LA COURNEUVE NORD (GLCN 1) | 28 d.m. |
| - VILLENEUVE LA GARENNE (VG 1 et VG 2) | 7 et 6,7 d.m. |
| - MONTGERON | 30 d.m. |
| - ORLY | 60 d.m. |
| - EVRY (GEY 1) | 16 d.m. |

On retiendra pour le site de BOISSY SAINT LEGER une transmissivité de 30 d.m. Les valeurs extrêmes que l'on peut envisager étant de 15 et 60 d.m.

V.2.5. Pression de gisement

Elle est connue par des mesures directes dans les forages pétroliers ou géothermiques. Il peut s'agir de pressions stabilisées ou extrapolées. Les mesures effectuées dans les forages pétroliers de la région sont disparates. Les fortes valeurs de pression de gisement (supérieures à 200 kg/cm²) mesurées à PONTCARRE et FAVIERES à respectivement 1 780 et 1 825 mètres de profondeur sont anormales pour cette région du Bassin de Paris.

Les mesures de pression effectuées dans les puits géothermiques et dans les puits pétroliers récents de GRISY et de BAILLY semblent cohérentes et ont été utilisées pour l'estimation de pression de gisement au droit du site étudié.

On a relevé à :

| FORAGES | PRESSIION DE GISE- MENT EN kg/cm ² | PROFONDEUR DE LA MESURE EN METRES | NIVEAU POTENTIOME- TRIQUES EN METRES* |
|------------------|--|--------------------------------------|--|
| AULNAY SOUS BOIS | 177,2 | 1 675 | + 146 |
| CLICHY SOUS BOIS | 179,6 | 1 730 | + 138 |
| BAILLY | 184 | 1 849 | + 140 |
| EVRY | 165,5 | 1 580 | + 154 |
| GRISY | 177 | 1 732 | + 138 |
| LA COURNEUVE | 175,15 | 1 638 | + 154 |
| MONTGERON | | | + 155 |

On retiendra pour le site de BOISSY SAINT LEGER une pression de gisement de l'ordre de 176 kg/cm² à 1 653 mètres.

L'altitude du sol du site de forage étant de + 38 m (NGF) la pression statique en tête de puits sera de 11 ±3 kg/cm². Cette valeur correspond à un niveau piézométrique voisin de + 145 m (NGF) ± 30 m.

V.2.6. Température

Plusieurs types de données sont disponibles pour évaluer la température des aquifères profonds :

- mesures de température effectuées dans les forages pétroliers (température de boue - température de test) ;
- mesures de température effectuées dans les forages géothermiques (température relevées au toit du réservoir, lors d'essais de longue durée - thermométrie enregistrée à l'équilibre thermique des puits).

Les mesures issues des forages géothermiques sont les plus fiables.

Les données disponibles sont résumées dans le tableau suivant :

| FORAGES GEOTHERMIQUES | MESURE EN PRODUCTION | | |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| | Température en degré cent. grade | Profondeur en mètres | Gradient moyen en °C/100m |
| AULNAY SOUS BOIS | 71,8 | 1 675 | 3,56 |
| CLICHY SOUS BOIS | 70,8 | 1 700 | 3,4 |
| LA COURNEUVE SUD | 57,9 | 1 643 | 2,79 |
| LA COURNEUVE NORD | 56,6 | 1 638 | 2,71 |
| VILLENEUVE LA GARENNE | 57 | 1 627 | 2,77 |
| EVRY | 71,8 | 1 580 | 3,8 |
| ORLY | 76 | 1 645 | 3,9 |
| MONTGERON | 70 | 1 750 | 3,71 |

La synthèse des données de température mesurées en production nous conduit à retenir pour le site de BOISSY SAINT LEGER un gradient géothermique moyen entre le Dogger et le sol de $3,7 \pm 0,3^\circ \text{C}/100 \text{ m}$, ce qui correspond à des températures du fluide géothermal au toit du réservoir de :

$$73 \pm 5^\circ \text{C}.$$

La perte thermique qui se produit entre le toit du réservoir et la tête de puits de production sera étudiée au paragraphe VII.3.3.

V.2.7. Hydrochimie

La composition chimique des eaux est le plus souvent traduite en équivalent NaCl exprimé en gramme par litre.

La salinité des eaux du Dogger à l'aplomb de BOISSY SAINT LEGER serait voisine de 15 grammes par litre compte tenu des résultats observés sur les forages voisins.

Les diagrammes d'analyse d'eau du Dogger pour différents puits (planche 11) montrent la nette prédominance des ions Cl^- et Na^+ et d'une manière moins importante Ca^{++} , sur les autres ions (Mg^{++} , SO_4^{--} ...).

D'autres éléments tels que des gaz (CO_2 , H_2S) ou des hydrocarbures peuvent être présents dans la zone étudiée.

V.2.8. Conclusion

Les principales caractéristiques hydrogéologiques de l'aquifère du Dogger sont résumées sur la planche 12.

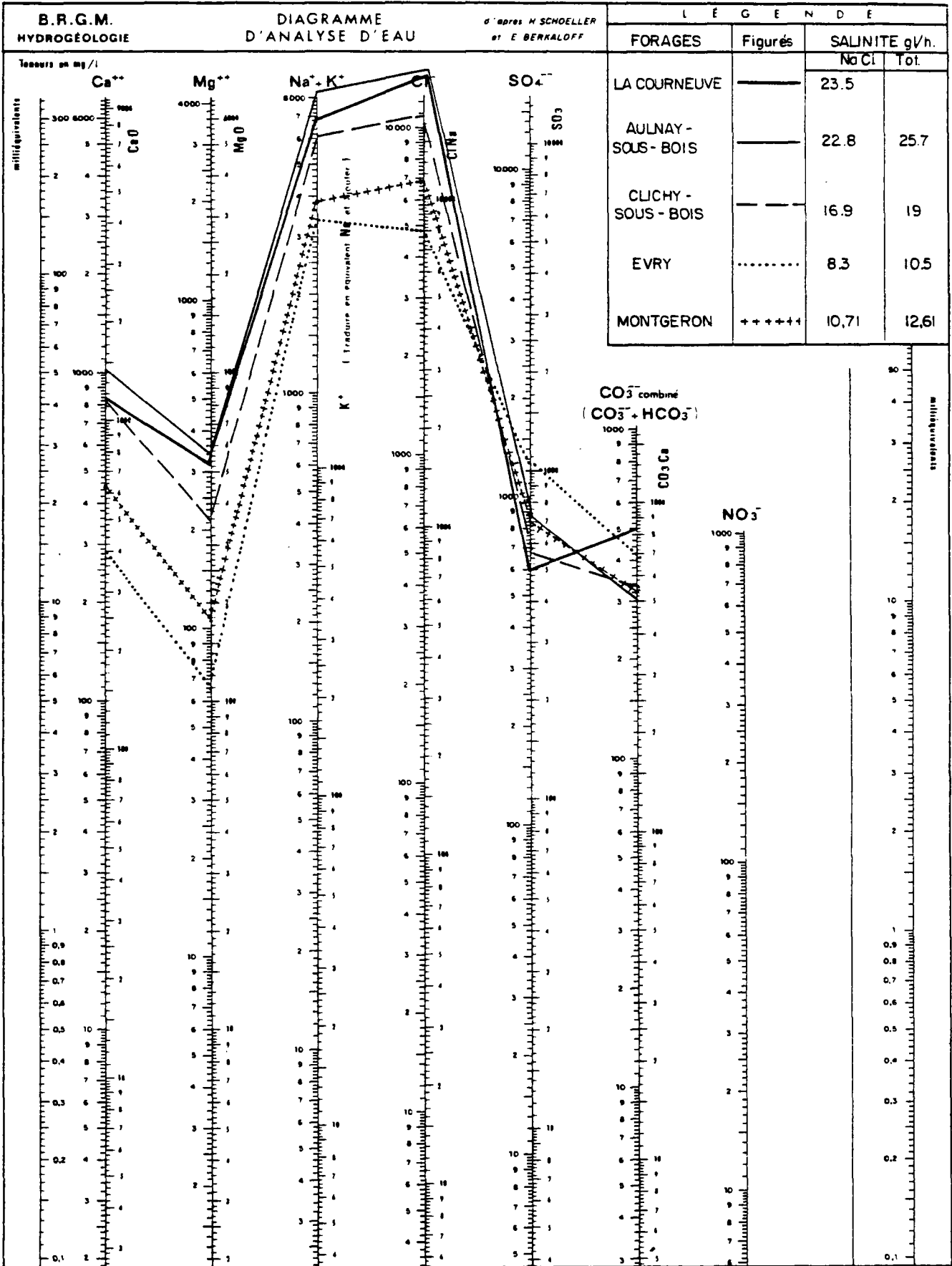
V.2.9. Documents utilisés pour l'étude du Dogger

- Synthèse géologique du Bassin de Paris - BRGM - 1980.
- Potentiel géothermique du Bassin Parisien - Action Concertée DGRST/BRGM/ELF AQUITAINE - B. HOUSSE et Ph. MAGET - 1976.
- Tectonique du Bassin de Paris dont carte des isobathes du toit du Dogger. F. HERITIER et J. VILLEMIN - Bull BRGM - 1971.
- Inventaire des ressources géothermiques de Paris - Rapport BRGM/GEOCHALEUR/BETURE - 1982.
- Rapports géologiques des forages géothermiques voisins de BOISSY SAINT LEGER.

REPARTITION DES BANCS POREUX
DANS LE DOGGER

| STRATIGRAPHIE | | SYMBOLE LITHOLOGIQUE | DESCRIPTION |
|---------------|-----------|----------------------|--|
| D | CALLOVIEN | A | Marne grise |
| | | R - C | Partie sommitale du calcaire du Dogger, formée par une alternance de bancs compacts et de bancs à porosité réduite. |
| O G G | BATHONIEN | R1 | Réservoir principal du Dogger, formé par les calcaires oolithiques et graveleux et qui présente la plus forte porosité : celle-ci est cependant très irrégulière, et seule une partie de cette assise est franchement productrice. Les faciès de barrière dominant |
| | | C | Fin niveau compact |
| | | A | Calcaire argileux et marne |
| E R | BAJOCIEN | R2 | Banc peu épais de calcaire oolithique à porosité réduite |
| | | A | Epaisse série argileuse ("Marne à Accuminata") |
| | | R3 | Banc de calcaire très faiblement poreux et d'épaisseur très réduite |
| | AALENIEN | A | Marne noire, imperméable |

HYDROCHIMIE DU DOGGER



milliéquivalents

IMPLANTATION (nom du site) : BOISSY SAINT LEGER

Coordonnées : x = 611.800 y = 116.750

Cote sol : + 38 m (NGF)

FORMATION CONSIDEREE :

DOGGER

STRUCTURE DU RESERVOIR

Cote du toit (NGF) : - 1 615 ± 30 m

Profondeur du toit : 1 653 ± 30 m

Hauteur utile potentielle : 60 ± 10 m

Hauteur productrice : 18 ± 10 m

Hauteur totale : 140 ± 10 m

Profondeur totale des forages : 1 793 ± 40 m

CARACTERISTIQUES DU RESERVOIR

Porosité : 14 ± 2 %

Perméabilité : 30 d.m. (valeurs extrêmes 15 et 60 d.m.)

Pression statique en tête de puits : 11 ± 3 kg/cm²

Niveau piézométrique : + 145 m (NGF) ± 30 m

CARACTERISTIQUES DU FLUIDE

Température au toit de l'aquifère : 73 ± 5° C

Salinité : 15 g/l

VI - ANALYSE DU RISQUE GEOLOGIQUE

L'étude sous-sol fait apparaître deux aquifères intéressants à l'aplomb de BOISSY SAINT LEGER :

- les calcaires du Lusitanien renfermant des eaux à 65° C ;
- les calcaires du Dogger dont les eaux se trouvent à une température de 73° C.

A BOISSY SAINT LEGER le risque géologique lié à la réalisation d'une opération de géothermie au Dogger est relativement faible. Le réservoir est en effet bien connu en région parisienne où il est déjà exploité par de nombreux forages géothermiques.

Par contre, l'aquifère du Lusitanien est beaucoup moins connu. Les caractéristiques de productivité varient notamment de façon importante et la connaissance réduite que l'on a de ce réservoir ne permet pas de faire des estimations de productivité précises. Le risque géologique lié à la réalisation d'une opération au Lusitanien est donc grand.

VII - CARACTERISTIQUES D'EXPLOITATION

Les eaux géothermales chaudes devront être exploitées au moyen de deux puits, l'un de production, l'autre d'injection. Les fortes salinités des eaux du Dogger et du Lusitanien rendent nécessaire la réinjection. Le fluide géothermal est pompé au puits de production, cède ses calories au niveau de l'échangeur de chaleur et revient dans l'aquifère par le puits d'injection.

Les caractéristiques hydrogéologiques de la ressource étant déterminées, il devient possible de concevoir l'exploitation. On détermine ainsi :

- la distance entre puits de production et puits d'injection ;
- le diamètre des forages ;
- les pressions et puissances de pompage nécessaire à la production et à l'injection en fonction des débits à exploiter.
- les pertes thermiques du fluide géothermal entre l'aquifère et la tête de puits de production.

Nous présentons dans un premier temps les principes généraux retenus pour la détermination des caractéristiques de l'exploitation et dans un second temps les résultats pour chacun des réservoirs étudiés.

VII.1. Principes généraux

VII.1.1. Distance entre puits de production et puits d'injection

L'injection de fluide géothermal refroidi conduit à la formation d'une bulle froide qui s'étend autour du puits et se réchauffe lentement. Au bout de plusieurs années d'exploitation, le front froid va atteindre le puits de production et la température du fluide géothermal commencera à décroître. Le temps au bout duquel la décroissance de la température apparaît en tête de puits de production est directement lié à la distance entre les puits.

LES CONTRAINTES

L'évaluation de la distance entre puits obéit à deux types de contraintes dont les implications sont de sens opposé.

Cette distance doit être suffisamment importante pour qu'une décroissance donnée de température en tête de puits de production ne se produise pas avant une date compatible avec l'économie globale de l'opération.

D'autre part cette distance doit être la plus courte possible afin :

- de limiter les risques techniques (les angles de déviation des forages augmentent quand la distance entre puits croît) ;
- de limiter les coûts d'investissement des forages (ou les coûts de réseau lorsque les deux puits sont droits)
- de limiter les volumes de fluide géothermal non exploité, dans le but de gérer le plus rationnellement possible la ressource.

Cette dernière condition est importante pour le site de BOISSY SAINT LEGER où des opérations doivent être réalisées dans les villes voisines.

LES PARAMETRES NECESSAIRES AU CALCUL DE LA DISTANCE ENTRE PUIITS

La distance entre puits de production et d'injection est déterminée à partir de trois groupes de paramètres :

- les données hydrogéologiques et thermiques du réservoir à exploiter (hauteur productrice, porosité de la roche réservoir, capacité calorifique du fluide et de la roche, conductivité thermique des épontes) ;
- les volumes de fluide géothermal à exploiter. On détermine pour le calcul de la distance entre puits, un débit d'exploitation moyen annuel qui peut se définir dans le cas de BOISSY SAINT LEGER comme :

$$Q \text{ moyen annuel} = \frac{232}{365} Q \text{ moyen hiver} + \frac{133}{365} Q \text{ moyen été}$$

- les paramètres liés à la durée de l'exploitation (durée pendant laquelle la température du fluide géothermal reste constante au puits de production, durées au bout desquelles la température au puits de production décroît de 1, 2, 3 ou 4° C).

Si les paramètres des deux premiers groupes nous sont imposés, d'une part par les caractéristiques de la ressource et d'autre part, par la nature des besoins de chaleur en surface, les paramètres du troisième groupe sont choisis de manière à déterminer une distance optimale entre les puits.

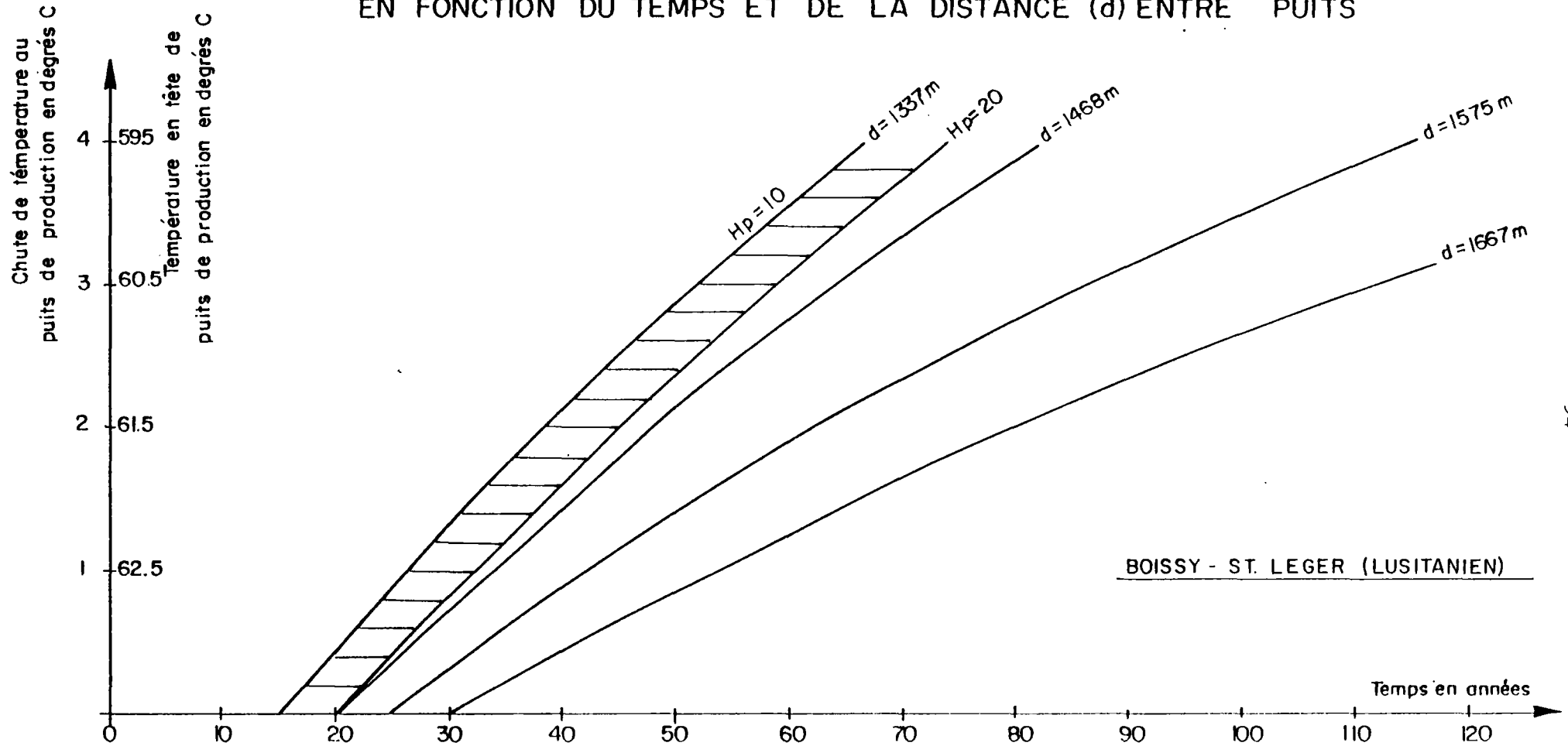
VII.1.2. Pressions limites

Au niveau du puits de production, on retient classiquement comme rabattement maximal la valeur de 250 mètres. Cette valeur constituera une limite*.

Au niveau du puits d'injection la valeur maximale de pression* classiquement retenue est de 50 kg/cm² en tête de puits.

(*) Ces valeurs limites sont classiquement retenues au stade des études de faisabilité. Sur les opérations réalisées jusqu'à présent elles n'ont été que rarement dépassées.

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU PUIT DE PRODUCTION EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA DISTANCE (d) ENTRE PUITES



Les courbes ont été établies à partir des paramètres suivants :

Q moyen annuel : 160m³/h
 Porosité : 15 %
 Hauteur productrice (Hp) : 10m

Capacité calorifique de la roche : 0,5 Cal/cm³/°c
 " " du fluide : 1 Cal/cm³/°c
 Conductivité thermique des épontes : 0,006 Cal/cm / s /°c

Influence de la variation de hauteur productrice

VII.1.3. Température du fluide géothermal à exploiter

Des pertes thermiques entre le réservoir et les têtes de puits se produisent et varient en particulier suivant le débit d'exploitation. Elles seront précisées pour chacun des réservoirs.

VII.2. Exploitation de l'aquifère du Lusitanien

VII.2.1. Distance entre puits

La planche 13 présente l'évolution de la chute de température en tête de puits de production en fonction du temps pour diverses hypothèses de distance entre puits. Les courbes ont été établies pour les caractéristiques de réservoir les plus probables (Hypothèses moyennes planche 8) et pour un débit d'exploitation moyen annuel de 160 m³/h et une température de réinjection de 30° C.

Dans ces conditions on a :

| DISTANCE ENTRE PUITS EN METRES | D0 EN ANNEES | D1 EN ANNEES | D2 EN ANNEES |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 337 | 15 | 26,4 | 37,4 |
| 1 468 | 20 | 34 | 46,6 |
| 1 575 | 25 | 41,7 | 61 |
| 1 667 | 30 | 53,6 | 78 |

Avec

- D0 : durée pendant laquelle la température reste constante au puits de production
- D1 : durée au bout de laquelle la température a baissé de 1° C en tête de puits de production
- D2 : durée au bout de laquelle la température a baissé de 2° C en tête de puits de production.

Ainsi dans ces conditions, pour une distance de 1 337 mètres on voit que la température resterait constante en tête de puits pendant 15 ans et qu'il faudrait attendre 26,4 ans pour que la température ait baissé de 1° C.

On retiendra donc pour une exploitation au Lusitanien une distance entre puits de l'ordre de 1 340 mètres.

VII.2.2. Diamètre des forages

Les calculs hydrodynamiques ont été réalisés pour des forages conçus de la façon suivante :

- tube de production de diamètre 7 pouces
- forage de l'aquifère en diamètre 6 pouces (captage en trou ouvert).

VII.2.3. Température du fluide géothermal

Les pertes thermiques entre le réservoir et la tête de puits sont pour des débits de l'ordre de 200 m³/h généralement de l'ordre de 2° C pour des exploitations au Dogger. Nous ne disposons d'aucune mesure concernant le Lusitanien. On retiendra une perte thermique de 1,5° C entre le réservoir du Lusitanien et la tête de puits de production.

La température en tête de puits de production serait de 63,5° C (hypothèse moyenne).

A ce stade de l'étude, la température de réinjection n'est pas encore définie. Les calculs des caractéristiques d'exploitation ont été réalisés pour deux hypothèses de température de réinjection : 25 et 30° C.

VII.2.4. Calcul des pressions et puissances de pompage pour l'exploitation du Lusitanien

Les pressions et les puissances de pompage en fonction des débits d'exploitation ont été calculées à partir des caractéristiques du réservoir (porosité, transmissivité, profondeur, pression de gisement) des forages (écartement des puits, diamètre du tubage, diamètre foré dans l'aquifère) et du fluide géothermal (température, salinité, viscosité).

Les résultats de ces calculs au puits de production sont présentés (planches 14 et 15 et tableau 1).

Les résultats de ces calculs au puits d'injection sont présentés :

- pour l'hypothèse de température d'injection de 25° C (planches 16 et 17 et tableau 2) ;
- pour l'hypothèse de température d'injection de 30° C (planches 18 et 19 et tableau 3)

Il convient de ne pas perdre de vue la grande incertitude qui réside dans l'estimation de la productivité du Lusitanien.

 PUITS DE PRODUCTION

PROJET DE:
 BOISSY

LUSITANIEN

P: PRESSION EN TETE DE PUIITS

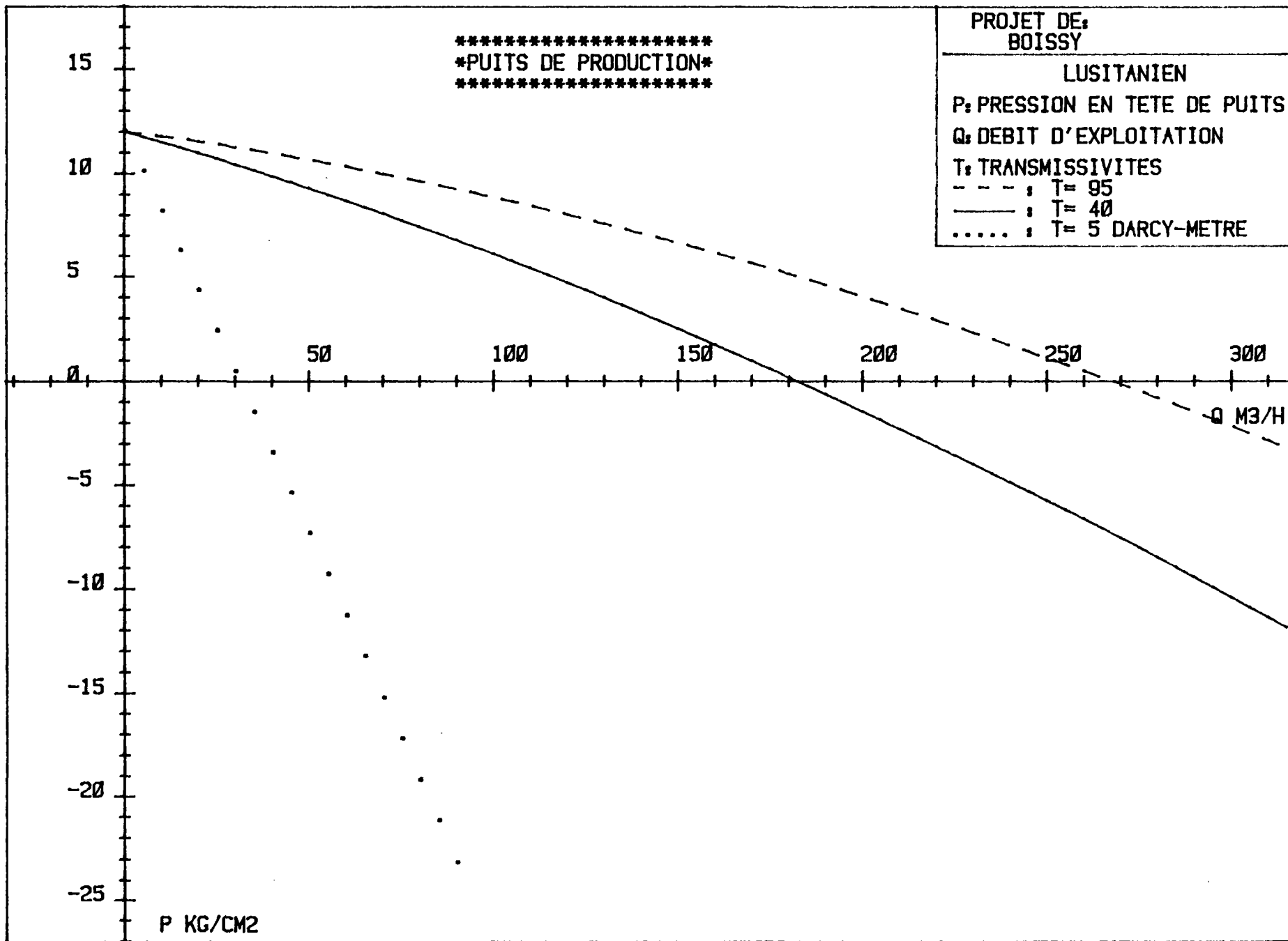
Q: DEBIT D'EXPLOITATION

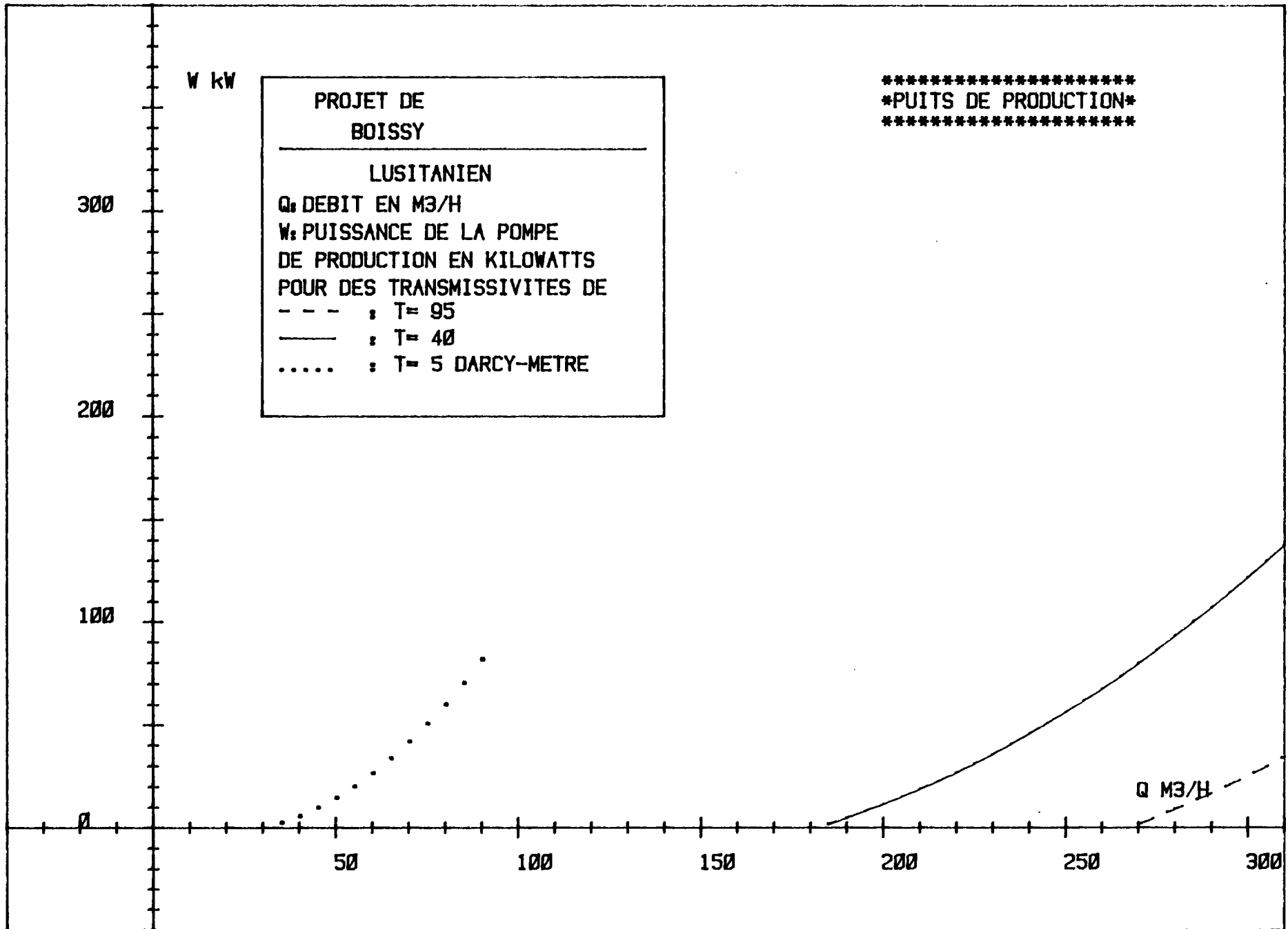
T: TRANSMISSIVITES

- - - : T= 95

— : T= 40

..... : T= 5 DARCY-METRE





TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
 PROJET DE BOISSY LUSITANIEN

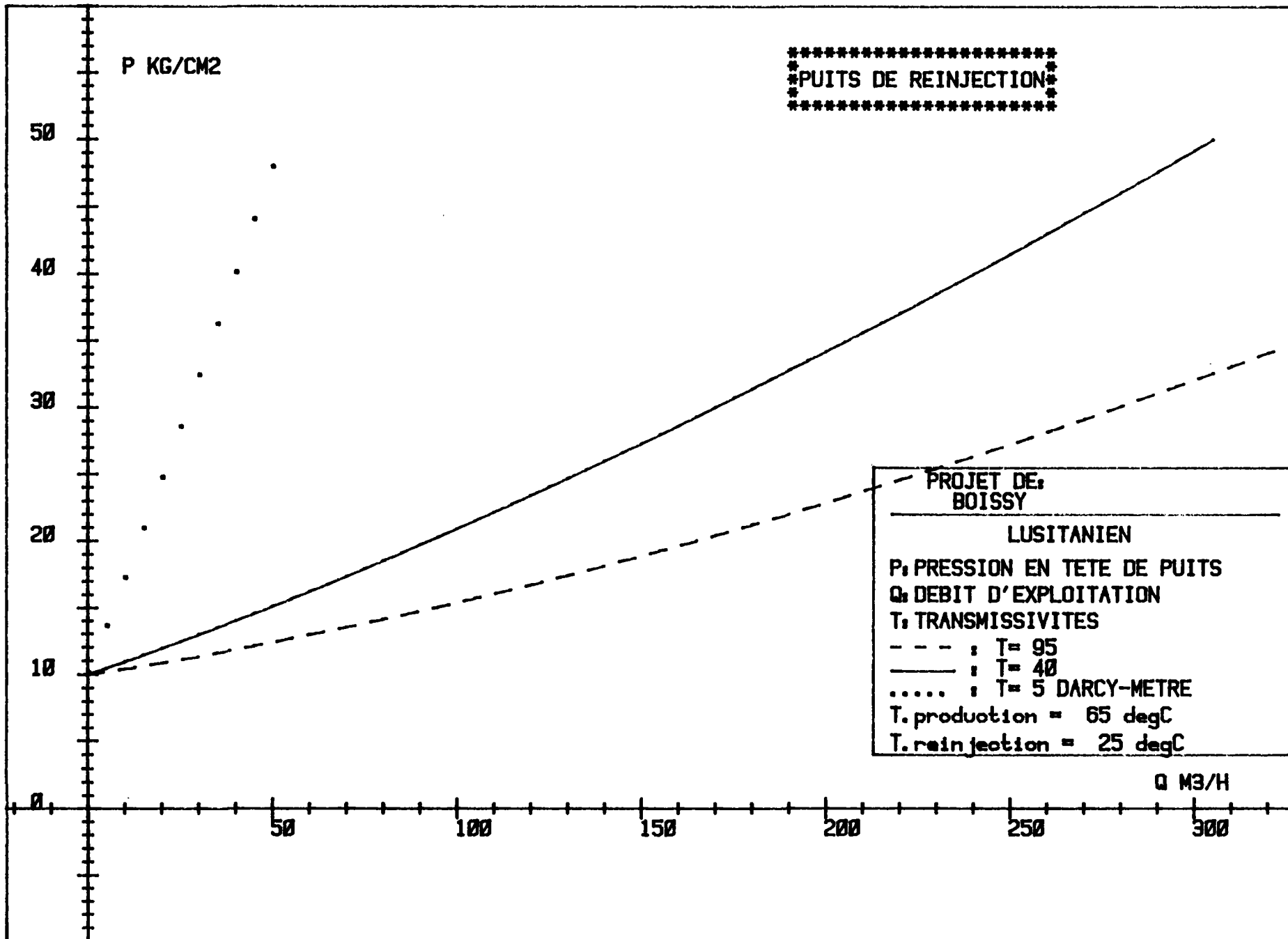
PRODUCTION
 T= 40 DARCY-METRE

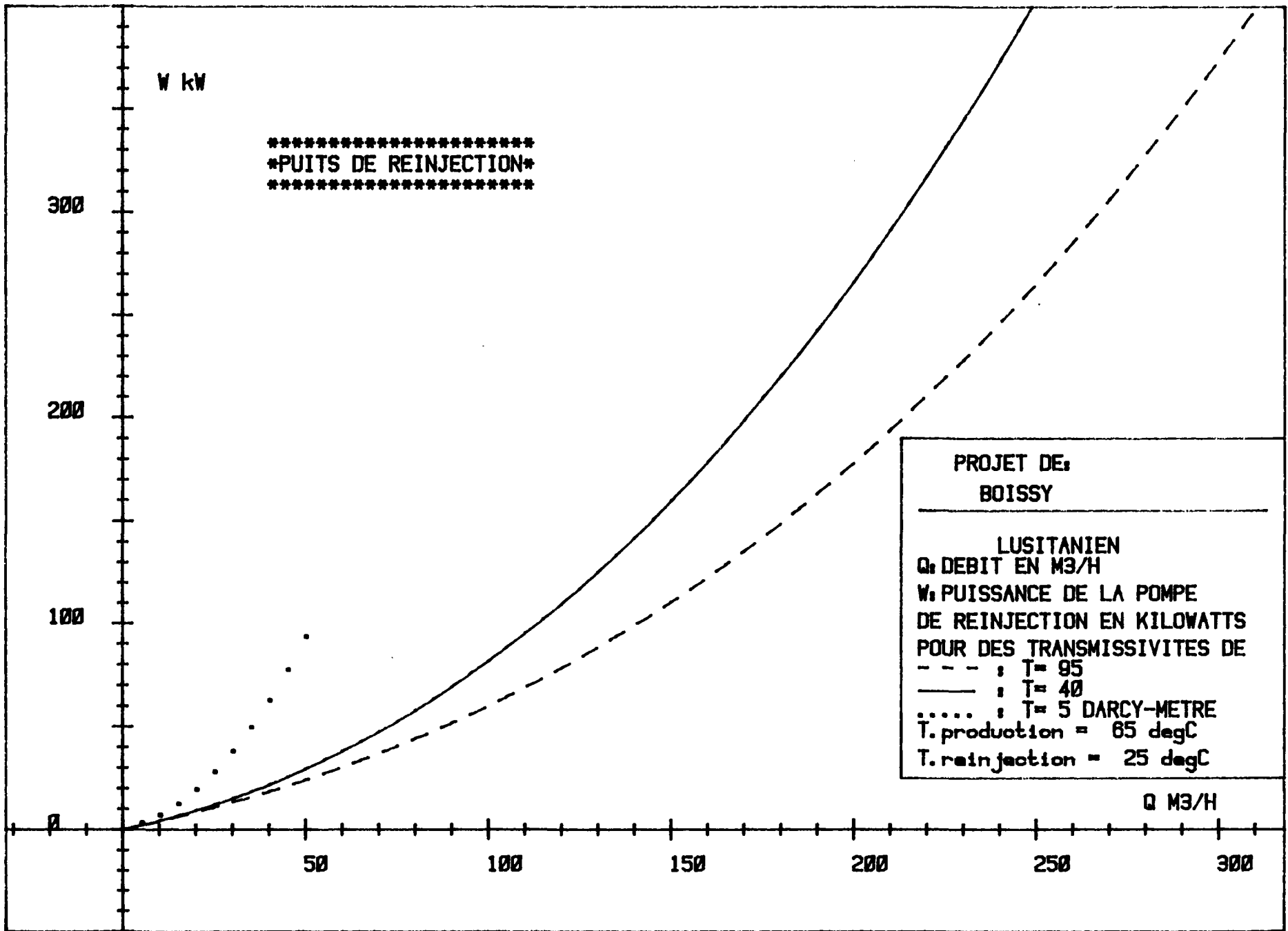
| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 11.5 | -- |
| 20 | 10.98 | -- |
| 30 | 10.44 | -- |
| 40 | 9.87 | -- |
| 50 | 9.29 | -- |
| 60 | 8.68 | -- |
| 70 | 8.06 | -- |
| 80 | 7.43 | -- |
| 90 | 6.77 | -- |
| 100 | 6.1 | -- |
| 110 | 5.41 | -- |
| 120 | 4.71 | -- |
| 130 | 3.99 | -- |
| 140 | 3.25 | -- |
| 150 | 2.5 | -- |

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 160 | 1.74 | -- |
| 170 | .96 | -- |
| 180 | .17 | -- |
| 190 | -.64 | 4.68 |
| 200 | -1.46 | 11.32 |
| 210 | -2.3 | 18.72 |
| 220 | -3.14 | 26.88 |
| 230 | -4.01 | 35.83 |
| 240 | -4.88 | 45.58 |
| 250 | -5.77 | 56.14 |
| 260 | -6.68 | 67.52 |
| 270 | -7.59 | 79.75 |
| 280 | -8.52 | 92.84 |
| 290 | -9.47 | 106.79 |
| 300 | -10.42 | 121.63 |

(-) <=> P<-25 kg/cm2

-- <=> P>0





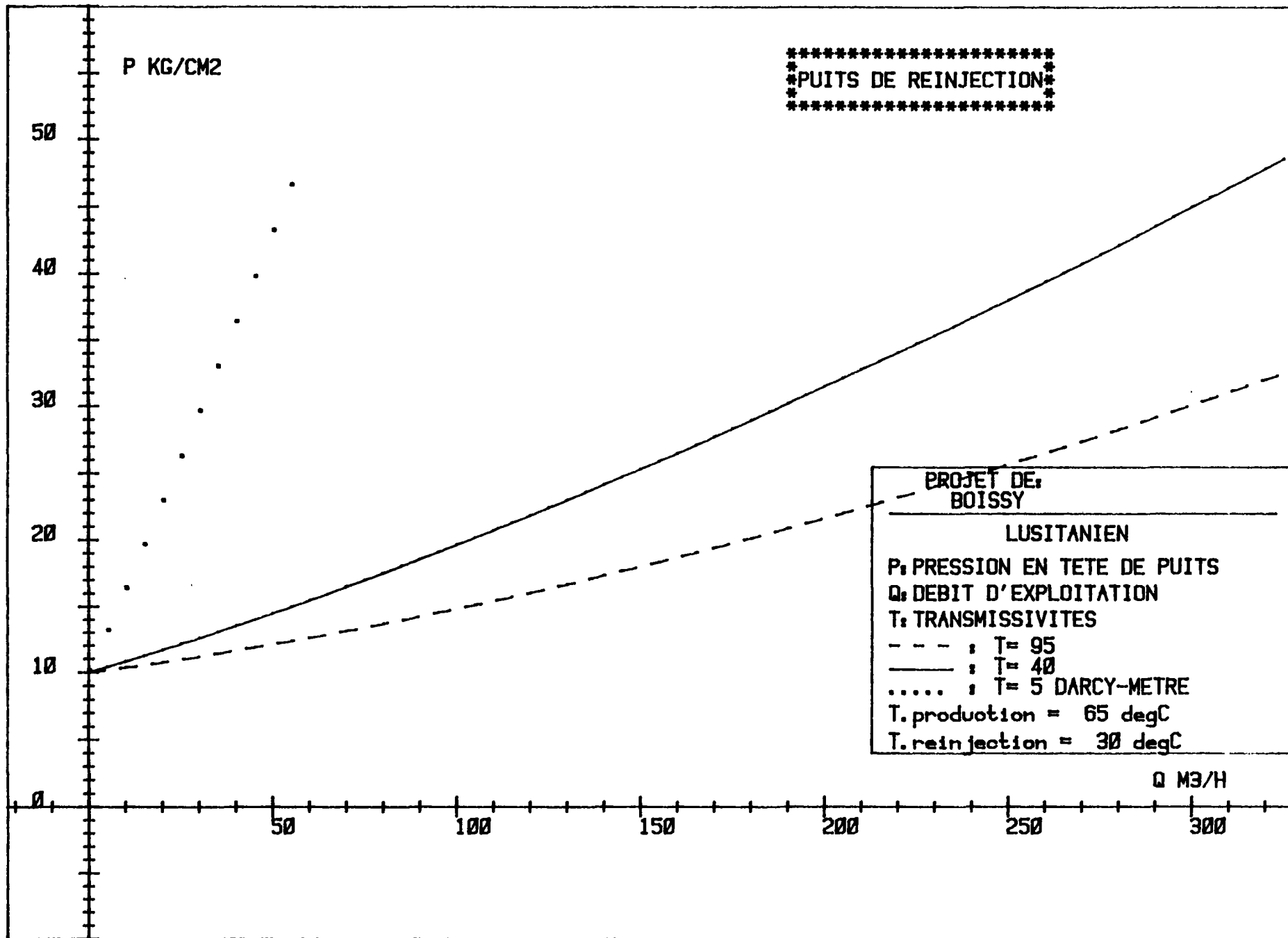
TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
 PROJET DE BOISSY LUSITANIEN

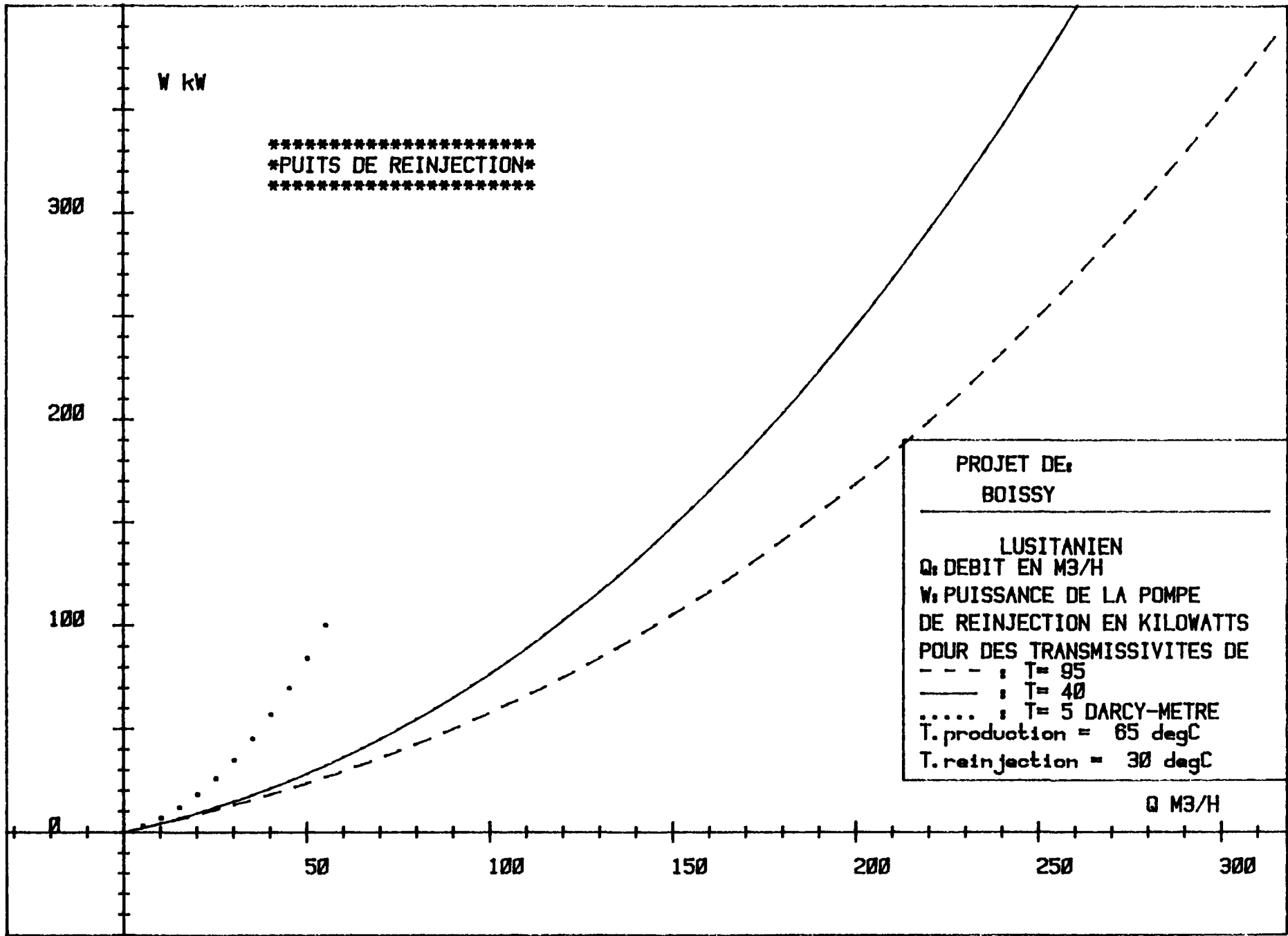
REINJECTION
 T= 40 DARCY-METRE

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW | DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 10.88 | 4.23 | 170 | 29.44 | 194.84 |
| 20 | 11.83 | 9.21 | 180 | 30.78 | 215.71 |
| 30 | 12.82 | 14.98 | 190 | 32.14 | 237.76 |
| 40 | 13.85 | 21.57 | 200 | 33.52 | 261 |
| 50 | 14.91 | 29.03 | 210 | 34.92 | 285.47 |
| 60 | 16 | 37.37 | 220 | 36.33 | 311.17 |
| 70 | 17.11 | 46.63 | 230 | 37.76 | 338.13 |
| 80 | 18.24 | 56.82 | 240 | 39.21 | 366.36 |
| 90 | 19.4 | 67.99 | 250 | 40.67 | 395.89 |
| 100 | 20.58 | 80.15 | 260 | 42.16 | 426.72 |
| 110 | 21.79 | 93.32 | 270 | 43.65 | 458.89 |
| 120 | 23.01 | 107.52 | 280 | 45.17 | 492.4 |
| 130 | 24.26 | 122.79 | 290 | 46.7 | 527.27 |
| 140 | 25.52 | 139.13 | 300 | 48.25 | 563.52 |
| 150 | 26.81 | 156.57 | 310 | 49.81 | 601.17 |
| 160 | 28.11 | 175.14 | 320 | (51.39) | (640.24) |

(-) <=> pression >50 kg/cm2

Temperature de production Tp= 65 deg.C T. de reinjection Tr= 25 deg.C





TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
 PROJET DE BOISSY LUSITANIEN

REINJECTION
 T= 40 DARCY-METRE

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 10.78 | 4.19 |
| 20 | 11.62 | 9.05 |
| 30 | 12.5 | 14.6 |
| 40 | 13.41 | 20.89 |
| 50 | 14.35 | 27.94 |
| 60 | 15.31 | 35.78 |
| 70 | 16.3 | 44.43 |
| 80 | 17.31 | 53.93 |
| 90 | 18.34 | 64.29 |
| 100 | 19.4 | 75.53 |
| 110 | 20.47 | 87.68 |
| 120 | 21.57 | 100.77 |
| 130 | 22.68 | 114.8 |
| 140 | 23.81 | 129.8 |
| 150 | 24.96 | 145.8 |
| 160 | 26.13 | 162.8 |

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 170 | 27.32 | 180.83 |
| 180 | 28.53 | 199.91 |
| 190 | 29.75 | 220.06 |
| 200 | 30.99 | 241.3 |
| 210 | 32.24 | 263.63 |
| 220 | 33.52 | 287.09 |
| 230 | 34.81 | 311.69 |
| 240 | 36.11 | 337.45 |
| 250 | 37.44 | 364.37 |
| 260 | 38.77 | 392.49 |
| 270 | 40.13 | 421.82 |
| 280 | 41.5 | 452.38 |
| 290 | 42.88 | 484.18 |
| 300 | 44.28 | 517.23 |
| 310 | 45.7 | 551.56 |
| 320 | 47.13 | 587.18 |

(-) <=> pression >50 kg/cm2

Temperature de production Tp= 65 deg.C

T. de reinjection Tr= 30 deg.C

VII.3. Exploitation de l'aquifère du Dogger

VII.3.1. Distance entre puits

La planche 20 présente l'évolution de la chute de température en tête de puits de production en fonction du temps pour diverses hypothèses de distance entre puits. Les courbes ont été établies pour les caractéristiques du réservoir les plus probables (hypothèse moyenne résumée planche 12) et pour un débit d'exploitation moyen annuel de 160 m³/h et une température de réinjection de 30° C.

Dans ces conditions on a :

| DISTANCE ENTRE PUITS EN METRES | D0 EN ANNEES | D1 EN ANNEES | D2 EN ANNEES |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 185 | 15 | 20 | 26,7 |
| 1 319 | 20 | 29,5 | 38,2 |
| 1 430 | 25 | 38,9 | 53,8 |
| 1 525 | 30 | 56 | 83,4 |

Avec D0 : durée pendant laquelle la température reste constante au puits de production
D1 : durée au bout de laquelle la température a baissé de 1° C tête de puits de production
D2 : durée au bout de laquelle la température a baissé de 2° C en tête de puits de production.

Ainsi dans ces conditions, pour une distance de 1 319 mètres on voit que la température resterait constante en tête de puits pendant 20 ans et qu'il faudrait attendre 26,4 pour que la température ait baissé de 1° C.

L'influence de la variation de hauteur productrice (Hp) dans une fourchette définie lors de l'étude des caractéristiques hydrogéologiques du réservoir (8 m < Hp < 28 m) sur le comportement thermique du doublet a été étudiée. Pour la distance entre puits choisie on aurait :

- pour l'hypothèse basse de hauteur productrice (8 m)
 - . une température constante, au puit de production pendant 17,5 ans
 - . une décroissance de température de 1° C au bout de 25 ans
 - . une " " " de 2° C au bout de 32,5 ans
- pour l'hypothèse haute de hauteur productrice (28 m)
 - . une température constante au puits de production pendant 24 ans
 - . une décroissance de température de 1° C au bout de 35 ans
 - . une " " " de 2° C au bout de 48 ans.

On propose donc de retenir pour une exploitation au Dogger une distance de l'ordre de 1 300 mètres.

VII.3.2. Diamètre des forages

Les calculs hydrodynamiques ont été réalisés pour des forages connus de la façon suivante :

- tube de production de diamètre 7 pouces
- forage de l'aquifère en diamètre 6 pouces (captage de l'aquifère en trou ouvert).

VII.3.3. Température du fluide géothermal

Les pertes thermiques entre le réservoir et la tête de puits sont pour des débits de l'ordre de 200 m³/h généralement de l'ordre de 2° C.

Dans ces conditions la température en tête de puits de production serait de 71° C (Hypothèse moyenne).

A ce stade de l'étude, la température de réinjection n'est pas encore définie. Les calculs des caractéristiques d'exploitation ont été réalisés pour trois hypothèses de température de réinjection 25, 30 et 35° C.

VII.3.4. Calcul des pressions et puissances de pompage pour l'exploitation du DOGGER

Les pressions et les puissances de pompage en fonction des débits d'exploitation ont été calculées à partir des caractéristiques du réservoir (porosité, transmissivité, profondeur, pression de gisement) du forage (écartement des puits, diamètre du tubage, diamètre foré dans l'aquifère) et du fluide géothermal (température, salinité, viscosité).

Les résultats de ces calculs au puits de production sont présentés planches 21 et 22 et tableau 4.

Les résultats de ces calculs au puits d'injection :

- pour l'hypothèse de température d'injection de 25° C (planches 23 et 24 et tableau 5) ;
- pour l'hypothèse de température d'injection de 30° C (planches 25 et 26 et tableau 6) ;
- pour l'hypothèse de température d'injection de 35° C (planches 27 et 28 et tableau 7).

CONCLUSION

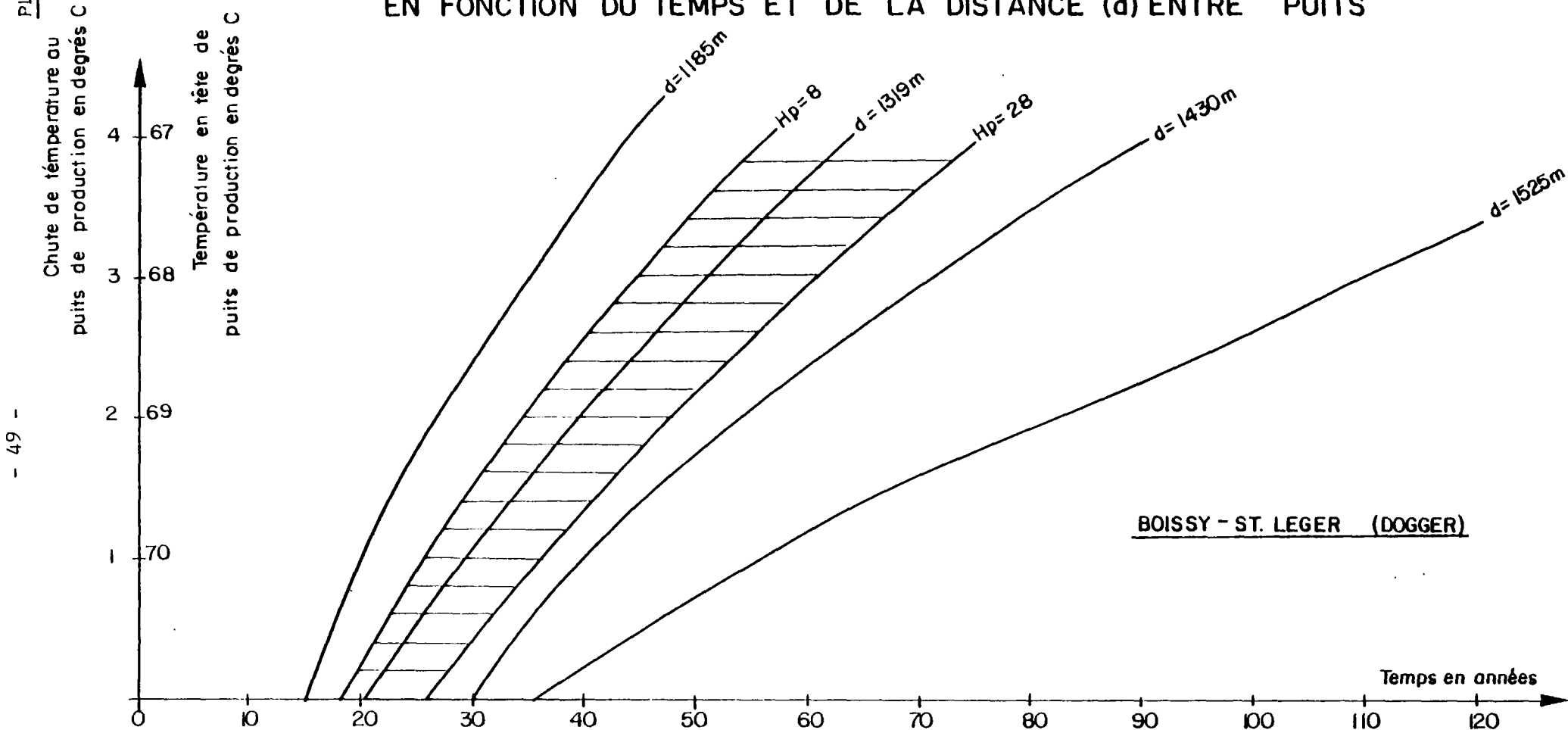
Les calculs des caractéristiques d'exploitation montrent que pour les hypothèses les plus probables de la ressource, il serait envisageable d'exploiter les eaux :

- du Lusitanien à 63° C à un débit de 250 m³/H avec une puissance électrique de pompage voisine de 420 KW*
- du Dogger à 71° C à un débit de 250 m³/H avec une puissance électrique de pompage voisine de 540 KW*.

Il convient toutefois de ne pas dissocier ces éléments de l'incertitude qui pèse sur la détermination des caractéristiques intrinsèques des réservoirs, plus particulièrement en ce qui concerne le Lusitanien.

(*) Pour une température du fluide géothermal à l'injection de 30° C.

EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU PUIS DE PRODUCTION EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA DISTANCE (d) ENTRE PUIS



Les courbes ont été établies à partir des paramètres suivants :

Q moyen annuel : 160 m³/h.
 Porosité : 14%
 Hauteur productrice (Hp) : 18m

Capacité calorifique de la roche : 0,5 Cal/cm³/°c
 " " du fluide : 1 Cal/cm³/°c
 Conductivité thermique des épontes : 0,006 Cal/cm²/°c



Influence de la variation de hauteur productrice

PUITS DE PRODUCTION

PROJET DE:
BOISSY

DOGGER

P: PRESSION EN TETE DE PUIT

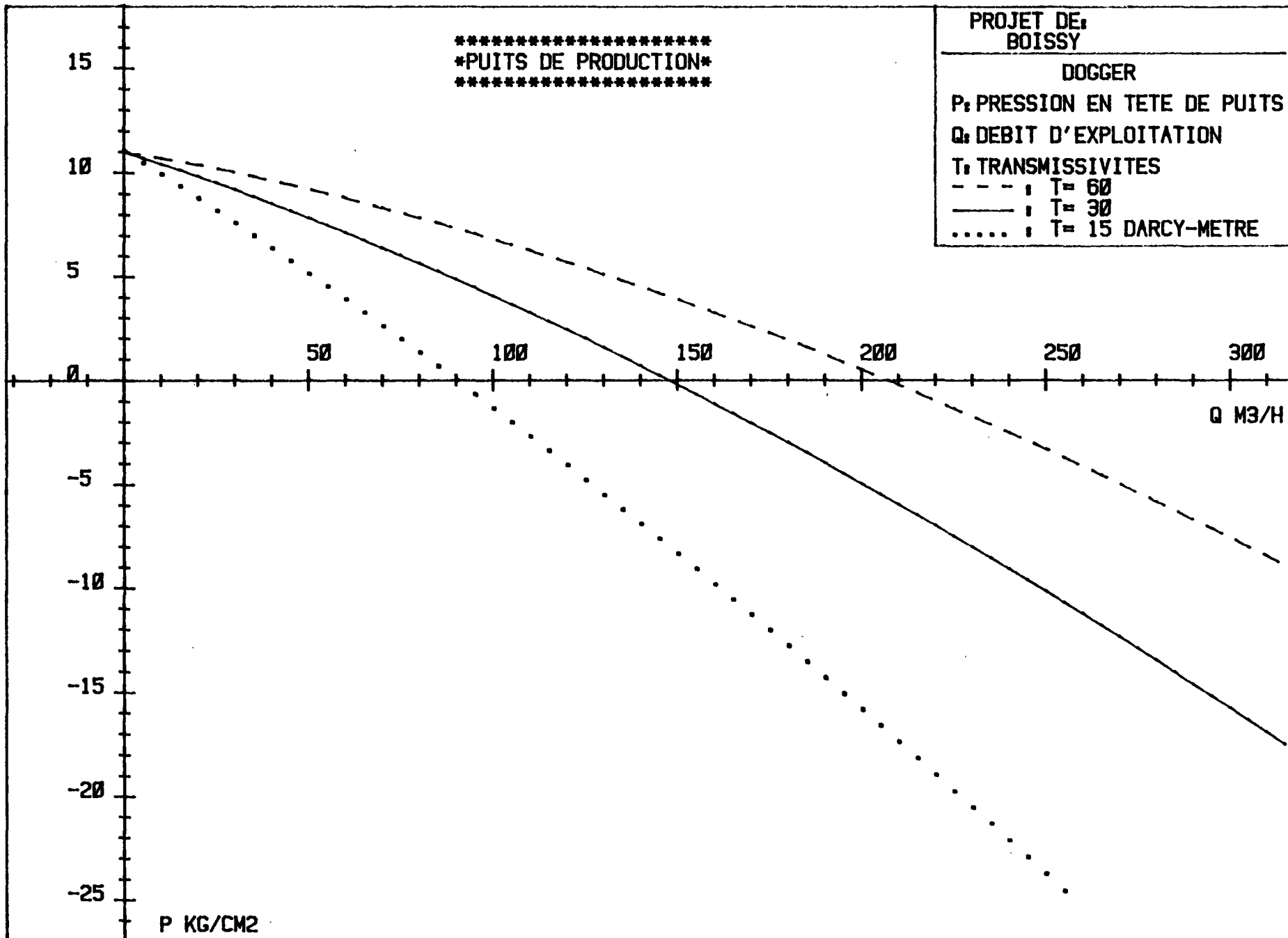
Q: DEBIT D'EXPLOITATION

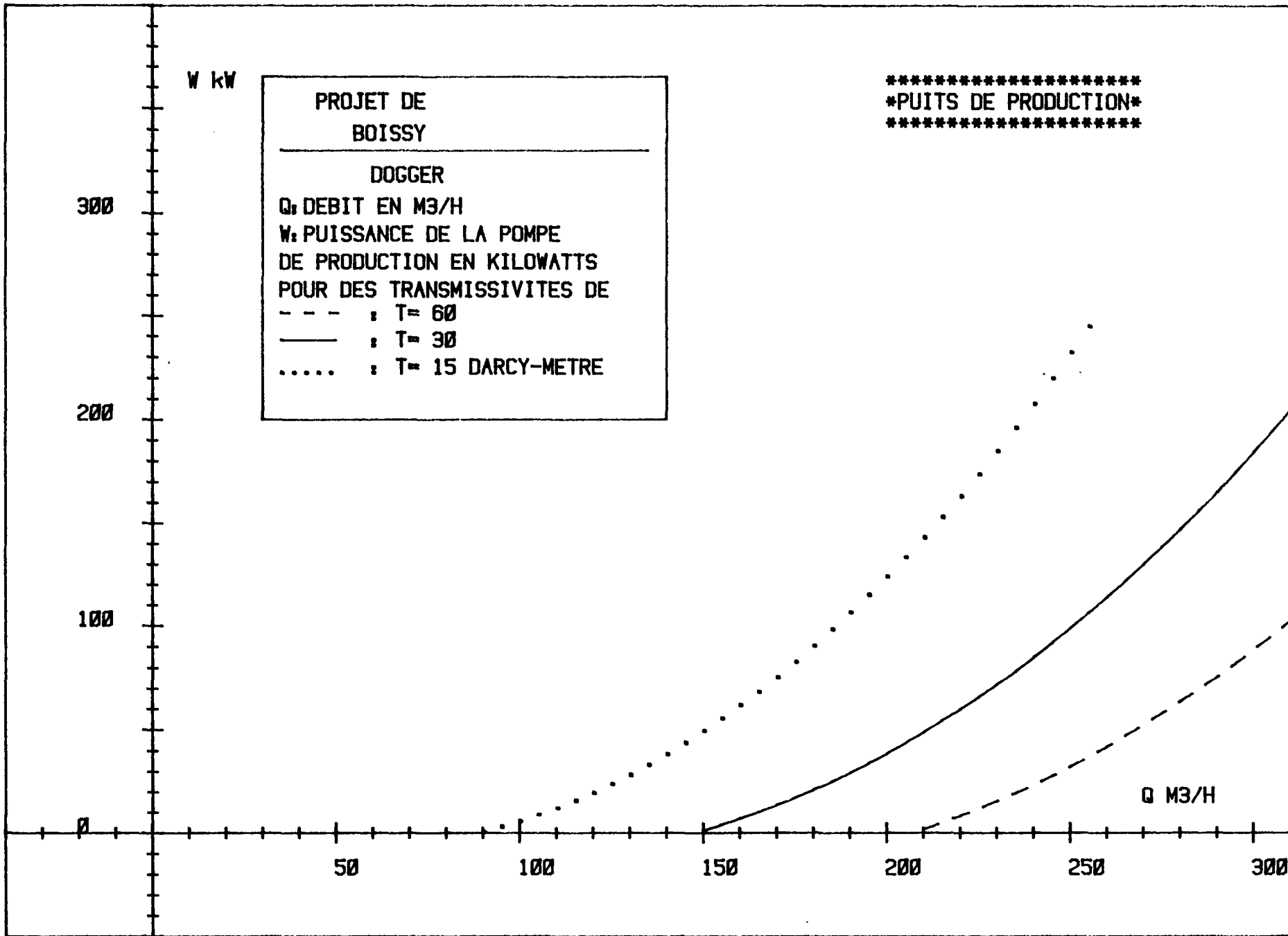
T: TRANSMISSIVITES

- - - : T = 60

— : T = 30

..... : T = 15 Darcy-metre





TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
 PROJET DE BOISSY DOGGER

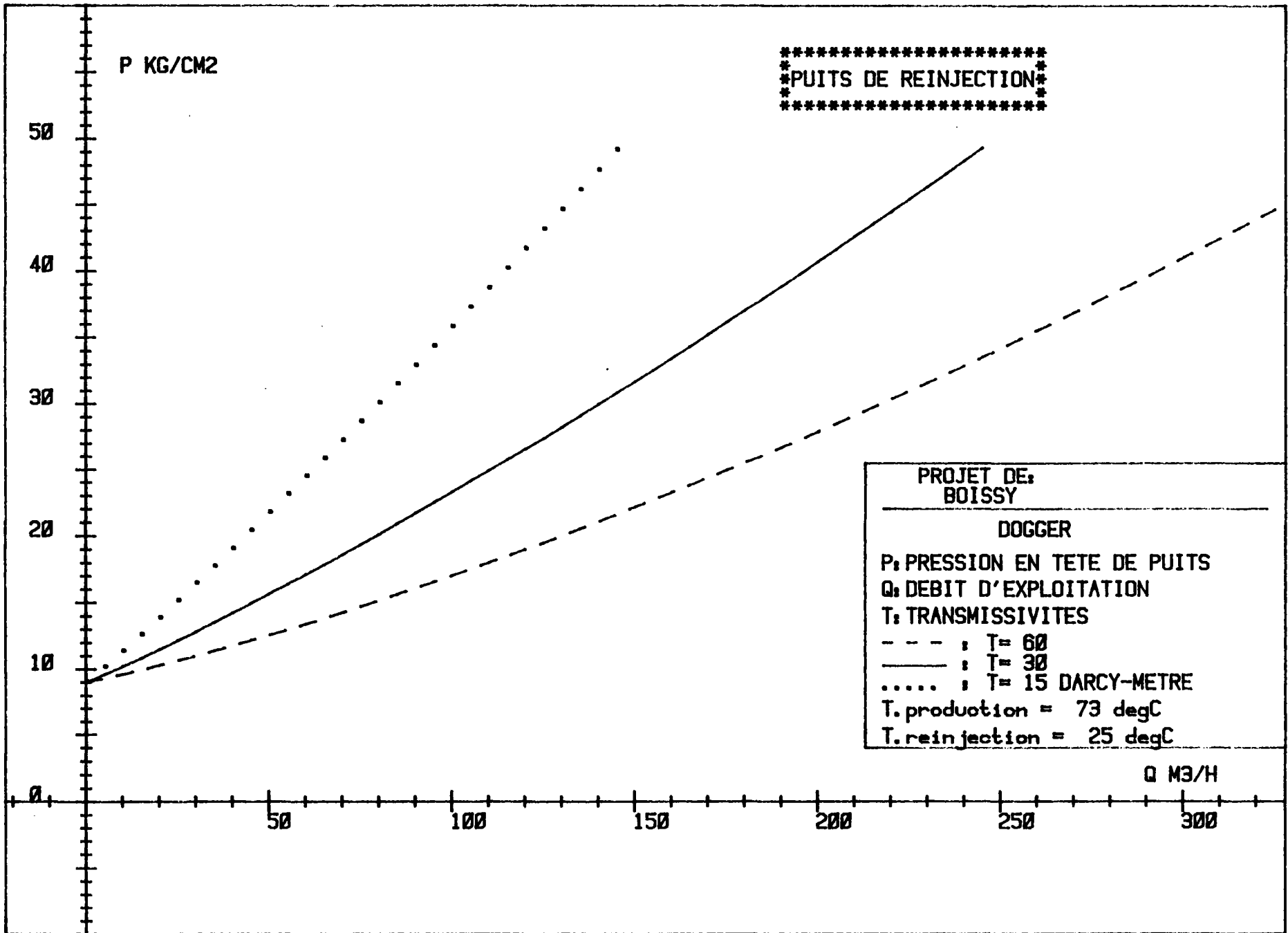
PRODUCTION
 T= 30 DARCY-METRE

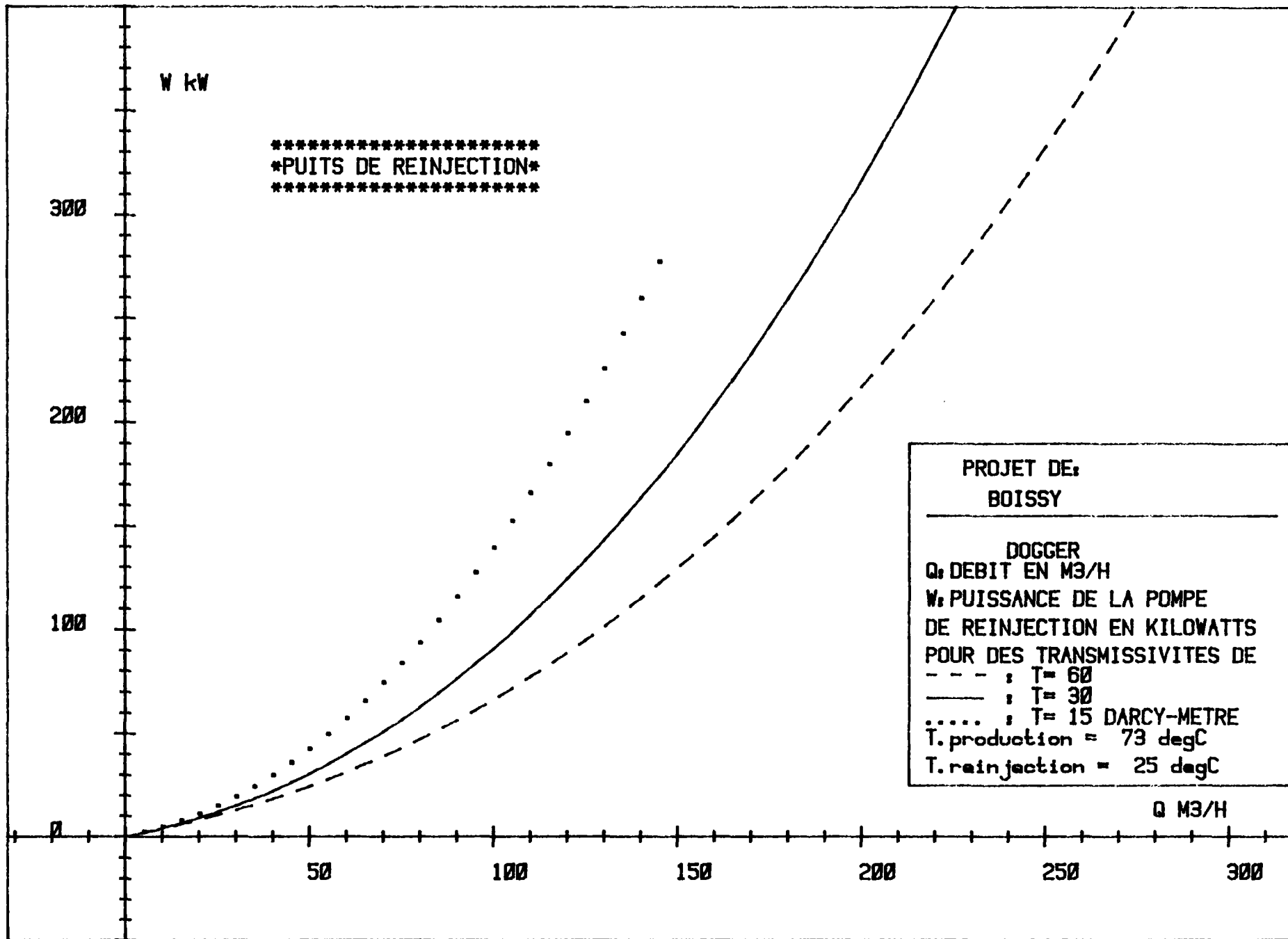
| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 10.43 | -- |
| 20 | 9.82 | -- |
| 30 | 9.19 | -- |
| 40 | 8.53 | -- |
| 50 | 7.84 | -- |
| 60 | 7.13 | -- |
| 70 | 6.4 | -- |
| 80 | 5.65 | -- |
| 90 | 4.87 | -- |
| 100 | 4.08 | -- |
| 110 | 3.26 | -- |
| 120 | 2.43 | -- |
| 130 | 1.57 | -- |
| 140 | .69 | -- |
| 150 | -.2 | 1.15 |

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 160 | -1.12 | 6.92 |
| 170 | -2.05 | 13.52 |
| 180 | -3 | 20.98 |
| 190 | -3.97 | 29.31 |
| 200 | -4.96 | 38.54 |
| 210 | -5.96 | 48.68 |
| 220 | -6.98 | 59.76 |
| 230 | -8.02 | 71.79 |
| 240 | -9.08 | 84.78 |
| 250 | -10.15 | 98.77 |
| 260 | -11.25 | 113.76 |
| 270 | -12.35 | 129.79 |
| 280 | -13.48 | 146.85 |
| 290 | -14.62 | 164.98 |
| 300 | -15.78 | 184.19 |

(-) <=> P<-25 kg/cm2

-- <=> P>0





TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
PROJET DE BOISSY DOGGER

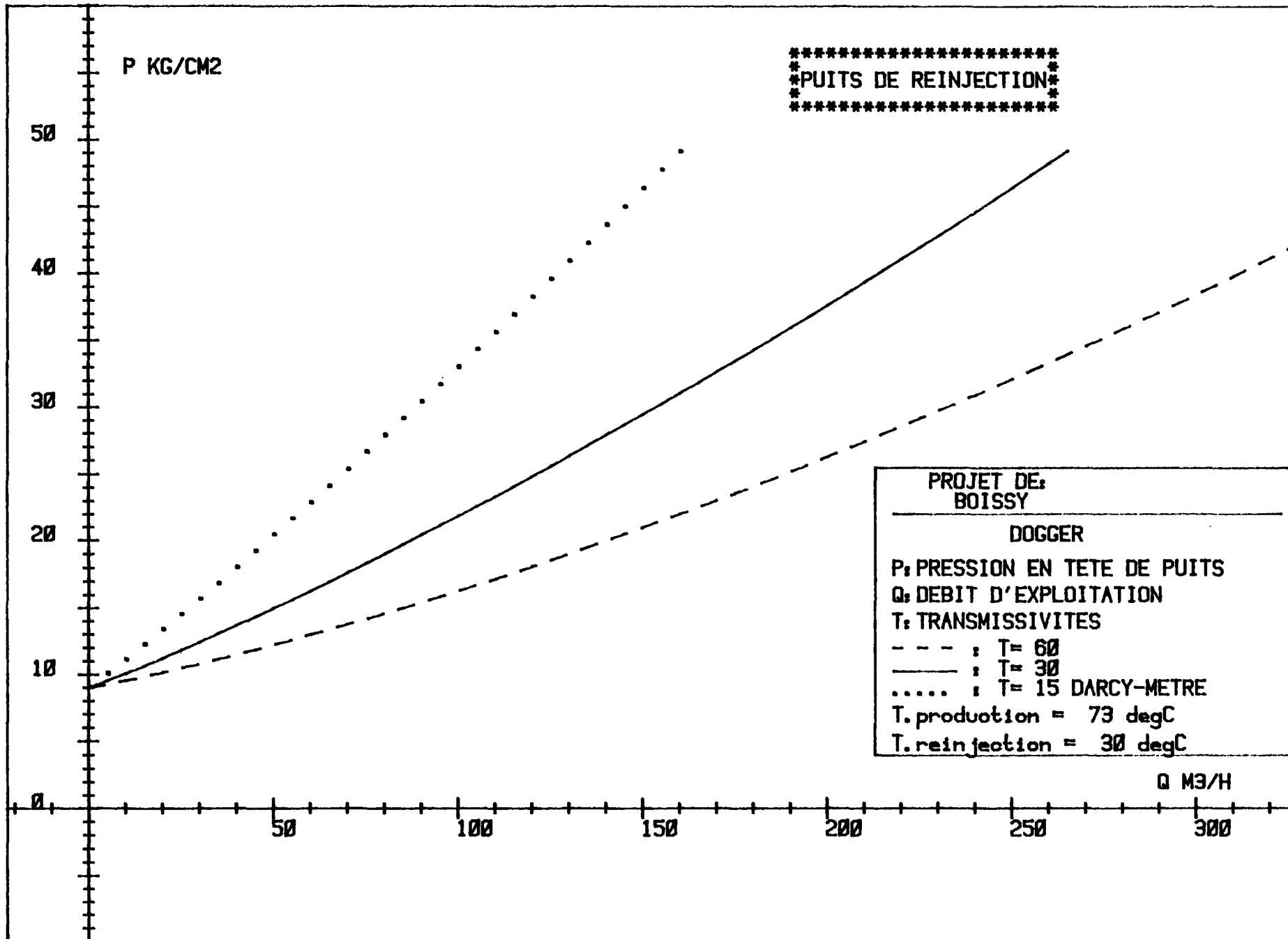
REINJECTION
T= 30 DARCY-METRE

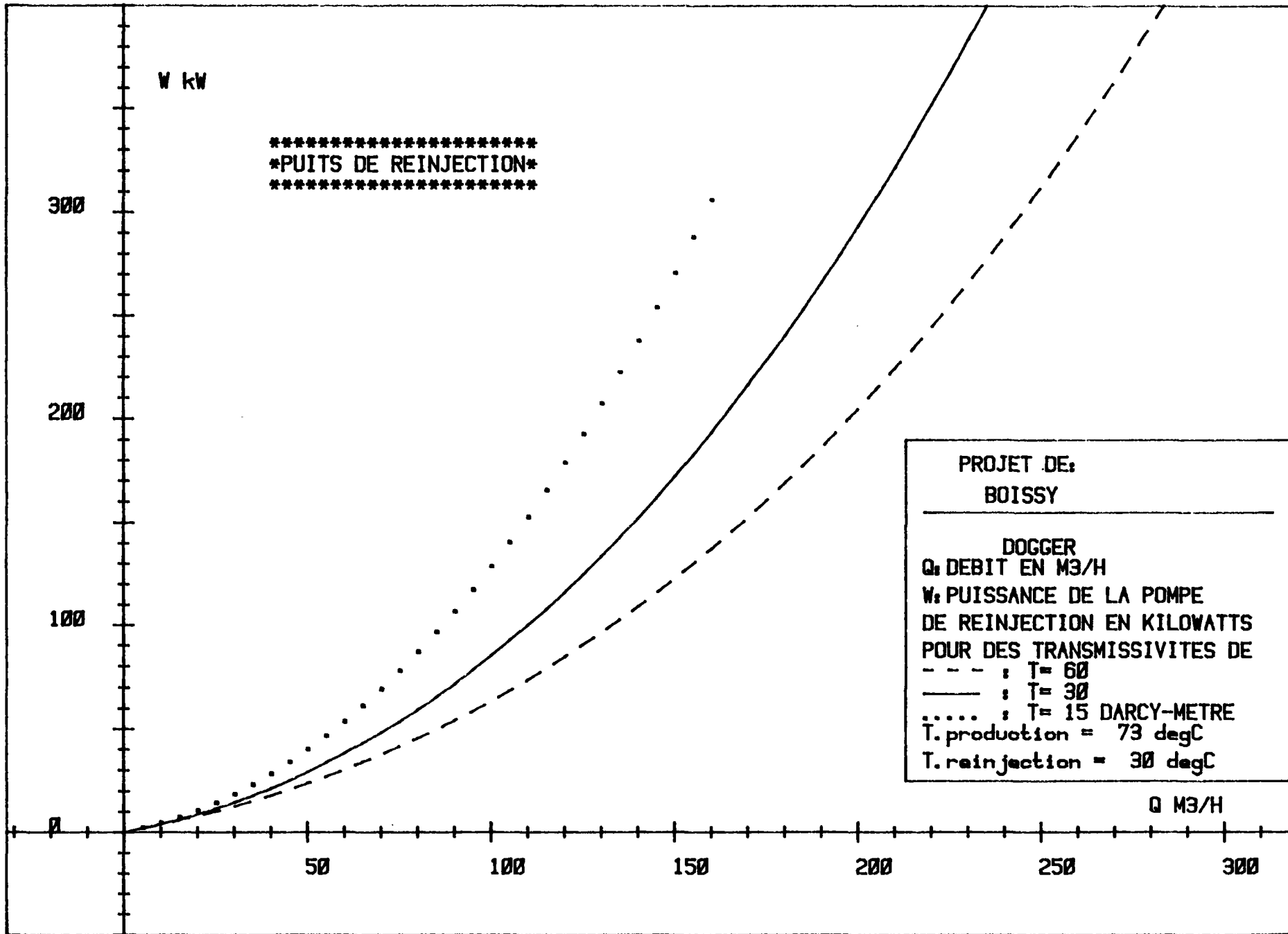
| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 10.13 | 3.94 |
| 20 | 11.37 | 8.85 |
| 30 | 12.66 | 14.79 |
| 40 | 14 | 21.81 |
| 50 | 15.38 | 29.95 |
| 60 | 16.8 | 39.25 |
| 70 | 18.25 | 49.74 |
| 80 | 19.74 | 61.48 |
| 90 | 21.25 | 74.47 |
| 100 | 22.8 | 88.76 |
| 110 | 24.37 | 104.38 |
| 120 | 25.98 | 121.36 |
| 130 | 27.61 | 139.72 |
| 140 | 29.26 | 159.5 |
| 150 | 30.94 | 180.72 |
| 160 | 32.65 | 203.41 |

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|
| 170 | 34.39 | 227.6 |
| 180 | 36.15 | 253.31 |
| 190 | 37.93 | 280.56 |
| 200 | 39.73 | 309.39 |
| 210 | 41.56 | 339.82 |
| 220 | 43.42 | 371.88 |
| 230 | 45.29 | 405.58 |
| 240 | 47.19 | 440.95 |
| 250 | 49.11 | 478.02 |
| 260 | (51.06) | (516.81) |
| 270 | (53.02) | (557.34) |
| 280 | (55.01) | (599.64) |
| 290 | (57.02) | (643.73) |
| 300 | (59.05) | (689.63) |
| 310 | (61.1) | (737.37) |
| 320 | (63.17) | (786.96) |

(-) <=> pression >50 kg/cm2

Temperature de production Tp= 73 deg.C T. de reinjection Tr= 25 deg.C





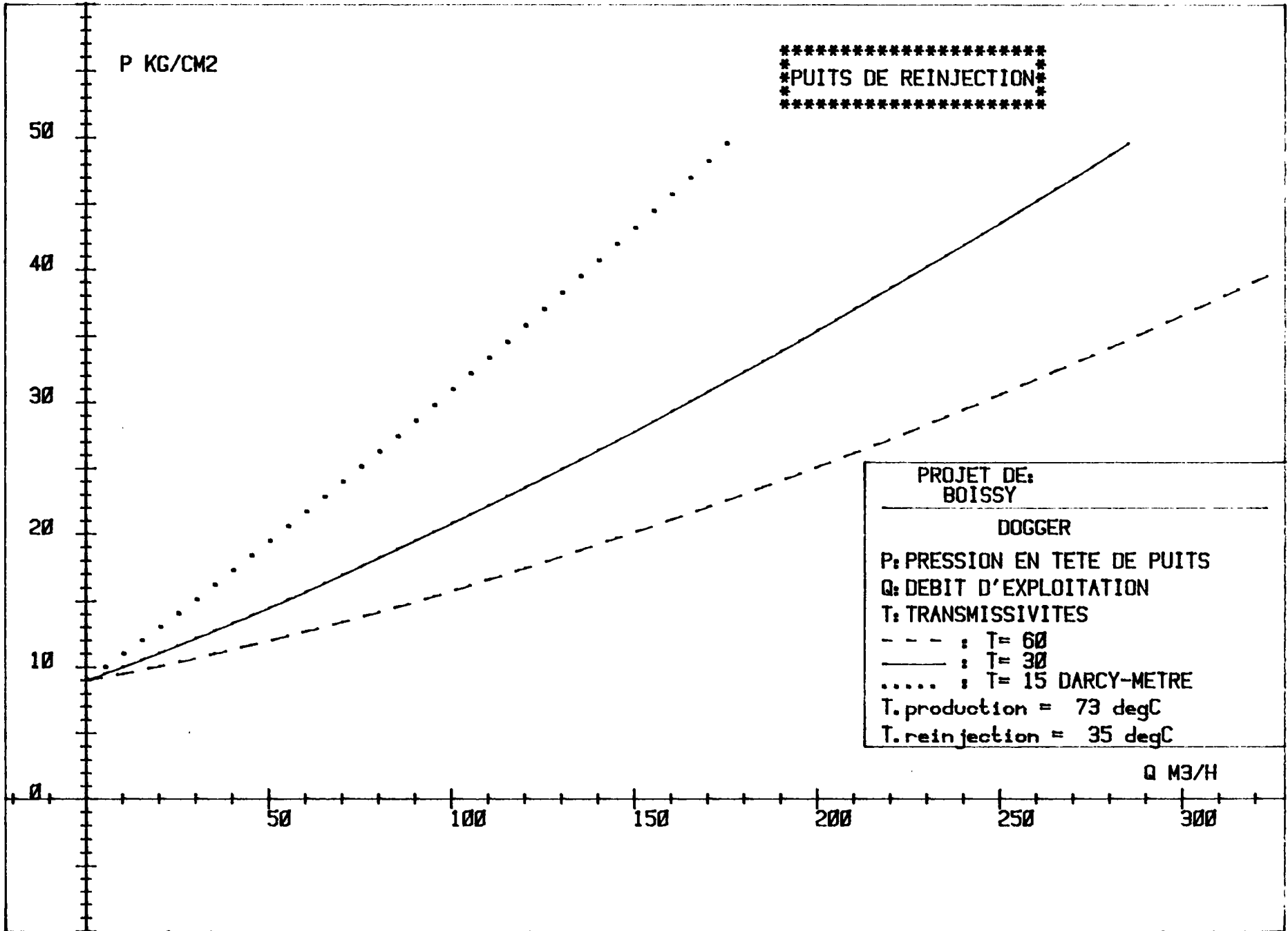
TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
 PROJET DE BOISSY DOGGER

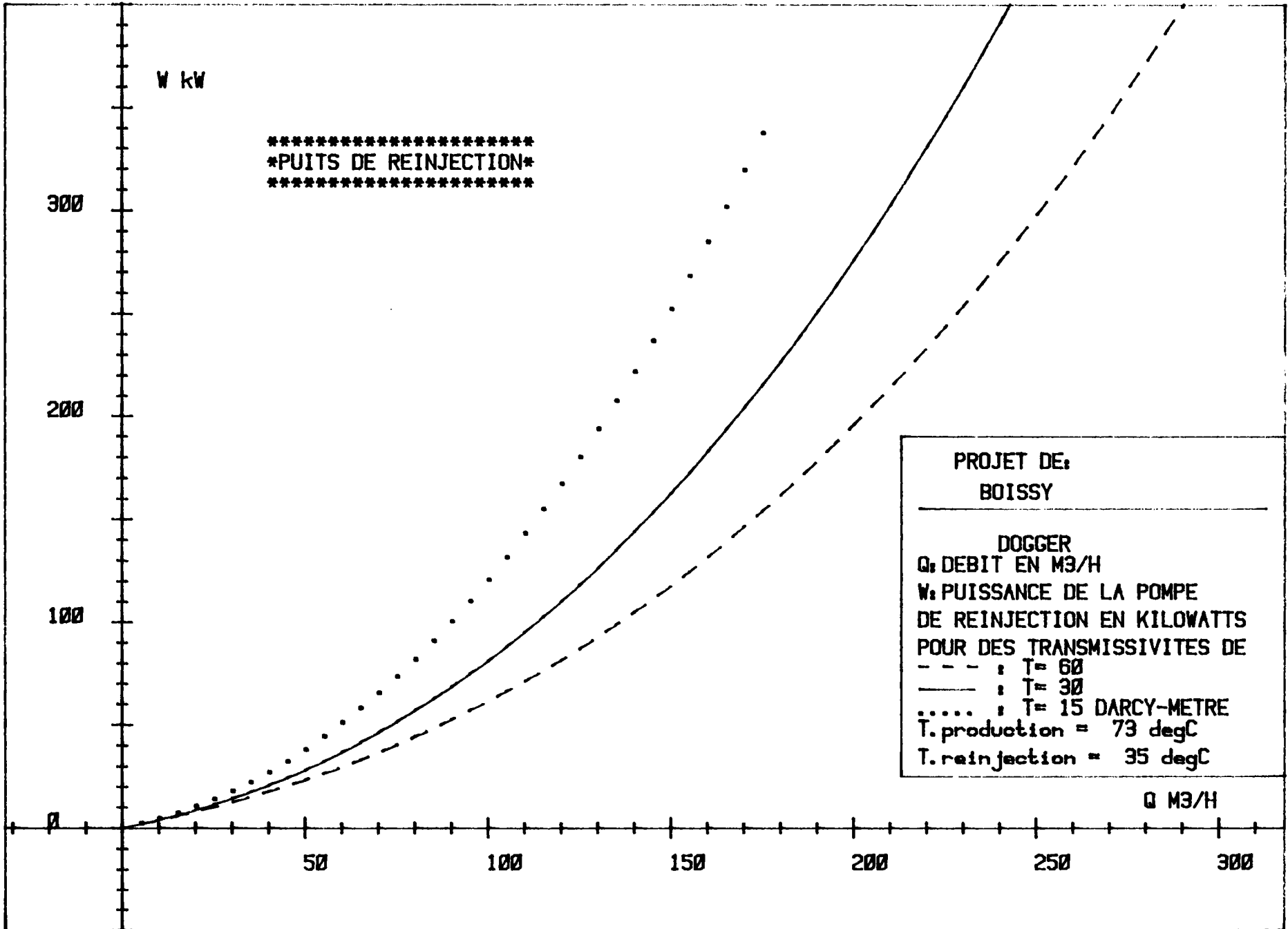
REINJECTION
 T= 30 DARCY-METRE

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW | DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 10.02 | 3.9 | 170 | 32 | 211.79 |
| 20 | 11.13 | 8.67 | 180 | 33.6 | 235.49 |
| 30 | 12.3 | 14.36 | 190 | 35.23 | 260.61 |
| 40 | 13.51 | 21.03 | 200 | 36.88 | 287.17 |
| 50 | 14.75 | 28.72 | 210 | 38.55 | 315.2 |
| 60 | 16.03 | 37.45 | 220 | 40.25 | 344.72 |
| 70 | 17.34 | 47.27 | 230 | 41.96 | 375.76 |
| 80 | 18.69 | 58.2 | 240 | 43.7 | 408.34 |
| 90 | 20.06 | 70.29 | 250 | 45.46 | 442.49 |
| 100 | 21.46 | 83.55 | 260 | 47.24 | 478.22 |
| 110 | 22.89 | 98.03 | 270 | 49.05 | 515.55 |
| 120 | 24.34 | 113.74 | 280 | (50.87) | (554.52) |
| 130 | 25.82 | 130.71 | 290 | (52.71) | (595.14) |
| 140 | 27.33 | 148.98 | 300 | (54.58) | (637.44) |
| 150 | 28.86 | 168.56 | 310 | (56.46) | (681.43) |
| 160 | 30.42 | 189.49 | 320 | (58.37) | (727.14) |

(-) <=> pression >50 kg/cm2

Temperature de production Tp= 73 deg.C T. de reinjection Tr= 30 deg.C





TABULATION DES TRIPLETS DEBIT-PRESSION-PUISSANCE
 PROJET DE BOISSY DOGGER

REINJECTION
 T= 30 DARCY-METRE

| DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW | DEBIT M3/H | PRESSION KG/CM2 | PUISSANCE KW |
|---------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| 10 | 9.94 | 3.87 | 170 | 30.25 | 200.25 |
| 20 | 10.96 | 8.53 | 180 | 31.74 | 222.47 |
| 30 | 12.03 | 14.06 | 190 | 33.26 | 246.02 |
| 40 | 13.15 | 20.47 | 200 | 34.79 | 270.92 |
| 50 | 14.29 | 27.82 | 210 | 36.35 | 297.19 |
| 60 | 15.47 | 36.14 | 220 | 37.93 | 324.87 |
| 70 | 16.68 | 45.46 | 230 | 39.53 | 353.96 |
| 80 | 17.92 | 55.82 | 240 | 41.15 | 384.49 |
| 90 | 19.19 | 67.24 | 250 | 42.79 | 416.49 |
| 100 | 20.48 | 79.75 | 260 | 44.45 | 449.97 |
| 110 | 21.8 | 93.39 | 270 | 46.14 | 484.97 |
| 120 | 23.15 | 108.17 | 280 | 47.84 | 521.49 |
| 130 | 24.52 | 124.13 | 290 | 49.56 | 559.57 |
| 140 | 25.92 | 141.29 | 300 | (51.3) | (599.22) |
| 150 | 27.34 | 159.68 | 310 | (53.07) | (640.47) |
| 160 | 28.79 | 179.33 | 320 | (54.85) | (683.33) |

(-) <=> pression >50 kg/cm2

Temperature de production Tp= 73 deg.C T. de reinjection Tr= 35 deg.C

VIII - PROGRAMME DE FORAGE

VIII.1. Lusitanien (2 puits droits - cf. planche 29)

VIII.1.1. Puits de production

1. Forage en 17"1/2 de 0 à 350 m.
- Si pertes dans le tertiaire, élargissement en 24" et pose d'un tubage 18"5/8 à 115 m.
2. Forage en 12"1/4 de 350 à 980 m.
Pose d'une colonne mixte 13"3/8 - 9"5/8 à 980 m et cimentation.
3. Forage en 8"1/2 de 980 m à 1250 m.
Pose d'un liner 7"
4. Forage du réservoir en 6"
5. Essais

VIII.1.2. Puits de réinjection

1. Forage en 12"1/4 de 0 à 980 m, élargissement
- Si pertes dans le tertiaire, dégazage en 24" et pose d'un tubage 18"5/8 à 115 m.
- Si pertes dans la craie, élargissement en 17"1/2 et pose d'un tubage 13"3/8 à 590 m.
- Absence de pertes : pose d'un tubage 9"5/8 à 980 m.
2. Forage en 8"1/2 de 980 à 1250 m.
Pose d'un tubage 7".
3. Forage du réservoir en 6"
4. Essais

VIII.2. Dogger (2 puits déviés - cf. planche 30)

VIII.2.1. Puits de production

1. Forage en 17"1/2 de 0 à 460 m.
Option : élargissement 23" de 0 à 120 m - pose 18"5/8
Pose d'un tubage 13"3/8 VAM (0-400) et API (400 - 460 m).

2. Forage 12"1/4 de 460 à 1050 m ($\alpha = 0 - 32^\circ$)
Pose d'un liner 9"5/8 de 400 à 1050 m.
3. Forage en 8"1/2 en déviation de 1050 à 1835 m ($\alpha = 32^\circ$)
Pose d'un tubage 7" de 0 à 1835 m.
4. Forage 6" de 1835 à 2000 ($\alpha = 32^\circ$)
5. Coupe du tubage 7" à 400 m
6. Essais

VIII.2.2. Puits d'injection

1. idem puits de production
2. Forage en 12"1/4 de 460 à 1050 m ($\alpha = 0 - 32^\circ$)
Pose d'un tubage 9"5/8 de 0 à 1050 m
3. idem puits de production
4. idem puits de production
5. Essais

IX - ESTIMATIONS PREVISIONNELLES DU COUT DES TRAVAUX

Les conditions d'établissement des estimations sont les suivantes :

- . Type d'appareil de forage non connu à la date d'établissement des coûts.
- . Le poste plateforme comprend uniquement les travaux nécessaires à l'implantation d'un appareil de forage type sur une surface de 8000 m² libre de toute servitude (environnement, ouvrages, souterrains, réseaux divers, fondations).

Le devis ne comprend ni d'éventuels travaux d'accès, ni les branchements (eau, électricité, téléphone, évacuation des eaux d'essais) ni la remise en état du site.

Le coût de location de la machine de forage tient compte de l'insonorisation.

- . Le poste pompe d'exhaure comprend :

- une pompe équipée d'un variateur
- une colonne de production munie d'un revêtement anti-corrosion
- la mise en place de la pompe (location d'une machine de "servicing").

IX.1. Lusitanien

Le coût d'un doublet 7" composé de 2 puits droits est de 16.500 kF H.T.

IX.2. Dogger

Le détail du coût d'un doublet est présenté sur la planche 31. Le montant total est de 20.110 kF H.T.

X - ESTIMATION DES COÛTS D'EXPLOITATION (valeur Mars 1983) (doublet Lusitanien ou Dogger)

Par rapport à la maintenance des équipements classiques d'un système centralisé de chauffage, une boucle géothermale nécessite des interventions spécifiques.

En effet, les caractéristiques physico-chimiques du fluide exploité (température, salinité, teneur en gaz dont H₂S, présence de bactéries) et la particularité du matériel utilisé imposent une maintenance spécifique des installations.

Ci-après est donnée une estimation des coûts d'entretien et de renouvellement des équipements "sous-sol" et des coûts d'intervention prévisibles sur les forages dans l'optique d'une exploitation optimale du fluide géothermal.

Les coûts concernant les échangeurs et la pompe de réinjection, ainsi que le réseau géothermique ne sont pas pris en compte dans ce chapitre.

X.1. Coûts d'entretien (P2)

X.1.1. Entretien courant

Certaines opérations d'entretien courant sont nécessaires sur un doublet géothermique :

- surveillance périodique des appareils de mesure permettant de suivre les conditions d'exploitation du doublet : indicateurs de pression, température, débit, chimisme, etc...
- manoeuvre périodique des vannes, afin d'éviter leur grippage ;

- entretien général des vannes et des têtes de puits ;

Ces tâches ne nécessiteront que quelques heures de travail par mois. Elles pourraient être assurées par le personnel d'entretien affecté à d'autres installations.

Les coûts annuels peuvent être estimés à 30 kF.

X.1.2. Pompe d'exhaure

Cette rubrique ne prend pas en compte les interventions qui correspondent au renouvellement de la pompe, interventions programmées tous les 4 ans.

Par contre, il paraît nécessaire de procéder à un entretien systématique des pompes, 2 ans après leur mise en service.

La périodicité de cette opération (remontée, entretien, descente de la pompe) est donc de 4 ans.

Le coût d'un entretien peut être estimé à :

| | |
|--|-----------------------|
| . Remontée - Descente | 115 kF |
| . Entretien (estimé à 20 % environ du coût d'investissement) | 200 kF |
| . Supervision travaux et divers | <u>65 kF</u> |
| TOTAL | 380 kF tous les 4 ans |

Une provision annuelle de 95 kF pourra être retenue pour ce poste.

X.2. Renouvellement des équipements et interventions spécifiques (P3)

X.2.1. Pompe d'exhaure

Elle sera changée tous les 4 ans. Le coût estimatif est :

| | |
|-------------------------|-------------------------|
| . Pompe d'exhaure | 990 kF |
| . Remontée - Descente | 115 kF |
| . Supervision et divers | <u>110 kF</u> |
| TOTAL | 1 215 kF tous les 4 ans |

Une provision annuelle de 305 kF pourra être retenue pour ce poste.

X.2.2. Colonne de production

La durée de vie est estimée à 6 ans. La provision annuelle à prendre est donc de 40 kF.

X.2.3. Têtes de puits

La durée de vie moyenne d'une tête de puits est de 10 ans. Un coût de 220 kF (deux têtes de puits) est à inscrire à cette échéance. Une provision annuelle de 20 kF pourra être retenue pour ce poste.

X.2.4. Interventions spécifiques

Certaines interventions spécifiques peuvent être rendues nécessaires sans qu'une périodicité précise puisse être fixée. Il en est ainsi des opérations suivantes :

- stimulation de puits (par acidification ou autre méthode) ;
- contrôle de l'état de corrosion des tubages (par enregistrement ETT ou autre méthode) ;
- interventions liées à la corrosion sur certains équipements.

Il conviendrait d'assurer une provision annuelle de l'ordre de 100 kF pour ces interventions et l'assistance technique qu'elles impliquent.

X.3. Résumé des coûts d'entretien et de renouvellement

Compte tenu de la périodicité différente des interventions, il est plus facile de raisonner sur un coût moyen annuel qui peut être approvisionné et constituer une réserve pour les opérations importantes.

Nous récapitulerons donc ci-dessous les coûts annuels moyens.

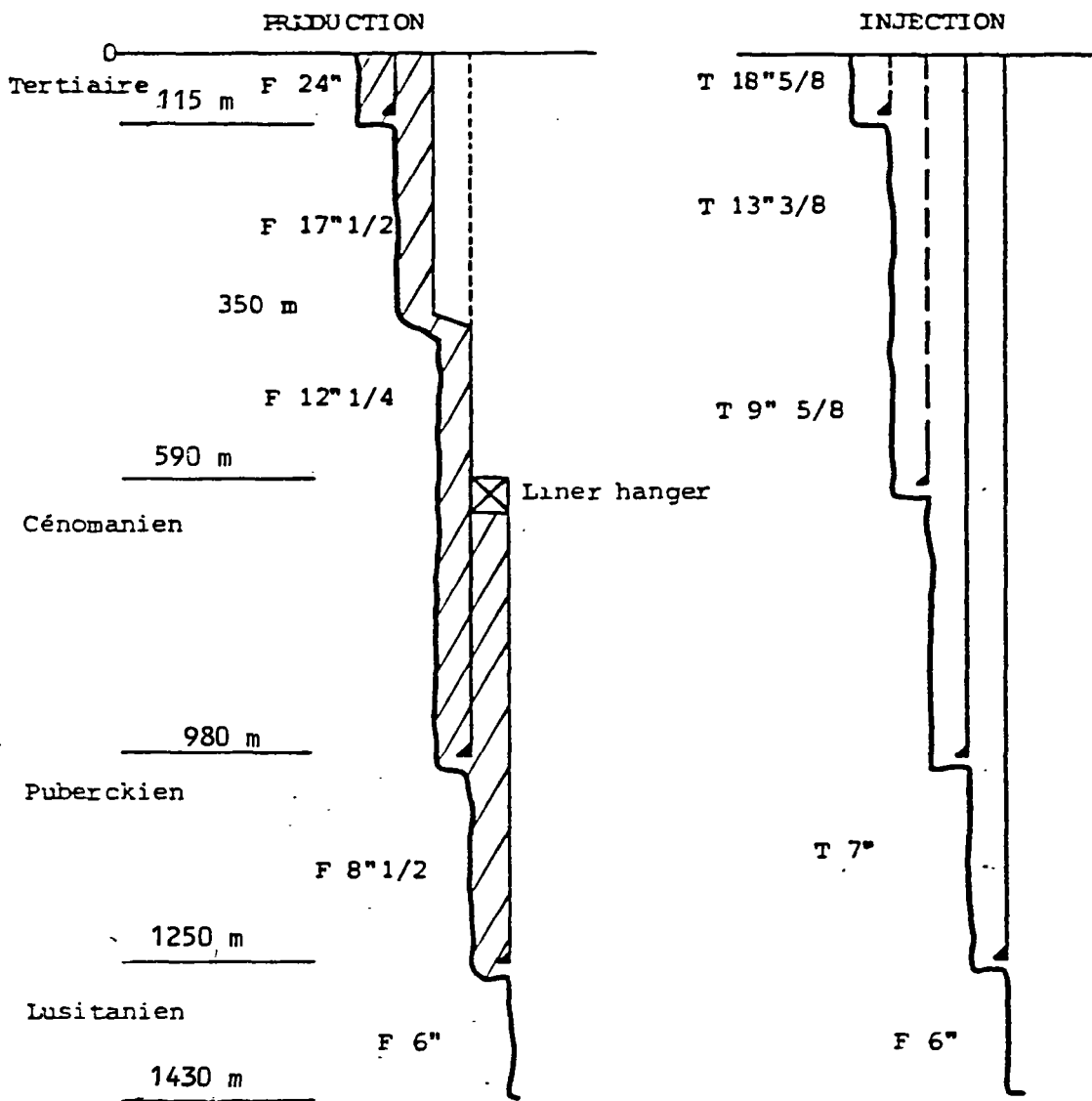
| | | |
|-----------|---------------------------|--------|
| <u>P2</u> | Entretien courant | 30 kF |
| | Pompe d'exhaure | 95 kF |
| | | <hr/> |
| | TOTAL | 125 kF |
| | | |
| <u>P3</u> | Pompe d'exhaure | 305 kF |
| | Colonne de production | 40 kF |
| | Tête de puits | 20 kF |
| | Interventions spécifiques | 100 kF |
| | | <hr/> |
| | TOTAL | 465 kF |

L'ensemble des dépenses annuelles d'entretien et de renouvellement des équipements représente donc un coût au 01/03/1983 de l'ordre de : $P2 + P3 = 590 \text{ kF}$

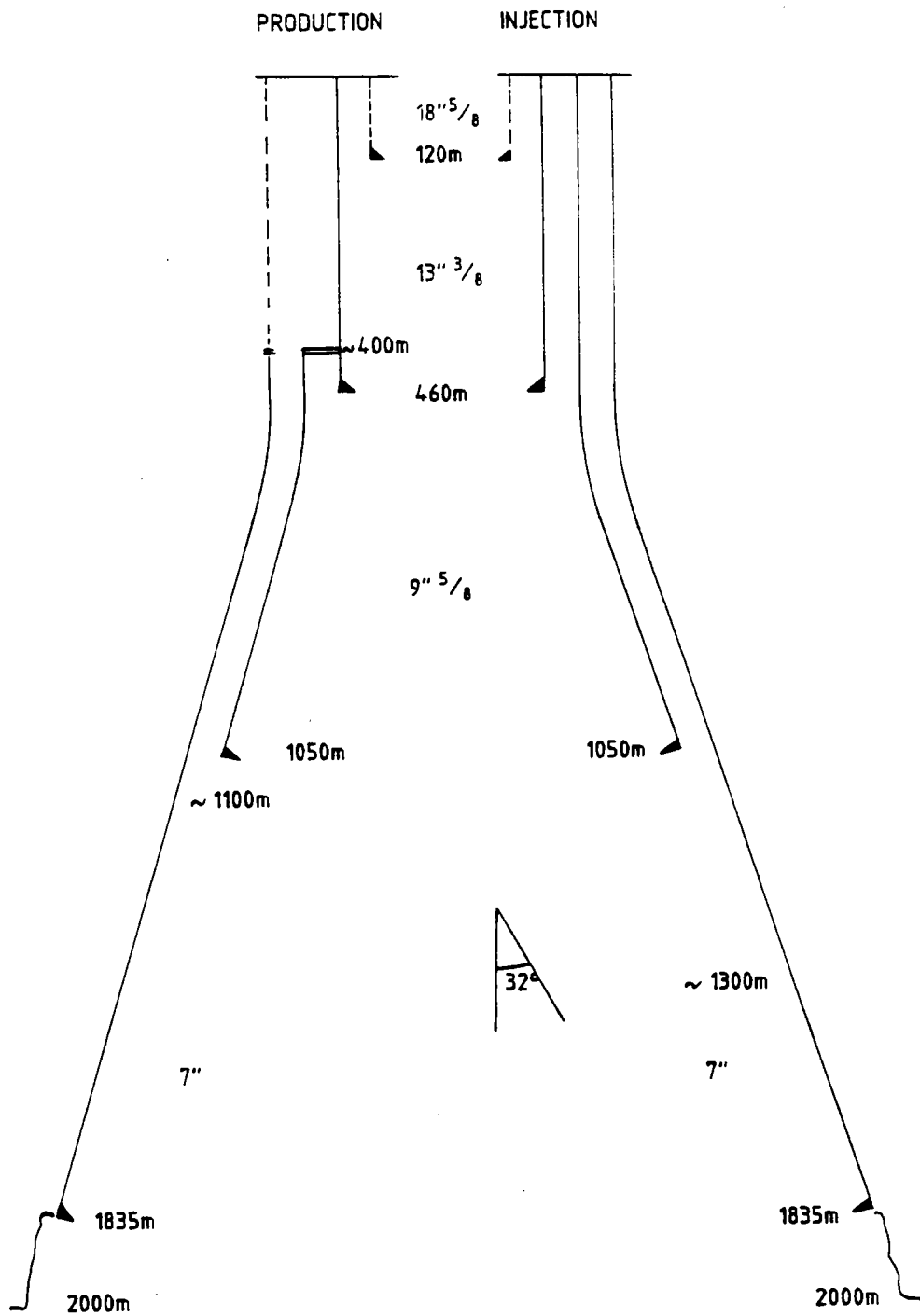
BOISSY ST LEGER

LUSITANIEN

2 puits droits 7"



BOISSY-S^t LEGER - Dogger 7"



DATE : MARS 1983

PROJET : BOISSY ST LEGER

HYPOTHESES GENERALES : 2 puits déviés (plateforme unique - opération coordonnée)

OBJECTIF : DOGGER (1653 - 1793 m) dévié (1835 - 2000)

| | | PRODUCTION | INJECTION |
|----|---|------------|-----------|
| 1 | Plateforme | 925 | |
| A | Transport-Montage 200 km | 595 | 160 |
| 2 | B Forage (y compris insonorisation) (et attachements spéciaux) | 1 785 | 1 785 |
| 3 | Fuel | 275 | 275 |
| 4 | Têtes de puits | 110 | 110 |
| 5 | Tubages et équipements (+ clé + hanger) | 1 830 | 1 885 |
| 6 | Outils | 270 | 270 |
| 7 | Boue + Technicien | 345 | 345 |
| 8 | Cimentations + ciment | 440 | 380 |
| 9 | Diagraphies et analyses | 495 | 520 |
| 10 | Opérations de déviation | 375 | 375 |
| 11 | Complétion | - | - |
| 12 | Stimulation | 65 | 65 |
| 13 | Coupe de tubage | 40 | - |
| 14 | Test de formation | - | - |
| 15 | Matériel d'air-lift | 75 | 75 |
| 16 | Eau-téléphone (1) | 70 | 70 |
| 17 | Electricité (1) | p.m. | p.m. |
| 18 | Citermage-Vidange Traitement bourbiers (2) | 375 | 375 |
| 19 | Pompe d'exhaure } Pompe } variateur } Colonne } Mise en place } | - | 990 |
| | | - | 580 |
| | | - | 380 |
| 20 | Transports | - | 115 |
| | | 55 | 55 |
| 21 | Divers imprévus | 405 | 440 |
| 22 | Intendant forage | 85 | 85 |
| 23 | Surveillance géologique | 220 | 160 |
| 24 | Suivi et interprétation essais | 70 | 70 |
| 25 | Maitrise d'oeuvre | 790 | 490 |
| 26 | Dossiers administratifs | 80 | - |
| 27 | Assurance globale chantier | 140 | 140 |
| | | 9 915 | 10 195 |
| | | 20 110 MF | |