



Proj. Nr. 2747

Veh. Nr. 2747

Programme

Géothermie

EF Nr.
194 398

Recherche des paramètres permettant d'élever la température moyenne des fluides circulant dans des sondes en terre verticales et destinés à l'alimentation de pompes à chaleur

Rapport final

Réalisation :

**Dr. B. Mathey
Bernard Matthey
Ingénieurs-Conseils SA
CH - 2205 Montezillon**

**Dr. D. Pahud
Dept. of Mathematical Physics
University of Lund
S - 22100 LUND**

Mandant :

**Office Fédéral de l'Energie
CH - 3003 Berne**

SOMMAIRE

Réalisation de l'étude

Liste des tableaux

Liste des figures

	Page
1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS	7
1.1 Objectifs du premier rapport intermédiaire	7
1.2 Résultats du premier rapport intermédiaire	8
2. 2EME RAPPORT INTERMEDIAIRE - TRAVAUX EFFECTUES EN 1995	9
2.1 Objectifs	9
2.2 Résultats	9
3. OBJECTIFS DU RAPPORT FINAL	10
3.1 Profil du projet	10
3.2 Données antérieures	10
3.3 Plan de travail	11
4. COMMENTAIRES AUX TABLEAUX ET FIGURES	12
5. CONCLUSIONS A LA TROISIEME ETAPE DU RAPPORT	21
6. CONCLUSIONS FINALES	22

Exemples d'application

Tableaux

Figures

REMERCIEMENTS

Les auteurs de la présente étude tiennent à remercier toutes les personnes qui les ont renseigné ou assisté dans leurs travaux, et en particulier :

M. Brunner	Office Fédéral de l'Energie 3003 Berne
J.-D. Burnat	Commune de Peseux (NE)
Dr. H. L. Gorhan	Responsable du programme géothermie Elektrowatt 8034 Zürich
Dr. G. Hellström	Dept. of Mathematical Physics University of Lund S - 22100 LUND
J. Telfser	Entreprise Tecfor 1872 Troistorrents

REALISATION DE L'ETUDE

Les personnes suivantes, collaborateurs de Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA, ont participé à la réalisation de l'étude :

Direction de l'étude	Dr. Bernard Mathey
Collaborateur scientifique	Dr. Daniel Pahud University of Lund (S)
Travaux de simulation	Mlle Sonia Freiburghaus
Travaux expérimentaux	MM. Jacob Büchi Sylvain Langel
Dessinatrice	Mlle Catherine Dubois
Secrétaire	Mlle Evelyne Benhenda

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Valeurs de la résistance R_b d'une sonde double_U, calculées en fonction d'un diamètre de sonde, du type de remplissage et du régime.

Tableau 2 Température moyenne du terrain calculée pour quatre régions représentatives

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Demande annuelle de chaleur du bâtiment en fonction de la puissance thermique de la PAC et de son nombre d'heures de fonctionnement

Figure 2 Energies extraites du terrain, en fonction de la demande annuelle de chauffage, pour différents COP de la PAC

Figure 3 Longueur totale de la sonde géothermique à installer, en fonction de l'énergie annuelle soutirée par mètre de sonde.

Figure 4 Puissance d'extraction thermique dans le terrain, en fonction de la puissance thermique de la PAC et du COP

Figure 5 Puissance extraite par mètre de forage, en fonction de la longueur de forage et de la puissance d'extraction thermique dans le terrain.

Figure 6 Nombre de Reynolds en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$

Figure 7 Perte de charge en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$

Figure 8 Puissance dissipée en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$

Figure 9 Nombre de Reynolds en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde $\Delta T = 3K$

Figure 10 Perte de charge en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$

Figure 11 Puissance dissipée en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$.

Figure 12 Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde double_U de 0,032 m (12a), 0,040 m (12b) ou 0,050 m (12c). Détermination du ΔT (entrée - sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

LISTE DES FIGURES (suite)

Figure 13 Perte de charge dans les sondes, en fonction de la longueur du forage. Vitesse du fluide à la limite de la turbulence.

Figure 14 Puissance du circulateur en fonction des pertes de charge et du rendement. Diamètres de sonde : 0,032 m (14a), 0,040 m (14b), 0,050 m (14c), régime faiblement turbulent (Re : 2'000).

Figure 15 Ablissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, en terrain calcaire [(2,8 W/m . K), 15a] ou en terrain molassique [(1,8 W/m . K), 15b].

Figure 16 Ablissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages.

Figure 17 Influence des changements de diamètre de forage (avec adaptation de l'écartement des sondes), sur l'abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde par rapport à la température moyenne annuelle du sol [ΔT (K)]. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, - \varnothing 0,04 m, remplissage de sable de quartz ou de bentonite - .

RECHERCHE DES PARAMETRES PERMETTANT D'ELEVER LA TEMPERATURE MOYENNE DES FLUIDES CIRCULANT DANS DES SONDES EN TERRE VERTICALES

CONSTRUCTION D'ABAQUES DESTINES AU DIMENSIONNEMENT D'UNE SONDE EN TERRE OPTIMALE

1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Cette étude, financée par l'Office Fédéral de l'Energie, s'est déroulée en trois étapes, dont les deux premières ont donné lieu à deux rapports intermédiaires, parus les 29 novembre 1994 et 20 décembre 1995.

Le présent rapport synthétise les conclusions des premier et deuxième rapports et poursuit la réflexion en proposant des abaques faisant intervenir des paramètres qui permettent de définir avec précision les meilleures associations longueur de sonde - diamètre - débit et ΔT , en fonction de la demande annuelle de chauffage du bâtiment.

1.1 OBJECTIFS DU PREMIER RAPPORT INTERMEDIAIRE

L'objectif de cette étude consistait à évaluer l'impact des paramètres qui conduisent à améliorer le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur (PAC). L'étude s'est concentrée essentiellement sur l'analyse de trois géométries différentes de sonde en terre (Types double_U, annulaire et multitubulaire). Pour chaque cas étudié, l'influence des différents paramètres sur la résistance thermique de la sonde a été évaluée et a permis son optimisation.

Sonde annulaire idéale

La sonde annulaire étudiée est qualifiée d'idéale, puisque le tube central est parfaitement centré sur l'axe du tube extérieur de la sonde, et remonte dans la partie centrale.

Sonde en double_U

La sonde en double_U est constituée de quatre tubes formant 2 U dans le forage. Le fluide caloporteur circule en parallèle dans chacun des U. Le matériau de remplissage doit assurer un bon contact thermique entre les tubes et la paroi du forage. L'écartement des tubes est mesuré entre les centres de deux tubes opposés dans le forage. Le placement optimal des tubes correspond à l'écartement maximal.

Sonde multitubulaire

La sonde multitubulaire est formée de 12 tubes périphériques dans lesquels descend le fluide caloporteur, et d'un tube central pour le faire remonter. Si l'on veut réduire l'écart entre la résistance thermique effective et locale pour de faibles débits, il est nécessaire d'isoler le tube central.

1.2 RESULTATS DU PREMIER RAPPORT INTERMEDIAIRE

L'impact de chaque constituant des sondes en terre a été évalué. Les analyses, sous forme paramétrique, ont permis d'apprécier l'importance relative de chaque paramètre, ainsi que le comportement de la résistance thermique en fonction de leurs variations. Il en ressort principalement que les performances de la sonde multitubulaire sont légèrement meilleures que celles de la sonde double_U. Cependant, elles ne permettent certainement pas de justifier la différence de coût des sondes. Quant à la sonde annulaire en plastique, elle est moins performante qu'une sonde double_U optimisée (avec écarteurs et remplissage de sable de quartz).

Un bon résumé des résultats est donné dans la publication présentée par les auteurs de l'étude au colloque de Constance en septembre 1996.

2. 2EME RAPPORT INTERMEDIAIRE - TRAVAUX EFFECTUES EN 1995

2.1 OBJECTIFS

Profitant de la construction d'un stock en terre constitué de 30 sondes de 60 mètres chacune à Peseux (NE), il a été décidé de tester en vraie grandeur les différentes variantes simulées dans le premier rapport intermédiaire.

La sonde annulaire étant peu performante pour les diamètres usuels, et une sonde multitubulaire performante avec isolation du tube central n'étant pratiquement pas disponible, il a été décidé de tester quatre géométries de sondes en double_U, à savoir :

- Type 1 : pas d'écarteurs, remplissage de bentonite + ciment
- Type 2 : avec écarteurs et remplissage de bentonite + ciment
- Type 3 : avec écarteurs et remplissage d'un mélange de bentonite + ciment + sable grossier
- Type 4 : avec écarteurs et remplissage de sable de quartz fin uniquement

2.2 RESULTATS

La réalisation de ces tests in situ a montré la possibilité d'améliorer les performances thermiques d'une sonde en terre sans créer des problèmes supplémentaires lors de la mise en place. Lorsque le terrain le permet, l'usage d'écarteurs et de sable de quartz comme matériau de remplissage est à recommander. L'amélioration de la résistance thermique par rapport à une sonde standard (bentonite, pas d'écarteurs) est d'environ 0,04 K/(W/m). Si une puissance thermique de 50 W/m est extraite de la sonde, un gain de +2K est donc réalisé sur le fluide caloporteur, pour autant qu'on soit en régime turbulent dans la sonde.

3. OBJECTIFS DU RAPPORT FINAL

3.1 PROFIL DU PROJET

La troisième étape, qui est à la fois la poursuite des recherches et une synthèse de travaux précédents, est intitulée : **"Essai de construction des abaques permettant à un ingénieur de dimensionner une sonde en terre en imposant comme condition initiale une température moyenne à la sortie de la sonde à partir des trois paramètres : forme, longueur et recharge "**.

La configuration de sonde en terre choisie consiste en une sonde de type double_U, car d'après le premier rapport intermédiaire, c'est celle qui a le meilleur rapport performances thermiques - prix. D'autre part, c'est la sonde la plus couramment installée en Suisse, de par son prix et sa mise en place relativement aisée.

3.2 DONNEES ANTERIEURES

Grâce à la réalisation des études antérieures, dont les résultats sont donnés dans les deux rapports intermédiaires, résumés aux paragraphes 1 et 2, les acquis quant à la configuration et à l'exploitation des sondes en terre sont déjà nombreux. Pour cette raison, et afin de ne pas répéter inutilement un important travail de simulation déjà réalisé, certaines données ont été admises, sans être testées. Il s'agit de :

- **l'utilisation d'écarteurs** (distanceurs) entre les sondes.
- **l'utilisation de propylèneglycol** (33 %, dont les propriétés physiques sont considérées à 0°C, et dont le point de congélation est de -15°C), a été préférée à celle de l'éthylèneglycol (30 %, dont les propriétés physiques sont considérées à 0°C, et dont le point de congélation est de -15°C).

Dans le premier rapport intermédiaire, il était cependant indiqué que pour bénéficier d'un régime non-laminaire avec un débit le plus faible possible, il convenait de choisir le fluide caloporteur le moins visqueux possible, soit l'éthylèneglycol. Cependant, partant du point de vue que :

- la différence de résistance thermique à proximité de la transition laminaire - turbulente n'est que de 0,01 K/(W/m), soit de 0.5K si une puissance de 50 W/m est extraite de la sonde
- l'éthylèneglycol est toxique

Tous les abaques présentés ont été calculés avec le propylèneglycol, comme fluide caloporteur.

- la présence d'un **gradient géothermique régulier**, de 3°C/100 m a été admise.

Dans les deux rapports précédents, on a supposé un gradient géothermique nul sur les 100 premiers mètres, puis normal (30°C/km) sur les suivants.

Ce changement d'option est justifié par :

- le fait que le choix de 100 mètres est arbitraire.

En fonction du type de roche rencontré, du degré de fracturation, de la présence temporaire ou permanente d'eau souterraine et de la localisation géographique du forage (gradient géothermique anormal dans les Alpes et dans la région de Bâle); la profondeur de roche dans laquelle le flux géothermique est nul peut varier de 0 à 100 m.

Pour cette raison, et afin de ne pas pénaliser les forages de faible profondeur, il a été décidé de simuler les différents cas en présence avec un gradient géothermique normal ($30^{\circ}\text{C}/1'000 \text{ m}$), dès la surface.

- le **remplissage avec du sable de quartz**, qui améliore sans conteste les performances de la sonde, a été comparé une nouvelle fois au remplissage avec de la bentonite, actuellement utilisé très couramment.

3.3 PLAN DE TRAVAIL

Le plan du travail a consisté dans un premier temps, en l'exécution de nombreux tests permettant de définir avec précision les associations optimales : longueur de sonde - diamètre de sonde - débit - ΔT . Dans un second temps, et grâce au modèle de simulation EED (Earth Energy Designer), la résistance thermique effective de la sonde a pu être calculée, permettant de connaître précisément les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur dans la sonde.

Les figures données plus loin permettent, grâce aux commentaires et explications du paragraphe 4, de mieux cerner l'évolution du travail au travers des différents abaques.

Par le biais de deux exemples concrets, l'utilisation des abaques est illustrée après le paragraphe 5.

4. COMMENTAIRES AUX TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1 Valeurs de la résistance R_b d'une sonde double_U, calculées en fonction d'un diamètre de sonde, du type de remplissage et du régime

Lorsqu'on calcule les valeurs de résistance interne de la sonde en **régime d'exploitation laminaire** (nombre de Reynolds de 1'700 et de 1'990), la valeur de R_b reste constante.

Les valeurs de R_b données ici pour un $Re < 2'000$ sont donc tout à fait représentatives. Tous diamètres de sondes et de forage confondus et en présence de distanceurs, on peut dire que :

Régime laminaire :

Remplissage de sable : $R_b = 0,10$

Remplissage de bentonite : $R_b = 0,14$

Le R_b calculé en régime d'exploitation **faiblement turbulent** ($Re = 2'000$) est environ 50 % plus faible, avec remplissage de sable et environ 60 % plus faible, avec remplissage de bentonite; ce qui donne :

Régime faiblement turbulent :

Remplissage de sable : $R_b = 0,052$

Remplissage de bentonite : $R_b = 0,086$

⇒ Les valeurs du tableau 1 sont à utiliser avec la figure 15.

Tableau 2 Température moyenne du terrain calculée pour quatre régions représentatives

Les températures moyennes du terrain sont données pour l'arc jurassien, le Plateau, les Alpes, ainsi que le sud des Alpes (Tessin). Elles ont été calculées sur la base des températures de l'air. Comme les échanges de température air - sol sont presque inexistant à une profondeur de -10 m, c'est cette valeur de température du terrain qu'il faut prendre comme étant représentative.

Il est cependant bien clair que ces valeurs ne sont exactes que pour le lieu pour lequel elles ont été calculées. Si l'altitude et les conditions climatiques du Plateau sont relativement homogènes, ce n'est pas le cas pour les régions de montagnes, en particulier pour les Alpes. La valeur de 3,3°C calculée à Davos est à adapter à la hausse ou à la baisse, en fonction de l'altitude du lieu.

En cas d'absence d'information, on prend comme température du sol à -10 mètres, la température moyenne de l'air, à laquelle on ajoute 1°C.

⇒ Valeur à utiliser avec la figure 15

Figure 1 *Demande annuelle de chaleur du bâtiment en fonction de la puissance thermique de la PAC et de son nombre d'heures de fonctionnement*

Une fois la calorimétrie du bâtiment réalisée (selon SIA 384/2), on connaît la puissance thermique du bâtiment. Il est ensuite possible de convertir cette puissance en demande annuelle de chauffage, selon le nombre d'heures de fonctionnement annuel (2'000 h/an, en général). La puissance thermique du bâtiment équivaut - si aucune autre source d'énergie n'est utilisée - à la puissance thermique de la PAC.

⇒ **Entrer cette valeur dans la figure 2 et dans la figure 4.**

Figure 2 *Energies extraites du terrain, en fonction de la demande annuelle de chauffage, pour différents COP de la PAC*

On choisira une PAC ayant un COP entre 3 et 4, voire davantage. En fonction du COP choisi, il est possible de convertir la demande annuelle de chauffage en énergie annuelle extraite du terrain.

⇒ **Entrer cette valeur dans la figure 3**

Figure 3 *Longueur totale de la sonde géothermique à installer, en fonction de l'énergie annuelle soutirée par mètre de sonde*

L'énergie extraite dépend du nombre d'heures de fonctionnement et du COP de la PAC, qui eux-mêmes dépendent du type de bâtiment, de l'altitude, de l'exposition, de la température du terrain, etc. Si ces facteurs sont plutôt défavorables, (par exemple, température du terrain basse, terrain peu conducteur, COP élevé), on pourra extraire une puissance relativement faible ($\approx 80 \text{ KWh/m . an}$).

En fonction de l'énergie annuelle extraite du terrain, et de l'énergie extraite par mètre de sonde, on définira la longueur totale du forage.

⇒ **Figure 5, choix de l'une des droites.**

Figure 4 *Puissance d'extraction thermique dans le terrain, en fonction de la puissance thermique de la PAC et du COP*

En reprenant, à la figure 1, la valeur de la puissance thermique de la pompe à chaleur et connaissant le COP de la PAC (choisi à la figure 2), on déterminera la puissance d'extraction thermique dans le terrain.

⇒ **Figure 5**

Figure 5 *Puissance extraite par mètre de forage, en fonction de la longueur de forage et de la puissance d'extraction thermique dans le terrain*

En entrant la puissance d'extraction thermique calculée à la figure 4, et connaissant la longueur de forage (figure 3), on déduira la puissance extraite par mètre de forage.

⇒ **Entrer cette valeur dans les figures 12a 12 b et 12c, selon le diamètre de sonde choisi.**

Figure 6 *Nombre de Reynolds en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$*

Principe :

Dans le but de trouver les meilleurs couples profondeur de sonde - diamètre de sonde, il a été décidé de tester deux paramètres dépendants du débit circulant dans la sonde et, donc, du nombre de Reynolds. Il s'agit des :

- Pertes de charge [mCE]
- Puissance nécessaire à vaincre les pertes de charge (appelée ici puissance dissipée [W]). La puissance dissipée ne tient pas compte du rendement du circulateur, donnée aux figures 14a, 14b et 14c.

En modifiant les valeurs de débit circulant dans les sondes, ces paramètres ont été testés pour des ΔT (K) entrée - sortie de la sonde, de 4K (figures 8-10) et de 3K (figures 9-11); qui sont ceux utilisés le plus couramment.

Commentaires de la figure 6 :

On constate, en observant la figure 6, qu'aux puissances unitaires choisies, certains couples longueur de sonde - diamètre, restent en régime laminaire (par exemple 75 m et \varnothing 0,04 m → 150 m et \varnothing 0,04 m, ou 75 m et \varnothing 0,032 m → 100 m et 0,032 m).

D'autres couples franchissent la limite de la turbulence fixée à un nombre de Reynolds de 2'000 :

- à faible puissance unitaire, pour les sondes profondes et de petit diamètre (300 m, \varnothing 0,04 m)
- ou lorsque la puissance unitaire est plus élevée [sondes moyennement profondes (150 m) et de petit diamètre (0,032 m)].

La sonde la plus profonde (300 m), de petit diamètre est, quant à elle, en régime turbulent de 40 à 80 W/m.

⇒ **Figure 7**

Figure 7 *Perte de charge en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$*

On confirme qu'à profondeur égale, ce sont les sondes de plus grand diamètre qui ont les pertes de charge les plus faibles. Les pertes de charge sont fonction du débit circulant dans la sonde, donc du nombre de Reynolds.

- $Re < 2'000$, les pertes de charge sont linéaires, de l'ordre de 0,5 m à 4 m, pour des puissances unitaires d'extraction de 40-80 W/m et pour des couples profondeur / \emptyset de 150 m / 0,04 m et de 100 m / 0,032 m.
- $Re = 2'000$, un "saut" de plusieurs mètres de perte de charge s'observe. Le Re de 2'000 correspond à une "zone d'ombre" qui permet le changement de régime laminaire - turbulent, qui se définit par des pertes de charges quadratiques.
- $Re > 2'000$, les pertes de charge augmentent très rapidement, de façon quadratique.

Ce graphique met en lumière très précisément qu'une fois la limite de la turbulence franchie, les pertes de charges augmentent trop pour que l'exploitation de la PAC soit encore intéressante. Il convient donc d'adapter le diamètre de sonde adéquat à la profondeur nécessaire.

En conclusion :

- Le diamètre de sonde 0,032 m est utilisable jusqu'à 150 m. Ensuite, les pertes de charge deviennent trop conséquentes.
- Le diamètre de sonde 0,04 m est adapté jusqu'à 200 m, voire 220 m; mais ne l'est plus au-delà.

⇒**Figure 8**

Figure 8 *Puissance dissipée en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$*

A nouveau, la puissance dissipée dépend du débit circulant dans la sonde, donc du nombre de Reynolds. On remarque le passage régime laminaire - régime turbulent (pour un Re fixé à 2'000) par le changement de fonction des droites devenant brutalement des fonctions logarithmiques. La puissance dissipée est une valeur qui ne tient pas compte du rendement du circulateur.

Figure 9 *Nombre de Reynolds en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde $\Delta T = 3K$*

Le ΔT étant plus faible dans cette figure que dans la figure 6, le débit circulant dans la sonde est par conséquent plus élevé, ce qui a pour effet d'accéder au régime turbulent plus vite.

Pour freiner l'apparition du régime turbulent, on peut augmenter le diamètre de sonde, ce qui a été fait à partir de sondes atteignant une profondeur de 200 m.

⇒**Figure 10**

Figure 10 *Perte de charge en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$*

On voit que les pertes de charge sont plus élevées avec un $\Delta T = 3K$, qu'avec un $\Delta T = 4K$. Cependant, la différence n'est pas très marquée pour les sondes dans lesquelles le débit du fluide caloporteur n'a pas atteint $Re = 2'000$ (pertes de charge linéaires).

En utilisant une sonde de 300 m, on voit que seul le diamètre de 0,05 m est adapté, pour des pertes de charge raisonnables.

⇒**Figure 11**

Figure 11 *Puissance dissipée en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$*

Comme le ΔT est de 3K, le fait de passer la limite de régime laminaire - turbulent plus vite qu'avec un $\Delta T = 4K$ hausse d'une façon importante la puissance dissipée. Une fois de plus, on constate l'importance de se limiter à proximité du $Re = 2'000$.

Conséquence des figures 6 à 11 :

Grâce aux figures 1 à 5, on connaît la longueur de forage nécessaire à l'exploitation d'une énergie annuelle choisie. Cependant, le choix du diamètre de sonde est dicté par différents paramètres, en particulier par :

- Le débit circulant dans la sonde, qui conditionne :
- Un nombre de Reynolds (Re) à la limite de la turbulence
- Un ΔT entre l'entrée et la sortie de la sonde
- Une perte de charge
- Une énergie dissipée pour vaincre les pertes de charge.

En conséquence :

- Pour un $Re < 2'000$, le régime est dit laminaire, avec des pertes de charge linéaires.
- Pour un $Re = 2'000$, le régime est dit "transitoire", on rencontre une zone d'ombre.
- Pour un $Re > 2'000$, le régime est dit turbulent, les pertes de charge sont quadratiques.

En définitive, on choisira les meilleurs couples diamètre - longueur de sonde, comme suit :

\varnothing de sonde ext.	Longueur maximale
0,032 m	150 m
0,040 m	220 m
0,050 m	300 m

Si l'on se réfère au tableau 1, on voit que pour un $Re = 2'000$, la résistance du forage (R_b) est en moyenne 50% plus faible, pour un remplissage de sable et 60 % plus faible, pour un remplissage de bentonite, qu'avec un $Re < 2'000$.

Conséquence :

Il est donc vivement conseillé d'adopter, pour une longueur de sonde définie, un débit et par conséquent un Reynolds, qui soient juste à la limite de la turbulence, soit à un Re de 2'000. C'est ce qui est présenté aux figures 12a à 12c.

Figure 12 *Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde double_U de 0,032 m (12a), 0,04 m (12b) ou 0,05 m (12c). Détermination du ΔT (entrée - sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)*

Le débit circulant dans la sonde, pour un Re de 2'000, est dépendant du diamètre, mais pas de la longueur de la sonde. Il est donné comme suit :

\varnothing de sonde ext.	\varnothing de sonde int.	Débit [l/h]
0,032 m	0,0260 m	2'370
0,040 m	0,0326 m	2'970
0,050 m	0,0408 m	3'720

Connaissant, grâce à la figure 5, les paramètres suivants :

- Puissance d'extraction thermique dans le terrain
- Longueur de forage
- Puissance extraite par mètre de forage,

on trouvera aux figures 12a, 12 b et 12c, le ΔT du fluide caloporeur circulant dans la sonde et ce, pour un nombre de $Re = 2'000$.

⇒Figure 13

Figure 13 *Perte de charge dans les sondes, en fonction de la longueur du forage. Vitesse du fluide à la limite de la turbulence*

Pour une longueur de forage définie (figure 5), cette figure illustre précisément les pertes de charge dans la sonde, pour un $Re = 2'000$, soit à la limite de la turbulence.

⇒ **Entrer cette valeur dans la figure 14**

Figure 14 *Puissance du circulateur en fonction des pertes de charge et du rendement. Diamètres de sonde : 0,032 m (14a), 0,040 m (14b), 0,050 m (14c), régime faiblement turbulent ($Re : 2'000$)*

La perte de charge peut être convertie en puissance du circulateur, si le rendement du circulateur est défini. Les rendements du circulateur sont donnés en pourcent. Les pertes de charge dans l'évaporateur de la pompe à chaleur ne sont pas considérées ici.

Figure 15 *Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, en terrain calcaire [(2,8 W/m.K), 15a] ou en terrain molassique [(1,8 W/m.K), 15b]*

Connaissant :

- l'énergie extraite annuellement (figure 3)
- la résistance thermique R_b , au $Re = 2'000$ (tableau 1)
- le type de terrain (calcaire, molasse, etc),

on peut calculer la température moyenne du fluide pour deux régimes d'exploitation, à savoir :

- **"Base load"**

La puissance d'extraction est fixée par un histogramme-type de demande thermique du bâtiment, tenant compte de l'évolution annuelle du climat. La température obtenue par calcul correspond à la température annuelle moyenne à la sortie de la sonde, pour les conditions imposées.

- **"Peak heat load"**

La puissance d'extraction correspond à un régime d'exploitation extrême pendant les jours les plus froids de l'hiver. Pour obtenir cette valeur de température, on fait l'hypothèse que la pompe fonctionne 96 heures sans interruption au mois de décembre.

Pour connaître la température moyenne réelle du fluide circulant dans la sonde, on rajoutera au "base load" et au "peak heat load" la valeur issue du tableau 2 qui correspond à la température moyenne du sol, à -10 mètres de profondeur.

On ajoutera à cette valeur la moitié du ΔT (K) calculé à la figure 12 et on obtiendra finalement la valeur de température entrée-sortie de la sonde, après une exploitation de 15 ans.

Figure 16 *Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages*

Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation à raison de 2'000 h/an :

- 0,032 m, remplissage de sable de quartz (16a) et de bentonite (16b)
- 0,040 m, remplissage de sable de quartz (16c) et de bentonite (16d)
- 0,050 m, remplissage de sable de quartz (16e) et de bentonite (16f)

Pour ces valeurs, la disposition des forages considérés est la suivante :

- 2 forages de 100 m, raccordés en série selon la géométrie suivante :
 - 2 forages distants de 5 m
 - 2 forages distants de 10 m
 - 2 forages distants de 15 m
 - 2 forages distants de 30 m
- 1 forage de 200 m

Pour chaque sonde, le débit a été choisi à la limite de la turbulence, soit avec un $Re = 2'000$.

En prenant les deux extrêmes, soit un diamètre de 0,032 m et un diamètre de 0,050 m, on obtient :

Type de remplissage	\emptyset de sond ext.	ΔT (K) positions 1 et 4	ΔT (K) positions 4 et 5	ΔT (K) positions 1 et 5
Sable	0,032 m	0,75	1,05	1,8
	0,032 m	0,74	1,18	1,9
Bentonite	0,050 m	0,74	1,20	1,9
	0,050 m	0,81	1,18	2,0

On constate que :

- Les ΔT (K) des "base load" sont relativement parallèles aux ΔT (K) des "peak heat load".
- L'écartement des forages conduit à une augmentation entre les deux positions extrêmes (5 m et 30 m) de 0,75 K en moyenne.
- L'exécution d'un forage de 200 m à la place de 2 forages de 100 m mis en série, permet un gain d'en moyenne 1,9 K.

Figure 17 *Influence des changements de diamètre de forage (avec adaptation de l'écartement des sondes), sur l'abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde par rapport à la température moyenne annuelle du sol [ΔT (K)]. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, - Ø 0,040 m, remplissage de sable de quartz ou de bentonite*

On constate qu'en surdimensionnant le diamètre de forage, par rapport au diamètre de sonde, on diminue un peu le Rb, en particulier pour les valeurs du "peak heat load". L'augmentation de température est similaire, quel que soit le type de remplissage.

En faisant passer le diamètre du forage de 4 1/2 pouces à 8 pouces, l'augmentation du ΔT (K) en régime faiblement turbulent est la suivante :

"Base load" :	0.75 K
"Peak heat load" :	2.0 K

C'est bien le critère économique qui sera alors déterminant pour le choix du diamètre.

5. CONCLUSIONS A LA TROISIEME ETAPE DU RAPPORT

La réalisation de la troisième étape du projet a consisté en la réalisation d'une série d'abaques dont le fondement se base sur des données précises, permettant au praticien de dimensionner une sonde en terre de type double_U de façon optimale.

Les paramètres retenus sont les suivants :

- Utilisation d'écarteurs
- Fluide calopoteur : propylèneglycol (33 %)
- Remplissage avec du sable de quartz
- Le nombre de Reynolds doit s'approcher de 2'000 (limite régime laminaire - régime turbulent), car :
 - en régime faiblement turbulent, la résistance de la sonde est environ 50-60 % plus faible qu'en régime laminaire
 - si le nombre de Reynolds dépasse la valeur de 2'000, les pertes de charges dans la sonde, qui augmentent de manière quadratique, deviennent rapidement très élevées
- Le débit adapté au diamètre de sonde, pour un nombre de Reynolds de 2'000 est :
 - 2'370 l/min, pour 0.032 m (\emptyset ext.)
 - 2'970 l/min, pour 0.040 m (\emptyset ext.)
 - 3'720 l/min, pour 0.050 m (\emptyset ext.)
- D'autre part, les ΔT (K) du fluide calopoteur circulant dans deux sondes de 100 mètres disposées en série, dans différentes géométries, est comparé au ΔT (K) d'une seule sonde de 200 mètres.

On constate, par exemple, un gain de 1,9 K entre la disposition de deux forages (de 100 m) éloignés de 5 mètres et un seul forage de 200 m.

Ces paramètres permettent, en passant d'un abaque à l'autre, de définir les températures d'entrée et de sortie de la sonde, en moyenne ("Base load"), ainsi qu'en période extrême ("Peak heat load").

6. CONCLUSIONS FINALES

L'objectif initial du rapport était motivé par les affirmations des promoteurs de la sonde dite GEOHILL, qui affirmaient réaliser un système de piston thermique parfait.

La question à résoudre était donc :

"Peut-on concevoir une sonde terrestre travaillant par échange diffusif en réalisant un système de piston thermique équivalent?".

Partant de cette hypothèse, nous avons alors testé, en utilisant les modèles de l'Université de Lund (S), 3 géométries de sondes pouvant conduire à améliorer la productivité des sondes en terre, en particulier par effet piston.

Les résultats de cette **première étape** sont décrits dans la publication de Constance (septembre 1996).

En résumé, on peut dire que :

- La sonde idéale serait de type annulaire, mais elle est non-réalisable, parce que ses parois sont trop peu conductrices, en raison de leur épaisseur
- La sonde en double_U, pour autant qu'on l'optimise par :
 - la pose de distanceurs,
 - un débit de circulation à la vitesse critique ($Re = 2'000$),
 - l'utilisation d'un remplissage conducteur,
 reste la meilleure technique jusqu'à une profondeur de 200 mètres.
- La sonde multitubulaire est indispensable au-delà de 300 mètres de profondeur. Elle peut être optimisée au même titre que la sonde en double_U.

La **deuxième étape** a consisté à vérifier expérimentalement les valeurs calculées. Les recommandations concernant le choix des sondes ont ainsi pu être confirmées.

La **troisième étape** de l'étude vise à proposer aux planificateurs de sondes en terre, une série d'abiques leur permettant de dimensionner une sonde en double_U sans recourir à un modèle de calcul.

Deux exemples montrent que l'opération est parfaitement possible, malgré certaines simplifications sur les conditions aux limites.

**RECHERCHE DES PARAMETRES PERMETTANT D'ELEVER LA
TEMPERATURE MOYENNE DES FLUIDES CIRCULANT
DANS DES SONDES EN TERRE VERTICALES**

**CONSTRUCTION D'ABAQUES DESTINES AU DIMENSIONNEMENT
D'UNE SONDE EN TERRE OPTIMALE**

Exemples d'application

Exemples d'application

OBJET

Le dossier qui suit est destiné au praticien qui souhaite dimensionner une sonde en terre à partir de documents graphiques et d'abaques, sans recourir à un modèle de calcul.

DEMARCHE RETENUE

La logique de la planification d'un système de chauffage voudrait qu'à partir d'une valeur imposée pour la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, on recherche sa longueur.

Dans la pratique, et parce que la solution au problème est implicite, on doit travailler par approches successives. Il faut donc :

- Définir la géométrie de la sonde
- Calculer les puissances et les quantités d'énergie extraites
- Donner les paramètres à l'environnement de la sonde
- Calculer les températures minimum et moyennes du fluide

Si les températures obtenues ne correspondent pas aux valeurs attendues, on modifie les paramètres d'entrée jusqu'à l'obtention d'un résultat conforme aux prévisions.

Cette démarche est valable tant lorsque l'on utilise des abaques, que lorsqu'on utilise un modèle comme le modèle EED par exemple.

OBJECTIF

Partant des abaques établis dans le cadre de la présente étude, on propose le dimensionnement de sondes en terre en double_U, pour 2 types de bâtiment; à savoir :

- Maison familiale à La Chaux-de-Fonds. PAC électrique pour le chauffage et la préparation d'eau chaude sanitaire. Client exigeant, souhaitant une installation de haute qualité.
- Locatif de 6 logements à Konolfingen. PAC électrique. L'eau chaude est produite par un désurchauffeur en hiver et une installation solaire en été.

EXEMPLE 1 : MAISON FAMILIALE A LA CHAUX-DE-FONDS

Etape N°	Référence Source d'information	Donnée ou paramètre recherché	Valeur 1 ^{ère} version	Valeur 2 ^{ème} version
1	D	Description	PAC électrique pour chauffage et ECS	
2	D	Température extérieure de référence	-9,0°C	
3	D	Calorimétrie de l'immeuble	7,0 kW	
4	D	Nombre d'heures de fonctionnement par an	2'000 h/an	
5	FIG1	Demande annuelle de chaleur du bâtiment	14'000 kWh/an	
6	D	Coefficient de performance moyen souhaité pour la PAC	3,7	
7	FIG2	Energie extraite du terrain	10'200 kWh/an	
8	HYP1	Energie soutirée annuellement par mètre de sonde	80 kWh/m.an	
9	FIG3	Longueur totale de la (des) sonde (s)	130 m	
10	FIG4	Puissance thermique totale d'extraction de chaleur du sol	5,1 kW	
11	10 / 9 FIG5	Puissance thermique unitaire d'extraction de chaleur du sol	40 W/m	

Etape N°	Référence Source d'information	Donnée ou paramètre recherché	Valeur 1 ^{ère} version	Valeur 2 ^{ème} version
12	DG	Nature du terrain	Calcaire	
13	DG	Profondeur maximum de sondage autorisée	200 m	
14	FIG	Diamètre des tubes de la sonde	0,032	
15	FIG12a	Différence de température entre l'entrée et la sortie de la sonde (PAC) pour être en régime turbulent	1,95 K	
16	FIG13	Débit du fluide dans la sonde en double_U	2'370 l/h	
17	FIG13	Perte de charge dans la sonde en double_U	8,4 mCE	
18	DT	Rendement du circulateur	0,50	
19	FIG14	Puissance électrique du circulateur pour vaincre les pertes de charge dans la sonde	110 W	
20	CT	Diamètre de forage	12 cm	
21	CT	Distanceur des sondes (oui/non)	oui	
22	CT	Remplissage de la sonde (sable, bentonite, autre)	sable de quartz	
23	TAB1	Résistance thermique Rb de la sonde	0,051	
24	TAB2	Température moyenne du sol à -10 m	6,9°C	

Etape N°	Référence Source d'information	Donnée ou paramètre recherché	Valeur 1 ^{ère} version	Valeur 2 ^{ème} version
25	FIG15a	Ablissement de la température du fluide dans la sonde par rapport à la température du sol : Base load Peak heat load	-5,0K -9,5K	
26	24 + 25	Température réelle du fluide dans la sonde Base load Peak heat load	1,9K -2,6K	
27	26 +/- 0,5 * 15	Températures d'entrée et de sortie de la sonde Base load : Entrée Sortie Peak heat load : Entrée Sortie	2,9K 0,9K -1,6K -3,6K	
28	16a	Correction éventuelle pour 2 sondes en série		

LEGENDE

D : Données du projet

FIG1 : Résultat obtenu par lecture de la figure 1

HYP1 : Hypothèse sur la valeur de l'énergie à soutirer du sol en fonction des objectifs recherchés. Valeur généralement comprise entre 80 et 120 kWh par an et par mètre de forage. Si l'on souhaite un COP élevé, prendre une valeur basse. Si le terrain est très conducteur (granite), on peut dépasser 100 kWh/ m.an

DG Donnée géologique à obtenir auprès d'un géologue ou de l'administration

DT Donnée technique d'un fournisseur de matériel

CT Choix technique laissé à l'appréciation du concepteur de la sonde. Préférer évidemment les choix conduisant à de bonnes performances

EXEMPLE 2 : LOGEMENTS A KONOLFINGEN

Etape N°	Référence Source d'information	Donnée ou paramètre recherché	Valeur 1 ^{ère} version	Valeur 2 ^{ème} version
1	D	Description	PAC électrique	
2	D	Température extérieure de référence	-7,0°C	
3	D	Calorimétrie de l'immeuble	23 kW	
4	D	Nombre d'heures de fonctionnement par an	1'600 h/an	
5	FIG1	Demande annuelle de chaleur du bâtiment	37'000 kWh/an	
6	D	Coefficient de performance moyen souhaité pour la PAC	3,2	
7	FIG2	Energie extraite du terrain	25'300 kWh/an	
8	HYP1	Energie soutirée annuellement par mètre de sonde	100 kWh/m an	
9	FIG3	Longueur totale de la (des) sonde (s)	250 m	
10	FIG4	Puissance thermique totale d'extraction de chaleur du sol	17.2 kW	
11	10 / 9 FIG5	Puissance thermique unitaire d'extraction de chaleur du sol	68 W/m	

Etape N°	Référence Source d'information	Donnée ou paramètre recherché	Valeur 1 ^{ère} version	Valeur 2 ^{ème} version
12	DG	Nature du terrain	Molasse	
13	DG	Profondeur maximum de sondage autorisée	250 m	250 m
14	FIG	Diamètre des tubes de la sonde	0,04	0.05
15	FIG12a	Différence de température entre l'entrée et la sortie de la sonde (PAC) pour être en régime turbulent	5,2 K	4,2 K
16	FIG13	Débit du fluide dans la sonde en double_U	2'970 l/h	3'720 l/h
17	FIG13	Perte de charge dans la sonde en double_U	5,8 mCE	4.6 mCE
18	DT	Rendement du circulateur	0,50	0,50
19	FIG14	Puissance électrique du circulateur pour vaincre les pertes de charge dans la sonde	97 W	95 W
20	CT	Diamètre de forage	12 cm	15 cm
21	CT	Distanceur des sondes (oui/non)	oui	oui
22	CT	Remplissage de la sonde (sable, bentonite, autre)	sable de quartz	sable de quartz
23	TAB1	Résistance thermique Rb de la sonde	0,054	0,054
24	TAB2	Température moyenne du sol à -10 m	8,8°C	8,8°C

Etape N°	Référence Source d'information	Donnée ou paramètre recherché	Valeur 1 ^{ère} version	Valeur 2 ^{ème} version
25	FIG15a	Ablissement de la température du fluide dans la sonde par rapport à la température du sol : Base load Peak heat load	-9,2K -16,3K	
26	24 + 25	Température réelle du fluide dans la sonde Base load Peak heat load	-0,4K -7,5K	
27	26 +/- 0.5 * 15	Températures d'entrée et de sortie de la sonde Base load : Entrée Sortie Peak heat load : Entrée Sortie	2,2K -3,0K -4,9K -10,1K	
28	16 d	Correction éventuelle pour 2 sondes en série		

Figure 1 : Demande annuelle de chaleur du bâtiment en fonction de la puissance thermique de la PAC et de son nombre d'heures de fonctionnement

Fonctionnement de la PAC en heures/an :

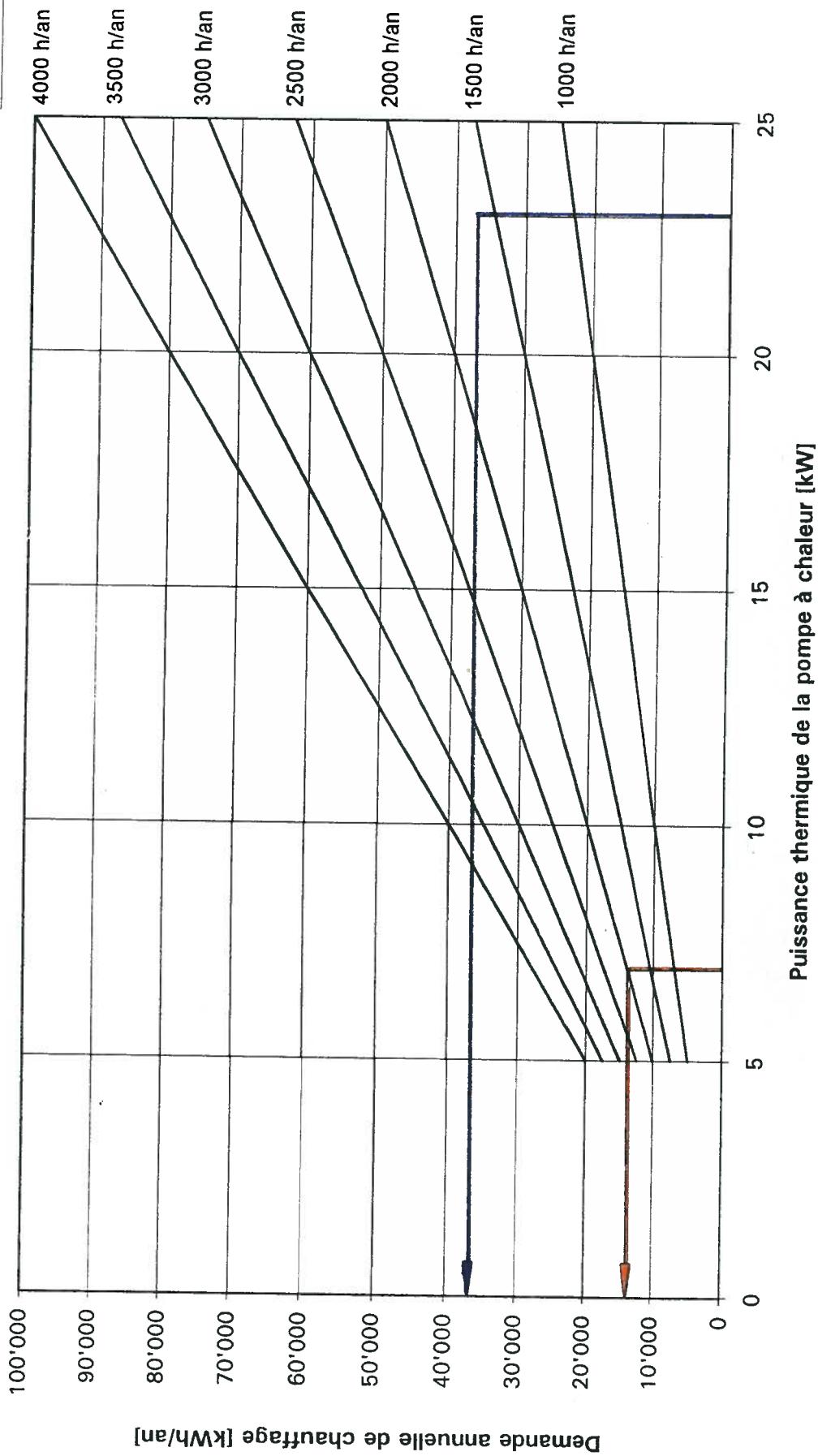


Figure 2 : Energies extraites du terrain, en fonction de la demande annuelle de chauffage,
pour différents COP de la pompe à chaleur

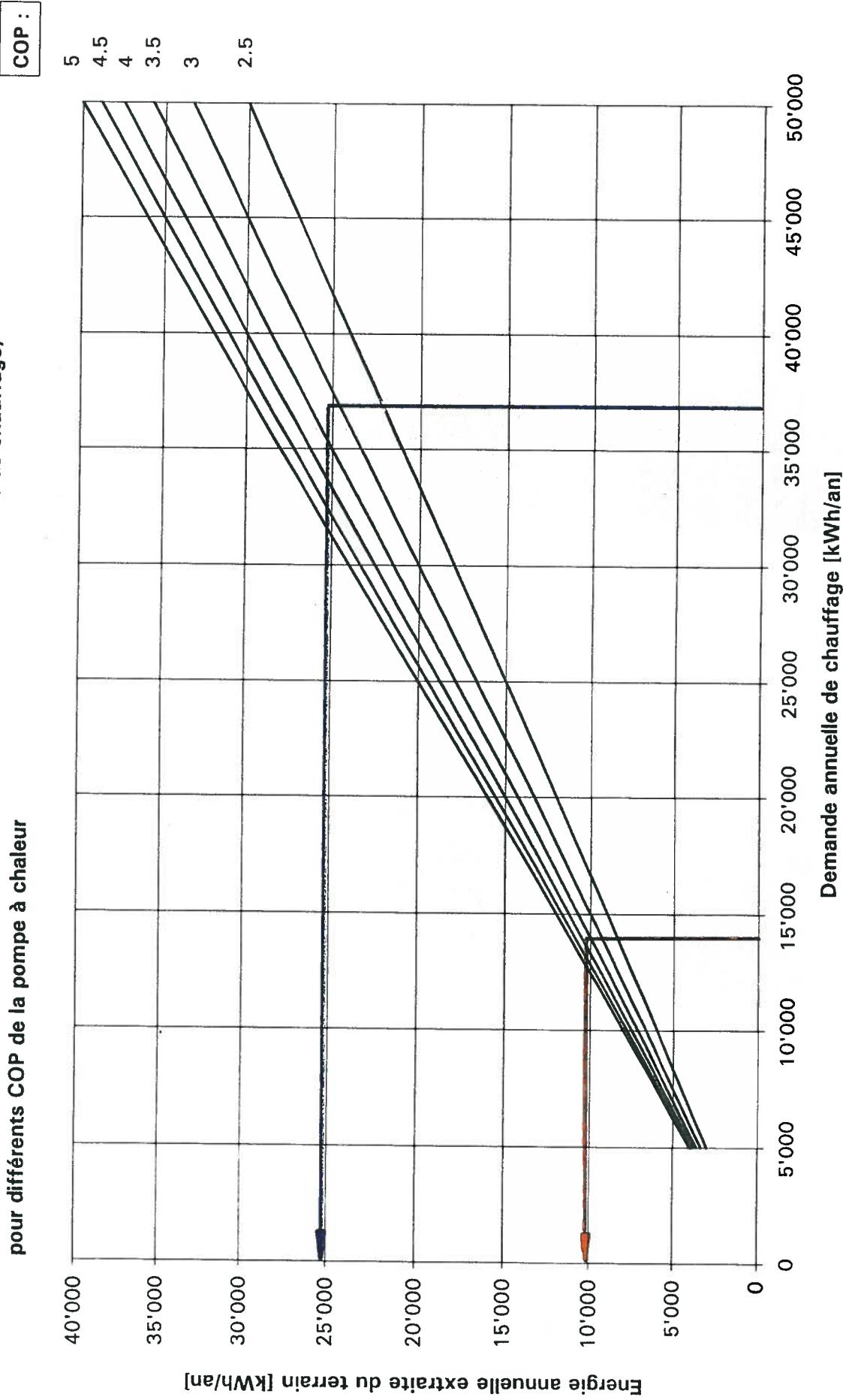


Figure 3 : Longueur totale de la sonde géothermique à installer, en fonction de l'énergie annuelle soutirée par mètre de sonde

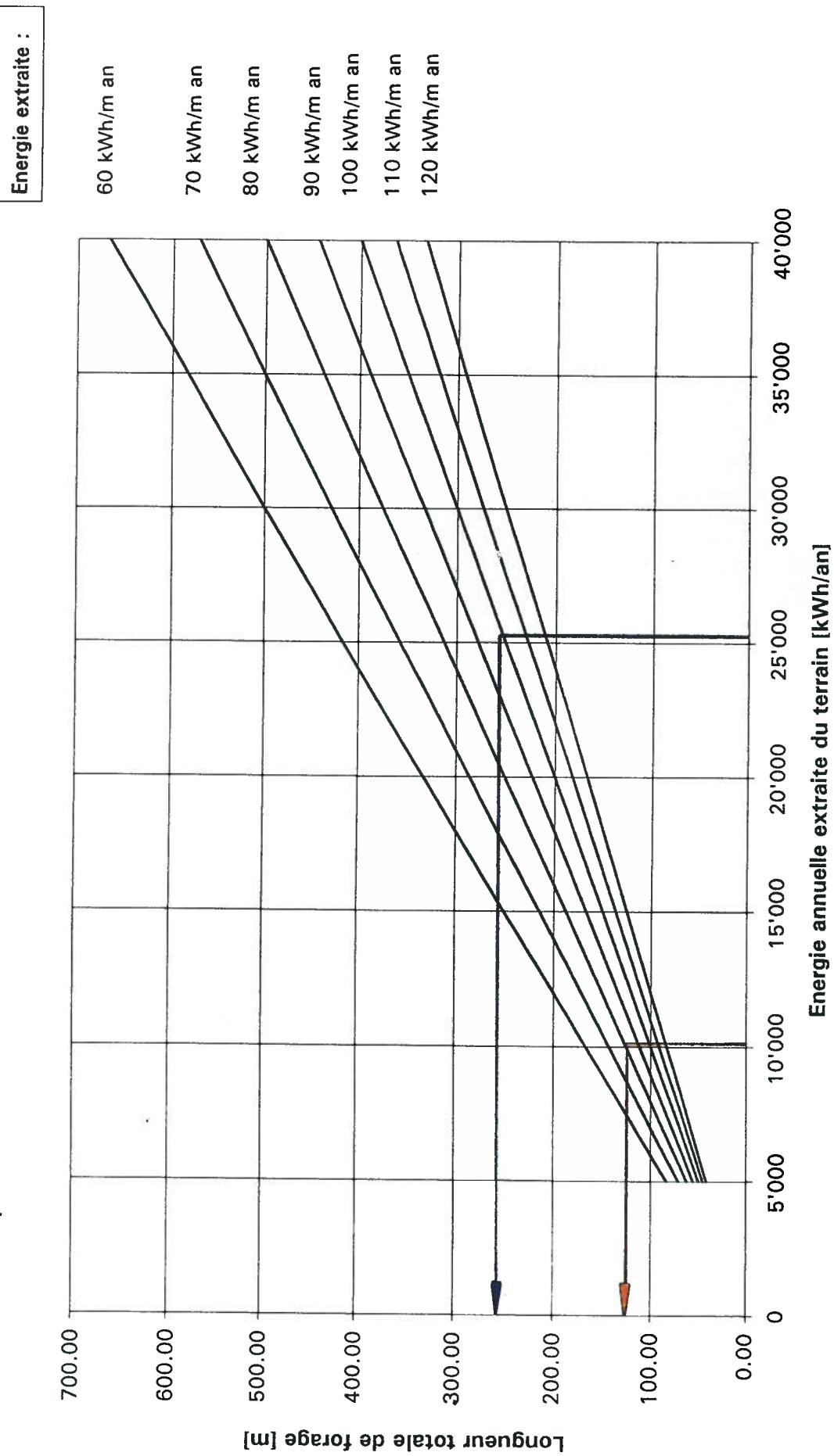


Figure 4 : Puissance d'extraction thermique dans le terrain, en fonction de la puissance thermique de la PAC et du COP de la PAC :

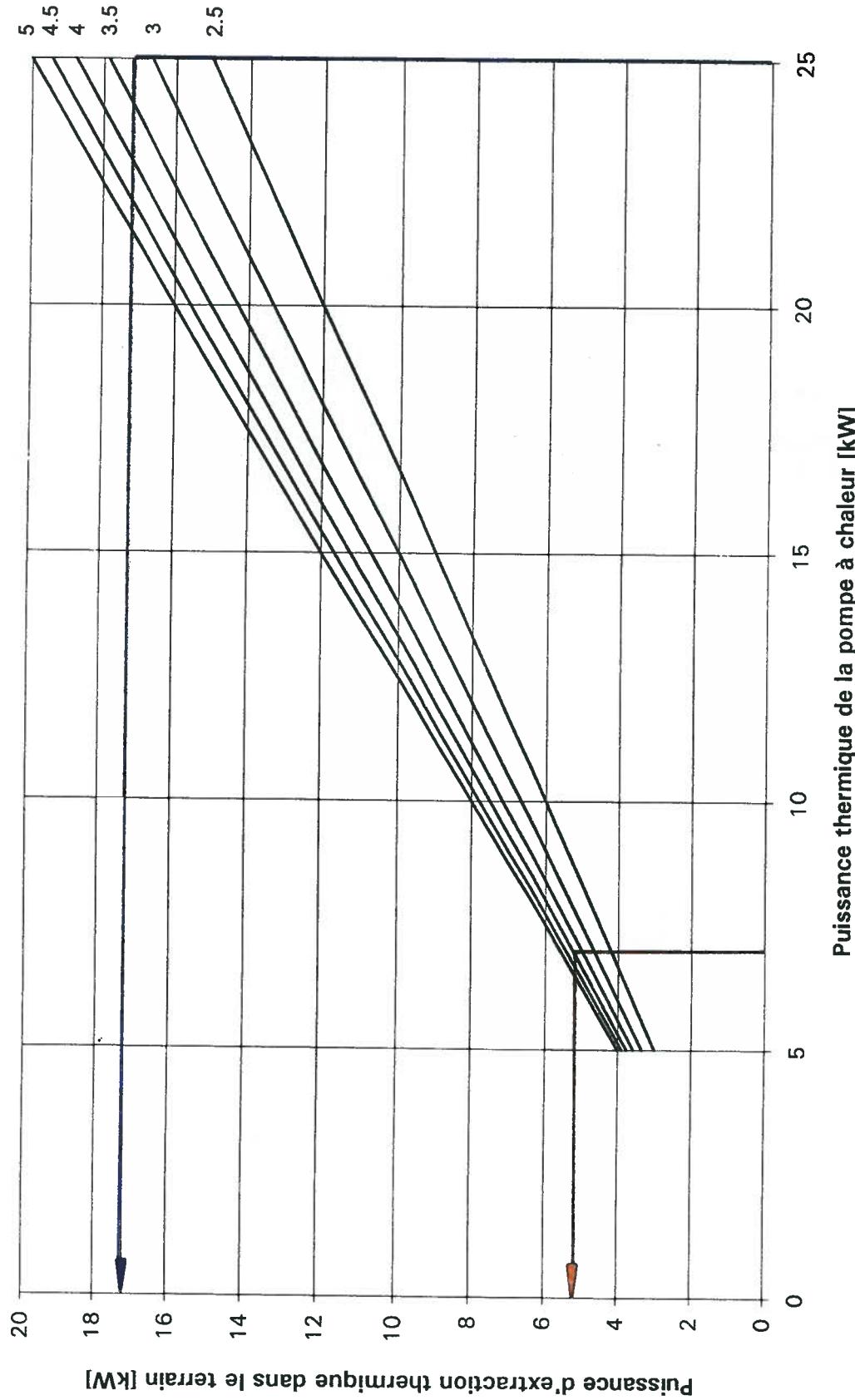


Figure 5 : Puissance extraite par mètre de forage, en fonction de la longueur de forage et de la puissance d'extraction thermique dans le terrain.

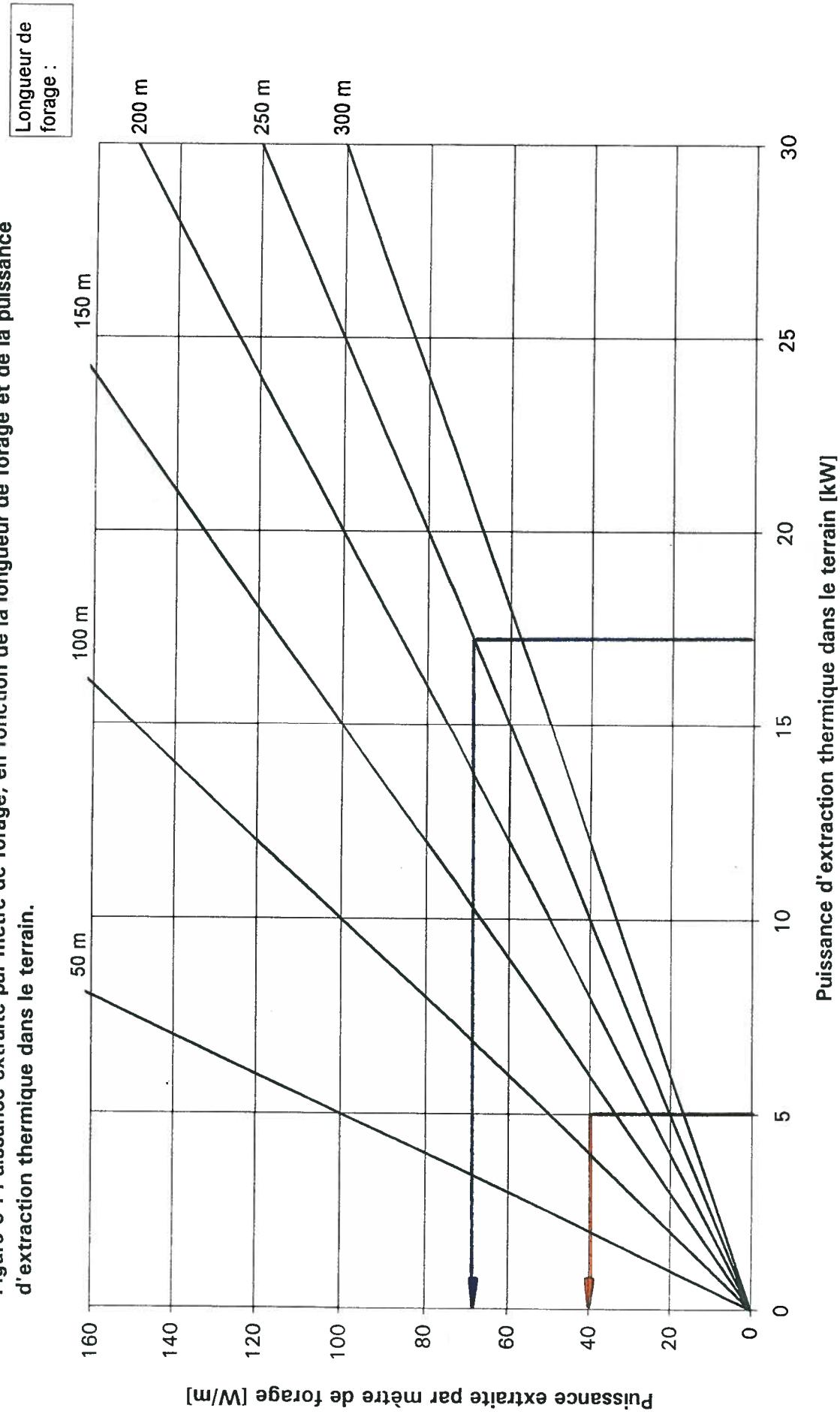


Figure 12a : Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde 2_U de 0.032 m.
 Détermination du ΔT (entrée-sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

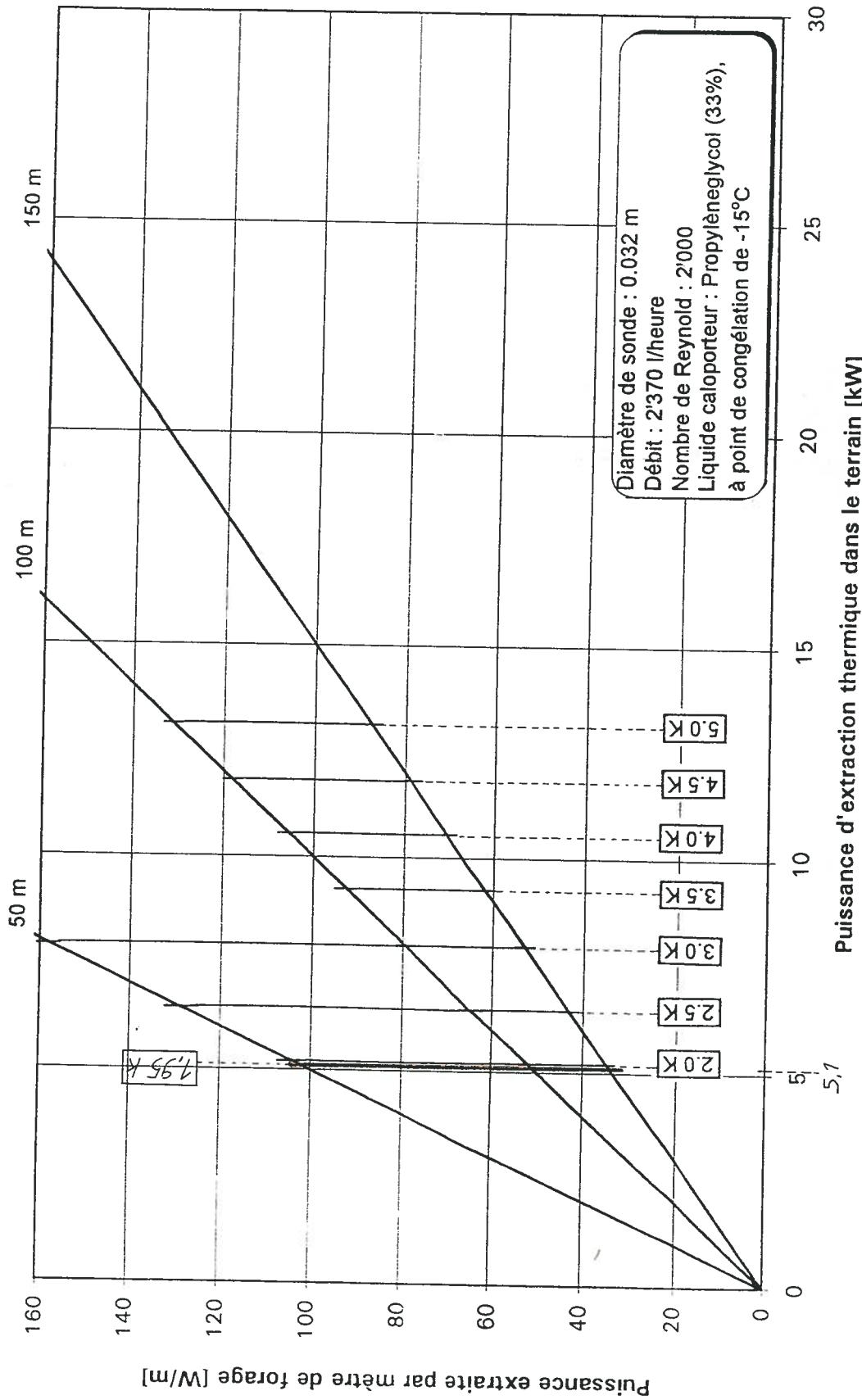


Figure 12b : Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde 2U de 0.04 m .
Détermination du ΔT (entrée-sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

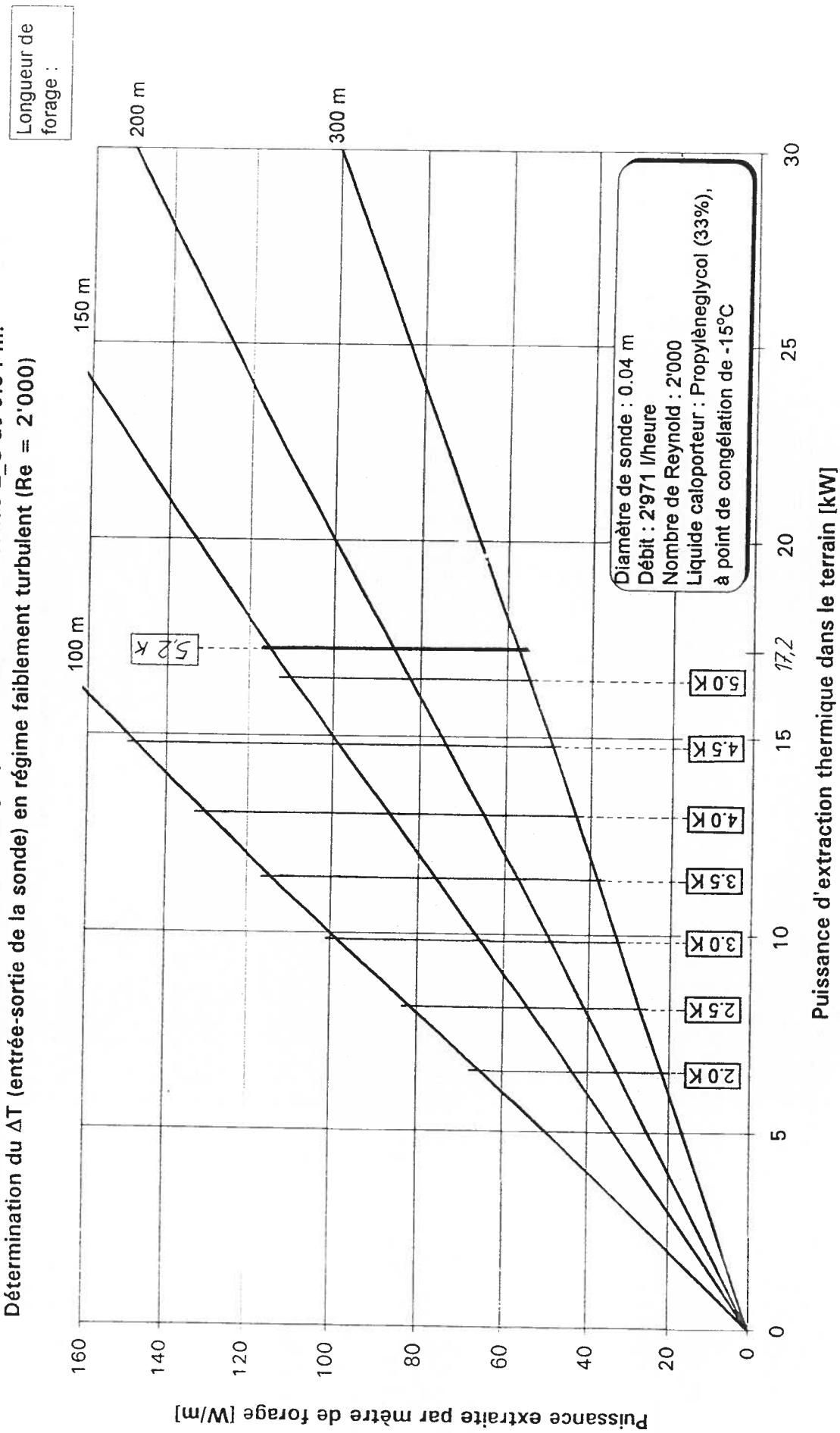


Figure 12c : Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde 2_U de 0.05 m.
 Détermination du ΔT (entrée-sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

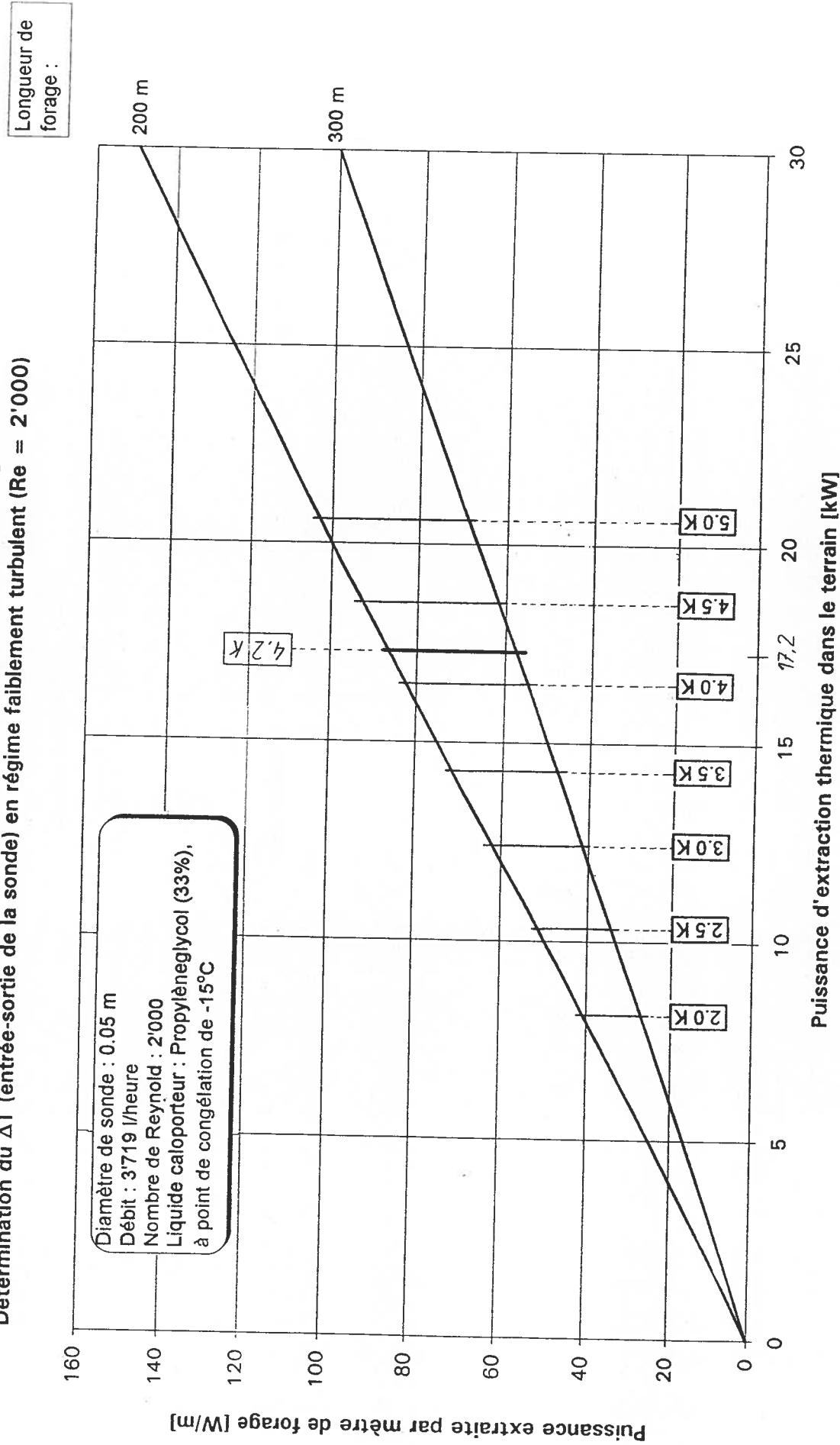
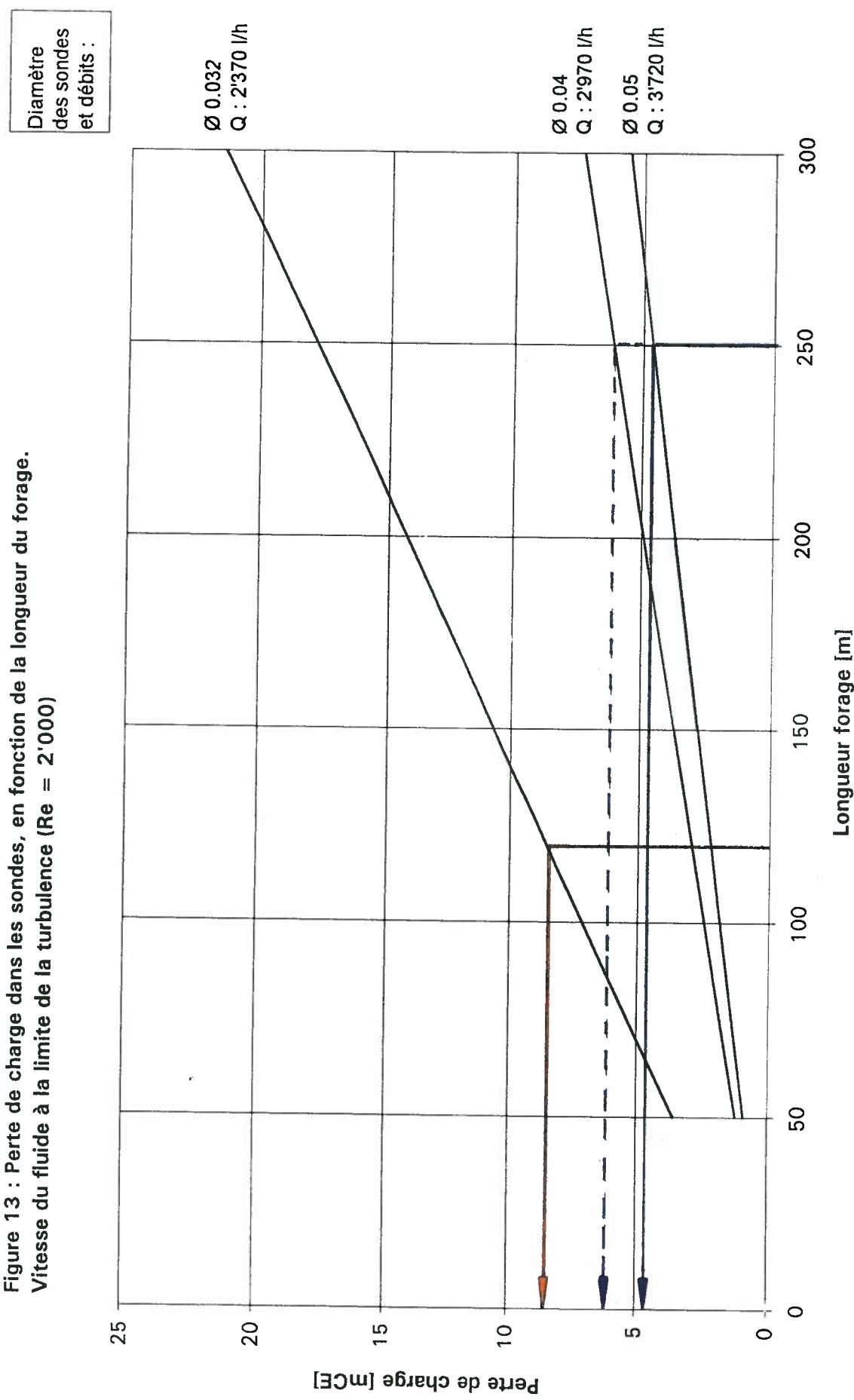


Figure 13 : Perte de charge dans les sondes, en fonction de la longueur du forage.
Vitesse du fluide à la limite de la turbulence ($Re = 2'000$)



Q

Figure 14a : Puissance du circulateur, en fonction des pertes de charge et du rendement.
Diamètre de sonde : 0.032 m, régime faiblement turbulent (Re : 2'000)

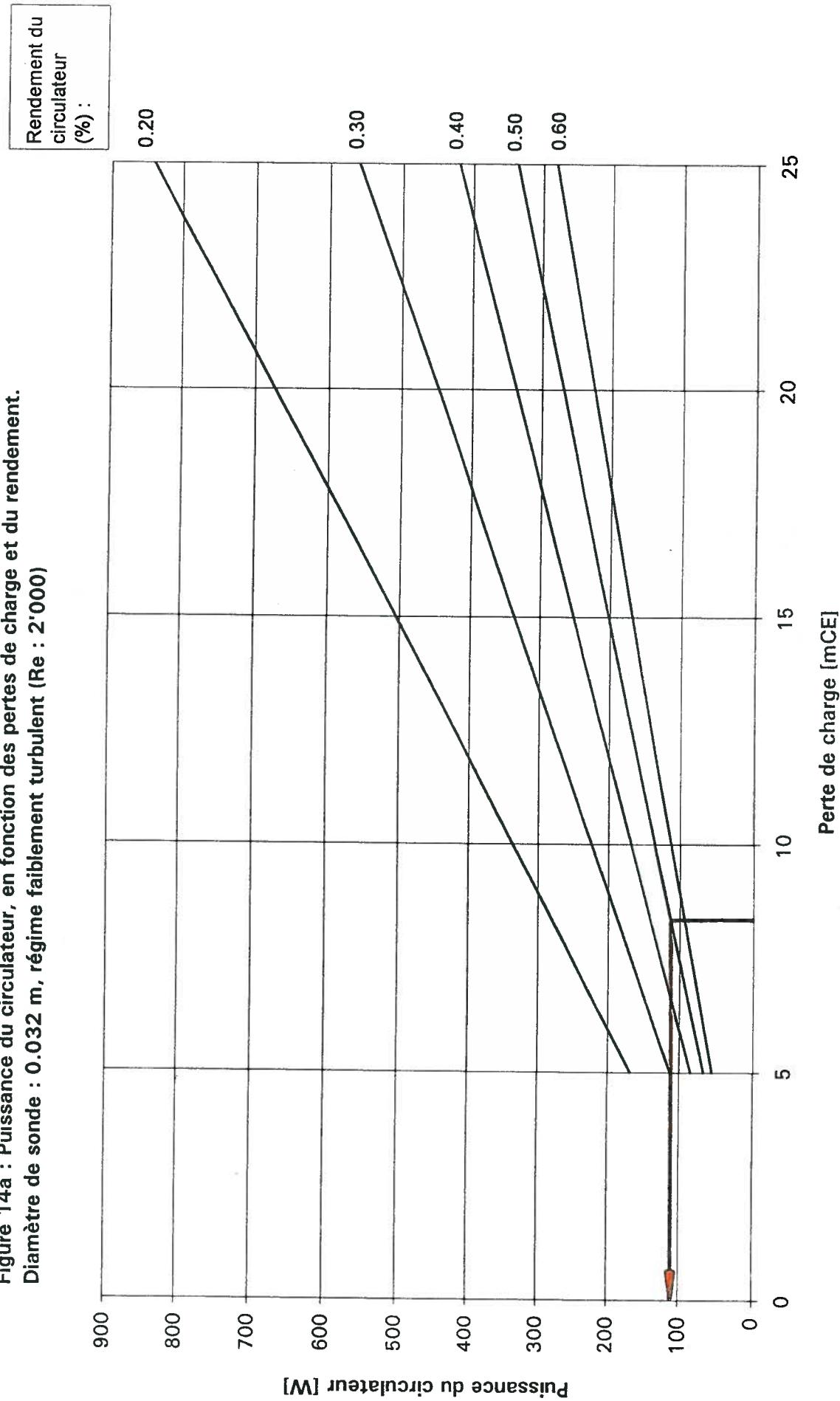


Figure 14b : Puissance du circulateur, en fonction des pertes de charge et du rendement.
 Diamètre de sonde : 0.04 m, régime faiblement turbulent ($Re : 2'000$)

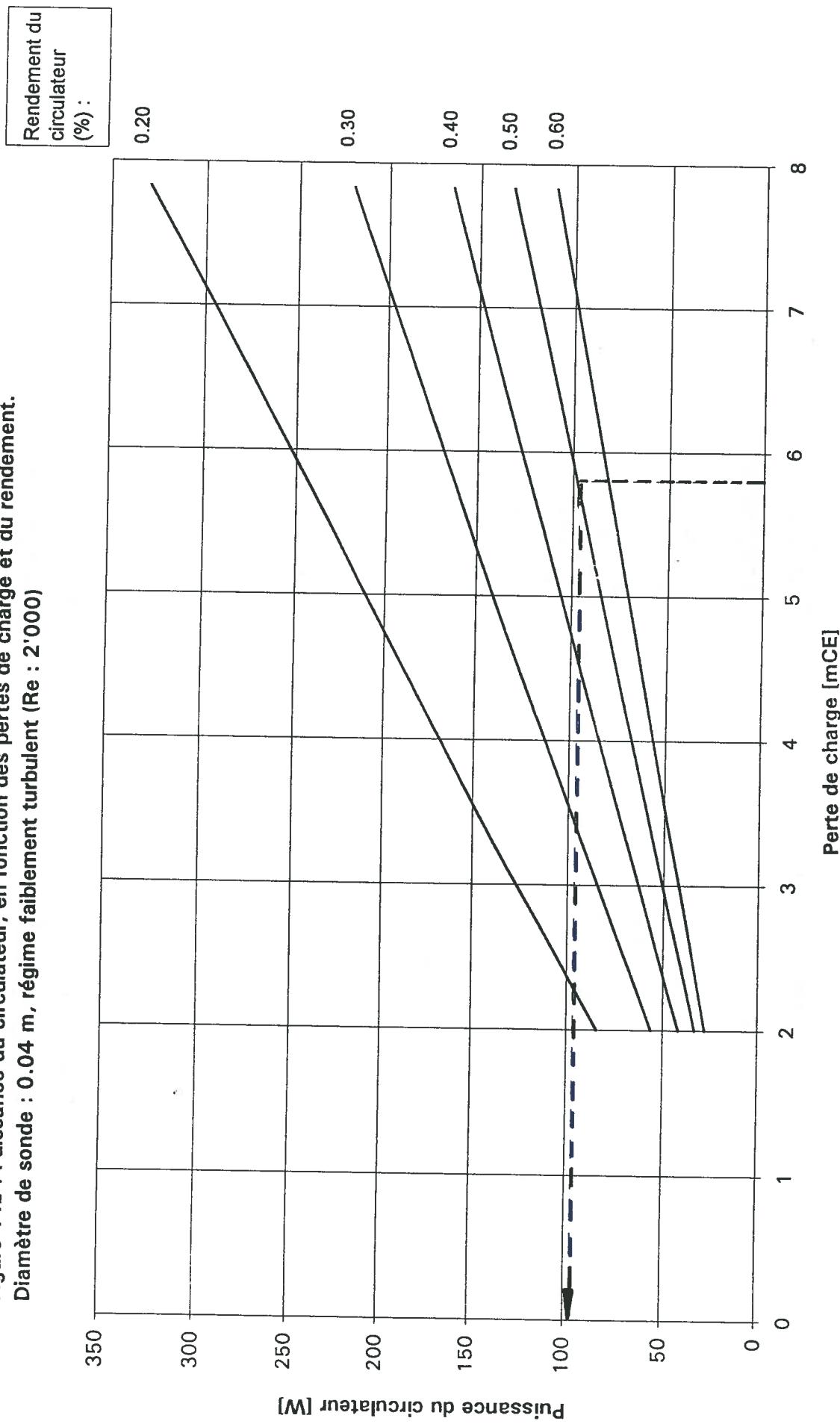


Figure 14c : Puissance du circulateur, en fonction des pertes de charge et du rendement.
Diamètre de sonde : 0.05 m, régime faiblement turbulent ($Re : 2'000$)

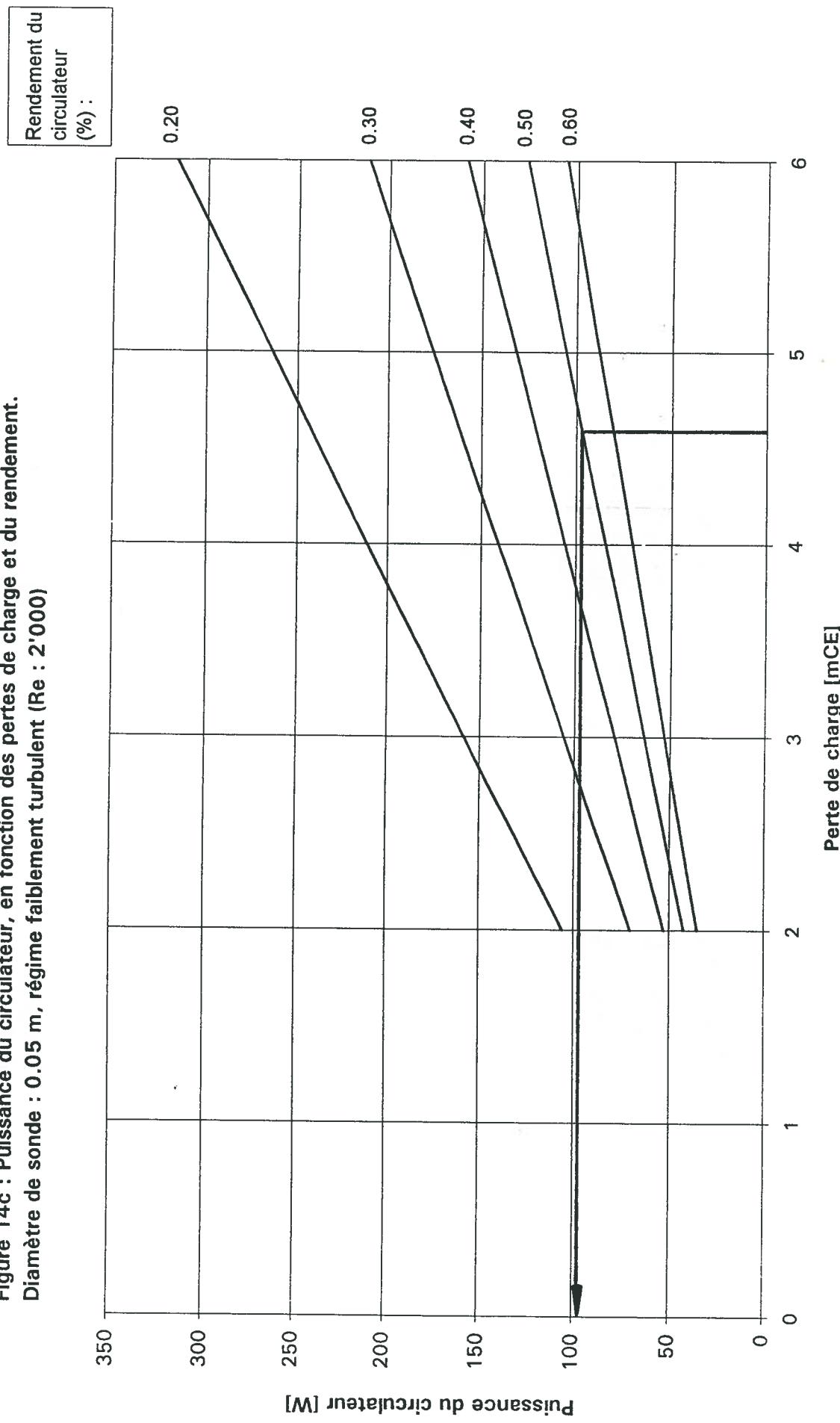


Figure 15a : Ablissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol.
 Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, en terrain calcaire (2.8 W/m.K).

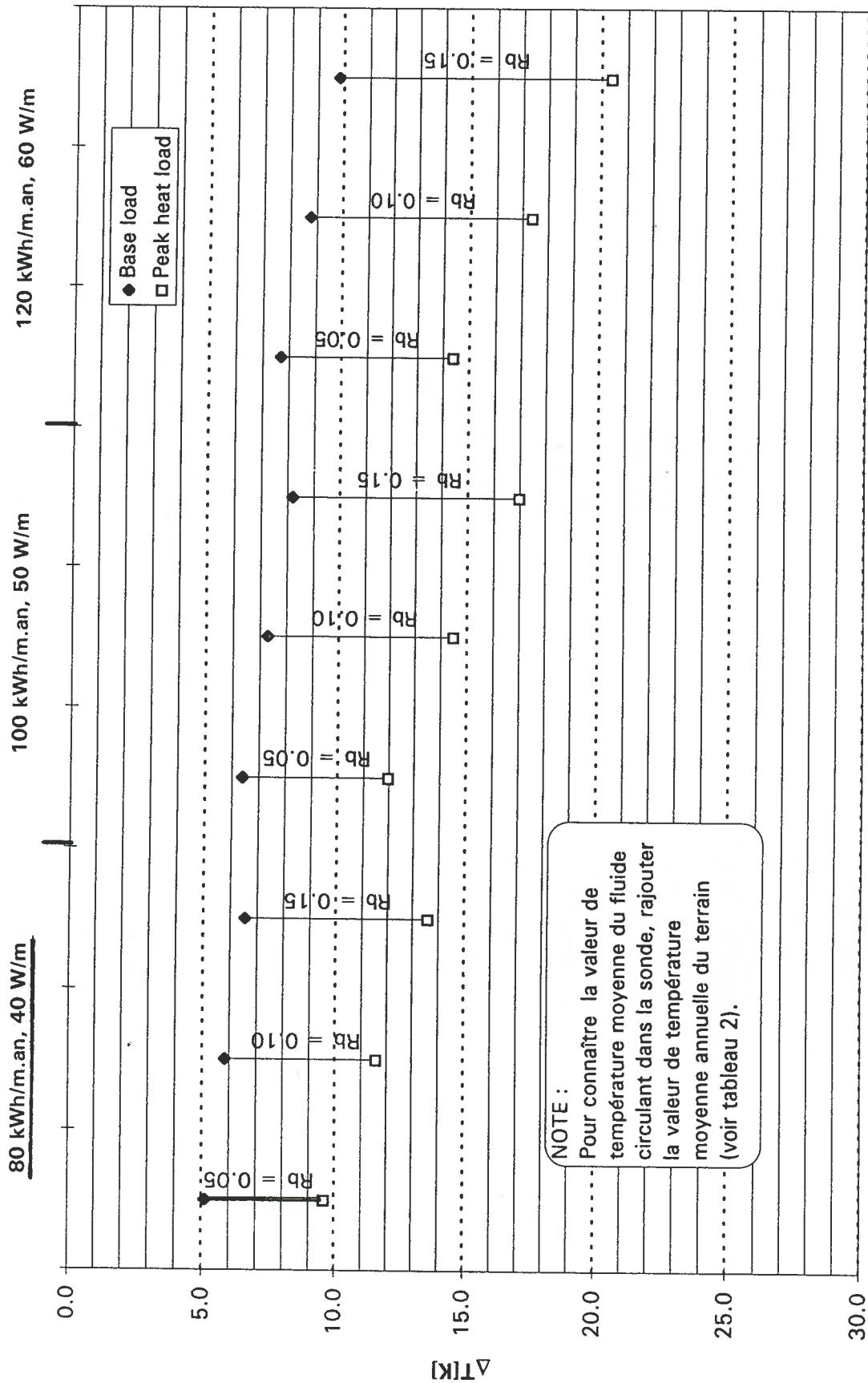
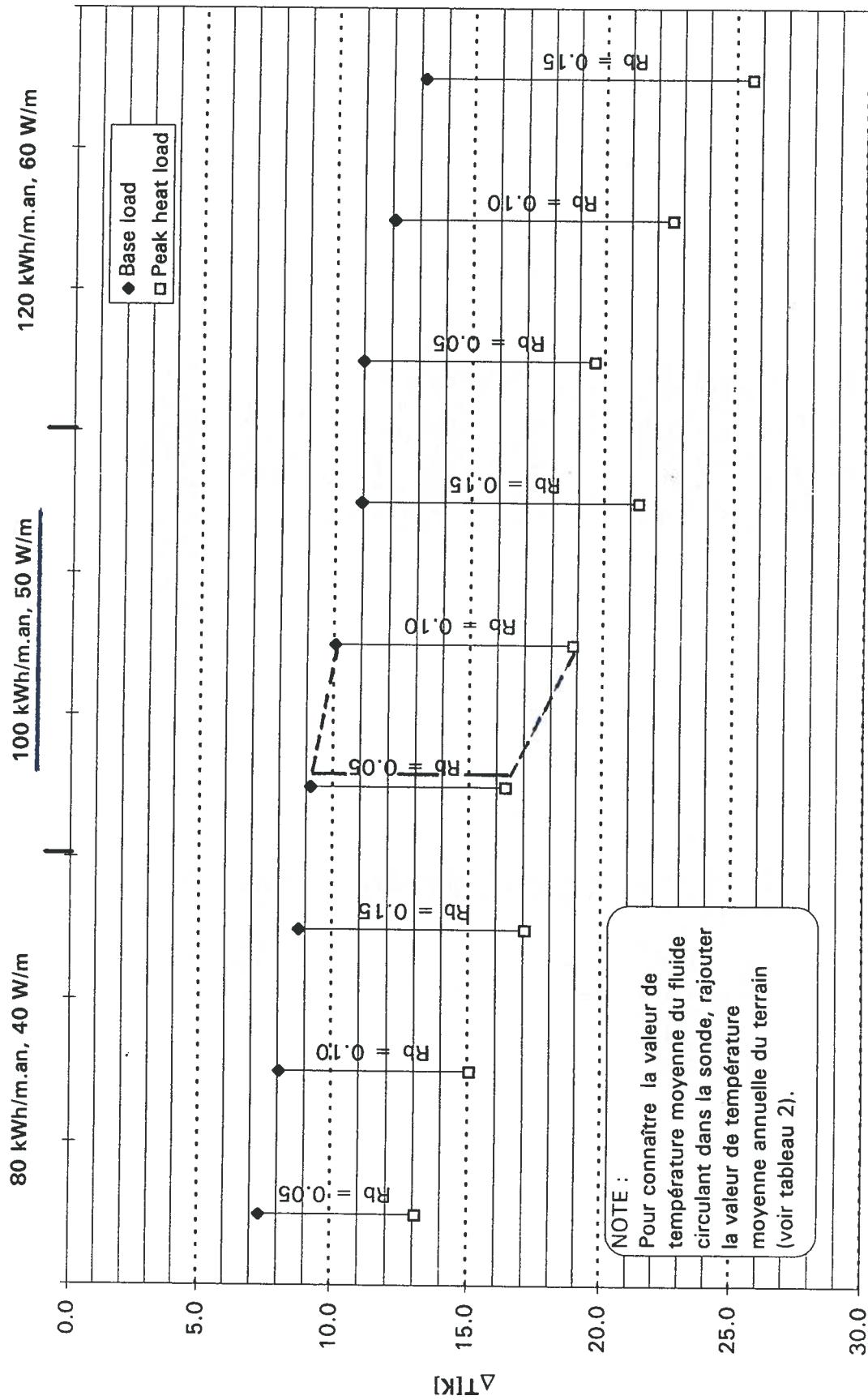


Figure 15b : Ablissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol.
 Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, en terrain molassique (1.8 W/m.K).



14

**RECHERCHE DES PARAMETRES PERMETTANT D'ELEVER LA
TEMPERATURE MOYENNE DES FLUIDES CIRCULANT
DANS DES SONDES EN TERRE VERTICALES**

**CONSTRUCTION D'ABAQUES DESTINES AU DIMENSIONNEMENT
D'UNE SONDE EN TERRE OPTIMALE**

Tableaux

Tableau 1 Valeurs de la résistance Rb d'une sonde double_U, calculées en fonction du diamètre de sonde, du type de remplissage et du régime

Conditions : Diamètre du forage, 12 cm, pour \varnothing 0.032 m et 0.04 m et
15 cm, pour \varnothing 0.05 m
Présence de distanceurs entre les tubes

\varnothing de sonde [mm]	Remplissage	Turbulent	Laminaire
		Re = 2'000 Rb	Re < 2'000 Rb
0.032	Sable	0.051	0.096
0.032	Bentonite	0.086	0.138
0.040	Sable	0.054	0.104
0.040	Bentonite	0.086	0.146
0.050	Sable	0.053	0.103
0.050	Bentonite	0.085	0.144

Note : La modification du diamètre du forage est sans grande conséquence sur le Rb (voir figures 17a et 17 b).

Tableau 2 Température moyenne du terrain calculée pour quatre régions représentatives.

Conditions : Températures calculées à -10 m de profondeur, stables durant l'année

Lieu	Région	Température °C
La Chaux-de Fonds	Jura	6.9
Berne	Plateau	8.8
Lugano	Sud des Alpes	12
Davos	Alpes	3.3

Formule utilisée lors de la détermination de la température du sol en fonction du temps et de la profondeur. (Source : D 025)

$$T(x,t) = T_m + \frac{A}{2} \cdot e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\tau \frac{\lambda}{\rho c}}}} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau} - x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\tau \frac{\lambda}{\rho c}}}\right)$$

L'amplitude de la température à la profondeur x est :

$$A = e^{-x \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{\rho c \tau}}}$$

et la vitesse de transmission des ondes est :

$$V_w = 2 \cdot \sqrt{\pi \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \frac{1}{\tau}}$$

avec :

- $T(x,t)$: température à la profondeur, au temps t
- T_m : température moyenne de l'air
- A : l'amplitude de la température à la surface du sol
- t : le temps [s]
- τ : la période (24 heures, 1 année) exprimée en secondes
- λ : la conductivité thermique du terrain [W/m.K]
- ρc : la capacité calorifique volumique du terrain [J/m³.K]
- $\lambda/\rho c$: la diffusivité thermique du terrain [m²/s]

77

**RECHERCHE DES PARAMETRES PERMETTANT D'ELEVER LA
TEMPERATURE MOYENNE DES FLUIDES CIRCULANT
DANS DES SONDES EN TERRE VERTICALES**

**CONSTRUCTION D'ABAQUES DESTINES AU DIMENSIONNEMENT
D'UNE SONDE EN TERRE OPTIMALE**

Figures

Figure 1 : Demande annuelle de chaleur du bâtiment en fonction de la puissance thermique de la PAC et de son nombre d'heures de fonctionnement

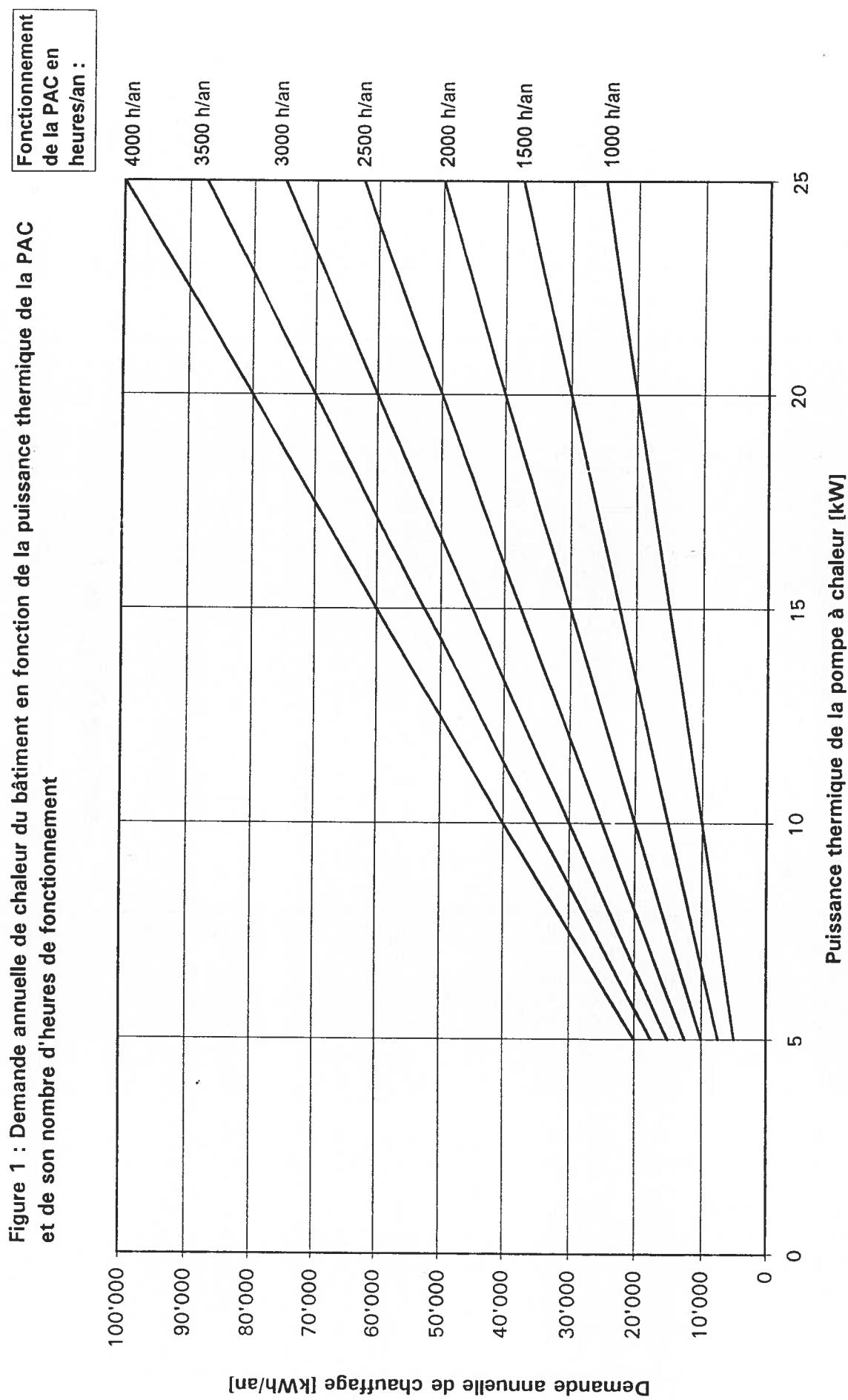


Figure 2 : Energies extraites du terrain, en fonction de la demande annuelle de chauffage,
pour différents COP de la pompe à chaleur

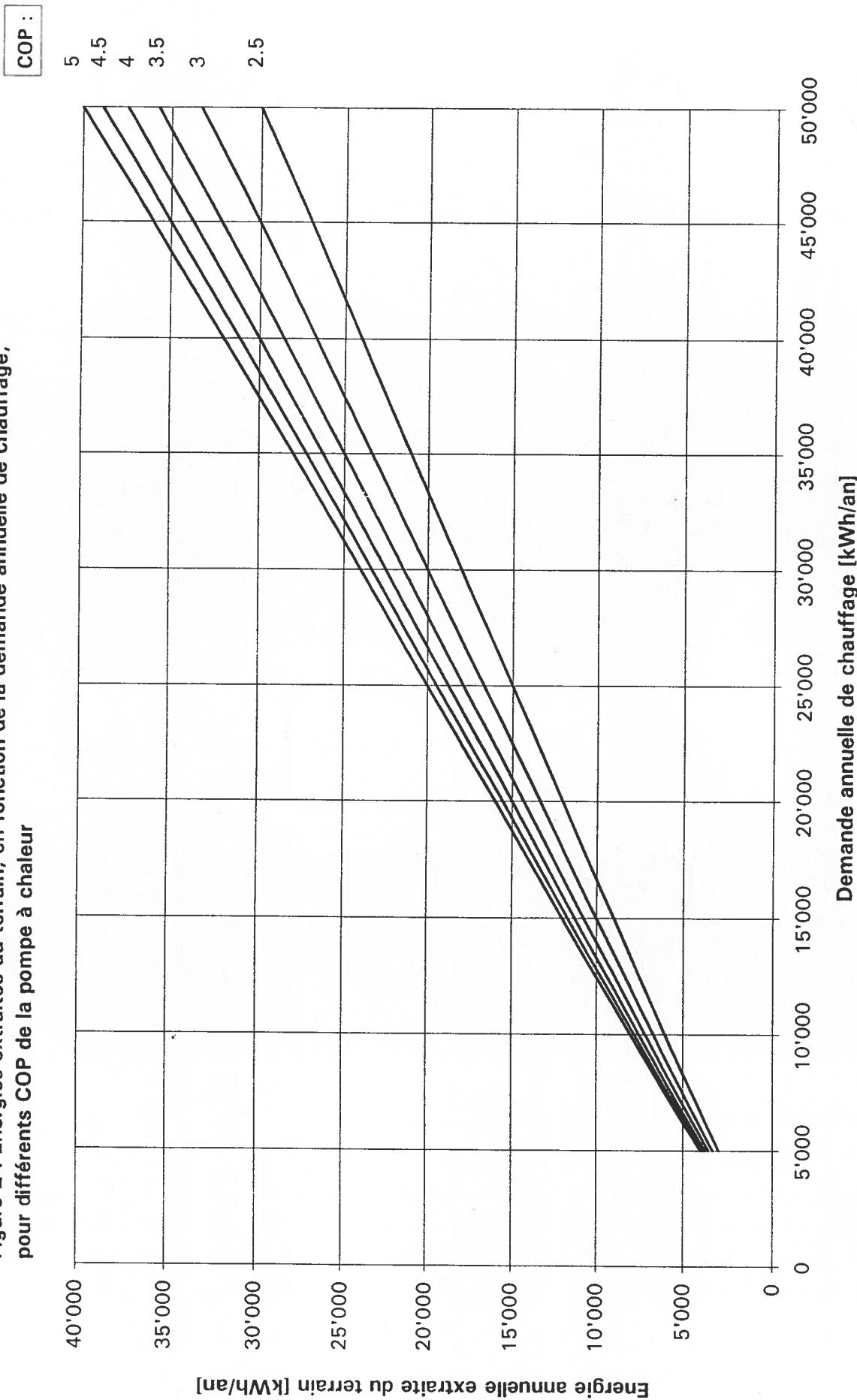


Figure 3 : Longueur totale de la sonde géothermique à installer, en fonction de l'énergie annuelle soutirée par mètre de sonde

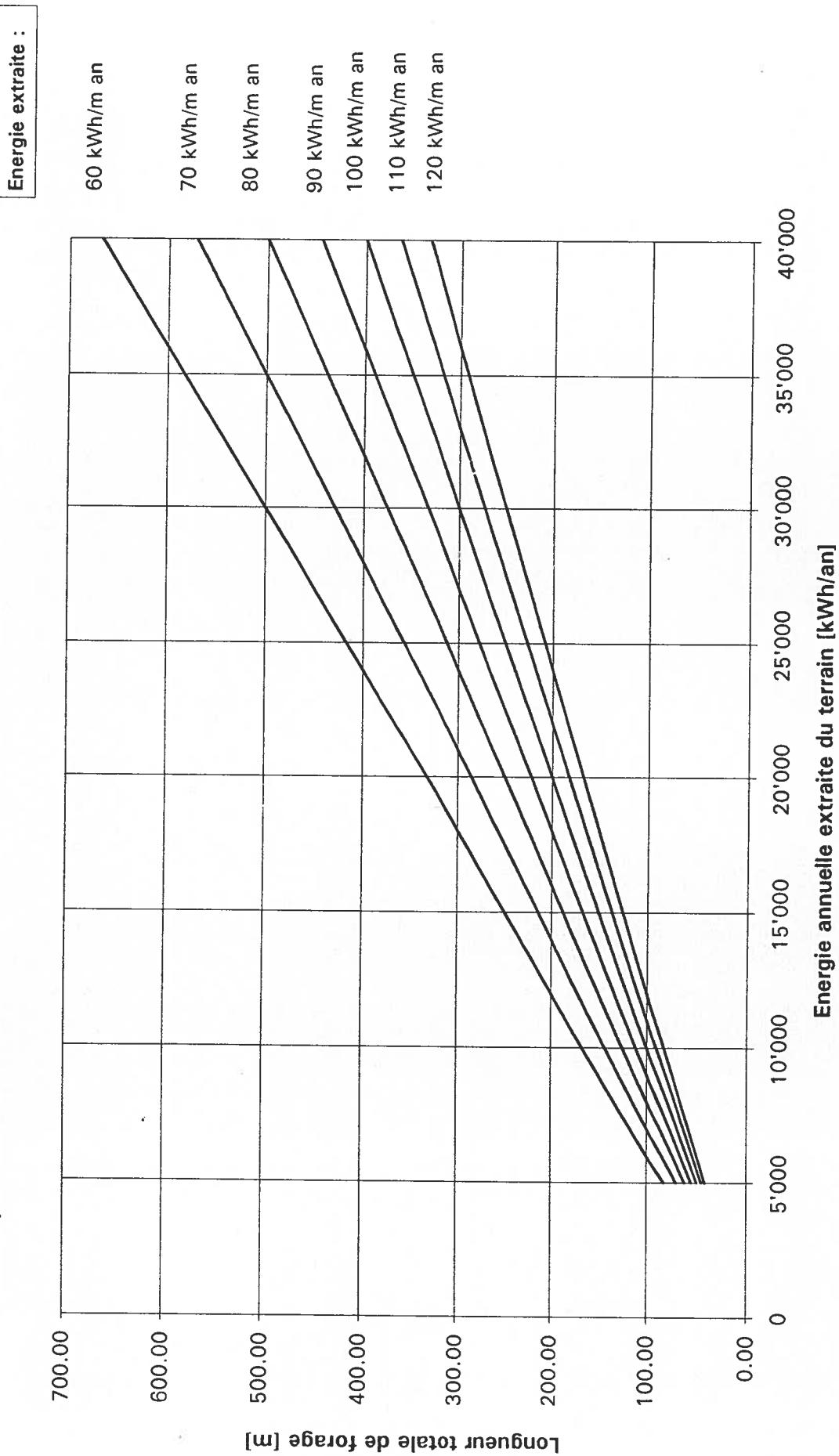


Figure 4 : Puissance d'extraction thermique dans le terrain, en fonction de la puissance thermique de la PAC et du COP de la PAC :

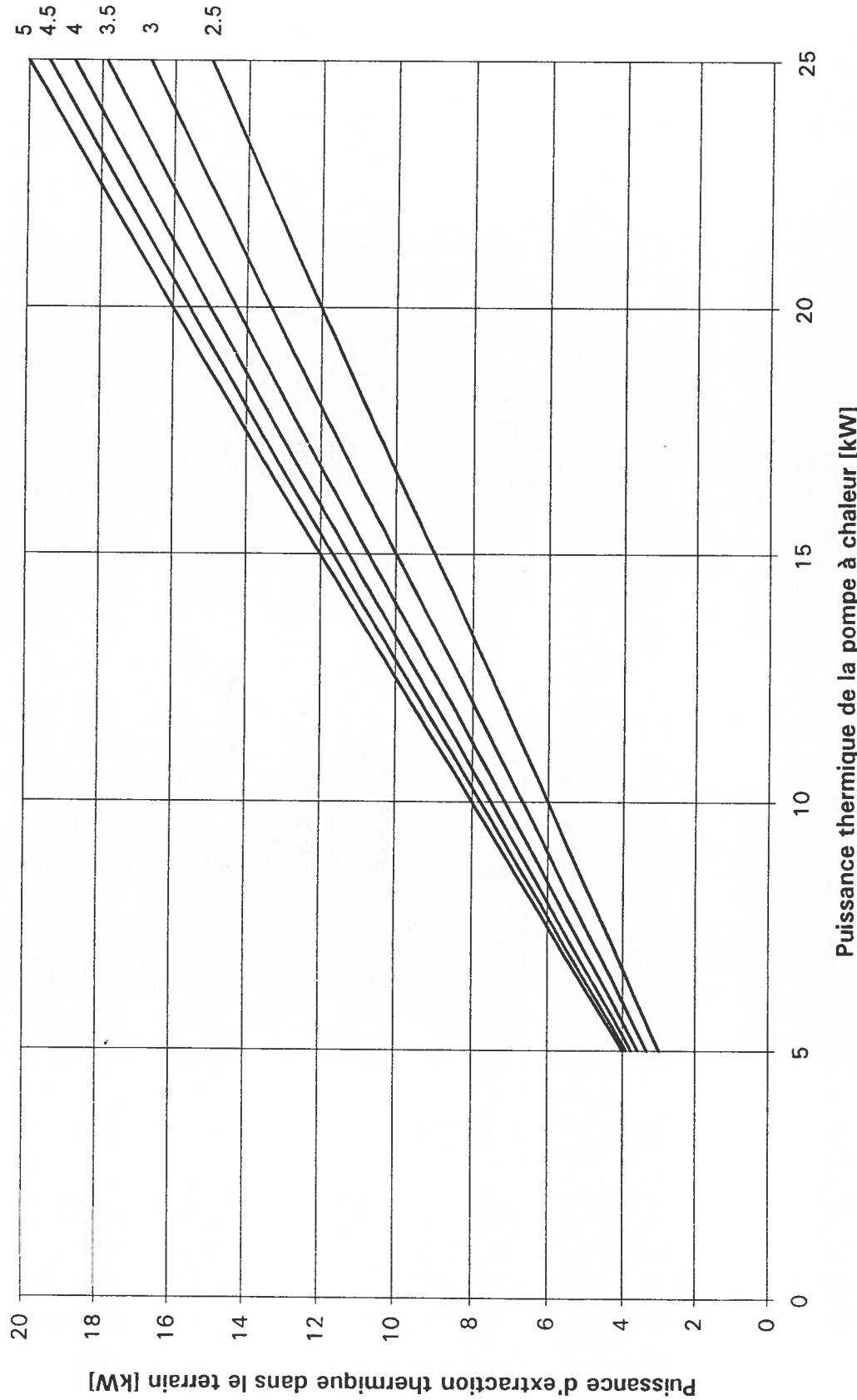


Figure 5 : Puissance extraite par mètre de forage, en fonction de la longueur de forage et de la puissance d'extraction thermique dans le terrain.

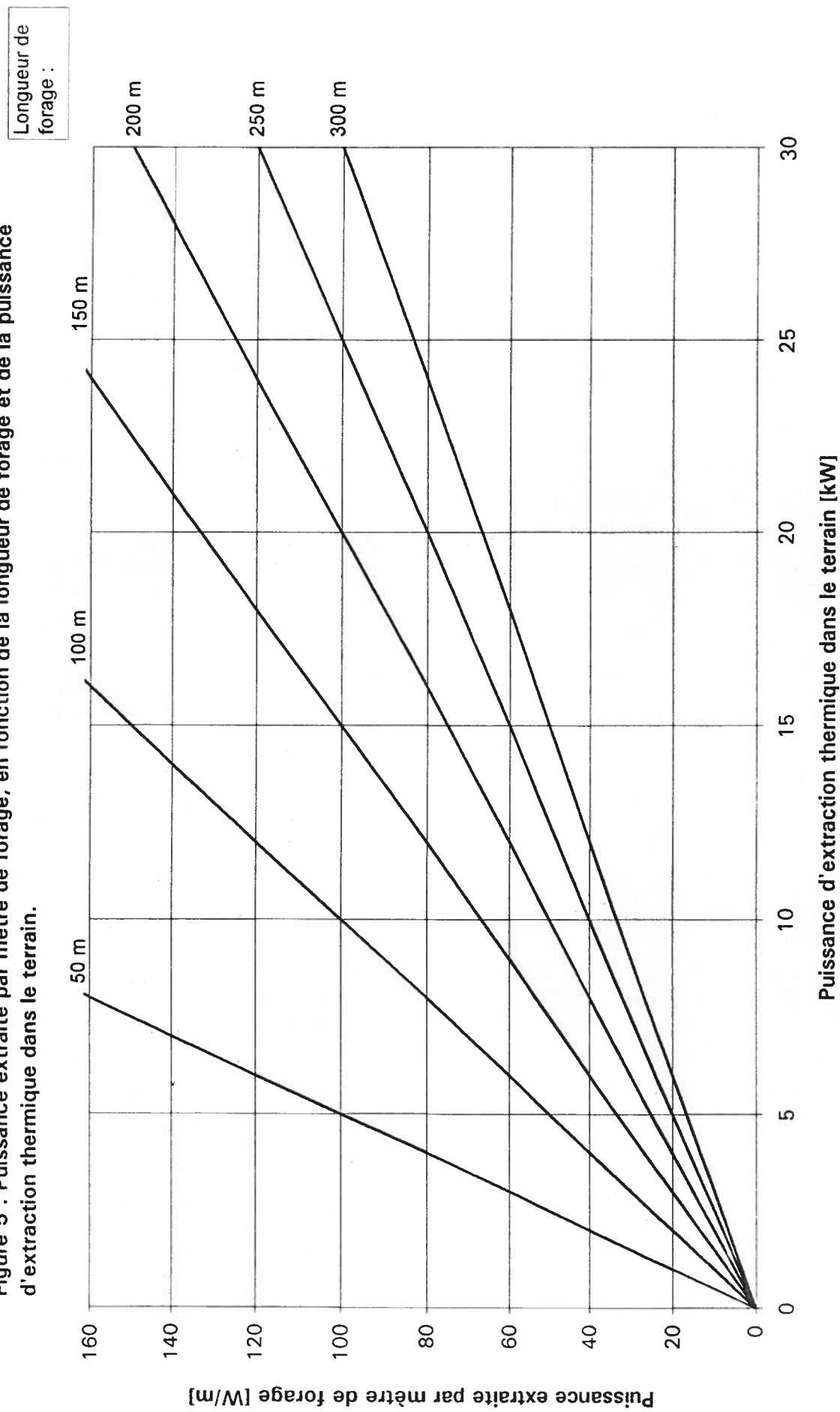


Figure 6 : Nombre de Reynolds en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$

Longueur de forage et diamètre de sonde :

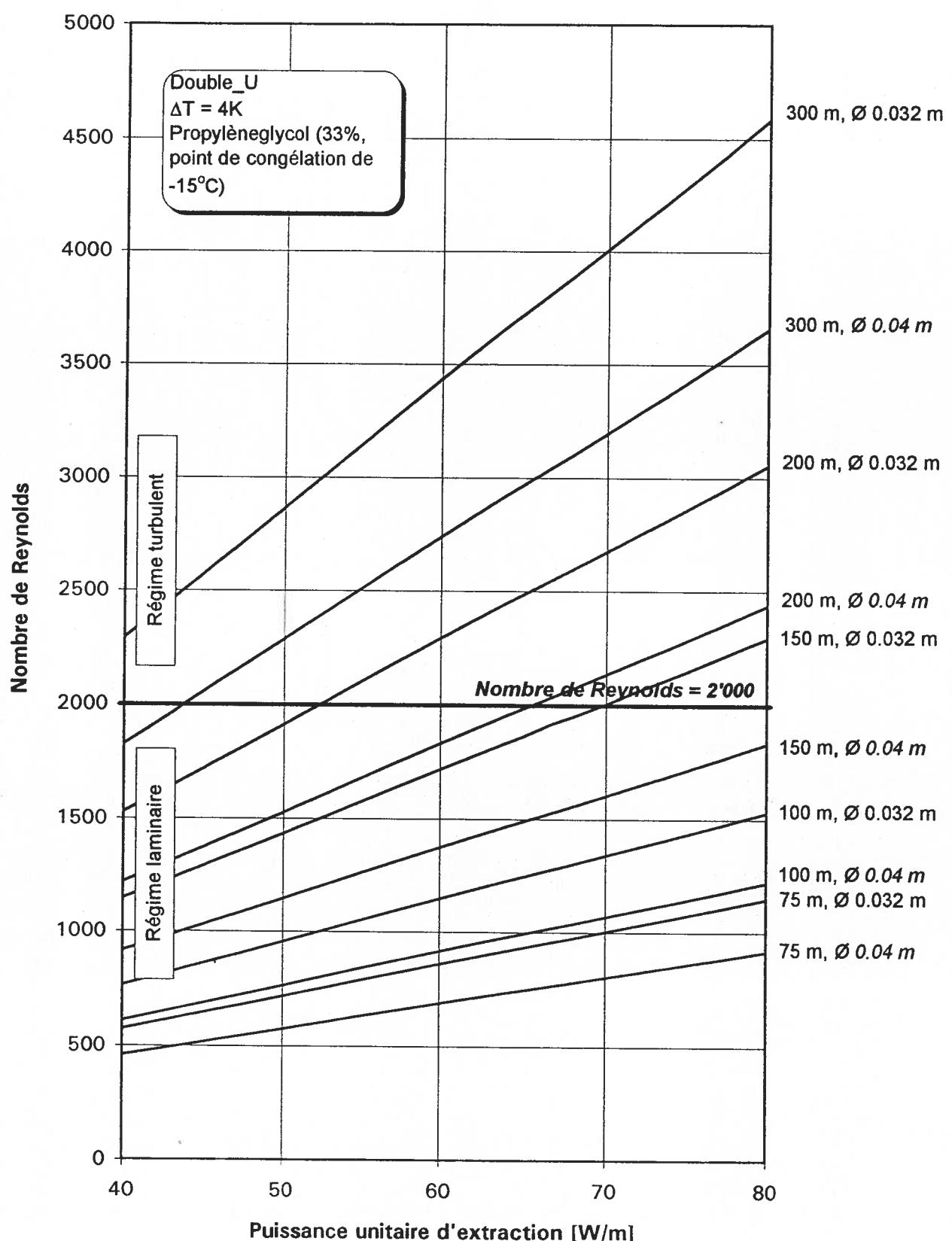


Figure 7 : Perte de charge en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$

Longueur de forage et diamètre de sonde :

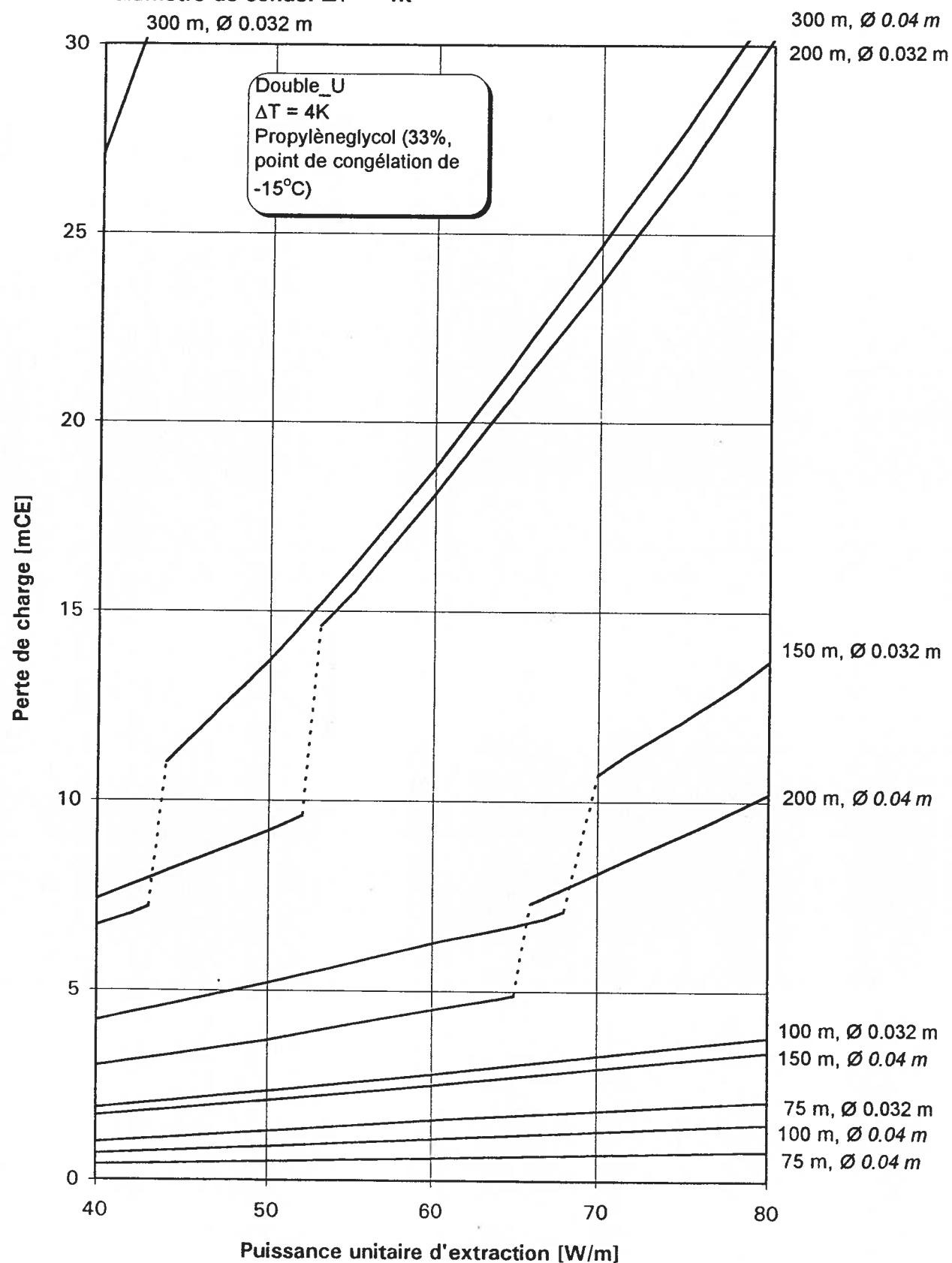


Figure 8 : Puissance dissipée en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 4K$

Longueur de forage et diamètre de sonde :

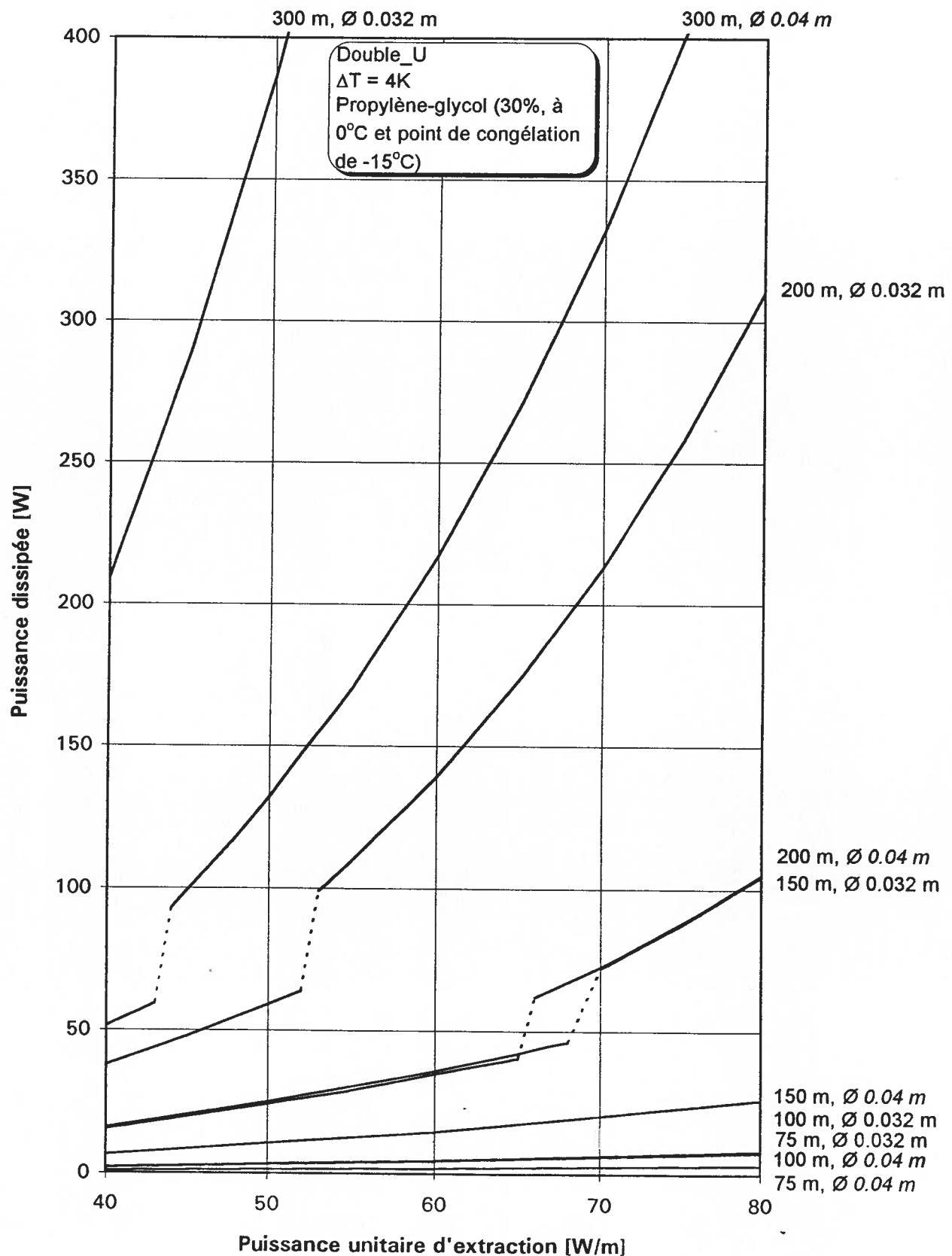


Figure 9 : Nombre de Reynolds en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$

Longueur de forage et diamètre de sonde :

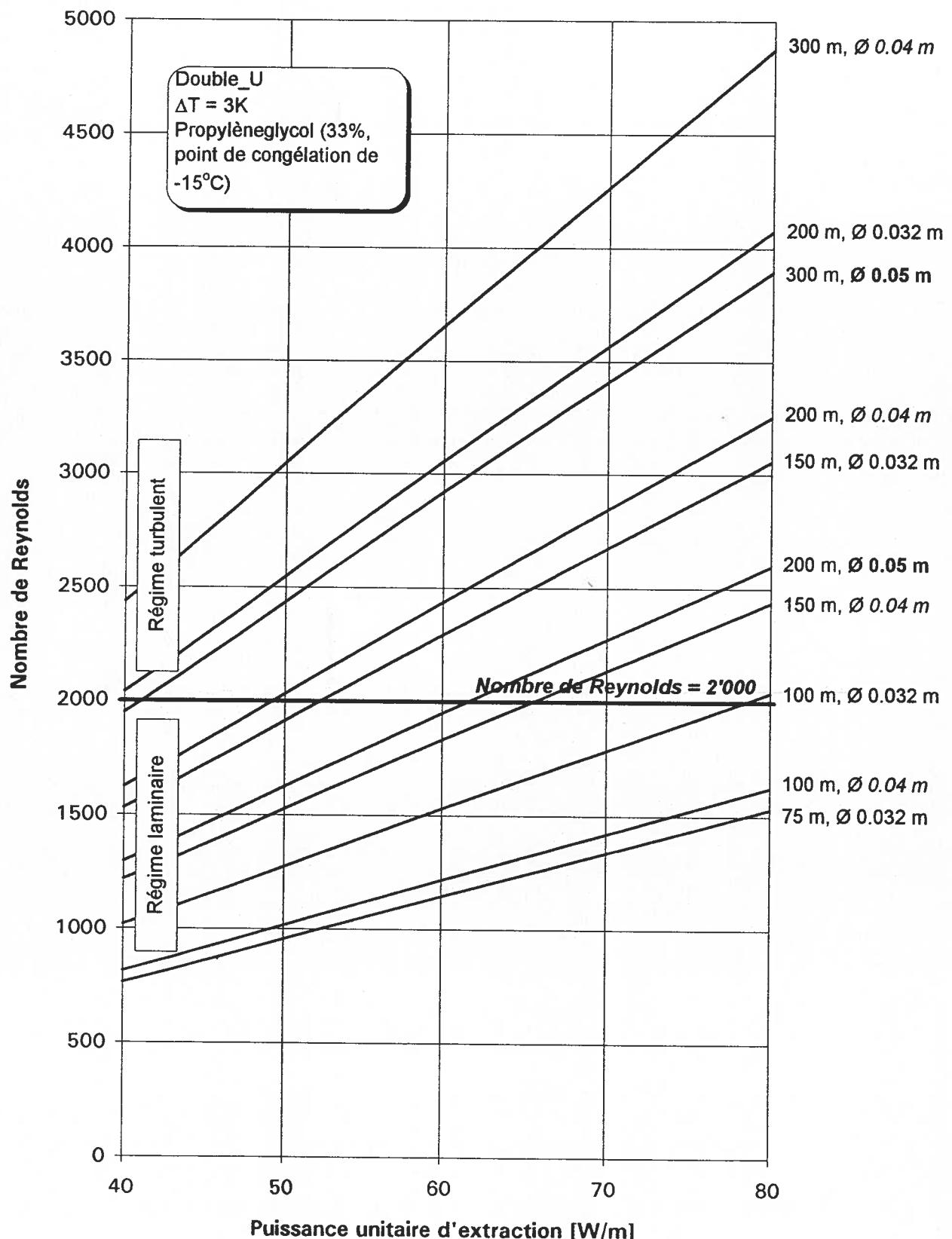


Figure 10 : Perte de charge en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$

Longueur de forage et diamètre de sonde :

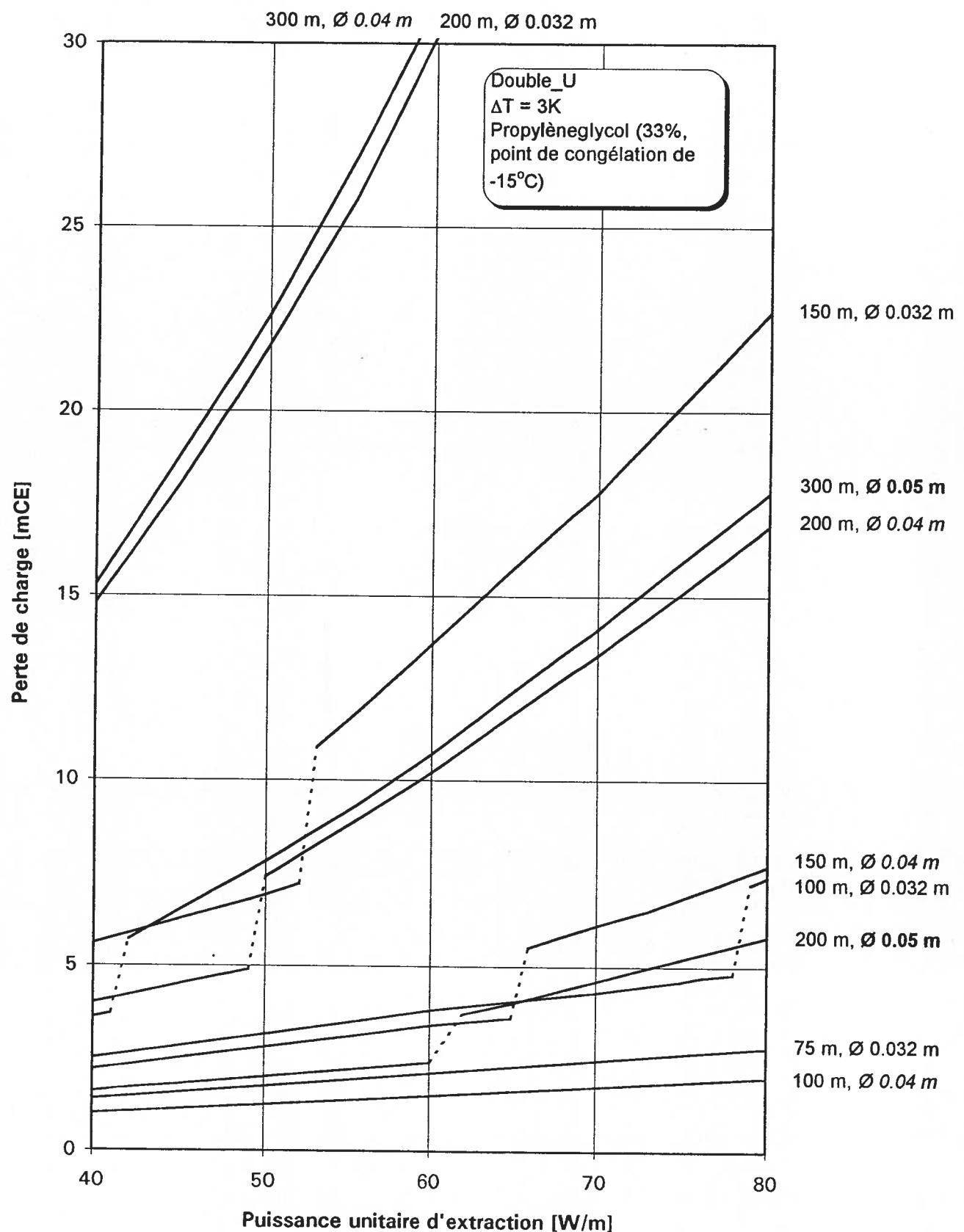


Figure 11 : Puissance dissipée en fonction de la puissance d'extraction dans le terrain, de la longueur et du diamètre de sonde. $\Delta T = 3K$

Longueur de forage et diamètre de sonde :

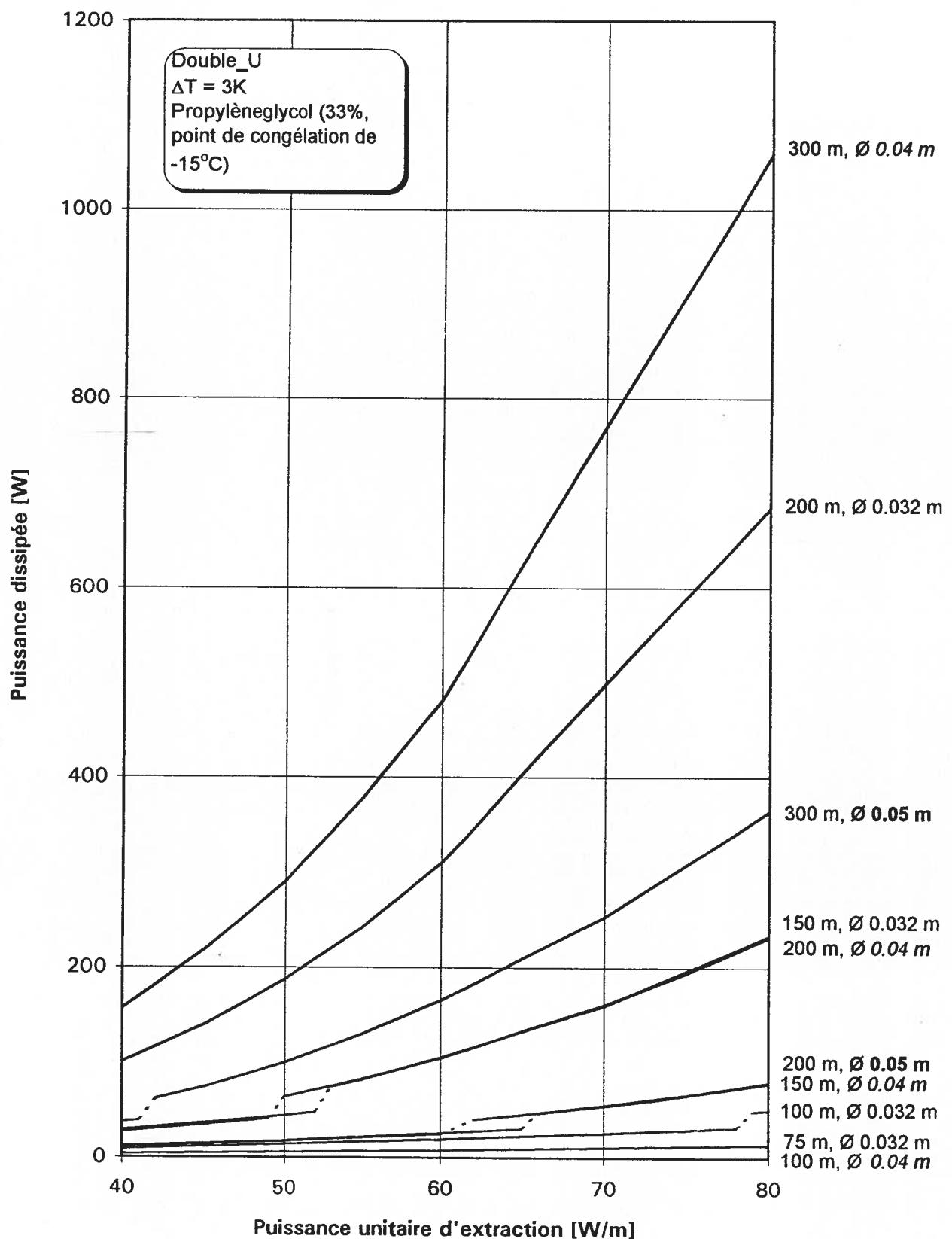


Figure 12a : Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde 2_U de 0.032 m.
 Détermination du ΔT (entrée-sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

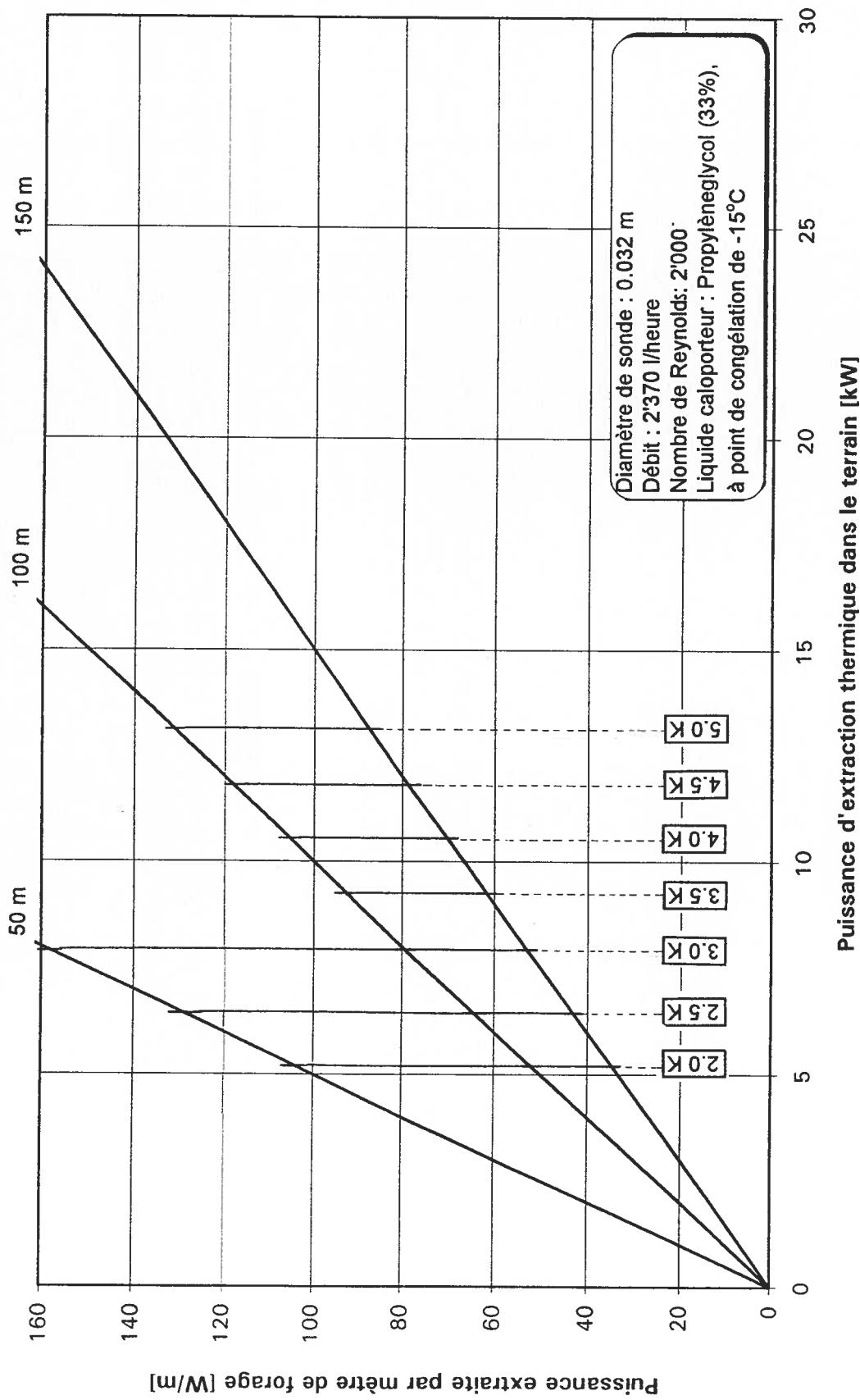


Figure 12b : Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde $2\sqrt{U}$ de 0.04 m.
Détermination du ΔT (entrée-sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

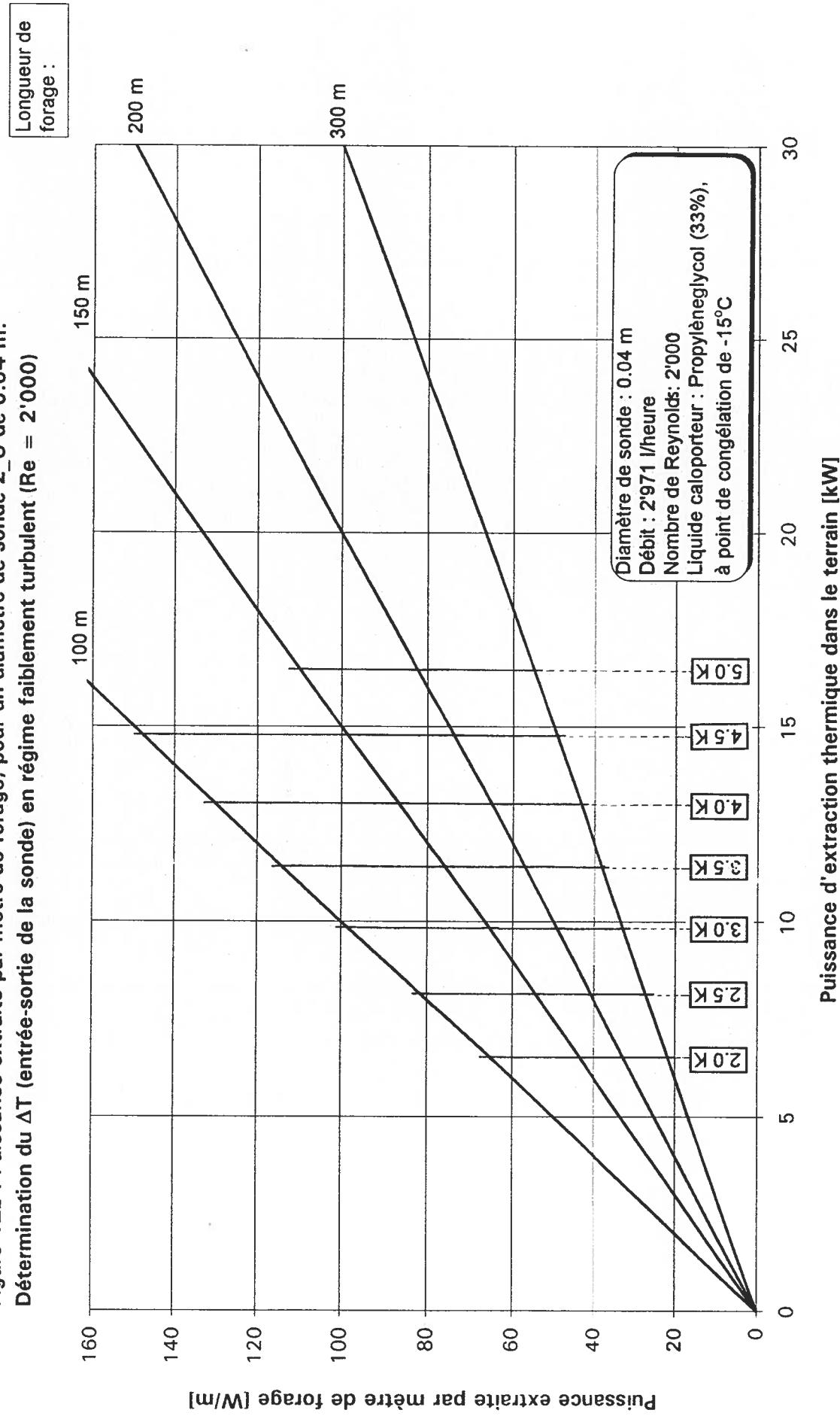


Figure 12c : Puissance extraite par mètre de forage, pour un diamètre de sonde 2_U de 0.05 m.
Détermination du ΔT (entrée-sortie de la sonde) en régime faiblement turbulent ($Re = 2'000$)

Longueur de
forage :

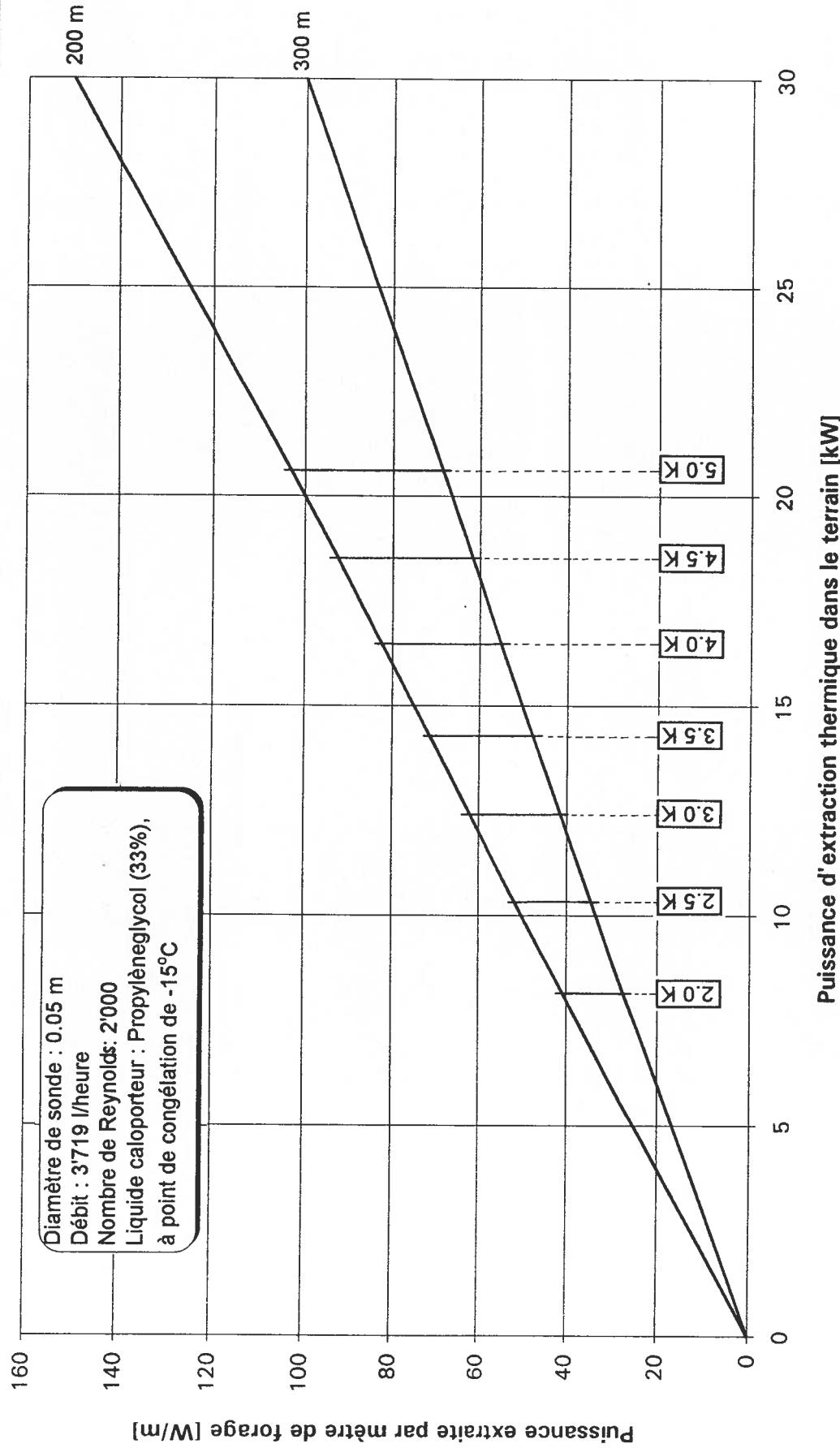


Figure 13 : Perte de charge dans les sondes, en fonction de la longueur du forage.
 Vitesse du fluide à la limite de la turbulence ($Re = 2'000$)

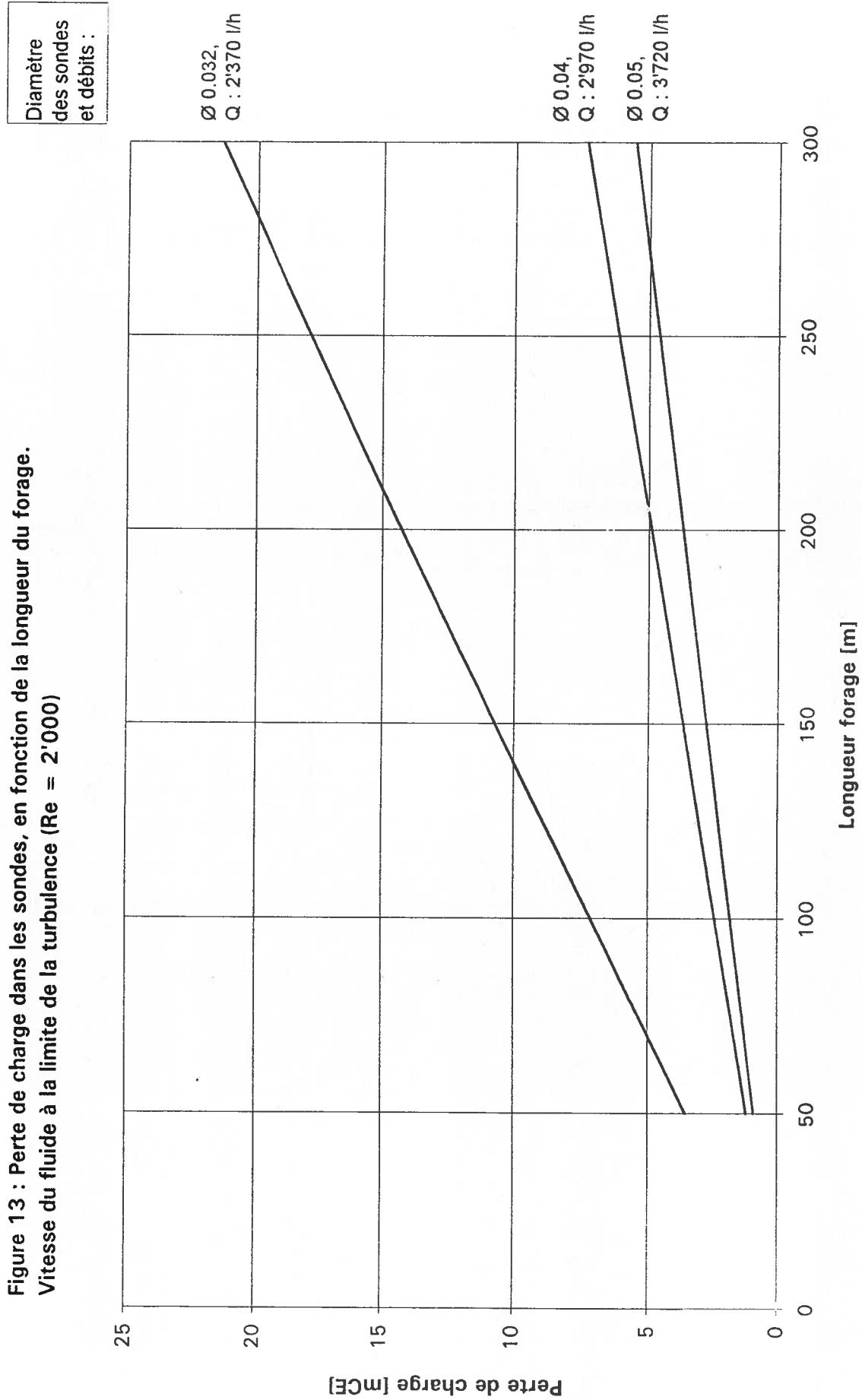


Figure 14a : Puissance du circulateur, en fonction des pertes de charge et du rendement.
Diamètre de sonde : 0.032 m, régime faiblement turbulent ($Re : 2'000$)

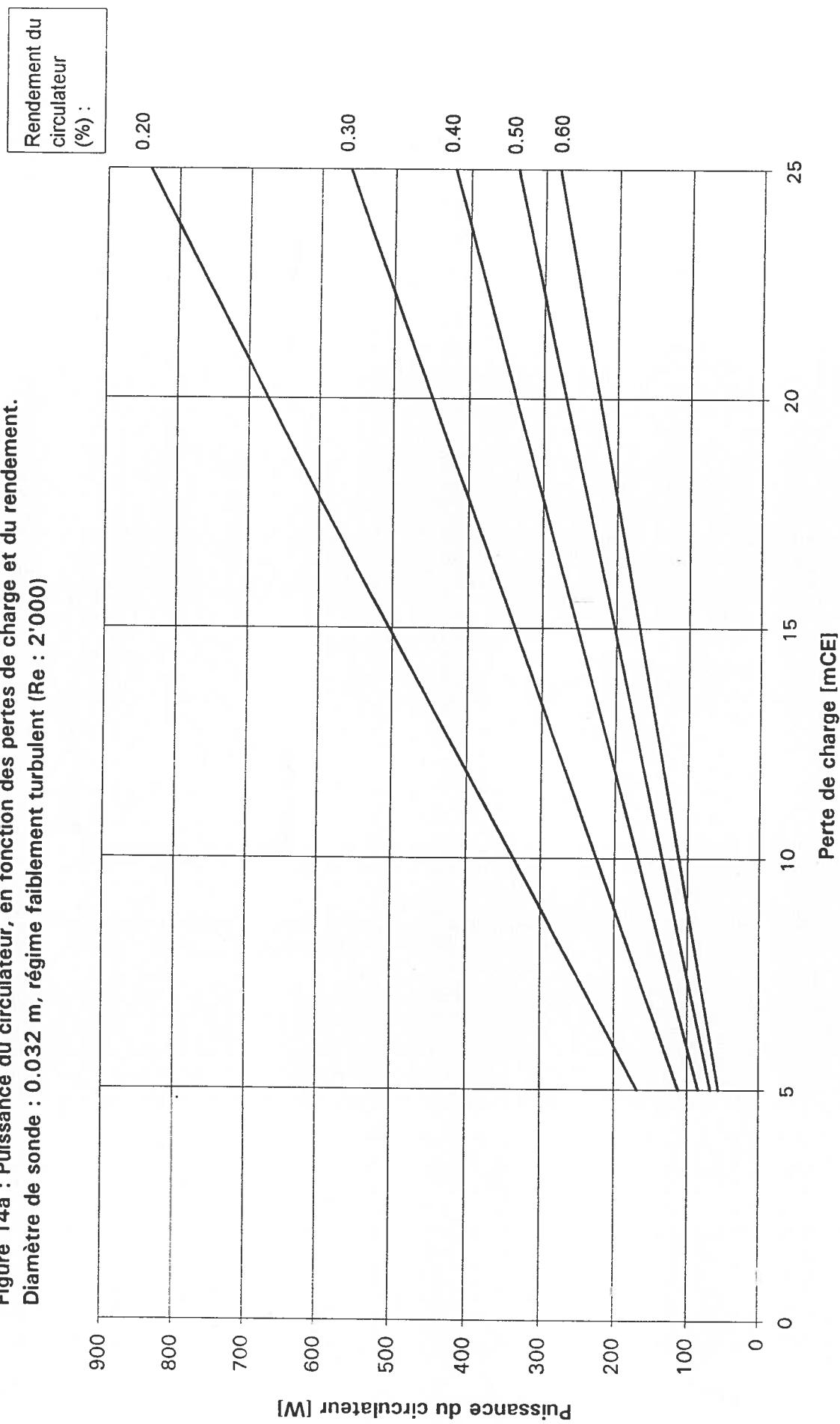


Figure 14b : Puissance du circulateur, en fonction des pertes de charge et du rendement.
 Diamètre de sonde : 0.04 m, régime faiblement turbulent ($Re : 2'000$)

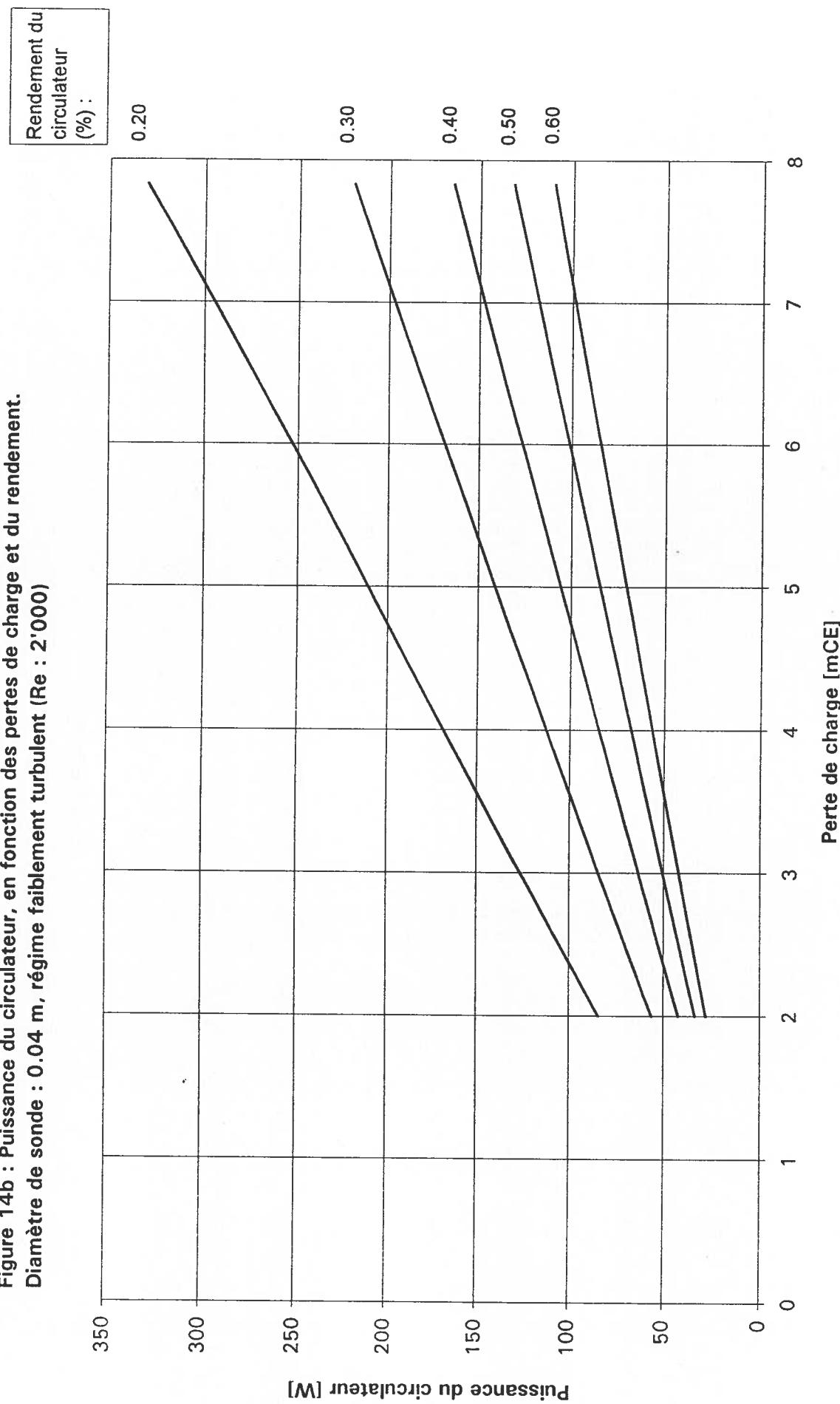


Figure 14c : Puissance du circulateur, en fonction des pertes de charge et du rendement.
Diamètre de sonde : 0.05 m, régime faiblement turbulent ($Re : 2'000$)

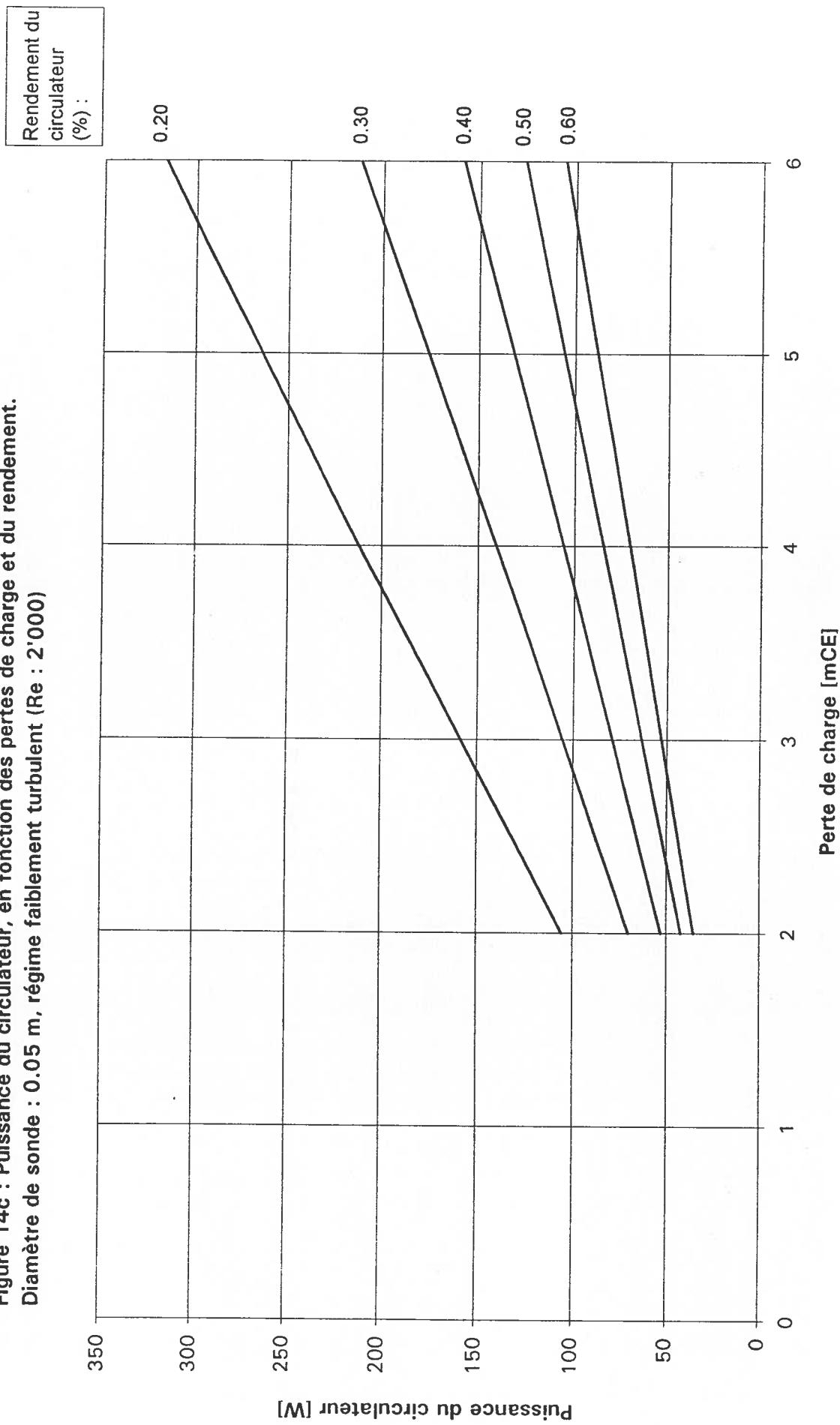


Figure 15a : Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol.
 Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, en terrain calcaire (2.8 W/m.K).

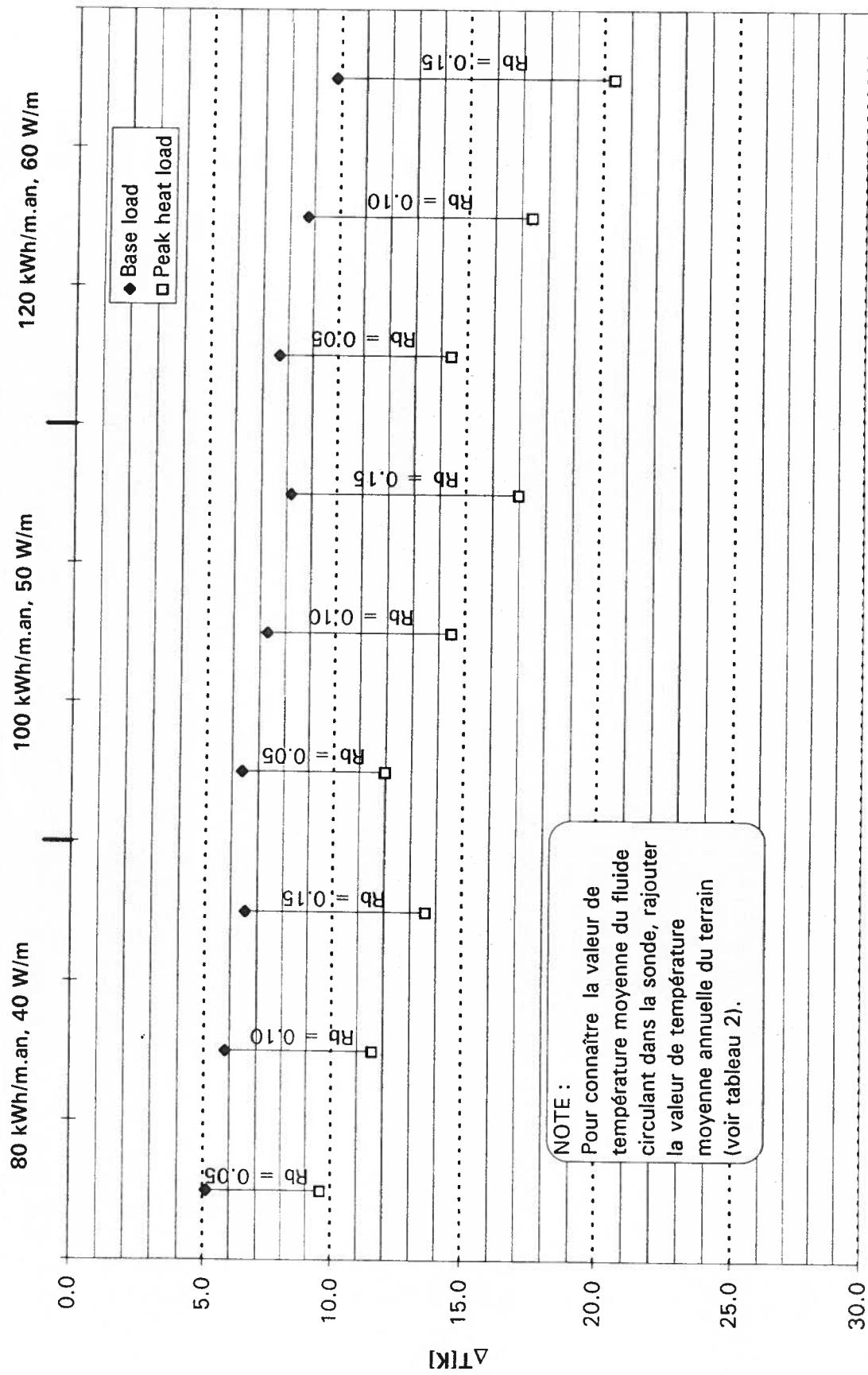


Figure 15b : A baisssement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an, en terrain molassique (1.8 W/m.K).

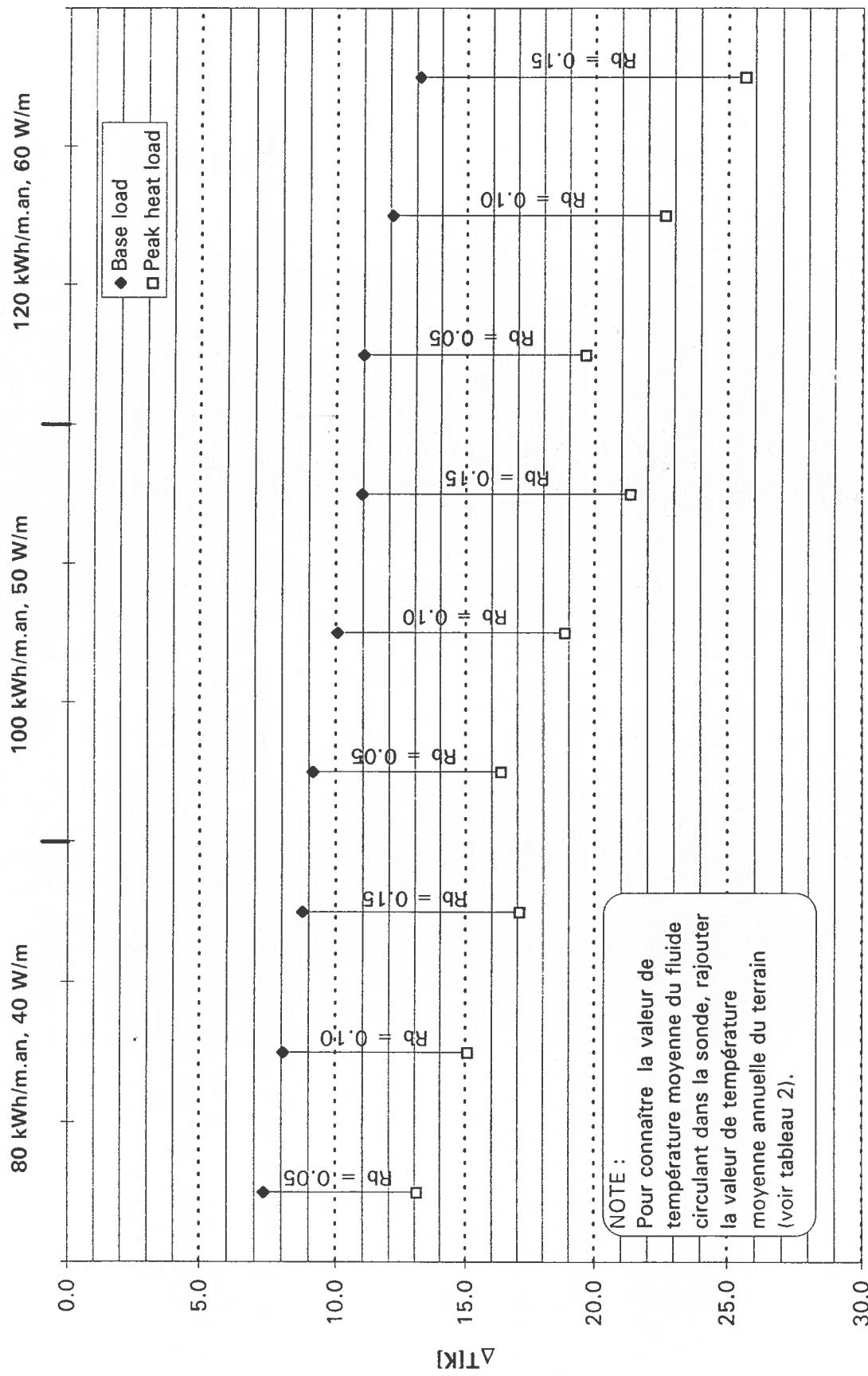


Figure 16a : Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an. - Ø 0.032 m, remplissage de sable de quartz -

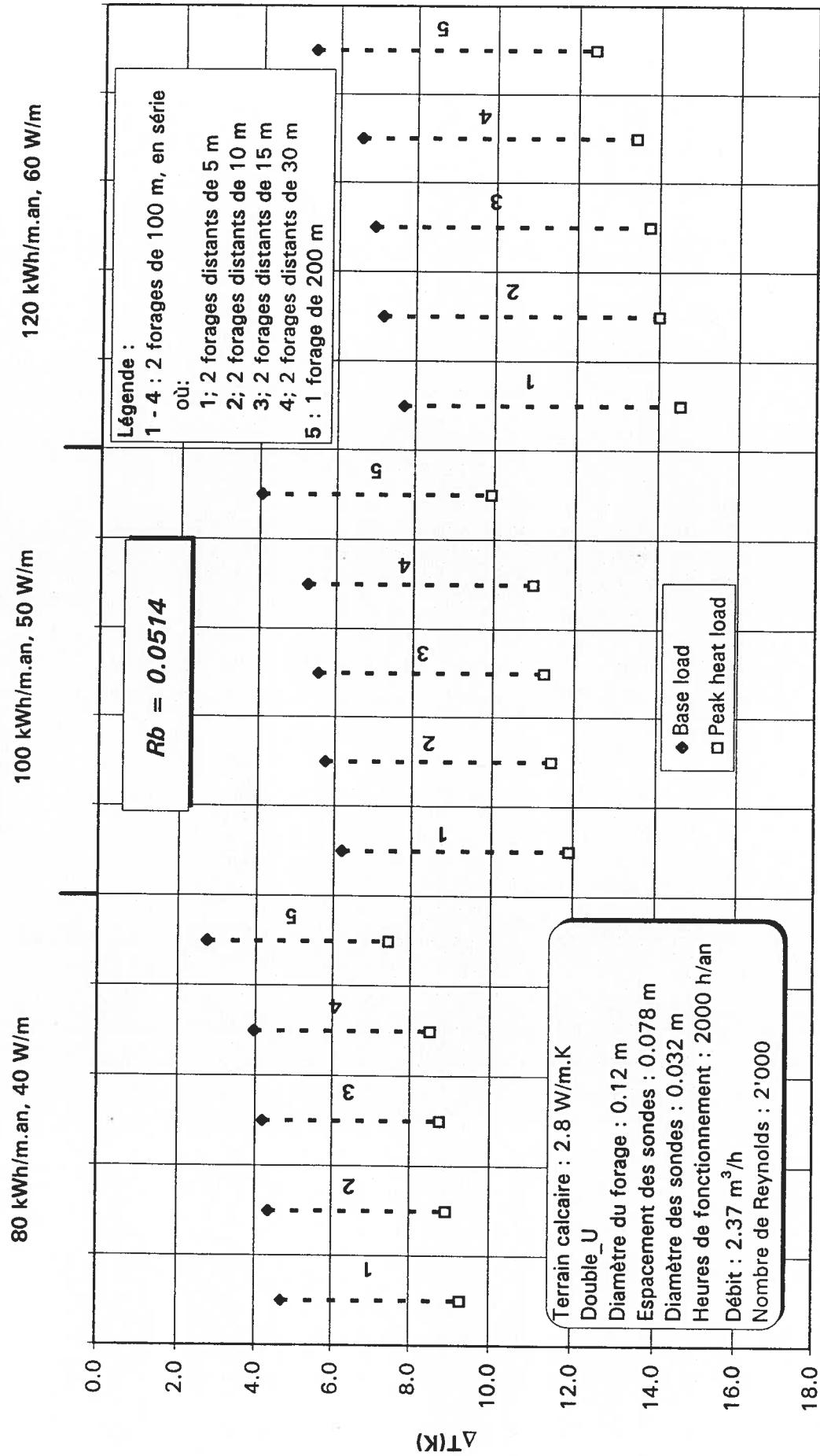


Figure 16b : Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an. - Ø 0.032 m, remplissage de bentonite -

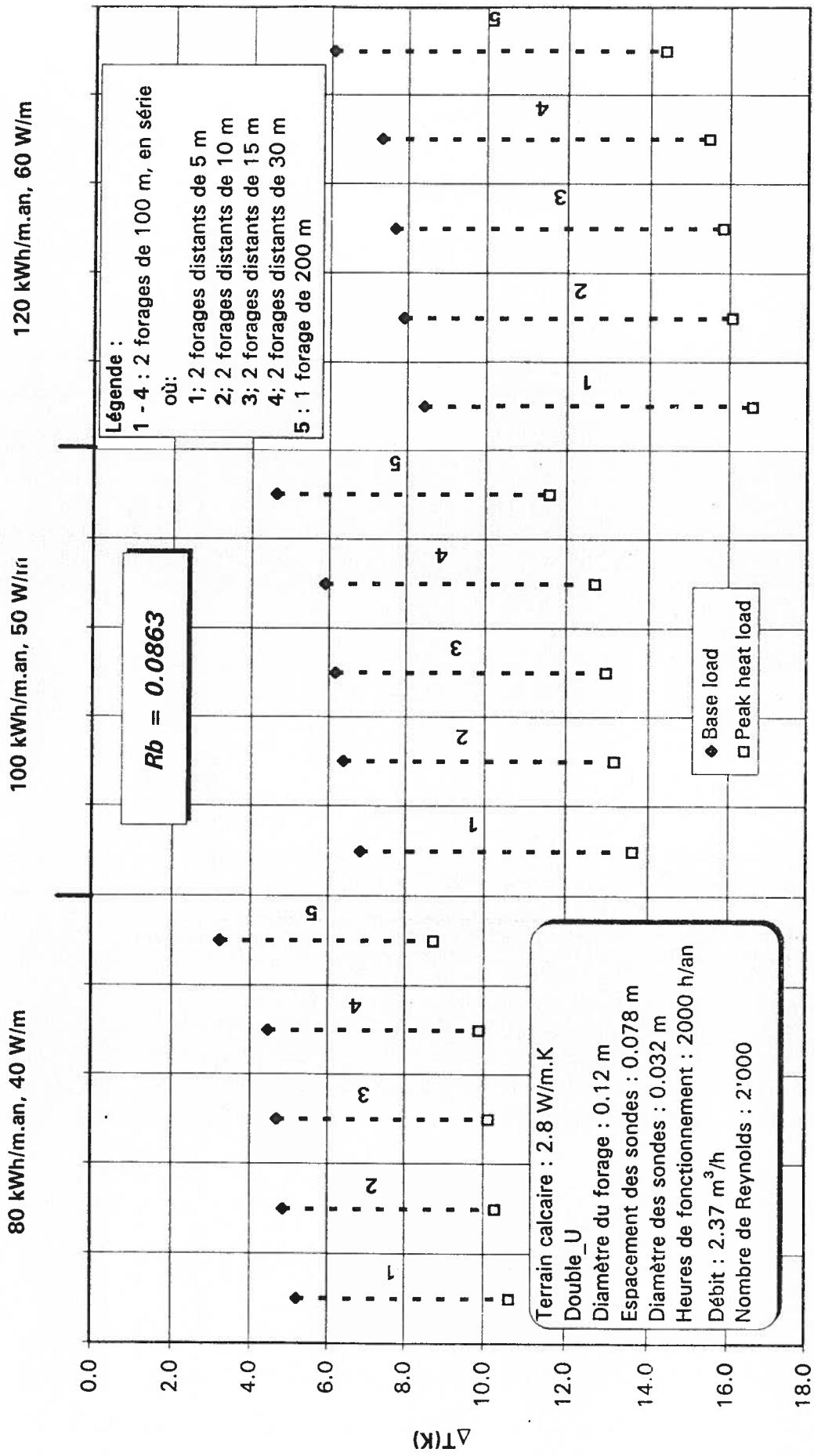


Figure 16c : Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages.
Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an. - Ø 0.04 m, remplissage de sable de quartz -

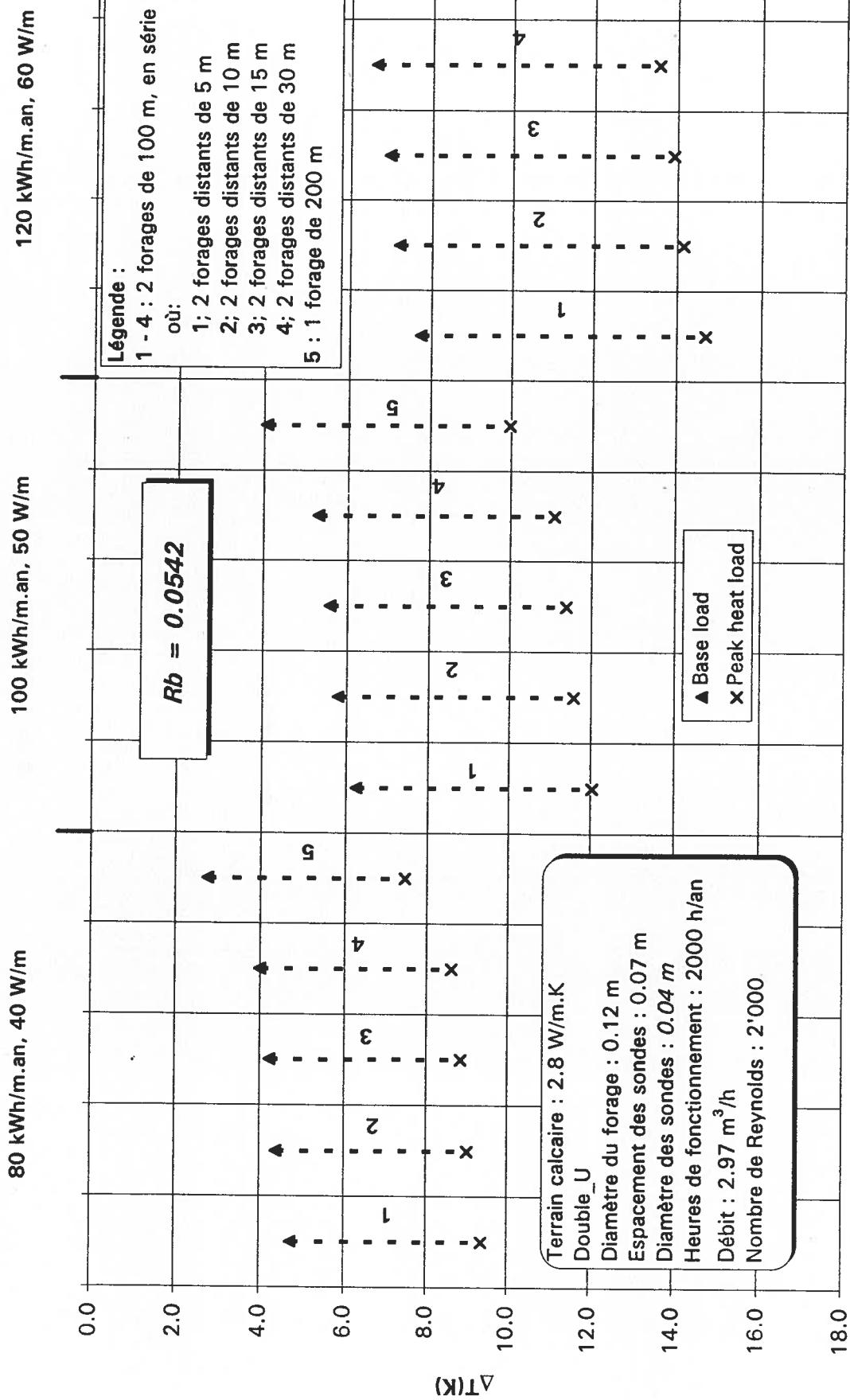


Figure 16d : Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages.
Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2 000 h/an. - Ø 0.04 m, remplissage de bentonite -

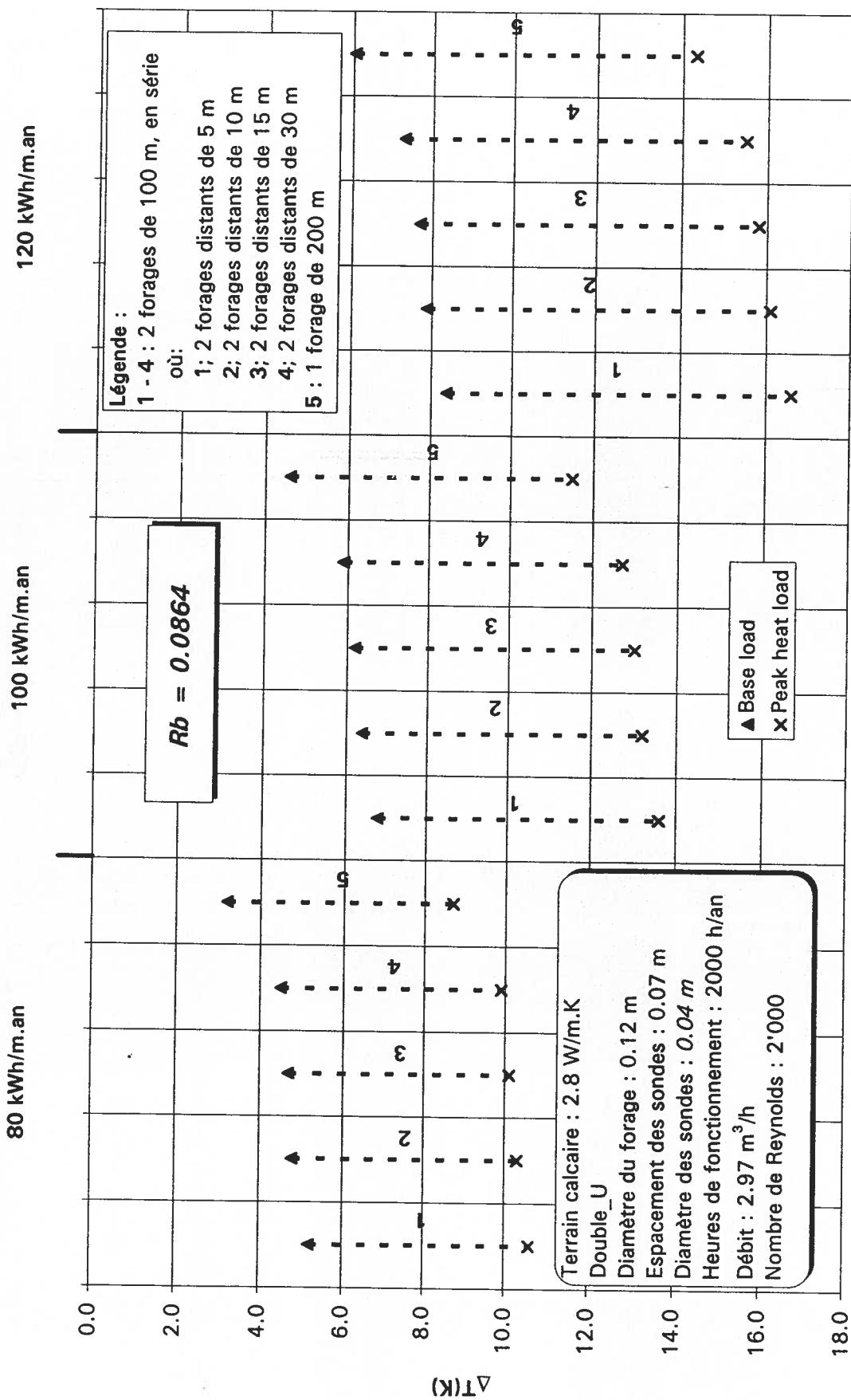


Figure 16e : A baississement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an. - Ø 0.05 m, remplissage de sable de quartz -

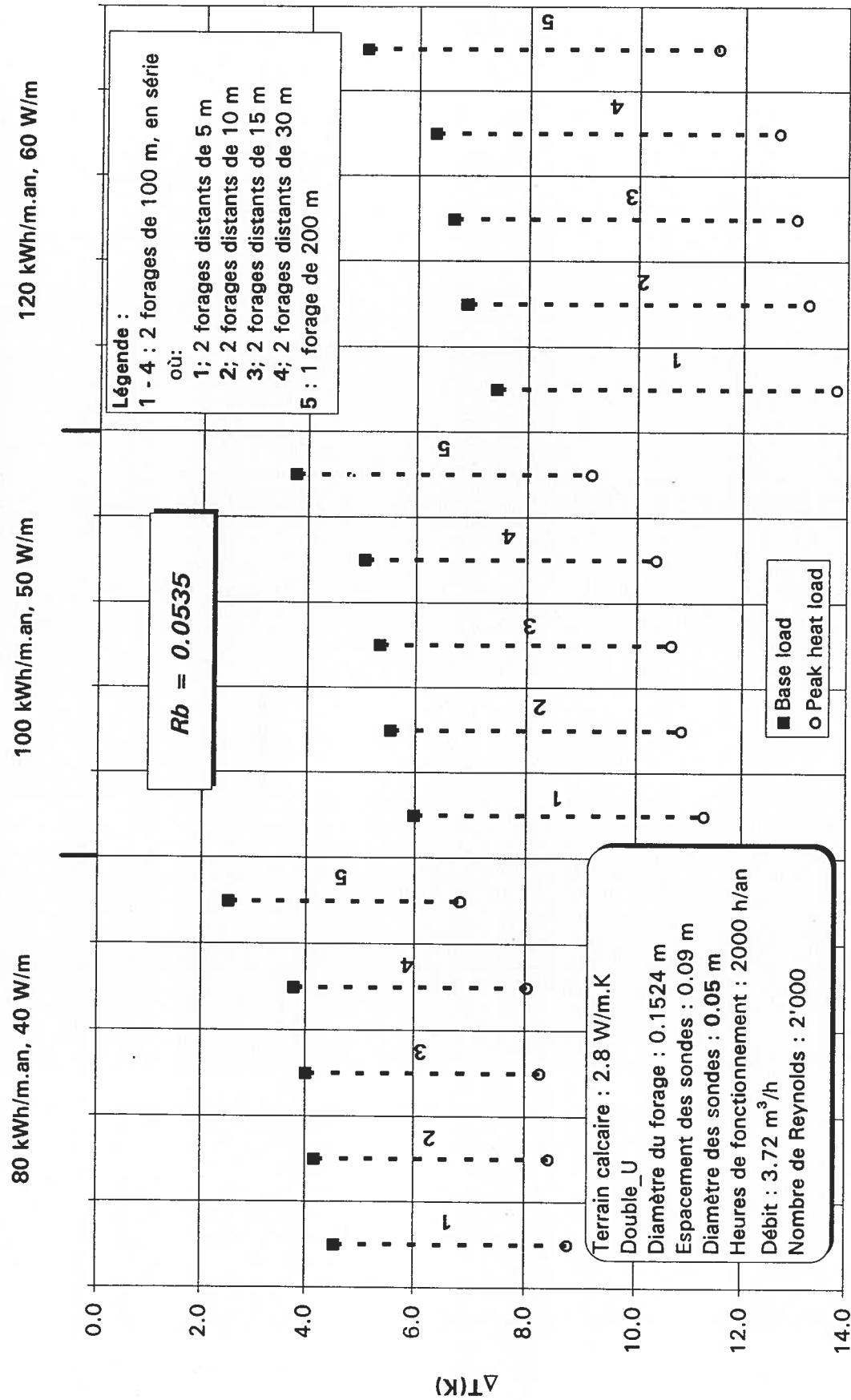


Figure 16f : Abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde, par rapport à la température moyenne annuelle du sol. Comparaison des ΔT entre différentes dispositions de forages.
Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an. - Ø 0.05 m, remplissage de bentonite -

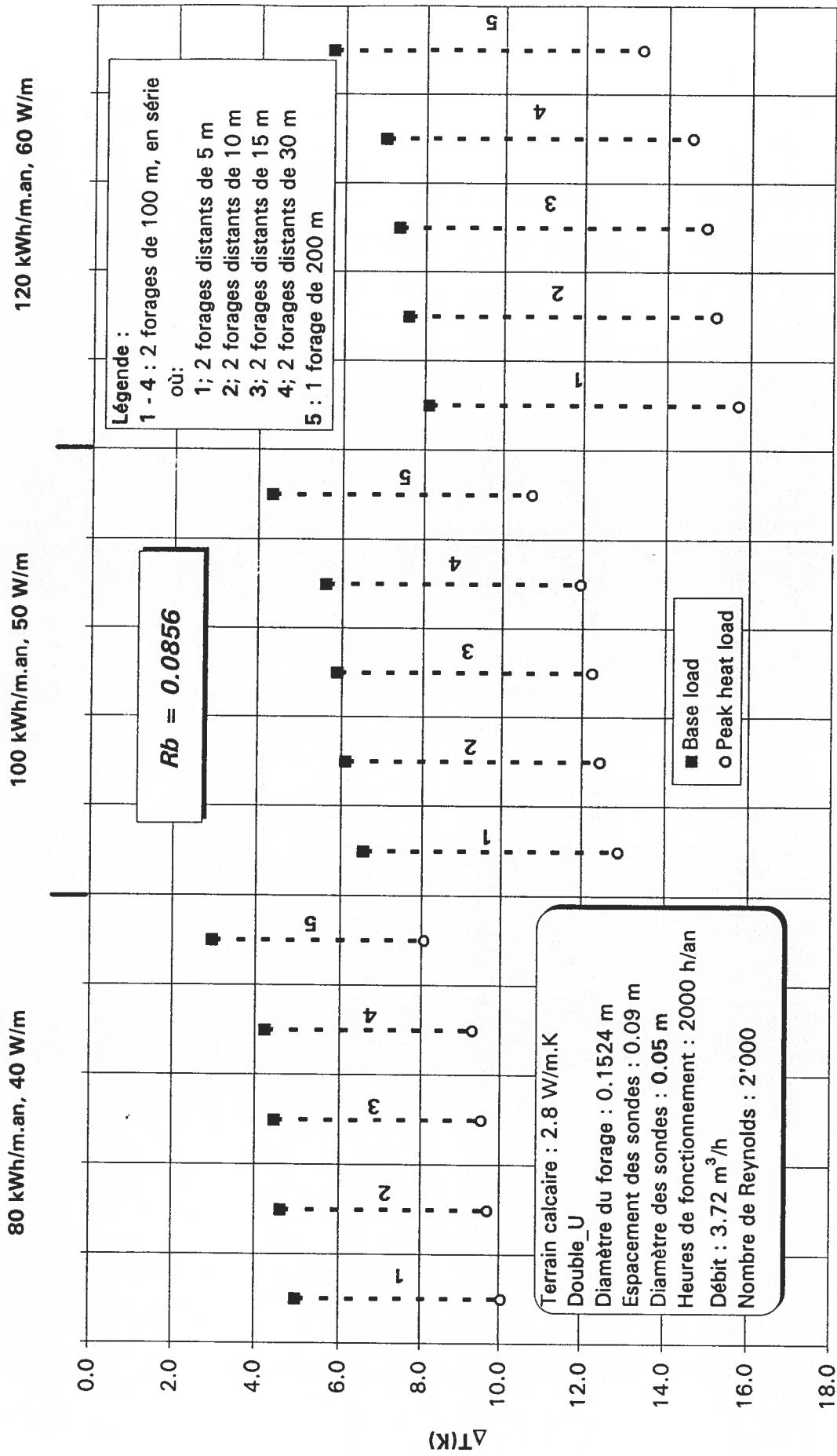


Figure 17 : Influence des changements de diamètre de forage (avec adaptation de l'écartement des sondes), sur l'abaissement de la température moyenne du fluide circulant dans la sonde par rapport à la température moyenne annuelle du sol [ΔT (K)]. Valeurs calculées après 15 ans d'exploitation, à raison de 2'000 h/an. - Ø 0.04 m, remplissage de sable de quartz ou de bentonite -

