



ASSISTANCE HYDROGEOLOGIQUE ET MAITRISE D'ŒUVRE D'UN FORAGE DE RECONNAISSANCE POUR L'EXPLOITATION GEOTHERMALE

COMPTE RENDU DES TRAVAUX

RAPPORT FINAL (INV 11058IO-TB-V1)

A : Gennevilliers		Le : 1 ^{er} Décembre 2011		⇒ ICF Environnement GRUPE IRH ENVIRONNEMENT
Système de Management de la Qualité certifié ISO 9001  FQA 9910144/C Validité 30/09/12	Entreprise titulaire du label QUALIPOL Ingénierie  Qualification UPDS IC-0812-IN02-010 - Validité 01-12-18	Travaux  Qualification UPDS IC-0812-TR01-017 - Validité 01-12-18	Entreprise certifiée MASE  Validité 23/10/12	14 à 30, rue Alexandre Bâtiment C 92635 Gennevilliers cedex ☎ : 01.46.88.99.00 Fax : 01.46.88.99.11 M@il : contact@icfenvironnement.com SAS Capital 1 091 240 € RCS NANTERRE 384640199

SOMMAIRE

I.	FICHE SIGNALETIQUE	4
II.	ABREVIATIONS	5
III.	AVANT-PROPOS	6
IV.	SYNTHESE DES TRAVAUX	7
V.	DEROULEMENT DES TRAVAUX.....	8
	DESCRIPTION DES TRAVAUX	9
	V.1 LOCALISATION DU SITE	9
	V.2 CREATION DU FORAGE DE RECONNAISSANCE	10
VI.	POMPAGES D’ESSAI.....	12
	VI.1 POMPAGE PAR PALIER	12
	VI.2 POMPAGE DE LONGUE DUREE.....	18
VII.	CONTROLE DU FORAGE	24
	VII.1 DIAGRAPHIE GAMMA-RAY	24
	VII.2 MICROMOULINET.....	26
	VII.3 QUALITE DES EAUX BRUTES	27
VIII.	SYNTHESE.....	29

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Tableau 1 : Synthèse des travaux	7
Tableau 2 : Synthèse des rapports journaliers de l'entreprise Picardie Forage	8
Tableau 3 : Coordonnées de l'ouvrage d'essai.....	10
Tableau 4 : Caractéristiques techniques du forage de reconnaissance.....	10
Tableau 5 : Débits, rabattements et débits spécifiques.....	12
Tableau 6 : Débit d'injection, augmentation du niveau et débit spécifique d'injection.....	15
Tableau 7 : Suivi du niveau d'eau pendant le pompage de longue durée	18
Tableau 8 : Résultats des valeurs de transmissivité	22
Tableau 9 : Analyse microbiologique	28
Figure 1 : localisation du site d'implantation.....	9
Figure 2 : Implantation du forage d'essai.....	9
Figure 3 : Pompage par paliers.....	13
Figure 4 : Rabattement en fonction du débit durant le pompage par paliers	14
Figure 5 : Rabattement spécifique (s/Q) en fonction du débit Q	15
Figure 6 : Essai de réinjection au débit de 20 m ³ /h du 8 septembre 2011	17
Figure 7 : Hydrogramme des ouvrages pendant l'essai de longue durée	19
Figure 8 : Courbe du pompage longue durée réalisé le 5 septembre 2011	21
Figure 9 : Les trois zones du graphique $s=f(\text{Log}(t))$ selon Jacob.....	22
Figure 10 : Courbe de montée du captage durant l'essai de longue durée réalisé le 05/09/11	23
Figure 11 : Diagraphie gamma-ray sur le forage d'essai	25
Figure 12 : Micromoulinet	26
Figure 13 : Représentation chimique des eaux selon Piper.....	27
Figure 14 : Teneurs en sulfates dans les marnes et caillasses	28

ANNEXES

Annexe 1 : Plan de masse de l'ouvrage.....	32
Annexe 2 : Coupe géologique et technique du Forage de reconnaissance FR1.....	34
Annexe 3 : Analyse physico-chimique des eaux brutes du 08/09/2011.....	36

I. FICHE SIGNALÉTIQUE

CLIENT :

- | | |
|----------------------------|--|
| ➤ Raison Sociale : | Sem Plaine Commune
Développement |
| ➤ Coordonnées : | 17-19, avenue de la Métallurgie
93210-SAINT DENIS LA PLAINE |
| ➤ Coordonnées juridiques : | |
| ➤ Interlocuteur : | Mme Vabre |
| Téléphone / Fax | 01 49 17 83 62 / 01 49 17 83 64 |
| Mail | evabre@semplaine.fr |

SITE D'INTERVENTION :

- | | |
|----------------------------|--|
| ➤ Raison Sociale : | Ancienne usine Mécano |
| ➤ Coordonnées : | 58 avenue Gabriel Péri
93120 La Courneuve |
| ➤ Coordonnées juridiques : | |
| ➤ Interlocuteur : Nom | |
| Téléphone / Fax | |
| Mail | |

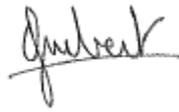
DOCUMENT :

- | | |
|---|--|
| ➤ Type : | Affaire n°INV 11 058 TB |
| ➤ Code prestation ICF : | TB : Maitrise d'œuvre |
| ➤ Code prestation selon NF X 31-620
(cf. Annexe A de la norme) : | B202 - Analyses des enjeux sur les
ressources en Eaux |

REVISION DU RAPPORT :

Numéro de révision	Date	Observations / Modifications
VF	01/12/11	Rapport final

SIGNATAIRES :

	Nom	Fonction	Visa/Date
Rédacteur	Céline Guibert	Ingénieur de Projets	
Vérificateur	Alexandre Chevalier	Chef de projets	
Approbateur	Joachim Maier	Superviseur	

II. ABREVIATIONS

ADES : Accès aux données sur les Eaux Souterraines

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BAC : Bassin d'Alimentation de Captage

BSS : Banque du Sous-Sol du BRGM

III. AVANT-PROPOS

Dans le cadre de la réhabilitation du quartier de la mairie de La Courneuve (93) en un pôle administratif et une médiathèque, il est envisagé d'utiliser le potentiel hydraulique et thermique de la nappe des calcaires du Lutétien pour l'alimentation d'une pompe à chaleur. Le débit maximum souhaité est de l'ordre de 65 m³/h avec un fonctionnement différent en chaud et en froid.

Un forage d'essai a été réalisé afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe. Dans le cas où les essais sont jugés concluants, celui-ci sera réutilisé dans le dispositif captage/rejet.

La mission de maîtrise d'œuvre pour la création du forage de reconnaissance ainsi que le dimensionnement du forage a été confié à ICF ENVIRONNEMENT.

Le présent rapport présente l'ensemble des travaux de reconnaissance qui ont été réalisés sur la parcelle OV section 7 située sur la commune de La Courneuve. Il a été fait :

- la création d'un forage de reconnaissance dans les calcaires grossiers du Lutétien,
- le nettoyage et le développement du forage,
- des pompages par palier et de longue durée,
- un prélèvement des eaux brutes,
- une diagraphie gamma-ray et une localisation des arrivées d'eaux par micromoulinet.

IV. SYNTHÈSE DES TRAVAUX

Le maître d'ouvrage de l'opération est le **la SEM Plaine Commune Développement**.

ICF Environnement assurait la maîtrise d'œuvre des travaux.

Nom du forage :	Forage F1 (forage de reconnaissance)
N°BDSS	01833B0225
Lieu de forage :	Ancienne usine Mécano Ville de la Courneuve (93)
Coordonnées Lambert 2 Etendu :	X = 603 907 m
<i>(précision : rattachement planimétrique et altimétrique par un géomètre)</i>	Y = 2 436 355 m
	Z = 39 m IGN69 (repère dalle béton)
Entreprise de travaux :	Picardie Forage 2, rue de la République 80800 CERISY
Profondeur totale du forage de reconnaissance	Profondeur forée : 64 m/sol Hauteur crépinée : 23 m/sol
Suivi géologique :	ICF Environnement – maître d'œuvre
Contrôle et diagraphies :	Géo Hydro Investigation
Date de début des travaux :	1 ^{er} août 2011
Date de fin des travaux :	09 septembre 2011
Nettoyage et développement :	Air lift Acidifications Pompages à débit variable
Date de début du pompage longue durée:	05 septembre 2011 – 11h00
Débit moyen de pompage :	60 m ³ /h
Date de fin du pompage longue durée :	08 septembre 2011– 11h09
Suivi de la remontée	22 h
Date de prélèvement :	9 septembre 2011 – 13h00

Tableau 1 : Synthèse des travaux

V. DEROULEMENT DES TRAVAUX

La synthèse des rapports journaliers de l'entreprise Picardie Forage est présentée dans le tableau ci-dessous.

Date	Travaux réalisés
Le 01 août 2011	Installation du chantier : mise en place de la foreuse.
Du 02 au 04 août 2011	Foration rotary de l'avant trou du forage de reconnaissance en diamètre 500 mm jusqu'à 39 m Mise en place d'un tubage de protection en diamètre 396/406 jusqu'à 39 m.
Le 04 août 2011	Cimentation à l'extrados du tubage (4 tonnes)
Du 8 au 9 août 2011	Foration rotary en diamètre 350 mm jusqu'à 64 m
Le 10 août 2011	Pose du tubage PVC 225/250 mm crépiné entre 39 et 62 m et du gravier. Mise en place d'un bouchon de fond et des centreurs Rinçage du forage et nettoyage du chantier
Le 11 août 2011	Air lift et installation de la pompe
Le 12 août 2011	Pompage de nettoyage à 39 m ³ /h
Du 29 au 30 août 2011	Acidification (1 tonne) Pompage de nettoyage à 80 m ³ /h Acidification (2 tonnes) Pompage de nettoyage à 97 m ³ /h
Le 31 août et le 1 ^{er} septembre 2011	Pompage par paliers enchaînés de 1h pour les deux premiers paliers puis de 2h suivis d'une remontée de 17 h au débit de 37,5, 52, 73 et 91 m ³ /h. Essai d'injection
Du 5 septembre au 8 septembre	Pompage de longue durée (72h + 22h de remontée) au débit de 60 m ³ /h.
Le 8 septembre 2011	Prélèvements d'eau pour analyse
Le 9 septembre 2011	Diagraphie gamma-ray et micromoulinet.

Tableau 2 : Synthèse des rapports journaliers de l'entreprise Picardie Forage

DESCRIPTION DES TRAVAUX

V.1 Localisation du site

Annexe 1 : Plan de masse

Le forage de reconnaissance est localisé sur la commune de la Courneuve.

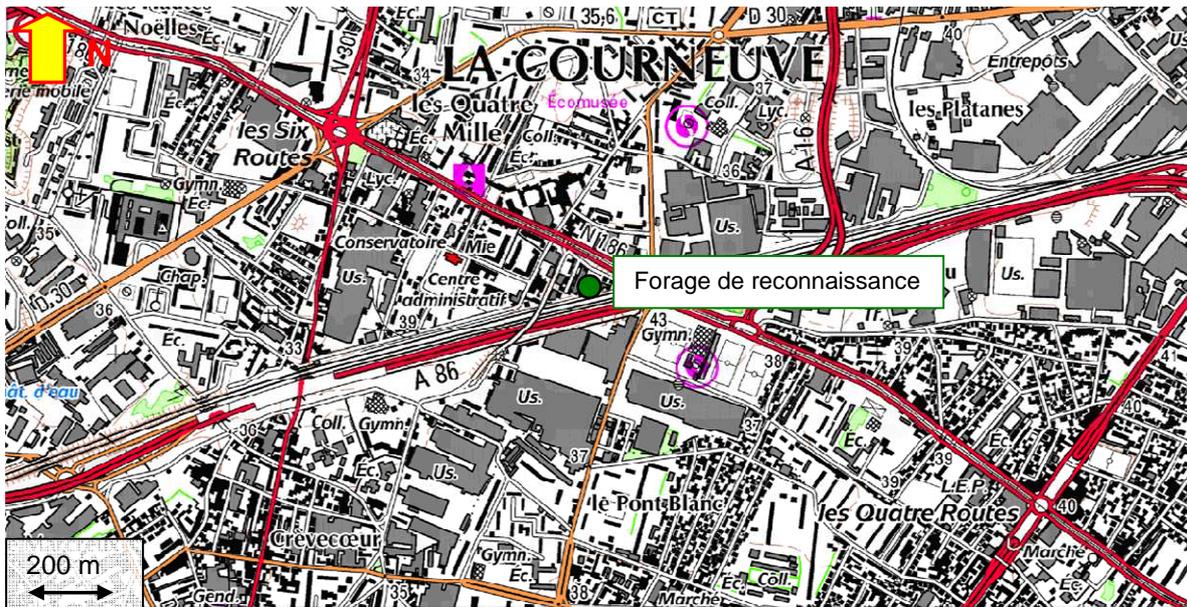


Figure 1 : localisation du site d'implantation

Le détail de la localisation est donné ci-dessous :



Figure 2 : Implantation du forage d'essai

Les coordonnées de l'ouvrage sont :

X Lambert 2 Etendu (m)	Y Lambert 2 Etendu (m)	Z (m NGF)
603 907	2 436 355	39

Tableau 3 : Coordonnées de l'ouvrage d'essai

V.2 Création du forage de reconnaissance

Annexe 2 : Coupe géologique et technique du Forage de reconnaissance FR1

Les travaux sur le forage de reconnaissance se sont déroulés du 1^{er} août au 9 septembre 2011.

V.2.1 Coupe géologique

La profondeur de l'ouvrage est de 63 m. En effet, le fond du forage s'est remblayé sur un mètre (foration sur 64 m).

La coupe géologique précise au droit du site a été déterminée à partir des échantillons recueillis durant la foration du forage de reconnaissance :

- 0 à 5 m : Terre végétale et remblais,
- 5 à 8 m : Marnes du Ludien,
- 8 à 11 m : Sables de Monceau,
- 11 à 24 m : Calcaire de Saint-Ouen,
- 24 à 25 m : Sables de Beauchamp,
- 25 à 39 m : Marnes et caillasses du Lutétien,
- 39 à 62 m : Calcaire grossier du Lutétien,
- 62 à 63 m : Sables de Cuise.

La coupe a été confirmée par la diagraphie gamma-ray.

V.2.2 Coupe technique

Le forage de reconnaissance a été foré au rotary en 500 mm de 0 à 39 m.

Un tubage à l'avancement en acier a été placé jusqu'à 39 et cimenté afin d'isoler la formation des marnes et caillasses du calcaire grossier du Lutétien.

La foration s'est ensuite poursuivie en diamètre 350 mm jusqu'à 63 m de profondeur.

L'équipement technique de l'ouvrage est le suivant :

TUBAGE	Profondeur / sol (mètres)	Tubage (mm)
TUBE DU FORAGE	De + 0,5 à - 39 m	Tube plein en acier Ø 396/406 mm
	De 0,5 à - 39 m	Tube plein en PVC Ø 225/250 mm
	De -39 à - 62 m	Tube crépiné en PVC, slot 2 mm, Ø 225/250 mm
	De -62 à -63 m	Tube décanteur en PVC, Ø 225/250 mm et bouchon de fond

Tableau 4 : Caractéristiques techniques du forage de reconnaissance

L'espace annulaire entre le tubage PVC et le terrain a été rempli de 37 m à 63 m par un massif filtrant de gravier siliceux de granulométrie 2,5/5 mm.

V.2.3 Observations particulières

Durant la foration au rotary à 64 m, une fois les sables atteints, le fond de l'ouvrage s'est remblayé sur un mètre.

V.2.4 Nettoyages et développements

Le programme de nettoyage et de développement consistait en :

- un air lift de 4 heures,
- des pompages de nettoyage,
- un développement par acidification par 3 tonnes en 2 passes.

V.2.4.1 Air lift

L'air lift est une méthode de nettoyage qui permet de retirer les fines et résidus du fond d'un ouvrage. Le principe consiste à injecter de l'air sous pression à travers une canne composée de deux tubes. L'émulsion ainsi créée s'élève dans l'un des tubes d'exhaure en entraînant les fines.

L'air lift a été réalisé le 11 août 2011 sur une durée de 4h.

V.2.4.2 Pompages de nettoyage

Les pompages de nettoyages se sont déroulés le 12 août 2011 et les 29 et 30 août 2011 Ils ont été réalisés selon la chronologie suivante :

- Air lift le 11 août 2011
- Pompage de nettoyage à 20 m³/h le 11 août 2011
- Acidification le 29 août 2011
- Pompage de nettoyage à 80 m³/h le 29 août 2011
- Acidification le 30 août 2011
- Pompage de nettoyage à 97 m³/h le 30 août 2011

Le niveau statique était de 8,17 m/sol le 30 août 2011.

V.2.4.3 Acidification

L'acidification par de l'acide chlorhydrique permet de dissoudre les carbonates pour de développer l'ouvrage. L'acidification a été réalisée sous pression.

La première acidification de 1 tonne a eu lieu le 29 août 2011. Elle a été suivie par un pompage de nettoyage au débit de 80 m³/h sur une durée de 4 heures.

La deuxième acidification de 2 tonnes a eu lieu le 30 août 2011. Elle a été suivie par un pompage de nettoyage au débit de 97 m³/h sur une durée de 4 heures.

VI. POMPAGES D'ESSAI

VI.1 Pompage par palier

VI.1.1 Déroulement du pompage

Une série de pompages par paliers a été réalisée le 31 août 2011. Les eaux pompées ont été rejetées dans le réseau d'eau usée.

Le niveau statique avant le commencement des essais était de 7,85 m/sol le 31 août 2011.

Il a été réalisé 4 paliers enchaînés aux débits successifs de 37,5, 52, 73 et 91 m³/h suivis d'une remontée de 17 h.

Les mesures ont été suivies manuellement et par sondes automatiques à la descente et à la remontée.

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous:

Temps (min)	Débit (m ³ /h)	Rabattement à la fin du palier (m)	Débit spécifique (m ³ /h/m)
0 à 60	37,5	4,2	8,9
60 à 120	52	6,9	7,5
120 à 240	73	11	6,6
240 à 360	91	16	5,7

Tableau 5 : Débits, rabattements et débits spécifiques

La figure page suivante présente le comportement de l'ouvrage pour différentes sollicitations de débit. Le rabattement au bout d'une heure n'étant pas suffisamment stabilisé pour les deux premiers paliers, il a été décidé d'augmenter la durée des paliers à 2 h pour les deux paliers suivants.

La figure suivante montre qu'au bout de deux heures, le rabattement n'était toujours pas stabilisé (quasi stabilisé).

La remontée quant à elle est relativement longue ; au bout de 5h sur le graphique, le niveau d'eau n'était toujours pas revenu à son niveau d'origine.

Essai de pompage par paliers

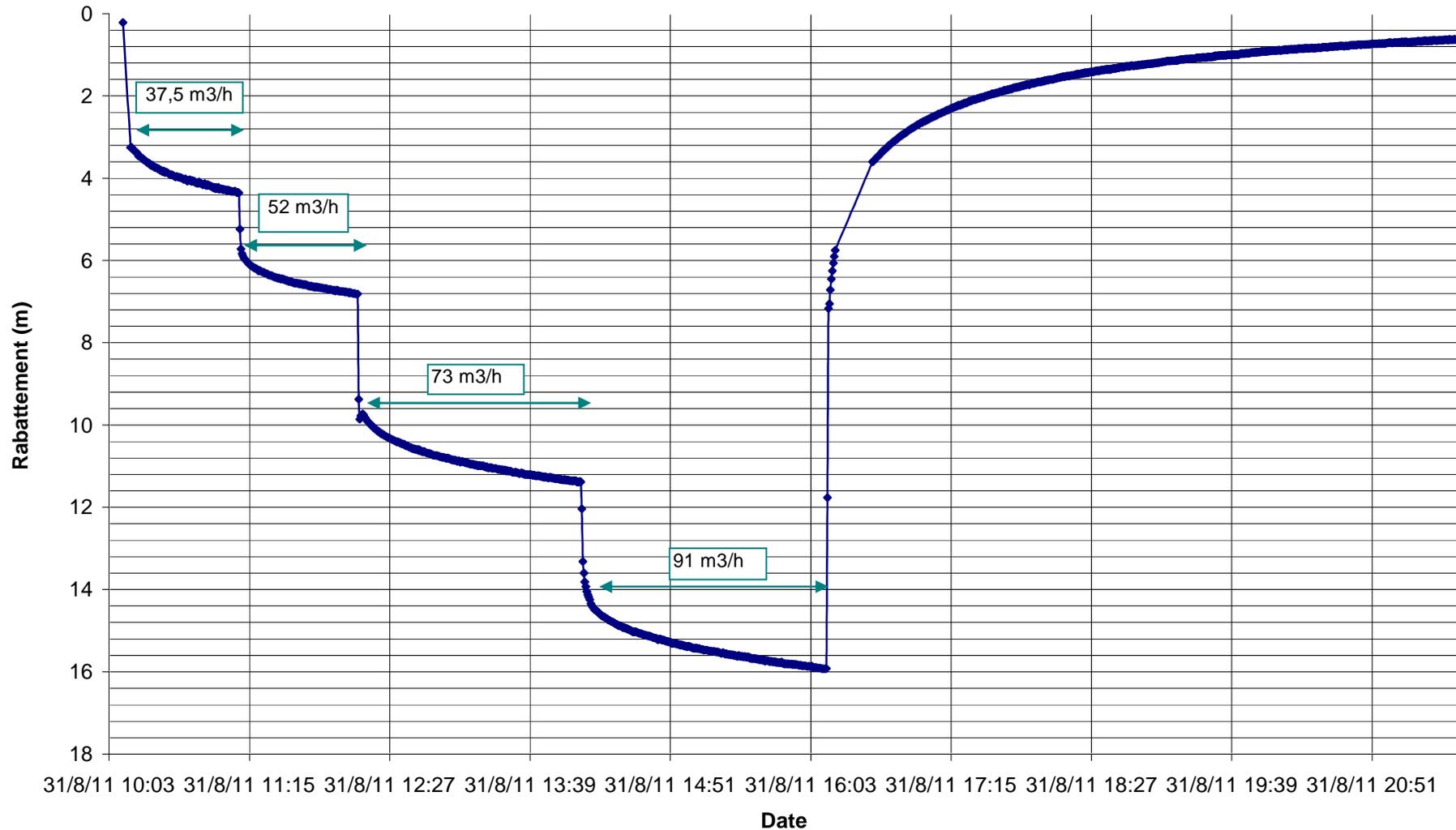


Figure 3 : Pompage par paliers

VI.1.1.1 Interprétation des paliers

L'essai de pompage par paliers de débit permet de déterminer le débit critique de l'ouvrage et les pertes de charges.

▪ Courbe caractéristique et débit critique

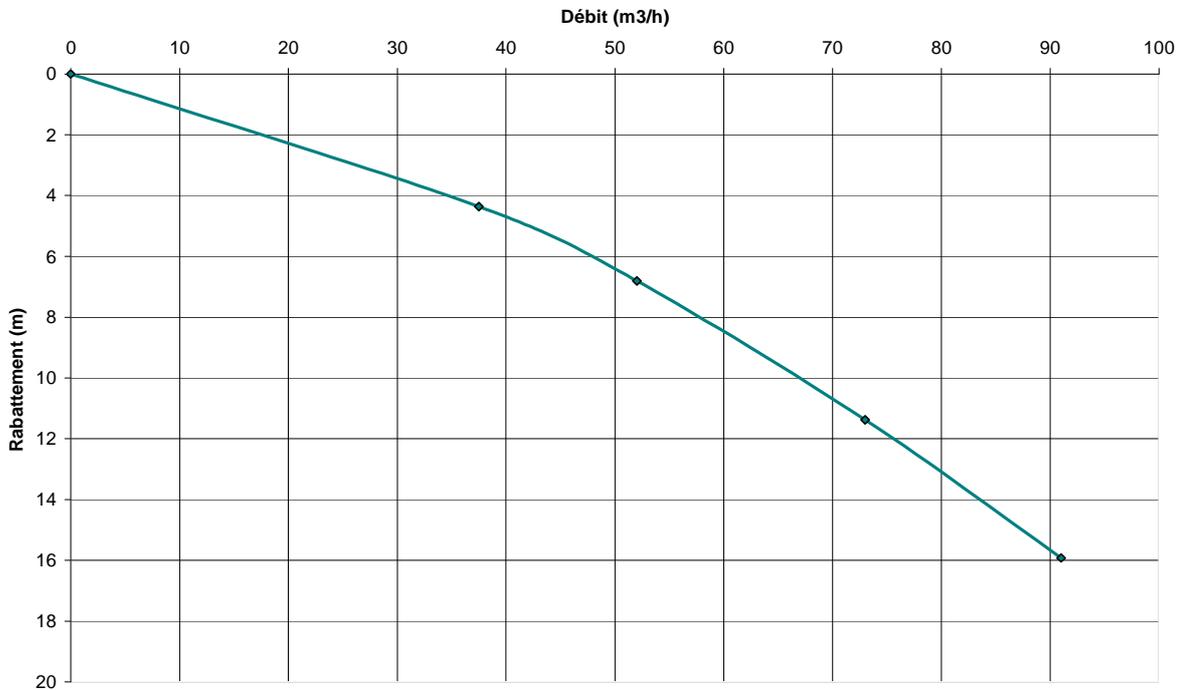


Figure 4 : Rabattement en fonction du débit durant le pompage par paliers

Le rabattement du niveau d'eau mesuré dans le puits est la somme des pertes de charge linéaires (BQ) et quadratiques (CQ²), soit :

$$s = B Q + C Q^2 \text{ (courbe caractéristique)}$$

avec

- Q = débit d'exhaure en m³/h,
- B = coefficient de pertes de charges linéaires,
- C = coefficient de pertes de charges quadratiques.

Le débit critique peut être déterminé de différentes façons :

- par le point d'inflexion de la courbe $s=f(Q)$,
- En déterminant le débit pour lequel les pertes de charge quadratiques deviennent supérieures aux pertes de charge linéaires.

Les coefficients de pertes de charge ne peuvent pas être déterminés avec (stabilisation incomplète des rabattements - Figure 3). Les données fournissent l'équation suivante (à partir de la courbe Figure 5).

$$s = 0,0733 Q + 0,0011 Q^2$$

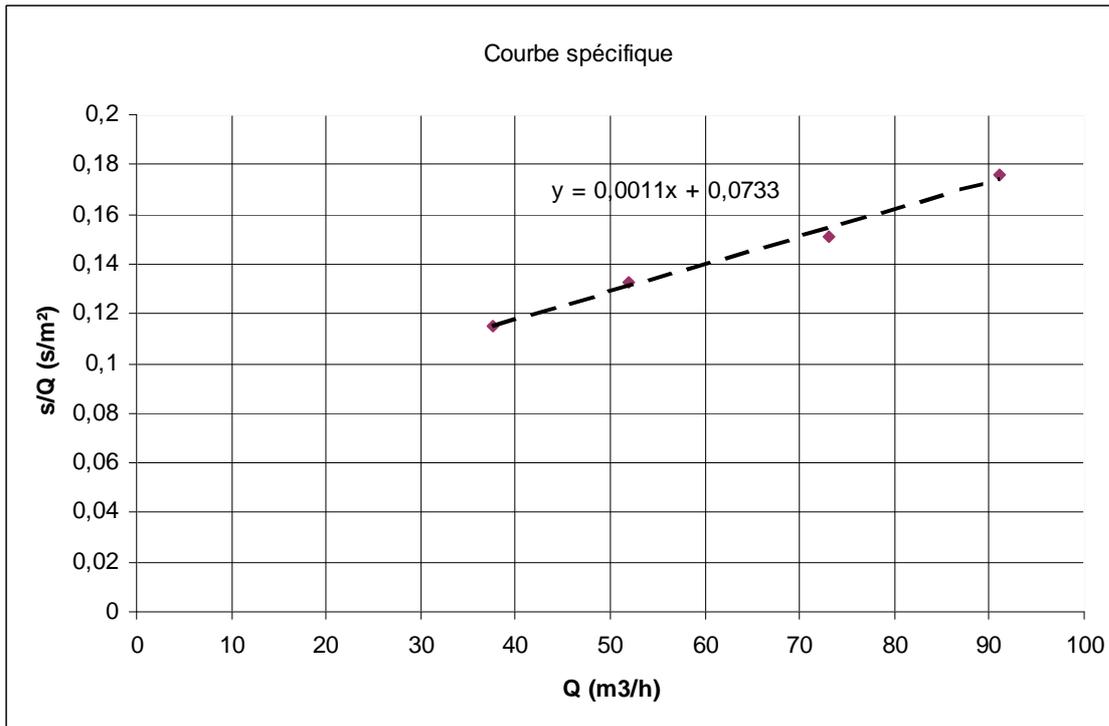


Figure 5 : Rabattement spécifique (s/Q) en fonction du débit Q

Le débit critique, pour lequel les pertes de charges quadratiques ($0,0011 Q^2$) deviennent supérieures aux pertes de charge linéaires ($0,0733$) serait théoriquement ici de $67 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce débit serait largement sous-estimé, au vu de la non stabilisation complète des pertes de charge. Le débit critique réel serait supérieur à ce débit.

Dans le cas présent, il convient de ne pas dénoyer les marnes et caillasses afin d’y limiter les mouvements d’eau et donc la dissolution du gypse. Le toit des marnes et caillasses se situe à 25 m de profondeur. Le niveau statique étant à 7 m de profondeur, le rabattement maximal admissible est de 17 m (sécurité de 1 m). Le débit correspondant est d’environ $94 \text{ m}^3/\text{h}$.

Nous retiendrons donc de l’essai :

- Un débit critique supérieur à $67 \text{ m}^3/\text{h}$,
- Un débit maximal d’exploitation inférieur à $94 \text{ m}^3/\text{h}$ pour éviter de dénoyer les marnes et caillasses.

Par conséquent, la formation pourra être exploitée à $65 \text{ m}^3/\text{h}$.

VI.1.2 Interprétation de la réinjection

Après suivi de la remontée sur 17 h, un essai d’injection a été effectué le 1^{er} septembre au débit maximal du réseau d’eau de ville (borne d’incendie), soit $20 \text{ m}^3/\text{h}$.

Les caractéristiques de l’essai d’injection sont détaillées ci-dessous :

Temps (min)	Débit d’injection (m^3/h)	Augmentation du niveau (m)	Débit spécifique d’injection ($\text{m}^3/\text{h/m}$)
0 à 120	20	10	10

Tableau 6 : Débit d’injection, augmentation du niveau et débit spécifique d’injection

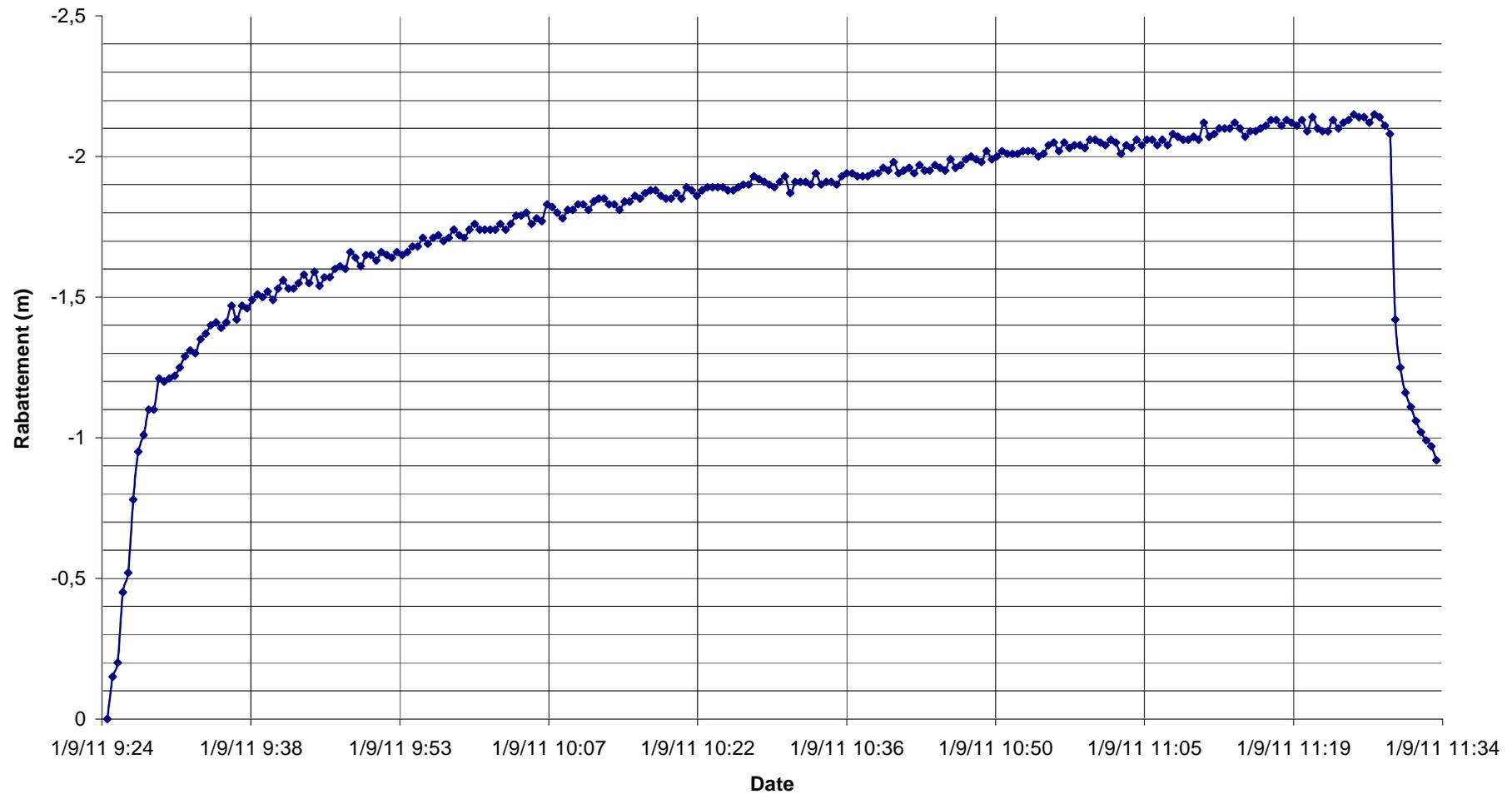
Un essai de réinjection a été réalisé après le suivi de la remontée du pompage par paliers au débit de $20 \text{ m}^3/\text{h}$, (débit maximal du réseau d'eau de ville).

Au bout de 2 h, la remontée du niveau d'eau était stabilisée et avait atteint 2 m par rapport au niveau mesuré le 5 septembre ($7,62 \text{ m/sol}$), soit $5,62 \text{ m/sol}$. La capacité d'infiltration serait donc de $10 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

Plus le débit augmente, plus la capacité d'infiltration diminue. A $65 \text{ m}^3/\text{h}$, elle sera donc inférieure à $10 \text{ m}^3/\text{h/m}$ (déterminée pour un débit de $20 \text{ m}^3/\text{h}$). En règle générale, la capacité d'infiltration est estimée la moitié du débit spécifique. A $60 \text{ m}^3/\text{h}$, le débit spécifique a été évalué à $5,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$ d'après le pompage longue durée. La capacité d'injection serait donc d'environ $2,7 \text{ m}^3/\text{h/m}$. Par conséquent la réinjection de l'eau en gravitaire entraînerait une remontée du niveau d'eau d'environ 20 m.

En conclusion, il sera nécessaire de réaliser un essai de pompage/réinjection en conditions réelles une fois le deuxième ouvrage réalisé.

Essai de réinjection

Figure 6 : Essai de réinjection au débit de 20 m³/h du 8 septembre 2011

VI.2 Pompage de longue durée

VI.2.1 Conditions de réalisation de l'essai

- Méthode : pompage à débit constant,
- Débit de 55 m³/h durant la première heure, puis réajustement à 60 m³/h,
- Mesure des débits : indexation compteur volumétrique,
- Niveau statique avant le démarrage : 7,62 m/sol,
- Rejet : dans le réseau d'eau pluvial à 15 m du forage,
- Date de pompage : du 5 au 8 septembre 2011,
- Durée : 72h

VI.2.2 Hydrogramme : suivis des niveaux d'eau

Le captage a été suivi par sonde de pression de type micro diver. Le niveau statique, dynamique et le rabattement dans l'ouvrage sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	Mesures
Niveau statique en m/sol	7,62
Niveau dynamique au bout de 72 h en m/sol	18,67
Rabattement en m	11,05

Tableau 7 : Suivi du niveau d'eau pendant le pompage de longue durée

Les courbes de descente et de remontée des ouvrages montrent une stabilisation du niveau dynamique.

Il n'a pas été noté d'incidents (arrêt de pompe, absence de carburant) pendant le pompage de longue durée. Cependant, au bout d'environ 1h de pompage, le débit a été réajusté à 60 m³/h (débit antérieur de 55 m³/h).

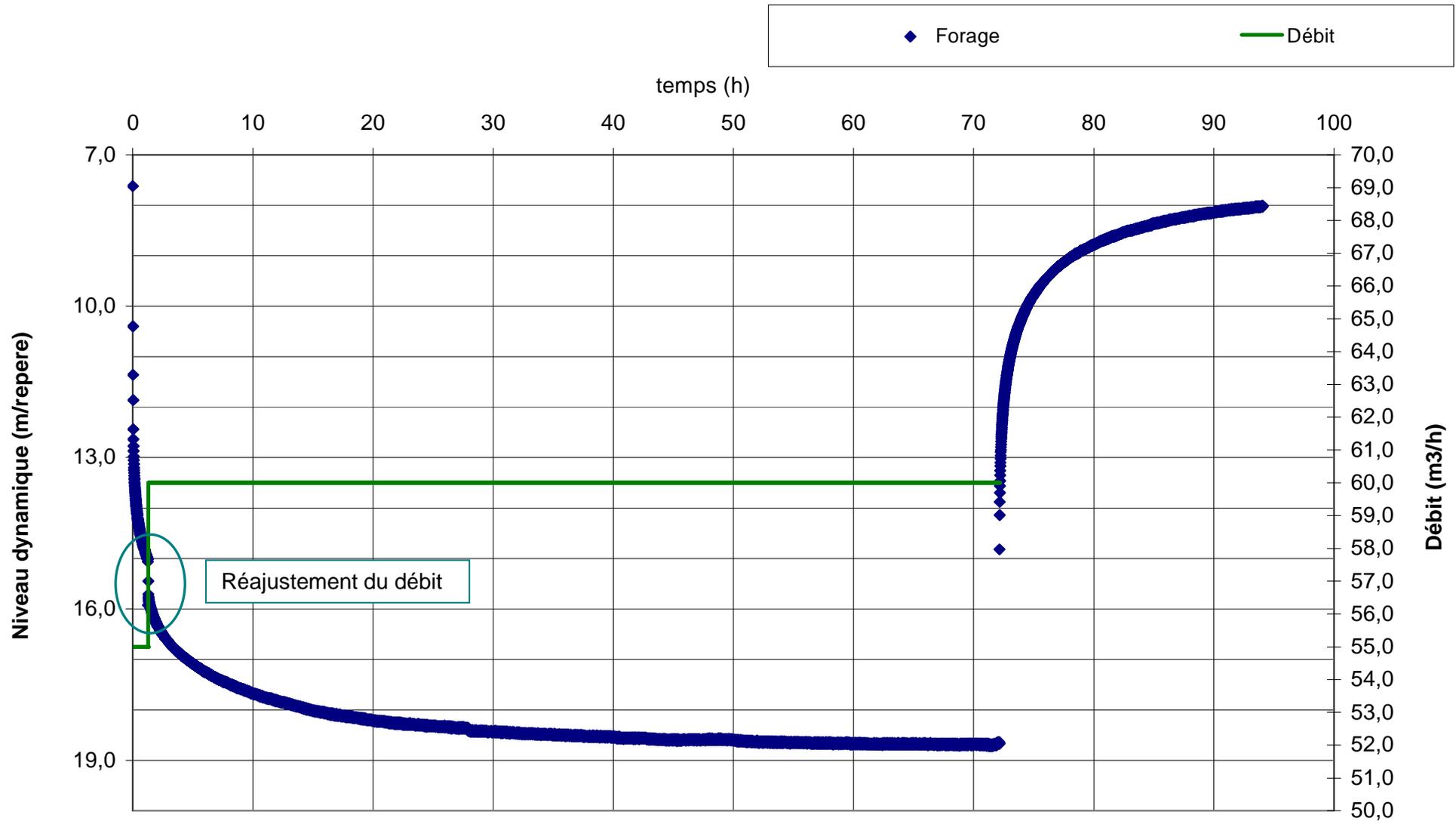


Figure 7 : Hydrogramme des ouvrages pendant l'essai de longue durée

VI.2.3 Interprétation des descentes et des remontées

Les courbes de descente et de remontée (figures pages suivantes) ont été interprétées par l'approximation de Theis-Jacob sur une échelle semi-logarithmique. L'interprétation de ces courbes permet de déterminer le comportement de l'aquifère (distance aux limites) et de calculer ses paramètres hydrodynamiques (transmissivité, emmagasinement).

La pente positive de la courbe de remontée s'explique par la prise en compte du temps total de pompage par l'équation $(t + t') / (t')$ avec t temps total de pompage et t' temps depuis l'arrêt du pompage.

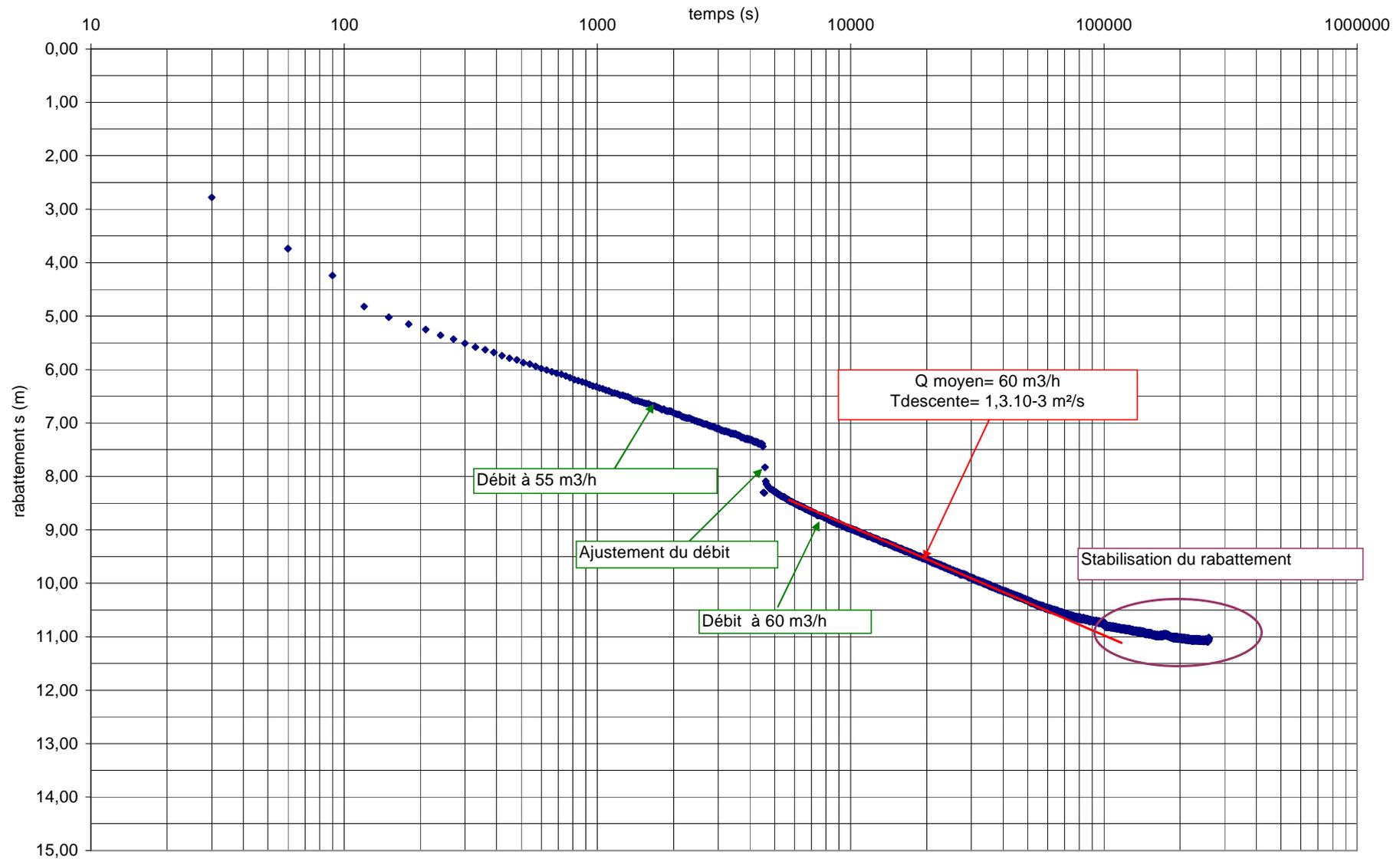


Figure 8 : Courbe du pompage longue durée réalisé le 5 septembre 2011

VI.2.3.1 Interprétation du pompage

Sur la figure 8, il est possible de remarquer :

- Une augmentation brutale du rabattement à 4560 sec (1h26). Ce phénomène s'explique par une augmentation du débit d'exploitation qui a été réajusté à 60 m³/h. Par conséquent, la première partie de la courbe n'est pas exploitable.
- Une stabilisation du rabattement à partir d'environ 152 000 sec (environ 27 h de pompage) qui correspondrait à la présence d'une frontière de recharge ou d'une drainance (voir Figure 9). Aucune frontière de recharge n'est connue à proximité du captage. La stabilisation du rabattement mettrait donc en évidence le drainage de l'aquifère supérieur.

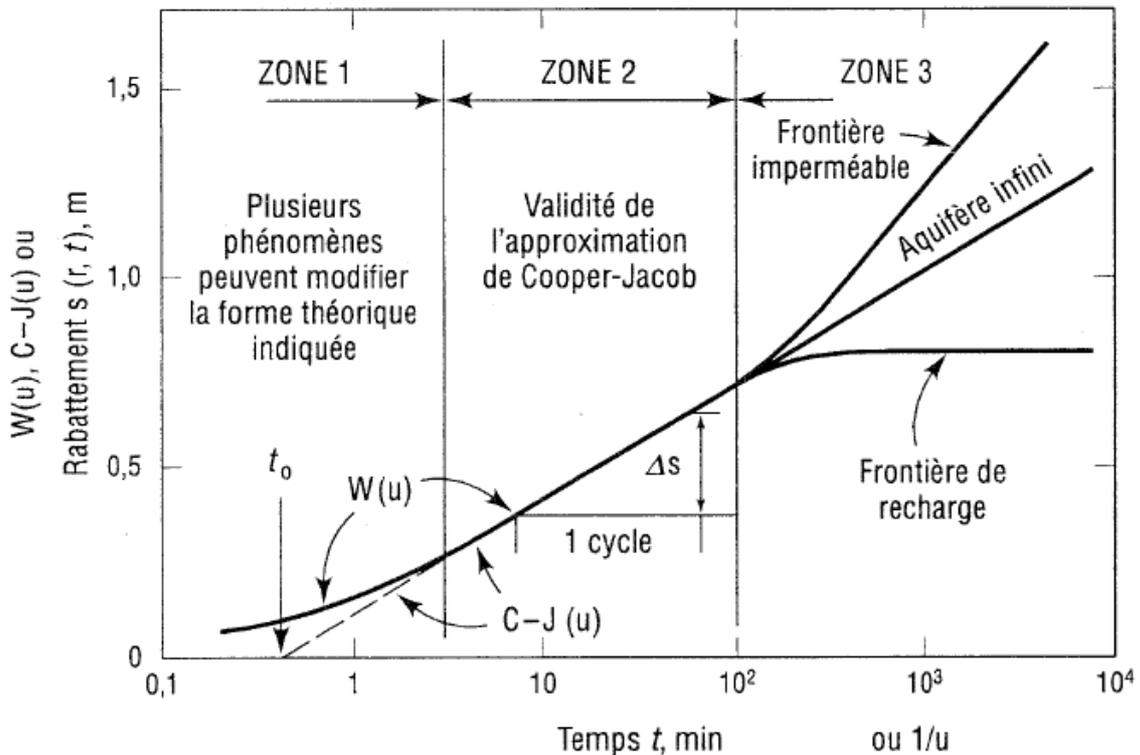


Figure 9 : Les trois zones du graphique $s=f(\text{Log}(t))$ selon Jacob

La courbe de remontée (Figure 10 page suivante) met quant à elle en évidence une transmissivité de $1,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

En conclusion,

	Transmissivité (m ² /s)
Pompage	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Remontée	$1,27 \cdot 10^{-3}$

Tableau 8 : Résultats des valeurs de transmissivité

La transmissivité moyenne peut donc être estimée à $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$.

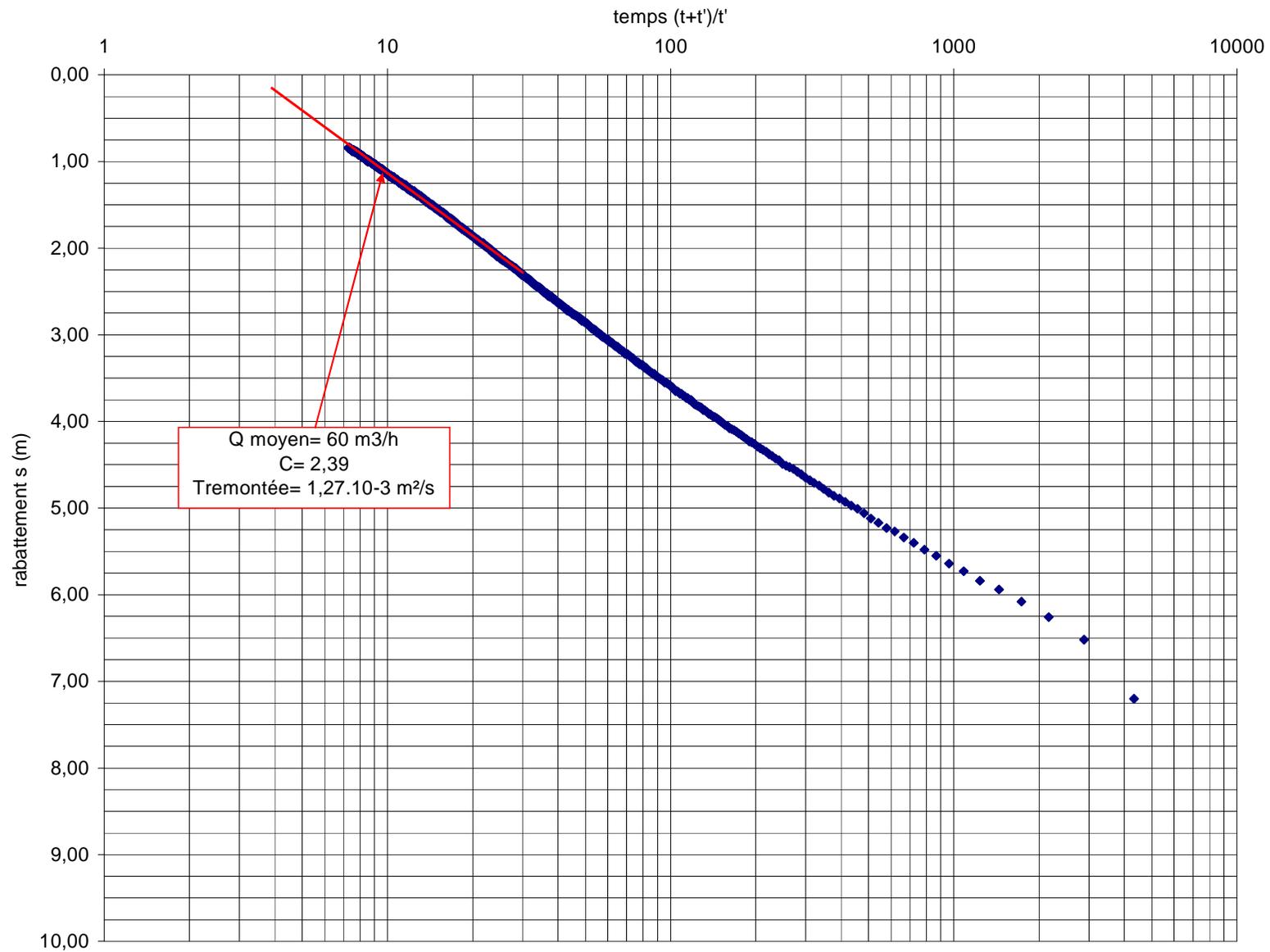


Figure 10 : Courbe de montée du captage durant l'essai de longue durée réalisé le 05/09/11

VII. CONTROLE DU FORAGE

Des mesures de diagraphies ont été réalisées le vendredi 9 septembre 2011 sur le forage d'essai par la société Geo Hydro Investigation (GHI). Elles ont pour objectif de :

- Préciser la coupe géologique et estimer la présence de gypse dans les marnes et caillasses par mesure de gamma-ray,
- Déterminer le positionnement des arrivées d'eau par mesures de micromoulinet.

VII.1 Diagraphie Gamma-Ray

Les mesures ont été réalisées de 0 à 61,80 m de profondeur (profondeur de l'ouvrage, qui se serait bouché à partir de 61,80 m).

Elles apportent les informations suivantes :

- De 0 à -12 m : Horizons superficiels à tendance relativement argileuse ou marneuse. Nombres de CPS supérieurs à 25.
- De 12 à 24 m : Niveau plus argileux. Nombres de CPS pouvant atteindre 60.
- De 24 à 25 m : Niveau plus sableux. Nombres de CPS d'environ 10
- De 25 à 39 m : Horizons à tendance relativement marneuse. Nombres de CPS d'environ 20. Banc de roche marquant la base des marnes et caillasses du Lutétien. Nombres de CPS de 10.
- De 39 à 61,80 m : Calcaires peu ou pas argilisés ou marneux, nombre de CPS compris entre 5 et 20 CPS.

La présence de gypse, correspond, sur une diagraphie gamma-ray, à des nombres de CPS inférieurs à 10, ce qui n'est pas observable dans la formation des marnes et caillasses (CPS supérieurs à 10). La diagraphie ne met pas en évidence la présence de bancs de gypse massifs dans les marnes et caillasses du Lutétien.

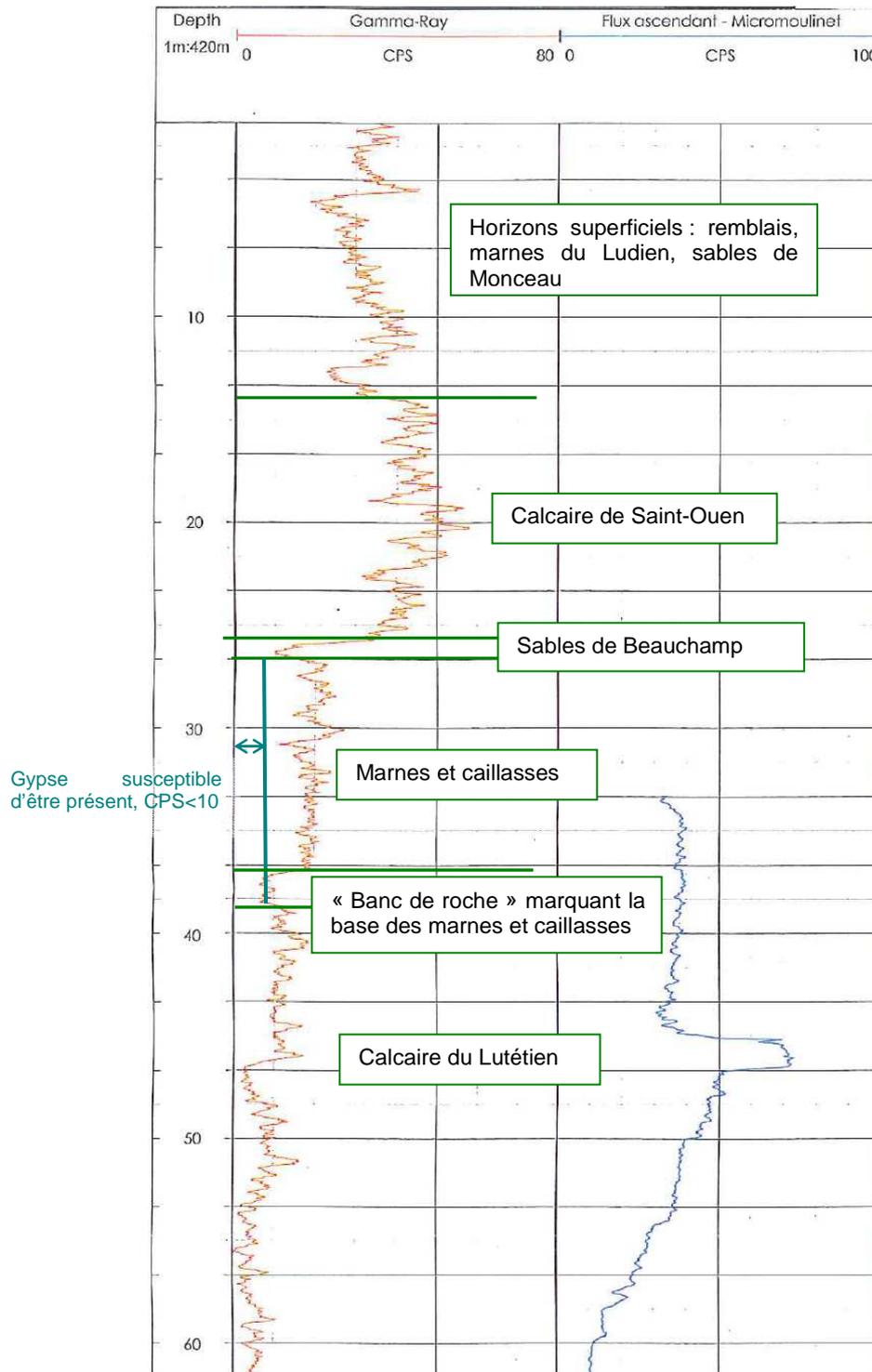


Figure 11 : Diagraphie gamma-ray sur le forage d'essai

VII.2 Micromoulinet

Le micromoulinet permet de localiser les venues d'eau et de les quantifier. Il a été réalisé par l'entreprise GHI le 9 septembre 2011. Ces mesures ont été effectuées par pompage au débit de 30 m³/h environ.

Le micromoulinet utilisé est muni d'une hélice légère montée sur un axe à double roulement qui permet à la sonde de répondre presque instantanément au moindre changement de mouvement du fluide. La mesure s'effectue à la fois à la descente et à la remontée. Cette sonde permet un enregistrement en continu avec une vitesse d'avancement constante.

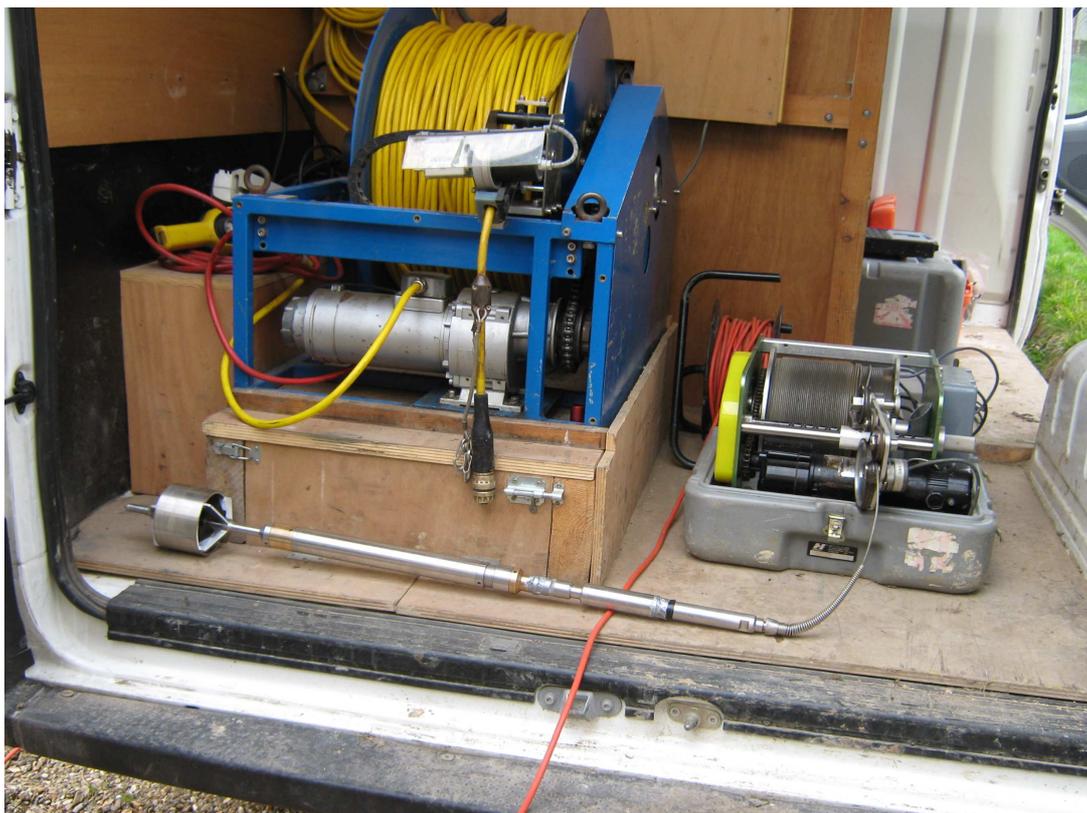


Figure 12 : Micromoulinet

Les mesures de micromoulinet ont été réalisées de -33 à -61,80 m/sol, soit sur 28,80m. Le passage au micromoulinet n'a pas été fait pour des niveaux supérieurs à 33 m, car, aucune arrivée d'eau ne peut y être observée, le tubage étant cimenté.

Les mesures fournissent les renseignements suivants :

- Avant 47 m, aucune arrivée d'eau n'est visible. Cette couche est donc peu productive. La diagraphie a révélée qu'elle est plus argileuse que les horizons inférieurs.
- Les arrivées d'eau sont localisées aux niveaux suivants
 - 50% entre 47 et 50 m,
 - 12% entre 50 et 53,
 - 12% entre 53 et 54,
 - 26% entre 54 et 61,8.

Toutes les arrivées d'eau sont localisées à des niveaux inférieurs à 47 m de profondeur. Elles ne proviennent donc a priori pas des marnes et caillasses.

VII.3 Qualité des eaux brutes

Annexe 3 : Analyse physico-chimique des eaux brutes du 08/09/2011

Un prélèvement de eaux a été réalisé par ICF ENVIRONNEMENT le 8 septembre 2011 à 13h. Une analyse complète des eaux brutes a ensuite été faite par les laboratoires ALCONTROL (analyse physico-chimique) et IPL (analyse microbiologique qui permet de déterminer le risque de concrétion du tubage). Les eaux captées sont de type bicarbonaté calcique magnésienne avec une tendance sulfatée (voir Figure 13).

Diagramme de Piper

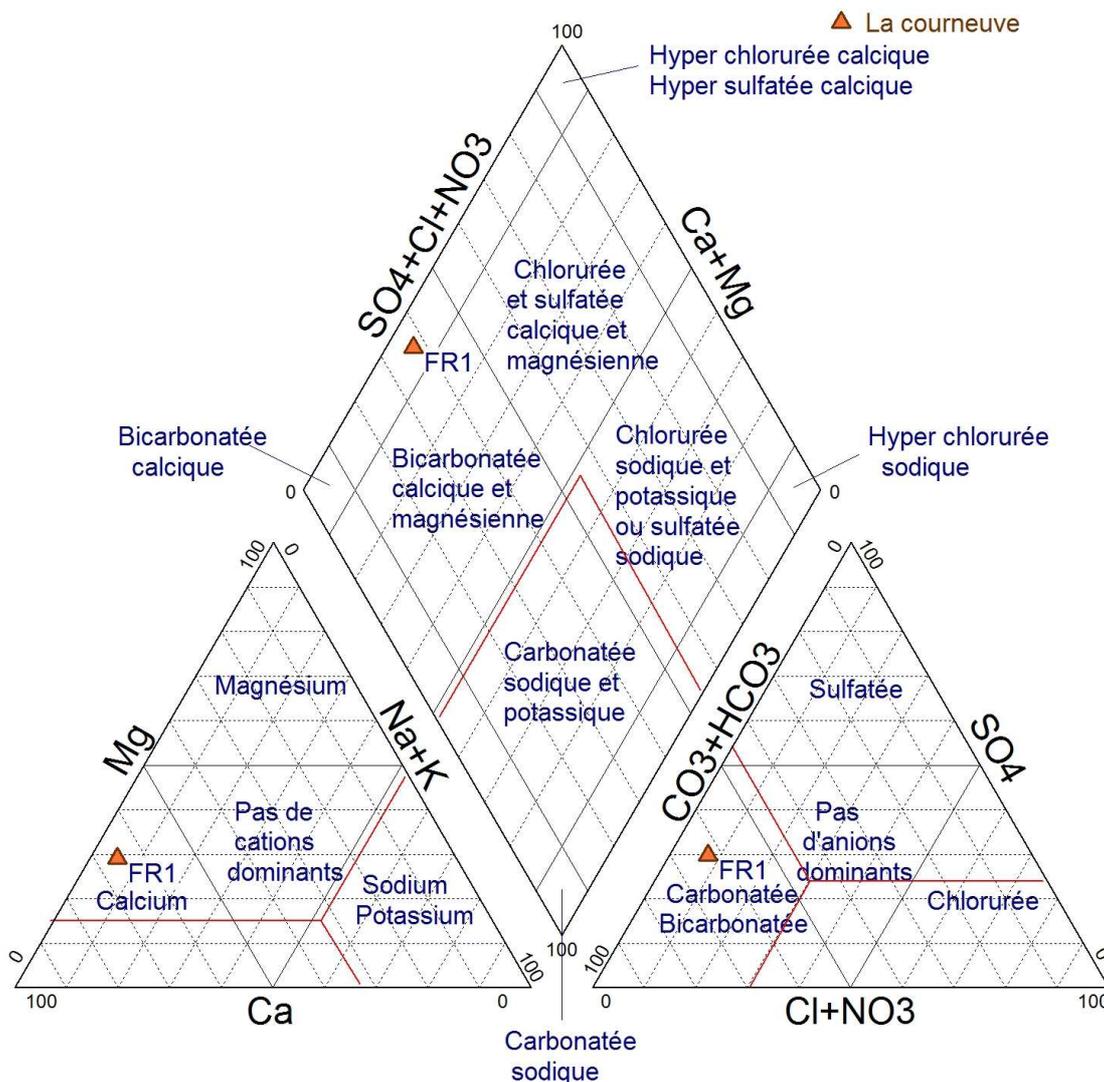


Figure 13 : Représentation chimique des eaux selon Piper

L'analyse montre :

- Une température de l'ordre de 13,6°C,
- La présence de BTEX,
- La présence de COHV, } Inférieurs aux valeurs de l'arrêté du 11/01/07, excepté pour le chlorure de vinyle
- Des teneurs conformes à l'arrêté du 11 janvier 2007 pour les autres paramètres.
- Des teneurs relativement faibles en sulfates ; il y aurait donc peu de formations gypseuses dans la formation des marnes et caillasses (voir Figure

14) ou une faible drainance des marnes et caillasses vers les calcaires grossiers.

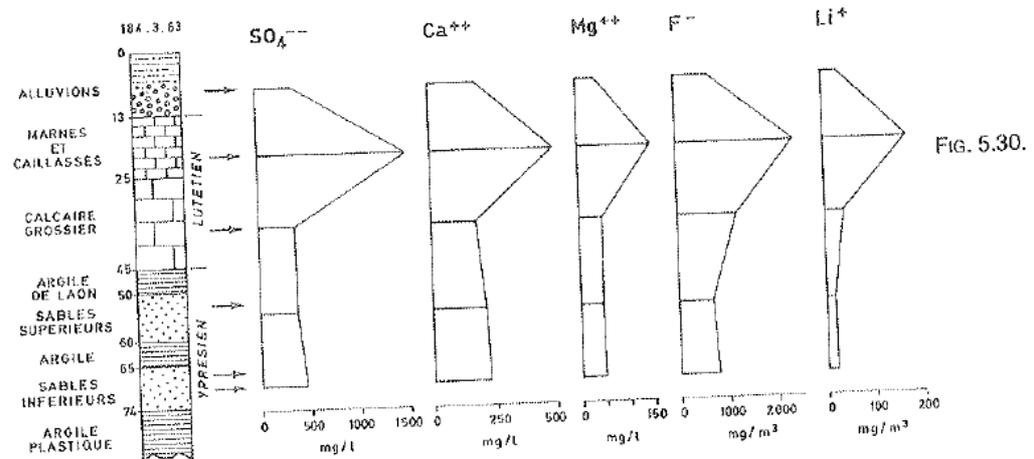


Figure 14 : Teneurs en sulfates dans les marnes et caillasses

La présence de polluants d’origine anthropique (présents en fortes teneurs dans la nappe de Saint-Ouen) dans la nappe du Lutétien (nappe en charge) peut s’expliquer de différentes façons :

- La présence en amont du site d’ouvrages détériorés mettant en relation ces deux nappes
- La drainance de la nappe de Saint-Ouen vers la nappe du Lutétien par une surexploitation ou une mauvaise exploitation des captages (notamment durant les années 60)

La présence de COHV (nutriments des bactéries) dans une nappe peut entraîner leur croissance, et donc un colmatage des ouvrages. Des analyses microbiologiques ont été réalisées le 08/09/2011.

Paramètre	Résultat	Interprétation
Bactéries sulfato-réductrices	930 NPP/ml	Valeur significative
Ferro-bactéries	500 à 9 000 cellules/ml	Valeur significative

Tableau 9 : Analyse microbiologique

Ces prélèvements ont eu lieu avant javellisation.

VIII. SYNTHÈSE

Dans le cadre de la rénovation du site de l'ancienne usine Mécano en médiathèque et en centre administratif à La Courneuve (93), il est envisagé d'utiliser le potentiel hydraulique et thermique pour un chauffage par géothermie. Le débit maximum souhaité est de l'ordre de $65 \text{ m}^3/\text{h}$.

Pour cela, un forage d'essai a été réalisé afin de déterminer les caractéristiques de la nappe. Les prestations suivantes ont été menées conformément au cahier des charges :

- la création d'un forage de reconnaissance dans le calcaire grossier du Lutétien,
- le nettoyage et le développement du forage,
- des pompages par palier et de longue durée,
- un prélèvement des eaux brutes,
- un diagnostic par diagraphie gamma-ray et micromoulinet.

Le forage de reconnaissance a permis de préciser la coupe géologique des terrains traversés. Il a été foré jusqu'au mur des calcaires grossiers (toit des sables de l'Yprésien) situés à 62 m. Les calcaires grossiers ont été rencontrés entre 39 et 62 m de profondeur et la crépine a été positionnée sur toute cette hauteur. La complétion du puits a été adaptée à la situation rencontrée c'est-à-dire isolation des aquifères supérieurs (risques de pollution par les nappes superficielles et de dissolution du gypse). La diagraphie (gamma-ray) confirme la coupe géologique.

Le niveau statique des calcaires grossiers du Lutétien se situait à 7,62 m/sol le 08/09/11. D'après les essais par paliers, le débit critique est supérieur à $65 \text{ m}^3/\text{h}$. Pour limiter les risques de drainance, il est conseillé de ne pas dénoyer l'ouvrage jusqu'à la côte des marnes et caillasses, ce qui correspondrait à un rabattement de 17 m et à un débit d'exploitation de $94 \text{ m}^3/\text{h}$.

La valeur de transmissivité serait de $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et la perméabilité de $5,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. L'essai de pompage longue durée pourrait avoir mis en évidence un phénomène de drainance de l'aquifère supérieur au bout de 27 h de pompage continu. L'exploitation prévisionnelle du doublet est de 11 h maximum par jour.

Un micromoulinet a été réalisé pour localiser les arrivées d'eau. 100% des arrivées sont situées dans le calcaire grossier entre 47 et 61,8 m. Il n'y aurait donc pas d'arrivée d'eau provenant des marnes et caillasses.

Des traces d'hydrocarbures ont été détectées sur les eaux prélevées à la fin du pompage longue durée (72h). Cela laisse supposer une communication depuis l'aquifère supérieur, qui pourrait être ancienne. En effet, le chlorure de vinyle est le produit de la dégradation du trichloroéthylène et du tétrachloroéthylène, réaction lente qui s'étale sur des années. L'exploitation prévisionnelle du doublet est de 11 h par jour. Or, le phénomène de drainance apparaît après 27h de pompage. Aucune communication ne devrait donc être constatée entre les aquifères pour cette durée.

En conclusion, le forage pourra être exploité au débit maximal de $65 \text{ m}^3/\text{h}$.

Plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- Réaliser un pompage longue durée d'une durée de 6 jours afin d'étudier précisément les phénomènes de drainance à long terme.
- Réaliser plusieurs analyses d'eau durant ce pompage pour mettre en évidence des phénomènes de changements de chimie de l'eau et préciser les communications entre les marnes et caillasses et le calcaire grossier. Il pourrait être réalisé, par

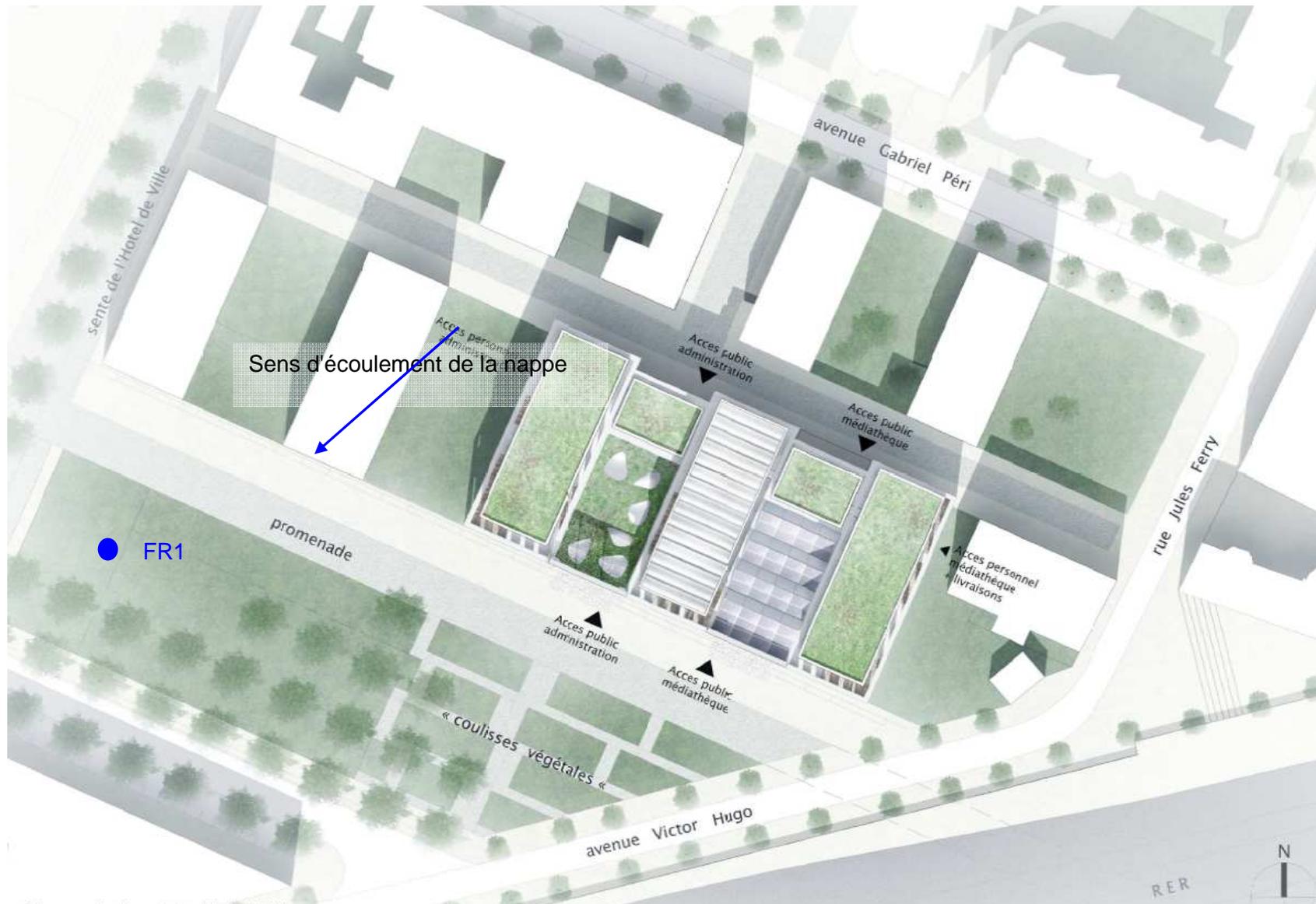
exemple, 6 prélèvements durant le pompage longue durée, avec analyse des cations et des anions.

- Réaliser un piézomètre dans les calcaires de Saint-Ouen pour estimer le phénomène de drainance.
- Réaliser un test de captage/rejet en condition réelle une fois le deuxième forage réalisé.

Annexe

Annexe 1 : Plan de masse de l'ouvrage

CETTE ANNEXE CONTIENT 1 PAGE



**Annexe 2 : Coupe géologique et technique du Forage
de reconnaissance FR1**

CETTE ANNEXE CONTIENT 1 PAGE

**Annexe 3 : Analyse physico-chimique des eaux brutes
du 08/09/2011**

CETTE ANNEXE CONTIENT 2 PAGES

Paramètre	Unité	Résultat
METAUX		
filtration métaux	-	1
aluminium	µg/l	<50
arsenic	µg/l	<5
cadmium	µg/l	<0,4
calcium	mg/l	160
durété calcium	meq/l	8
chrome	µg/l	<1
potassium	mg/l	3
cuivre	µg/l	<5
mercure	µg/l	<0,05
plomb	µg/l	<10
magnésium	mg/l	43
magnésium dureté	meq/l	3,5
manganèse	µg/l	<10
sodium	mg/l	13
nickel	µg/l	<10
fer	µg/l	<50
zinc	µg/l	<20
Dureté (TH)	meq/l	11
dureté totale	deg. all	32
COMPOSES INORGANIQUES		
phosphates (totaux)	mgP/l	<0,05
carbonate	mg/l	<10
bicarbonate	mg/l	480
Titre alcalimétrique complet	mmol/l	7,9
TA- titre alcalimétrique	mmol/l	<0,1
COMPOSES AROMATIQUES VOLATILS		
benzène	µg/l	<0,2
toluène	µg/l	0,26
éthylbenzène	µg/l	0,24
orthoxyène	µg/l	0,27
para- et métaxyène	µg/l	0,74
xylènes	µg/l	1,0
BTEX total	µg/l	1,5
COMPOSES ORGANO HALOGENES VOLATILS		
1,2-dichloroéthane	µg/l	<0,1
1,1-dichloroéthène	µg/l	<0,1
cis-1,2-dichloroéthène	µg/l	8,8
trans 1,2-dichloroéthylène	µg/l	0,91
dichlorométhane	µg/l	<0,5
1,2-dichloropropane	µg/l	<0,2
1,3-dichloropropène	µg/l	<0,2

tétrachloroéthylène	µg/l	<0,1
tétrachlorométhane	µg/l	<0,1
1,1,1-trichloroéthane	µg/l	<0,1
trichloroéthylène	µg/l	0,13
chloroforme	µg/l	<0,1
chlorure de vinyle	µg/l	0,54
hexachlorobutadiène	µg/l	<0,2
bromoforme	µg/l	<0,2
HYDROCARBURES TOTAUX		
fraction C10-C12	µg/l	<5
fraction C12-C16	µg/l	<5
fraction C16 - C21	µg/l	<5
fraction C21 - C40	µg/l	<5
hydrocarbures totaux C10-C40	µg/l	<20
DIVERSES ANALYSES CHIMIQUES		
chlorures	mg/l	33
nitrite	mg/l	<0,3
nitrate	mg/l	<0,75
sulfate	mg/l	180