



ARCHAMBAULT CONSEIL



**Service des Marchés Publics  
Place du général Leclerc  
02 000 LAON**

**Projet de géothermie très basse énergie  
dans le cadre du chauffage de la nouvelle  
« Maison Pour Tous » à Laon (02)**

**COMPTE RENDU DES TRAVAUX DES OUVRAGES  
F1 ; F2 ; PZ1 ; PZ2**

**CNT 02554  
Novembre 2012**

ETUDES ET EXPERTISES : EAU & ENVIRONNEMENT

EGE & AGENCE SUD EST : ZA du Charpenay - 16 rue de l'Aqueduc - 69210 LENTILLY - Tél : 04 78 48 83 83 - Fax : 04 78 48 86 31  
AGENCE NORD EST IDF : 3 av. du Général Gallieni - 92000 Nanterre - Tél 01 55 90 16 68 - Fax 01 55 90 60 77  
AGENCE CENTRE OUEST : 175 rue Morandière - 37260 Monts - Tél 02 47 26 98 31 - Fax 02 47 73 04 17  
ARCHAMBAULT CONSEIL - SAS Capital 500 000 € - SIRET 32875112800054 - APE 7112B

[www.archambault-conseil.fr](http://www.archambault-conseil.fr)

## SOMMAIRE

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 SITUATION GEOGRAPHIQUE .....</b>	<b>6</b>
<b>2 CHRONOLOGIE DES TRAVAUX ET COUPES TECHNIQUES .....</b>	<b>6</b>
<b>3 COUPE LITHOLOGIQUE.....</b>	<b>9</b>
<b>4 RESULTATS DES TESTS HYDRAULIQUES .....</b>	<b>9</b>
<b>4.1 FORAGE DE REJET F1.....</b>	<b>9</b>
4.1.1 Développement des ouvrages.....	9
4.1.2 Pompage par paliers .....	9
4.1.3 Pompage longue durée.....	11
<b>4.2 FORAGE DE CAPTAGE F2.....</b>	<b>12</b>
4.2.1 Développement des ouvrages.....	12
4.2.2 Pompage par paliers .....	12
4.2.3 Pompage longue durée.....	13
<b>4.3 PIEZOMETRE PZ1 ET PZ2.....</b>	<b>14</b>
4.3.1 Pompes des ouvrages .....	14
<b>4.4 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT .....</b>	<b>15</b>
<b>4.5 ESSAI D'INJECTION .....</b>	<b>15</b>
<b>4.6 INCIDENCE LORS DES PRELEVEMENTS .....</b>	<b>16</b>
<b>4.7 SYNTHESE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES .....</b>	<b>16</b>
<b>4.8 DIAGRAPHIE DE PRODUCTION.....</b>	<b>16</b>
<b>4.9 INSPECTION VIDEO DU FORAGE DE CAPTAGE F2 .....</b>	<b>17</b>
<b>4.10 INSPECTION VIDEO DU FORAGE DE REJET F1 .....</b>	<b>18</b>
<b>5 QUALITE DES EAUX .....</b>	<b>19</b>
<b>5.1 AGRESSIVITE ET CORROSIVITE .....</b>	<b>21</b>
5.1.1 Définitions.....	21
5.1.2 Indice de Langelier .....	21
5.1.3 Indice de Ryznar .....	22
5.1.4 Indice de Larson.....	22
5.1.5 Indice de Leroy .....	23
<b>5.2 CONCLUSION .....</b>	<b>24</b>
<b>6 PIEZOMETRIE DE LA NAPPE DE LA CRAIE .....</b>	<b>24</b>



<b>6.1</b>	<b>ÉTAT DE LA NAPPE.....</b>	<b>24</b>
<b>6.2</b>	<b>ÉVOLUTION PIEZOMETRIQUE .....</b>	<b>24</b>
<b>6.3</b>	<b>SENS D'ÉCOULEMENT ET GRADIENT DE LA NAPPE.....</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>EXPLOITABILITE DE LA THERMOFRIGOGOMPE .....</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>PRECONISATION ET RECOMMANDATION.....</b>	<b>26</b>
<b>9</b>	<b>COUPE D'EXPLOITATION .....</b>	<b>27</b>
<b>10</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>28</b>

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1	LOCALISATION TOPOGRAPHIQUE DU PROJET ET IMPLANTATION DES OUVRAGES
ANNEXE 2	COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DEFINITIVE DE F1 F2 PZ1 ET PZ2
ANNEXE 3	HYDROGRAMME DU POMPAGE PAR PALIERS SUR F1 COURBE CARACTERISTIQUE DE F1 HYDROGRAMME DU POMPAGE DE LONGUE DUREE D'OCTOBRE 2012 SUR F1 SUIVI DE LA DESCENTE ET DE LA REMONTEE LORS DU POMPAGE DE LONGUE DUREE DE F1
ANNEXE 4	HYDROGRAMME DU POMPAGE PAR PALIERS SUR F2 COURBE CARACTERISTIQUE DE F2 HYDROGRAMME DU POMPAGE DE LONGUE DUREE D'OCTOBRE 2012 SUR F2 SUIVI DE LA DESCENTE ET DE LA REMONTEE LORS DU POMPAGE DE LONGUE DUREE DE F2
ANNEXE 5	COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT, HYDROGRAMME DE DESCENTE ET DE REMONTEE
ANNEXE 6	ESSAI D'INJECTION GRANDEUR NATURE SUR F1
ANNEXE 7	INCIDENCE DU POMPAGE DE F2 SUR F1
ANNEXE 8	QUALITE DES EAUX SUR F2 – SEQ'EAUX USAGE ENERGETIQUE – DIAGRAMME DE PIPER
ANNEXE 9	COURBE PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DE LA CRAIE
ANNEXE 10	SIMULATIONS DE L'ÉVOLUTION DYNAMIQUE EN POMPAGE CONTINU A DIFFERENTS DEBITS, EN PERIODE DE BASSES EAUX

## **AVANT-PROPOS**

A la demande de la commune de Laon et de son assistant ARCADIS, ARCHAMBAULT CONSEIL a été missionné pour étudier le potentiel géothermique des eaux souterraines au droit du projet de construction d'une « Maison Pour Tous ».

A la suite d'une première étude réalisée par ARCHAMBAULT CONSEIL en 2011 (CNT 2554), il a été établi que l'aquifère de la Craie pouvait satisfaire le projet en terme de débit et de qualité des eaux pompées.

La mairie de Laon a donc missionné Archambault Conseil pour l'assistance technique relative à la création d'un doublet de forage géothermique ainsi que de deux piézomètres qui ont servi à déterminer le sens d'écoulement de la nappe, dont le débit de pointe nécessaire est de 14 m<sup>3</sup>/h.

Ce présent rapport synthétise l'ensemble des informations recueillis au cours de la réalisation de ces différents ouvrages.

Les points suivants seront abordés :

- la chronologie des travaux de réalisation du forage de rejet,
- la coupe lithologique et technique des ouvrages définitifs,
- les résultats des tests hydrauliques (pompage par paliers et pompage longue durée),
- la qualité des eaux
- le débit d'exploitation et de réinjection,

## 1 SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le site est localisé en zone urbaine en partie basse de la commune de Laon (02), à l'Est du centre-ville. Le bâtiment, d'une superficie de 1 400 m<sup>2</sup> environ est bordé par la rue des Filles, qui est parallèle à la rue Edouard Branly, la N2 et la RD181.

Sur le plan géomorphologique, le site se situe à la cote de 73 m NGF environ en pied de coteau de la butte témoin sur laquelle repose la vieille ville. L'**annexe 1** localise le projet sur un extrait de plan topographique et sur un plan masse.

Le projet est implanté sur les parcelles 72 et 86 de la section ZK du cadastre de Laon (02). Les deux forages de reconnaissance et les 2 piézomètres sont implantés sur ces dernières (**annexe 1**).

Tableau 1 : Localisation géographique du forage.

		Coordonnées en Lambert II Étendu		
Type	Désignation	X (m)	Y (m)	Z* (m EPD)
Captage	F2	694 895	2 508 626	+ 74,745
Rejet	F1	694 904	2 508 560	+ 74,557
Suivi 1	PZ1	694 930	2 508 590	+ 73,949
Suivi 2	PZ2	694 895	2 508 632	+ 74,745

\*les cotes des têtes de puits provisoires (pour les ouvrages F1 et F2 il est prévu des chambres bétonnées enterrées) entre les ouvrages ont été mesurés au théodolite ; les cotes finales devront être réalisées par un géomètre et après finalisation complète du projet

## 2 CHRONOLOGIE DES TRAVAUX ET COUPES TECHNIQUES

Les travaux de forage et d'équipement se sont déroulés du 19 septembre au 11 octobre 2012 en 2 étapes :

Compte tenu des terrains et de la mise à disposition d'eau sur site, il a été décidé de réaliser les ouvrages au Rotary. L'**annexe 2** consigne l'ensemble des coupes techniques et lithologiques des ouvrages (forages de captage et de rejet, ainsi que les piézomètres).

- Les piézomètres ont atteint une profondeur d'environ 10 m suivant la complétion

Phase	Profondeur de foration (m / sol)	Dispositions constructives
1	De 0 à 4 m	Foration au rotary boue (ou MFT) Ø 181 mm. Pose d'un tube plein PVC Ø 112 - 125 mm de +1 m à -4 m
2	De 4 à 10 m	Foration au rotary boue (ou MFT) Ø 181 mm. Pose tube crépiné PVC Ø 112 - 125 mm (slot 2 mm) de -4 m à -10 m. Gravillonnage avec massif de gravier, Ø 4- 8 mm, de -3 m à -10 m. Cimentation de l'espace annulaire de 0 à -3m.
3	A 10 m	Fond plein

- Les forages (captage et rejet) ont atteint une profondeur d'environ 35 m/sol (cote de +38 m NGF) selon les caractéristiques suivantes :

Phase	Profondeur de foration (m / sol)	Dispositions constructives
1	De 0 à 10 m	Foration au rotary boue (ou MFT) Ø 438 mm. Pose d'un tube acier à l'avancement Ø 355 mm de 0 à 10 m. Cimentation de l'espace annulaire (2" minimum) par l'intérieur du tube plein sous pression. Attente de séchage du ciment d'au moins 24 heures.
2	De 10 à 34 m	Foration au rotary boue (ou MFT) Ø 340 mm. Pose de la colonne captante : crépine inox à nervures repoussées Ø 219 mm de -9 à -34 m Pose d'un tube plein Inox, Ø 219 mm de 0 m à -9 m. Gravillonnage avec massif de gravier, Ø 4- 8 mm, de -7 m à -35 m Cimentation de l'espace annulaire de 0 à -7 m
3	A 35 m	Bouchon de fond de -34 à -35 m Ø 219 mm

Les diamètres des équipements et de foration ont conservés les espaces annulaires permettant d'avoir **une cimentation d'au moins 2" (50 mm environ, selon la norme NF X10-999).**

Le développement et les tests se sont déroulés sur cette même période. Les tableaux ci-après récapitulent le déroulement de ces travaux :

<b>Chronologie des travaux de réalisation des ouvrages</b>
--

*COMMUNE DE LAON*  
*PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION*  
*D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –*  
*COMPTE RENDU DE TRAVAUX*

	Description des travaux	Observations
du mercredi 19 septembre au vendredi 21 septembre	Mise en place foreuse  Réalisation du fonçage en mono-diamètre (Ø181 mm) jusqu'à 10 m de profondeur de Pz1	Tube plein de tête jusqu'à 4 m de profondeur pour isolement de la surface et cimenté à l'extrados  Tube crépiné jusqu'à 10 m de profondeur pour capter les niveaux les plus producteurs de l'aquifère
	Déplacement foreuse et réalisation de Pz2 dans les mêmes conditions	
du lundi 24 au vendredi 28 septembre 2012	Déplacement de la foreuse pour réalisation du forage de rejet F1  Foration Rotary Ø 438 mm de 0 à 10 m de profondeur, plus équipement	Isolement de la surface par la pose d'un tube plein acier cimenté jusqu'à 10 m de profondeur  Tube crépiné jusqu'à 35 m de profondeur pour captage de la ressource
	Foration Rotary Ø 340 mm de 10 à 35 m de profondeur	
du lundi 31 au vendredi 04 octobre 2012	Déplacement de la foreuse pour réalisation du forage de captage F2.  Equipement du forage (identique F1).	Les graviers mis en place représentent un volume de 0,75 m <sup>3</sup> . La granulométrie est plus importante que dans le forage F1 afin de permettre d'avoir une perte de charge moins importante et mieux réinjecter

Chronologie des développements et des tests hydrauliques		
jeudi 27 septembre 2012	Nettoyage par pistonage provoqué par des marches/arrêts jusqu'à obtention d'une eau claire sur F1.	Injection visant à nettoyer le forage et à en optimiser la productivité  Eau propre. Suivi de la remontée sur 1 heure manuellement
	Injection d'acide chlorhydrique.	
	Après attente de réaction, le forage a été pompé afin de finir le développement et le nettoyage.	
mardi 9 et mercredi 10 octobre	Opération similaire sur F2	
jeudi 04 octobre 2012	pompage de 4h par palier de 1h avec 1h30 de remontée	Détermination de la courbe caractéristique
jeudi 11 octobre 2012	pompage de 4h par palier de 1h avec 1h de remontée	
du mardi 16 au jeudi 18 octobre	Pompage longue durée 48 h sur F1 Pompage réglé à 18 m <sup>3</sup> /h	Fort potentiel hydrogéologique
du lundi 22 au mercredi 24 octobre 2012	Pompage longue durée 48 h sur F2 Pompage réglé à 18 m <sup>3</sup> /h	
du 18 au 19 octobre 2012	Essai d'injection sur 24h au débit de 18 m <sup>3</sup> /h	Niveau stabilisé rapidement

## 3 COUPE LITHOLOGIQUE

La coupe lithologique de terrain au droit du projet a été déterminée à partir des échantillons de terrain recueillis par le foreur tous les mètres sur l'ensemble des ouvrages réalisés. Il s'est avéré que la lithologie du terrain était relativement homogène sur l'emprise du projet. Les relevés ainsi que l'interprétation stratigraphique proposée figurent dans le tableau ci-après et s'appuient sur la notice géologique de Laon :

Coupe lithologique au droit du projet			
Profondeur	Epaisseur	Formation	Interprétation géologique proposée
0-2,5	2,5	Remblais	Quaternaire
2,5-36	300	Craie blanche à silex	Sénonien

## 4 RESULTATS DES TESTS HYDRAULIQUES

### 4.1 FORAGE DE REJET F1

#### 4.1.1 Développement des ouvrages

Afin d'exploiter au mieux la ressource, les forages ont été nettoyé à l'acide. Cette dernière a contribué à l'augmentation de la productivité de l'ouvrage ainsi qu'à nettoyer les premiers mètres autour des ouvrages afin de les débarrasser des poches éventuelles de fines.

#### 4.1.2 Pompage par paliers

##### 4.1.2.1 Généralités

Le pompage par palier s'est déroulé le 04/10/2012.

Il a consisté en la réalisation de 4 paliers enchaînés de 1 heure aux débits de 10 m<sup>3</sup>/h, 20 m<sup>3</sup>/h, 30 m<sup>3</sup>/h et 40 m<sup>3</sup>/h. Le niveau statique a été mesuré à -5,24 m/sol.

La profondeur de la crépine d'aspiration de la pompe était située vers 30 m/sol.



#### 4.1.2.2 Résultats

L'hydrogramme du pompage (**annexe 3**) montre que le niveau dynamique dans le forage de reconnaissance est pseudo-stabilisé à l'issu de tous les paliers.

Le tableau suivant synthétise les résultats de ce pompage par paliers.

Résultats du pompage par paliers				
Q (m³/h)	10	20	30	40
NS (m/sol)	5,24			
ND (m/sol)	5,39	5,64	5,90	6,24
Temps de pompage	60 minutes			
Débit spécifique (m³/h/m)	66	50	45	40
Couleur de l'eau à la fin du pompage	Limpide			

La courbe caractéristique de l'ouvrage (**annexe 3**) montre que le débit critique de l'ouvrage n'a pas été approché lors de ce pompage. En effet, les rabattements observés sont faibles, les niveaux en pompage se stabilisent très rapidement.

D'autre part, on peut estimer la transmissivité du puits à partir de la simplification de la formule de Dupuit :

$$Q \approx T \times s$$

Avec, Q : débit en m³/s

T : transmissivité en m²/s

S : rabattement en m

Le débit spécifique (Q/s) est homogène à la transmissivité et en constitue une bonne approximation si les pertes de charge qui pèsent sur le rabattement sont faibles (approximation de Dupuit). On utilise donc le premier palier de débit pour minimiser l'effet de ces pertes de charges.

On obtient donc pour le premier palier à 10 m³/h :

$$\frac{Q}{s} \approx T = 1,8.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

### 4.1.3 Pompage longue durée

#### 4.1.3.1 Généralités

Le pompage de longue durée s'est déroulé du 16 au 18 octobre 2012 au débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/h. La remontée du niveau d'eau a été suivie sur 1 h manuellement (le niveau étant revenu à sa cote initiale très rapidement).

On remarque sur l'hydrogramme du pompage (**annexe 3**) que le niveau d'eau dans le forage est stabilisé à la fin du pompage de 48 heures et que le niveau d'eau a eu tendance à remonter avant de se stabiliser.

Comme pour le pompage d'essai par paliers, la profondeur de la crépine d'aspiration de la pompe était située vers 30 m de profondeur.

#### 4.1.3.2 Résultats

Les résultats de cet essai ne sont interprétables que pour la remontée. Lors de la descente l'hydrogramme montre que le niveau de la nappe avait tendance à remonter. Aussi la transmissivité observée à la remontée montre qu'elle est sensiblement identique à celle observée lors des pompages par paliers (**annexe 3**) :

Interprétation du pompage d'essai de longue durée au débit moyen de 18 m <sup>3</sup> /h (du 16 au 18 octobre 2012)		
Niveau statique : 5,26 m/sol le 16/10/2012		
Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	3,4.10 <sup>-2</sup>	Remontée

On notera que la valeur obtenue par l'approximation de Dupuit (1<sup>er</sup> palier) était plus faible, ce qui suggère que le forage s'est encore développé.

## 4.2 FORAGE DE CAPTAGE F2

### 4.2.1 Développement des ouvrages

Afin d'exploiter au mieux la ressource, les forages ont été nettoyé à l'acide. Cette dernière a contribué à l'augmentation de la productivité de l'ouvrage ainsi qu'à nettoyer les premiers mètres autours des ouvrages afin de le débarrasser des poches éventuelles de fines.

### 4.2.2 Pompage par paliers

#### 4.2.2.1 Généralités

Le pompage par palier s'est déroulé le 11/10/2012.

Il a consisté en la réalisation de 4 paliers enchaînés de 1 heure aux débits de 10 m<sup>3</sup>/h, 20 m<sup>3</sup>/h, 30 m<sup>3</sup>/h et 36 m<sup>3</sup>/h.

Le niveau statique a été mesuré à -5,08 m/sol.

La profondeur de la crépine d'aspiration de la pompe était située vers 30 m/sol.

#### 4.2.2.2 Résultats

L'hydrogramme du pompage (**annexe 4**) montre que le niveau dynamique dans le forage de reconnaissance est pseudo-stabilisé à l'issu de tous les paliers.

Le tableau suivant synthétise les résultats de ce pompage par paliers.

Résultats du pompage par paliers				
Q (m <sup>3</sup> /h)	10	20	30	36
NS (m/sol)	5,08			
ND (m/sol)	5,18	5,32	5,47	5,55
Temps de pompage	60 minutes			
Débit spécifique (m <sup>3</sup> /h/m)	100	83	77	76
Couleur de l'eau à la fin du pompage	Limpide			

La courbe caractéristique de l'ouvrage (**annexe 4**) montre que le débit critique de l'ouvrage n'a a priori pas été approché lors de ce pompage. En effet, les rabattements observés sont faibles, les niveaux en pompage se stabilisent très rapidement.

D'autre part, on peut estimer la transmissivité du puits à partir de la simplification de la formule de Dupuit :

$$Q \approx T \times s$$

Avec, Q : débit en m<sup>3</sup>/s

T : transmissivité en m<sup>2</sup>/s

S : rabattement en m

Le débit spécifique (Q/s) est homogène à la transmissivité et en constitue une bonne approximation si les pertes de charge qui pèsent sur le rabattement sont faibles (approximation de Dupuit). On utilise donc le premier palier de débit pour minimiser l'effet de ces pertes de charges.

On obtient donc pour le premier palier à 10 m<sup>3</sup>/h :

$$\frac{Q}{s} \approx T = 2,8.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

## 4.2.3 Pompage longue durée

### 4.2.3.1 Généralités

Le pompage de longue durée s'est déroulé du 22 au 24 octobre 2012 au débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/h. La remontée du niveau d'eau a été suivie sur 1 h manuellement (le niveau étant revenu à sa cote initiale très rapidement).

On remarque sur l'hydrogramme du pompage (**annexe 4**) que le niveau d'eau dans le forage est stabilisé à la fin du pompage de 48 heures.

Comme pour le pompage d'essai par paliers, la profondeur de la crépine d'aspiration de la pompe était située vers 30 m de profondeur.

### 4.2.3.2 Résultats



Les résultats de cet essai mettent en évidence une transmissivité similaire entre la descente et la remontés des niveaux (**annexe 4**) :

Interprétation du pompage d'essai de longue durée au débit moyen de 18 m <sup>3</sup> /h (du 22 au 24 octobre 2012)		
Niveau statique : 5,2 m/sol le 22/10/2012		
Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	4,2.10 <sup>-2</sup>	Descente
	5,2.10 <sup>-2</sup>	Remontée

La transmissivité calculée lors de la descente et de la remontée sont quasiment identiques. On notera que la valeur obtenue par l'approximation de Dupuit (1<sup>er</sup> palier) était plus faible, ce qui suggère que le forage s'est encore développé.

## 4.3 PIEZOMETRE PZ1 ET PZ2

### 4.3.1 Pompages des ouvrages

Des pompages ont été réalisés sur les 2 piézomètres jusqu'à stabilisation du niveau d'eau. Il apparaît que pour :

- Pz1 : pompage d'une heure au débit de 4m<sup>3</sup>/h avec stabilisation du niveau dynamique au bout de 20 min
- Pz2 : pompage de 2 heures au débit de 4 m<sup>3</sup>/h avec stabilisation du niveau dynamique au bout de 20 min également.

D'autre part, on peut estimer la transmissivité du puits à partir de la simplification de la formule de Dupuit :

$$Q \approx T \times s$$

Avec, Q : débit en m<sup>3</sup>/s

T : transmissivité en m<sup>2</sup>/s

S : rabattement en m

Le débit spécifique (Q/s) est homogène à la transmissivité et en constitue une bonne approximation si les pertes de charge qui pèsent sur le rabattement sont faibles (approximation de Dupuit). On utilise donc le premier palier de débit pour minimiser l'effet de ces pertes de charges.

On obtient donc pour le piézomètre Pz1 :  $\frac{Q}{s} \approx T = 1,4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

On obtient donc pour le piézomètre Pz2 :  $\frac{Q}{s} \approx T = 1,5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

## 4.4 COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Au cours du pompage de longue durée sur le forage de captage F2, les niveaux d'eau ont également été mesurés au niveau du forage de rejet F1 qui a servi de piézomètre.

L'**annexe 5** montre l'hydrogramme de la descente des niveaux d'eau sur le forage F1 lors du pompage de longue durée sur F2. F1 est distant d'environ 60 m de F2, en aval.

Les résultats de cet essai ne montrent pas de différence de transmissivité entre la descente et la remontée des niveaux, **annexe 5** :

**Tableau 2 : Interprétation de la descente et de la remontée des niveaux d'eau sur F1 lors du pompage d'essai de longue durée sur F2 au débit de 18 m<sup>3</sup>/h (du 22 au 24 octobre 2012)**

Niveau statique F1 : 5,27 m/sol, le 22/10/2012		
Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	3,9.10 <sup>-2</sup>	Descente
	5,5.10 <sup>-2</sup>	Remontée

Le coefficient d'emmagasinement calculé est voisin de 4,4.10<sup>-2</sup>.

On notera la similitude des résultats de transmissivité pour cet essai hydraulique avec ceux effectués sur F2.

## 4.5 ESSAI D'INJECTION

Un essai d'injection « grandeur nature » au débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/h a été réalisé pendant 24 heures du 18 au 19 octobre 2012. Lors de cet essai, F2 a été utilisé comme forage de production et F1 a servi à la réinjection des eaux. Les niveaux d'eau ont été mesurés en continu sur F1 et F2.

L'**annexe 6** présente l'hydrogramme de F1 et F2 lors de cet essai d'injection.

Deux observations sont remarquables à l'issue de l'essai d'injection :

- le niveau dynamique de F2 lors de l'essai d'injection est de 5,4 m/sol (soit 0,19 m de rabattement),
- le niveau dynamique en fin de pompage sur F1 est de 4,94 m/sol. Le forage d'injection n'a donc pas été mis en charge lors de la réinjection. Une élévation de l'ordre de 0,33 m est observée au niveau de l'ouvrage.

Un seul forage de réinjection (F1) est donc suffisant pour absorber les 18 m<sup>3</sup>/h pompés (F1).

## 4.6 INCIDENCE LORS DES PRELEVEMENTS

Lors des essais hydrauliques de F2 (pompage longue durée), le niveau d'eau a été suivis sur F1 afin d'observer le rabattement induit de ces pompages (**annexe 7**).

Il s'est avéré lors des pompages de longue durée de 48h au débit de 18 m<sup>3</sup>/h, il a été observé un rabattement maximal de 0,047 m sur F1.

## 4.7 SYNTHESE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les caractéristiques hydrodynamiques du secteur calculées sont les suivantes :

Transmissivité en m <sup>2</sup> /s lors des essais		Rejet F1	Captage F2
Pompages par paliers (Dupuit 1 <sup>er</sup> palier)		1,8.10 <sup>-2</sup>	2,8.10 <sup>-2</sup>
Pompage longue durée	descente	-	5,2.10 <sup>-2</sup>
	remontée	3,4.10 <sup>-2</sup>	4,2.10 <sup>-2</sup>
Suivi sur F1 lors du pompage LD de F2	descente	3,9.10 <sup>-2</sup>	-
	remontée	5,5.10 <sup>-2</sup>	-
Coefficient d'emmagasinement		4,4.10 <sup>-2</sup>	

On retiendra la valeur moyenne de 4.10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s comme transmissivité de la nappe au droit du site. Le coefficient d'emmagasinement est celui d'une nappe libre. Ces données sont conformes aux caractéristiques habituelles de la nappe de la craie dans un contexte de nappe libre.

## 4.8 DIAGRAPHIE DE PRODUCTION

Le test au micromoulinet a montré que toute l'eau provenait entre 5 et 7 m/sol, soit les niveaux où la craie est la plus fracturé (observé lors de la foration).

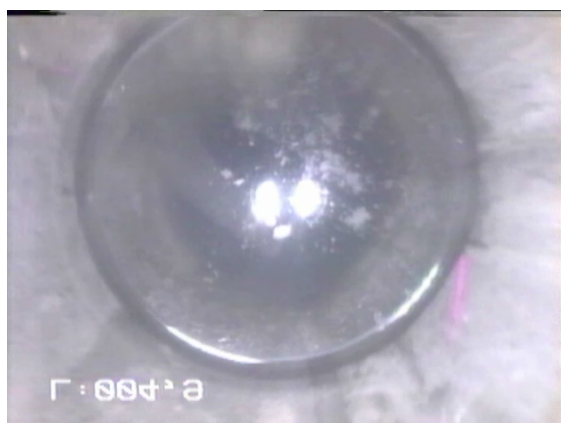
## 4.9 INSPECTION VIDEO DU FORAGE DE CAPTAGE F2

Une inspection vidéo de réception de l'ouvrage a été réalisée le 13 décembre 2012. Elle permet de confronter la coupe technique initiée avec les observations réalisées. On remarque que la complétion du forage est conforme à la coupe.

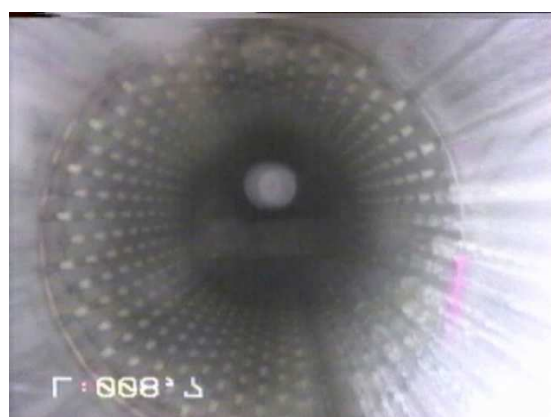
Le niveau statique est de 5,2 m/sol avec un fond de forage à 36 m/sol.

Il est également à noter qu'une partie du tubage commence à se couvrir d'un léger dépôt floconneux en surface du tubage sans pour autant obstruer les crépines. Ce dépôt correspond vraisemblablement à des fines. Il conviendra donc lors de l'exploitation des forages de réaliser des nettoyages réguliers pour éviter toute obturation des filtres (ces derniers devront d'ailleurs être adaptés).

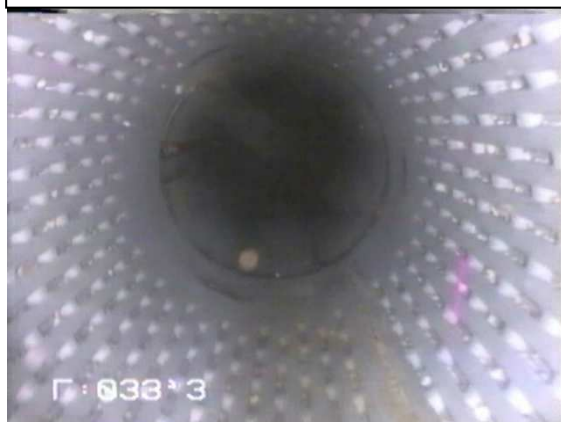
Les photos ci-après résument les observations faites à la caméra :



Tube plein et niveau statique apparent



Début des crépines. Gravier bien en place



Les crépines sont bien dégagées sur toute la hauteur du tubage.  
Le gravier reste bien en place.



Fond du forage. Une légère décantation s'est opérée dans la « poubelle » = partie pleine en fond d'ouvrage.



## 4.10 INSPECTION VIDEO DU FORAGE DE REJET F1

Une inspection vidéo de réception de l'ouvrage a été réalisée le 13 décembre 2012. Elle permet de confronter la coupe technique initiée avec les observations réalisées. On remarque que la complétion du forage est conforme à la coupe.

Le niveau statique est de 5,4 m/sol avec un fond de forage à 35 m/sol.

Il est également à noter qu'une partie du tubage commence à se couvrir d'un léger dépôt de fine en fond d'ouvrage (entre 30 et 34 m de profondeur) qui obstrue légèrement les crépines. Toutefois ce dépôt étant tellement fin qu'au passage de la caméra il n'est pas difficile de le déplacer. Il conviendra donc lors de l'exploitation des forages de réaliser des nettoyages réguliers pour éviter toute obturation des filtres (ces derniers devront d'ailleurs être adaptés).

Les photos ci-après résument les observations faites à la caméra :



Début crépines



Graviers bien en place



Tubage laisse apparaitre un début de dépôts fins crayeux facilement mobilisable lors du passage de la caméra.



Fond du forage. Une légère décantation s'est opérée dans la « poubelle » = partie pleine en fond d'ouvrage.

## 5 QUALITE DES EAUX

Des prélèvements d'eau pour analyses physico-chimiques et bactériologiques ont été réalisés à l'issue du pompage de longue durée par le laboratoire SGS Multilab (24/10/12). L'**annexe 8** consigne les résultats.

Les paramètres mesurés sont majoritairement ceux définis dans le Système d'Évaluation de la Qualité (SEQ) des eaux souterraines pour l'usage "énergie" qui établit 4 altérations (**annexe 8**).

Le système d'évaluation des eaux souterraines réalisé par le BRGM, établit 5 classes d'aptitude (très bonne – bonne – passable – mauvaise – inapte à satisfaire l'usage) de l'eau à usage énergétique pour la production de froid et de chaleur.

Description de la signalétique colorée du SEQ Eau des eaux souterraines					
Classe					
Aptitude pour satisfaire l'usage	Très bonne	Bonne	Passable	Mauvaise	Inapte à satisfaire l'usage
Altération Température (Usage Pompes à Chaleur et Usage Climatisation)	Favorable à l'usage énergétique considéré	Permet l'usage énergétique considéré	Usage délicat pour raisons techniques ou économiques	<i>Classe non définie</i>	<i>Classe non définie</i>
Altération Corrosion	Absence de corrosion	Corrosion faible	Corrosion modérée	Corrosion moyenne	Corrosion forte
Altération Formation de dépôts	Pas de risque de dépôts importants	Peu de risques de dépôts	Risques de dépôts	<i>Classe non définie</i>	Dépôts très importants

Les paramètres à prendre en compte pour évaluer l'utilisation d'une eau à usage énergétique sont les suivants :

- la température liée au processus thermodynamique (altération Température – usage climatisation ; altération Température – usage pompes à chaleur),
- les facteurs chimiques liés à l'altération possible par corrosion (altération corrosion),
- les facteurs chimiques liés à l'altération par formation de dépôts (altération formation de dépôts).

Le tableau ci-après compare les résultats d'analyses des eaux issues du forage de reconnaissance F2 avec les paramètres des altérations du SEQ Eaux souterraines.

Paramètre	Résultat du prélèvement du 24/10/12	Qualité générale de l'altération
Altération température – usage climatisation		
Température (en °C)	13,8	Vert
Altération température – usage Pompes à chaleur		
Température (en °C)	13,8	Vert
Altération Corrosion		
CO <sub>2</sub> dissous (mg/l)	72	Jaune
O <sub>2</sub> (mg/l)*	4,56	
Salinité (g/l NaCl)	-	
Conductivité à 25°C (µS/cm)	970	
pH (unité pH)	7,2	
Chlorures Cl <sup>-</sup> (mg/l)	44	
Sulfates SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> (mg/l)	106	
Bactéries sulfatoréductrices (unité/ml)	0	
Sulfures HS <sup>-</sup> (mg/l)	<0,05	
Eh (mV)*	-	
Altération Formation de dépôts		
pH (unité pH)	7,2	Jaune
Eh – selon valeur du pH (mV)	-	
O <sub>2</sub> (mg/l)*	4,56	
Ferro-bactéries	0	
Indice de saturation selon valeur TAC	- (TAC =33°F)	

\*valeur mesurée in situ par SGS Multilab

Selon le SEQ Eaux souterraines à usage énergétique et sur la base des résultats d'analyse actuels, la qualité de l'eau au niveau des forages :

1. permet l'usage climatisation et l'usage pompe à chaleur,
2. favorise la corrosion : les paramètres déclassant est l'oxygène dissous (corrosivité ; le tubage en Inox est donc très bien adapté).
3. risque de provoquer la formation de dépôts importants carbonatés, les paramètres déclassant étant le pH et l'oxygène dissous.

L'**annexe 8** présente le diagramme de Piper des eaux extraites du forage F2. Le faciès de l'eau prélevée est bicarbonatée calcique et magnésienne.

A partir des résultats d'analyses, on observe également :

- un résidu sec à 180°C proche de 597 mg/l,
- un Titre Alcalimétrique Complet (TAC) de 33°F,
- un Titre Hydrotimétrique (TH = dureté) de 43°F (eau très dure),
- une teneur en fer total de 14,10 µg/l,

## **5.1 AGRESSIVITE ET CORROSIVITE**

### **5.1.1 Définitions**

La corrosivité d'une eau est le résultat de l'interaction électrochimique entre le caractère électrolytique de cette eau (présence d'anions et de cations) et le métal (ou le béton).

Cette interaction conduit à la dissolution du métal et sa transformation en oxydes insolubles (la corrosion la plus connue est la rouille qui correspond à l'action de l'eau sur de l'acier). Le degré de corrosivité peut être mesuré par la conductivité (qui correspond à la minéralisation de l'eau : moins il y a de cations et d'anions dans l'eau, moins cette eau sera corrosive).

L'agressivité d'une eau est la tendance à dissoudre du carbonate de calcium : elle est due au CO<sub>2</sub> (anhydride carbonique) libre présent dans l'eau.

Une eau agressive est en règle générale corrosive (mais l'inverse n'est pas vrai).

### **5.1.2 Indice de Langelier**

L'indice de Langelier ou indice de saturation caractérise l'agressivité d'une eau. Il se définit par la formulation suivante :

$$I_L = pH - pH_s$$

Avec :

$I_L$ , indice de Langelier,

pH, le potentiel en hydrogène mesuré de l'eau,

pH<sub>s</sub>, le potentiel en hydrogène de saturation.

Une eau agressive est caractérisée par un indice négatif, ce qui signifie que l'eau est sous-saturée en carbonate de calcium : elle dissout le calcaire. Si l'indice de saturation est positif, l'eau est dite incrustante (ou entartrante) : il y a formation de dépôts carbonatés.

Le pH à saturation est de 7,107. Les eaux ne sont donc pas agressives.

### 5.1.3 Indice de Ryznar

L'indice de Ryznar ou indice de stabilité permet également de caractériser l'agressivité d'une eau. Sa formulation est la suivante :

$$I_R = 2pH_s - pH$$

Avec :

$I_R$ , indice de Ryznar,

pH, le potentiel en hydrogène mesuré de l'eau,

$pH_s$ , le potentiel en hydrogène de saturation.

L'indice de Ryznar de l'eau prélevée au niveau du forage de reconnaissance est de 7,04. Le tableau ci-après donne la relation entre l'indice de stabilité et l'agressivité de l'eau :

Indice de Ryznar	Caractère de l'eau
4 à 5	Entartrage important
5 à 6	Entartrage faible
6 à 7	Équilibre
7 à 7,5	Légère agressivité
7,5 à 8,5	Agressivité notable
> 8,5	Agressivité importante

A partir de cette classification, l'eau issue du forage est jugée légèrement agressive.

### 5.1.4 Indice de Larson

L'indice de Larson ou indice de corrosivité est déterminé par la formule empirique suivante :

$$I_c = \frac{[Cl^-] + (2 \times [SO_4^{2-}])}{[HCO_3^-]}$$

Avec :

$I_C$ , indice de corrosivité,

$[Cl^-]$ , la concentration en chlorures (mol/l),

$[SO_4^{2-}]$ , la concentration en sulfates (mol/l),

$[HCO_3^-]$ , la concentration en hydrogénocarbonates (mol/l),

L'indice de Larson de l'eau prélevée au niveau du forage F2 est de 0,54. Le tableau ci-après donne la relation entre l'indice de Larson et la corrosion de l'eau :

Indice de Larson	Caractère de l'eau
<0,2	Pas de tendance à la corrosion
0,2 à 0,4	Faible corrosion
0,4 à 0,5	Légère corrosion
0,5 à 1	Corrosion moyenne
> 1	Nette tendance à la corrosion

A partir de cette classification, l'eau issue du forage à une tendance moyenne à la corrosion.

### 5.1.5 Indice de Leroy

L'indice de Leroy permet de déterminer la corrosivité d'une eau à partir des concentrations en ions chlorures, sulfates et bicarbonates. Cette formulation ne tient pas compte des ions calcium et magnésium qui ralentissent le phénomène de corrosion.

L'indice de Leroy qui est égal au rapport du TAC sur le TH, permet de confirmer ou non la tendance à la corrosion d'une eau déterminée à partir de l'indice de Larson.

Une eau est considérée comme non corrosive si l'indice de Leroy est compris entre 0,7 et 1,3.

L'indice de Leroy de l'eau du forage est égal à 0,67. Ce résultat confirme la corrosivité de l'eau estimée à partir de l'indice de Larson.

## **5.2 CONCLUSION**

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux prélevées sur le forage F2 dans la craie montrent un faciès de l'eau bicarbonatée calcique et magnésienne.

Des teneurs importantes ont été relevées pour les paramètres : résidu sec à 180°C (597mg/l), dureté importante (49°F), oxygène dissous (4,56 mg/l).

Selon le SEQ Eaux souterraines, l'utilisation de cette eau pour la géothermie est globalement appropriée (classe jaune ou passable pour l'altération "formation de dépôts"). L'aspect corrosif des eaux est accentué par l'O<sub>2</sub>, en classe rouge, qui favorise la solubilisation du fer. En cours d'exploitation, cette valeur sera vraisemblablement améliorée.

L'eau au droit du forage est en effet incrustante et présente une tendance moyenne à la corrosion. Un entretien régulier des forages sera à prévoir (soit par brossage et/ou traitement chimique). Afin d'estimer la fréquence de ces interventions, des inspections vidéos des ouvrages pourront être effectués régulièrement pour vérifier l'état de colmatage des crépines (inspection à réaliser tous les 2 à 5 ans, voir moins si des pertes de charges seront observées lors de l'exploitation de l'ouvrage).

## **6 PIEZOMETRIE DE LA NAPPE DE LA CRAIE**

### **6.1 ÉTAT DE LA NAPPE**

Le réservoir est de type crayeux à porosité d'interstice et de fracture. Il constitue la nappe régionale la plus importante de la région.

La formation présente une perméabilité moyenne, voisine de  $1,4.10^{-3}$  m/s.

### **6.2 ÉVOLUTION PIEZOMETRIQUE**

Le réseau de surveillance des nappes de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) dispose de plusieurs ouvrages permettant d'observer les fluctuations piézométriques des différentes nappes

d'eau souterraines dans la région parisienne. Toutefois pour la nappe de la craie, il n'existe pas de suivi dans le secteur.

La nappe de la craie étant sub-affleurante, son alimentation est principalement liée à la pluviométrie et à l'incidence des pompages du secteur. Le sens d'écoulement peut donc évoluer localement. Les relevés piézométriques (**annexe 9**) du piézomètre 00845X0036 de la banque de données ADES (localisé en **annexe 9** et situé dans la partie Nord-ouest de la commune) permettent d'apprécier les variations saisonnières et les différences d'amplitudes de la nappe de la craie. Suivant ce graphique et en extrapolant ces données au droit du site (notamment en prenant le niveau de hautes eaux exceptionnels d'avril 1994), il apparaît que les niveaux d'eau observés en 2010 sur site sont susceptibles d'augmenter de 4 m (soit vers 1 à 1,5 m/sol). Actuellement, sur la période d'octobre 2012, les niveaux d'eau ont été enregistrés vers 5 m/sol. Compte tenu de l'exploitation d'un champ captant au sud du site, il est possible que les fluctuations de la nappe soient tamponnées.

Sur la base de ce suivi il apparaît que les variations interannuelles soient relativement élevées et sont ici enregistré à 1,2 m au maximum entre 2002 et 2012.

### **6.3 SENS D'ÉCOULEMENT ET GRADIENT DE LA NAPPE**

Concernant l'écoulement souterrain, bien qu'il n'y ait pas de carte piézométrique au droit de la zone d'étude, la réalisation des 2 piézomètres et du 1<sup>er</sup> forage (F1) ont permis de déterminer le sens d'écoulement de la nappe qui est ici orienté Nord-Sud avec un gradient de 2‰.

## **7 EXPLOITABILITE DE LA THERMOFRIGOGOMPE**

En exploitation estivale (période de basses eaux) : débit de pointe désiré de 18 m<sup>3</sup>/h

L'ouvrage F2 a été dimensionné pour permettre une exploitation de la nappe à un débit supérieur à 18 m<sup>3</sup>/h (débit utile pour le projet de la « Maison Pour Tous » avec une profondeur de la pompe d'environ 30 m/rep.



En se référant à la simulation de l'**annexe 10** on constate qu'avec un niveau dynamique admissible de 16 m/sol (niveau à ne pas dépasser afin de ne pas dépasser un rabattement d'1/3 de la zone saturé, avec un niveau statique basses eaux estimée de 7 m/sol), une exploitation de ce type, à long terme, est techniquement possible. Le niveau d'eau pris dans cette simulation correspond à un niveau bas, théorique, basé sur les variations piézométriques observées sur le piézomètre n°00845X0036 ainsi que sur les niveaux d'eau observés sur les forages. Il permet d'approcher un niveau critique de la nappe au droit du projet.

On constate alors que l'exploitation envisagée à un débit moyen de 18 m<sup>3</sup>/h est réalisable toute l'année. Des débits supérieurs à 100 m<sup>3</sup>/h peuvent être exploités toute l'année.

## **8 PRECONISATION ET RECOMMANDATION**

Concernant la réinjection des eaux dans la nappe, il s'est avéré qu'à l'issue d'un essai de 24h au débit de 18 m<sup>3</sup>/h que le forage F2 avait les caractéristiques hydrodynamique pour permettre une exploitation de ce type sans mise en charge du forage. Le niveau dynamique final observé était de 4,94 m/sol pour un niveau statique de 5,27 m/sol, soit une mise en charge de 0,33 m.

Concernant la qualité des eaux, lors de l'inspection vidéo il a été observé un dépôt de fine. L'inspection ayant été faite 1 mois et demi après sa réalisation (donc sans exploitation du forage pendant tout ce temps) il apparaît que le dépôt apparaît rapidement dans le forage. L'exploitation journalière du forage devrait limiter en partie ces développements mais compte tenu de la qualité des eaux (eau incrustante), il faudra prévoir un nettoyage régulier (au-moins annuel) des ouvrages pour s'assurer qu'ils ne se détériorent pas. C'est une question de pérennité des ouvrages. L'absence d'entretien pourrait conduire à une perte de productivité (notamment par obstruction des crépines par des dépôts).

Ce nettoyage pourra être exécuté par un traitement chimique et une inspection vidéo de contrôle afin de vérifier l'efficacité du nettoyage. Les filtres mis en place dans le dispositif de la PAC devront également être dimensionnés correctement afin de ne pas créer de bouchon et altérer le bon fonctionnement du système de thermofrigopompe.

## **9 COUPE D'EXPLOITATION**

Sur la base des éléments mentionnés dans les paragraphes précédents, il apparaît que la pompe d'exploitation devra être située vers 15 m de profondeur dans la partie crépiné. En effet, il est apparu que :

- le niveau d'eau actuel (période de moyennes eaux) est globalement de 5 m/sol, qui dont les fluctuations sont difficiles à prévoir (comparaison avec le piézomètre n°00845X0036).
- le rabattement généré par un pompage de 18 m<sup>3</sup>/h sera globalement inférieur au mètre.

→ D'autre part, des mesures de sécurité (notamment sur la variabilité, dans le temps, des paramètres vu précédemment) nous obligent à prendre un niveau sécuritaire supplémentaire (au moins 2 m d'eau au-dessus de la pompe). En dernier lieu, l'exploitation de la pompe va générer un échauffement de cette dernière. Il faut donc avoir un minimum d'eau au-dessous de la pompe pour s'assurer qu'elle se refroidisse au-mieux et ainsi lui garantir une pérennité la plus grande possible.

Aussi la pompe devra être disposée vers 15 m de profondeur.



## 10 CONCLUSION

A la demande de la commune de Laon et de son assistant ARCADIS, ARCHAMBAULT CONSEIL a été missionné pour étudier le potentiel géothermique des eaux souterraines au droit du projet de construction d'une « Maison Pour Tous ».

A la suite d'une première étude réalisée par ARCHAMBAULT CONSEIL en 2011 (CNT 2554), il a été établie que l'aquifère de la Craie pouvait satisfaire le projet en terme de débit et de qualité des eaux pompées.

La mairie de Laon a donc missionné Archambault Conseil pour l'assistance technique relative à la création d'un doublet de forage géothermique ainsi que de deux piézomètres qui ont servi à déterminer le sens d'écoulement de la nappe, dont le débit de pointe nécessaire est de 14 m<sup>3</sup>/h.

Les travaux de forage se sont déroulés du 19 septembre au 11 octobre 2012.

Les forages de captage F2 et de rejet F1 font 35 m de profondeur et captent la craie. Les deux piézomètres Pz1 et Pz2 ont permis d'affiner le sens d'écoulement de la nappe au droit du secteur qui est globalement orienté NNW-SSE.

Les résultats des tests hydrauliques donnent des paramètres hydrodynamiques de la nappe satisfaisant au droit du forage (transmissivité moyenne de  $4.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) avec un coefficient d'emmagasinement de 4,4.10<sup>-2</sup>, représentatif d'une nappe libre.

Par ailleurs, compte tenu du dispositif envisagé (1 doublet de forages), il apparaît que le prélèvement et la réinjection de 18 m<sup>3</sup>/h est techniquement possible (essai hydraulique de 24h en réinjection réalisé au débit de 18 m<sup>3</sup>/h). Compte tenu de la bonne productivité de la nappe des débits plus importants peuvent être pompés pour alimenter d'autre PAC (sous réserve de réaliser un nouveau essai d'injection avec le nouveau débit d'exploitation).

Sur le plan quantitatif, compte tenu que l'intégralité du prélèvement sera réinjectée dans la même nappe à l'aide du forage de rejet F1, le bilan en eau sur la nappe sera donc nul.

Sur le plan qualitatif, la craie montre un faciès de l'eau chlorurée, sulfatée calcique et magnésienne. Des teneurs importantes ont été relevées pour les paramètres : résidu sec à 180°C (597 mg/l), dureté importante (33°F), titre hydrotimétrique de 43°F (eau très dure).



Selon le SEQ Eaux souterraines, l'utilisation de cette eau pour la géothermie est globalement appropriée (classe jaune ou passable pour l'altération "formation de dépôts"). L'aspect corrosif des eaux est accentué par l'O<sub>2</sub>, en classe rouge, qui favorise la solubilisation du fer. En cours d'exploitation, cette valeur sera vraisemblablement améliorée.

L'eau au droit du forage est en effet incrustante et présente une tendance moyenne à la corrosion. Un entretien régulier des forages sera à prévoir (soit par brossage et/ou traitement chimique). Afin d'estimer la fréquence de ces interventions, des inspections vidéos des ouvrages pourront être effectués régulièrement pour vérifier l'état de colmatage des crépines (inspection à réaliser tous les 2 à 5 ans, voir moins si des pertes de charges seront observées lors de l'exploitation de l'ouvrage)

Les caméras de réception des forages ont montré qu'un entretien régulier (traitement chimique) devra être effectué afin de garantir la pérennité de l'ouvrage.

Le projet ne montre pas d'incompatibilité vis-à-vis de la réglementation en vigueur.

Nanterre, le 21 décembre 2012

**M MATHIEUX Florian**

Hydrogéologue – Responsable de projets

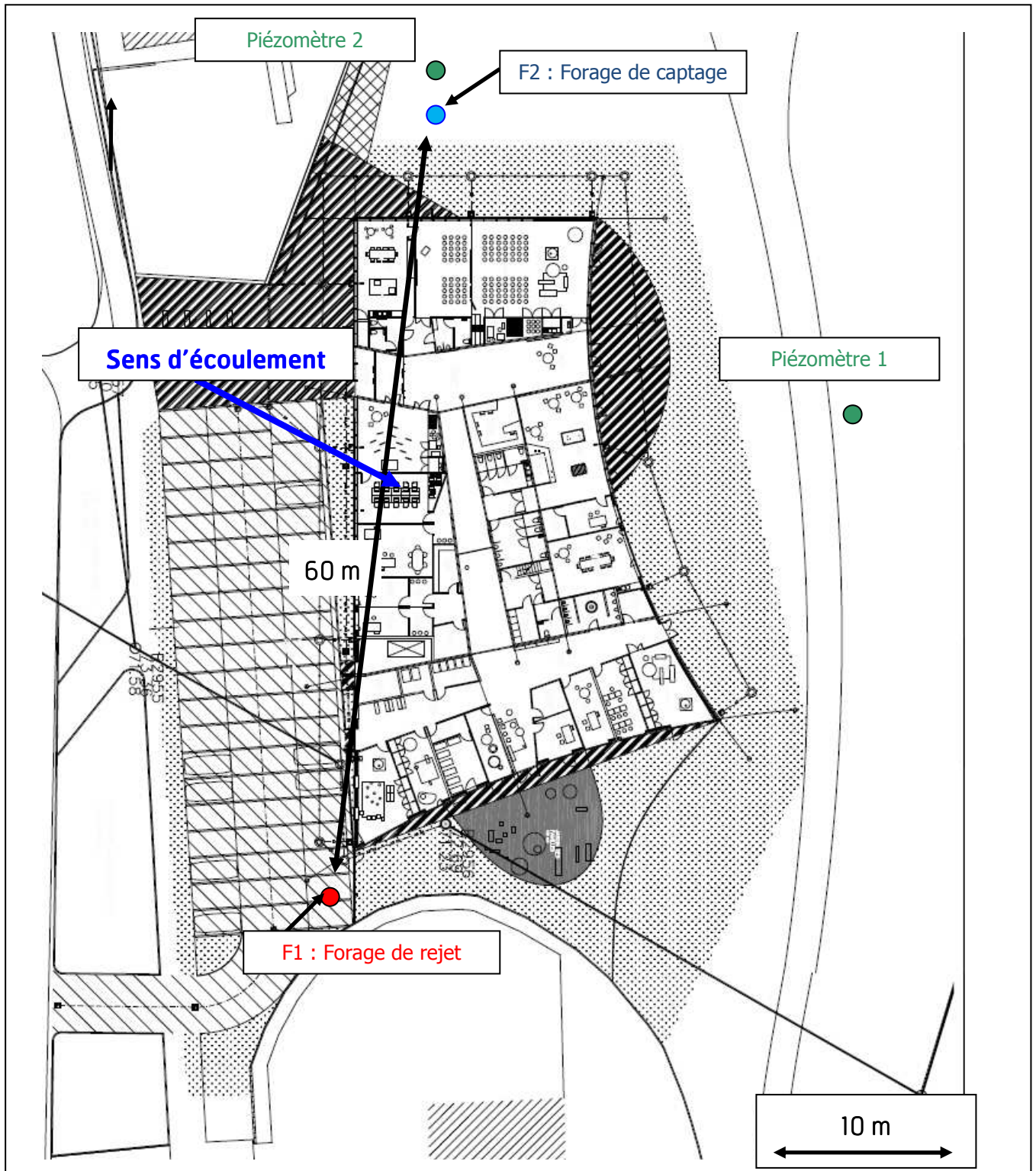
**M THOMAS Matthias**

Hydrogéologue – Responsable agence IDF Est

## **ANNEXE 1**

### **LOCALISATION TOPOGRAPHIQUE DU PROJET ET IMPLANTATION DES OUVRAGES**



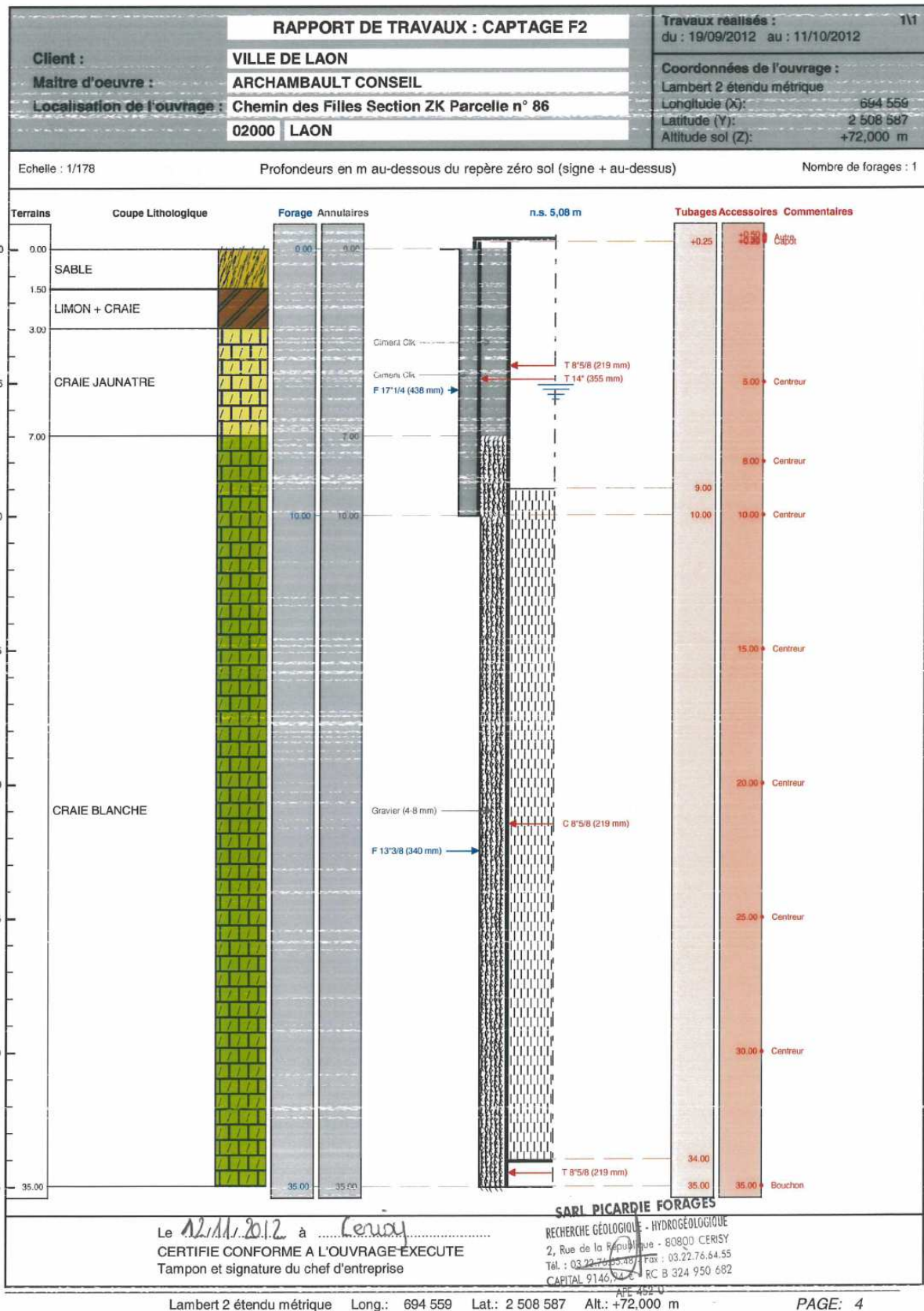


## **ANNEXE 2**

### **COUPE TECHNIQUE ET LITHOLOGIQUE DEFINITIVE DES OUVRAGES**

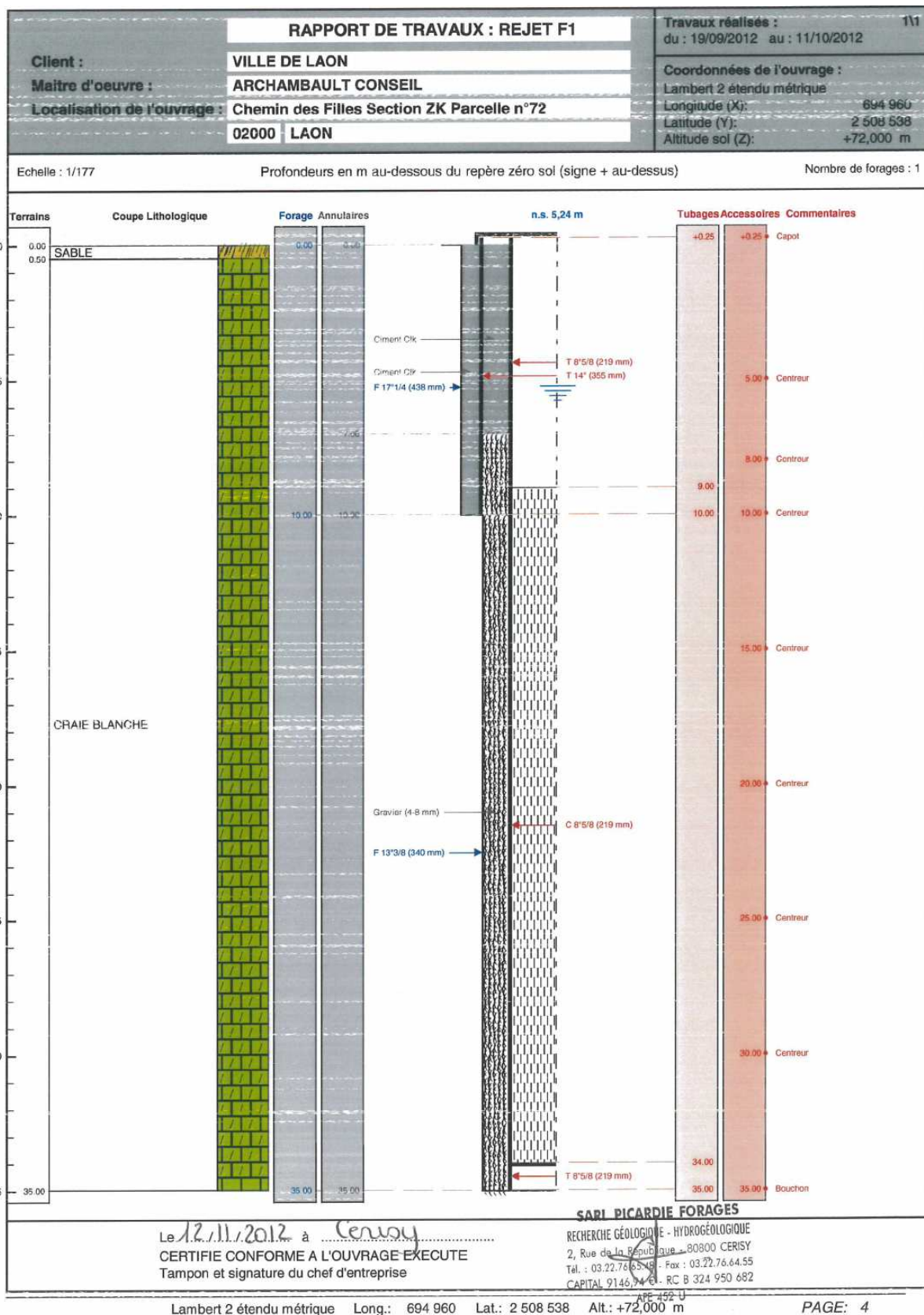


COMMUNE DE LAON  
PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –  
COMPTE RENDU DE TRAVAUX



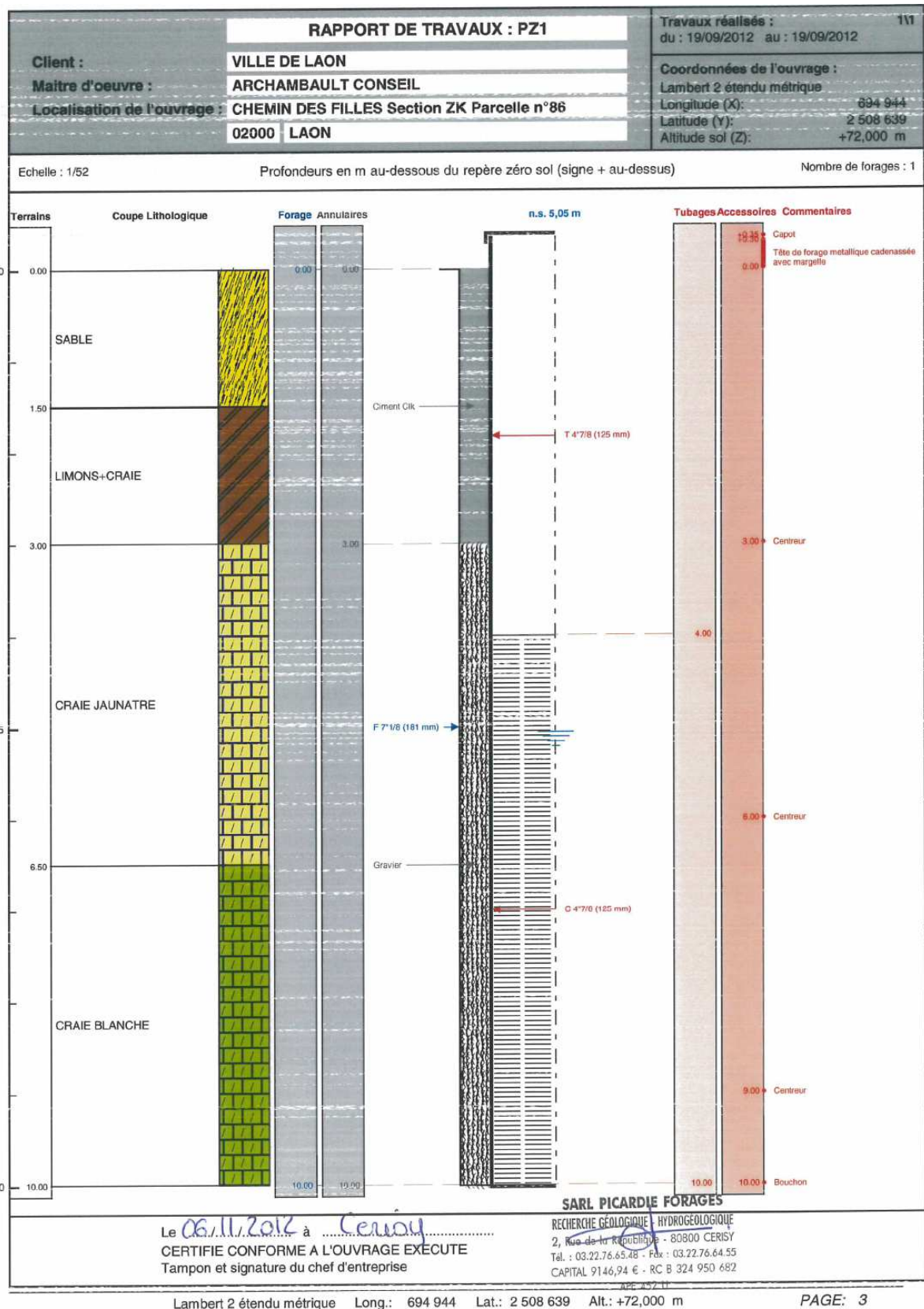


COMMUNE DE LAON  
PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –  
COMPTE RENDU DE TRAVAUX





COMMUNE DE LAON  
PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –  
COMPTE RENDU DE TRAVAUX





## **ANNEXE 3**

### **DONNEES HYDRAULIQUES FORAGE DE REJET F1**

**HYDROGRAMME PALIERS**  
**COURBE CARACTERISTIQUE**  
**HYDROGRAMME LONGUE DUREE**  
**COURBE DE REMONTEE**



PICARDIE FORAGES SARL

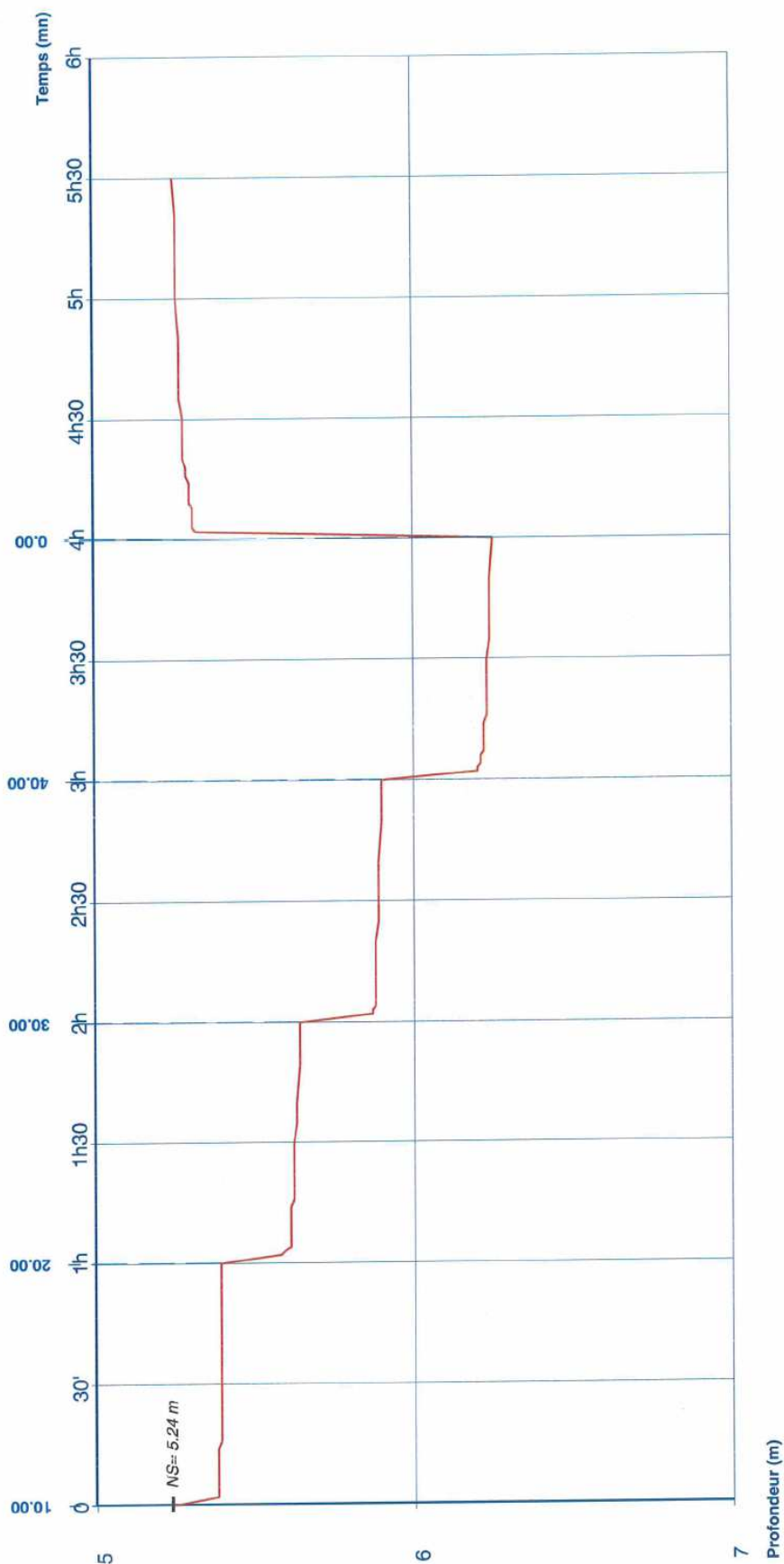
## COURBE DE POMPAGE

### RAPPORT DE TRAVAUX : REJET F1

#### POMPAGE PAR PALIER

Date début: 04/10/2012

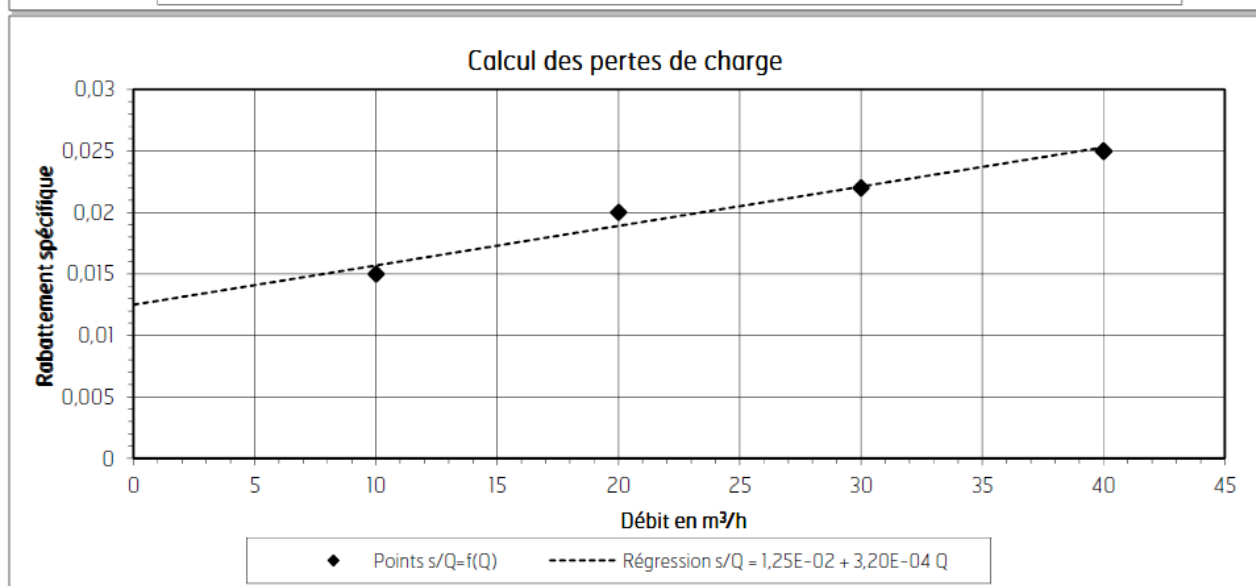
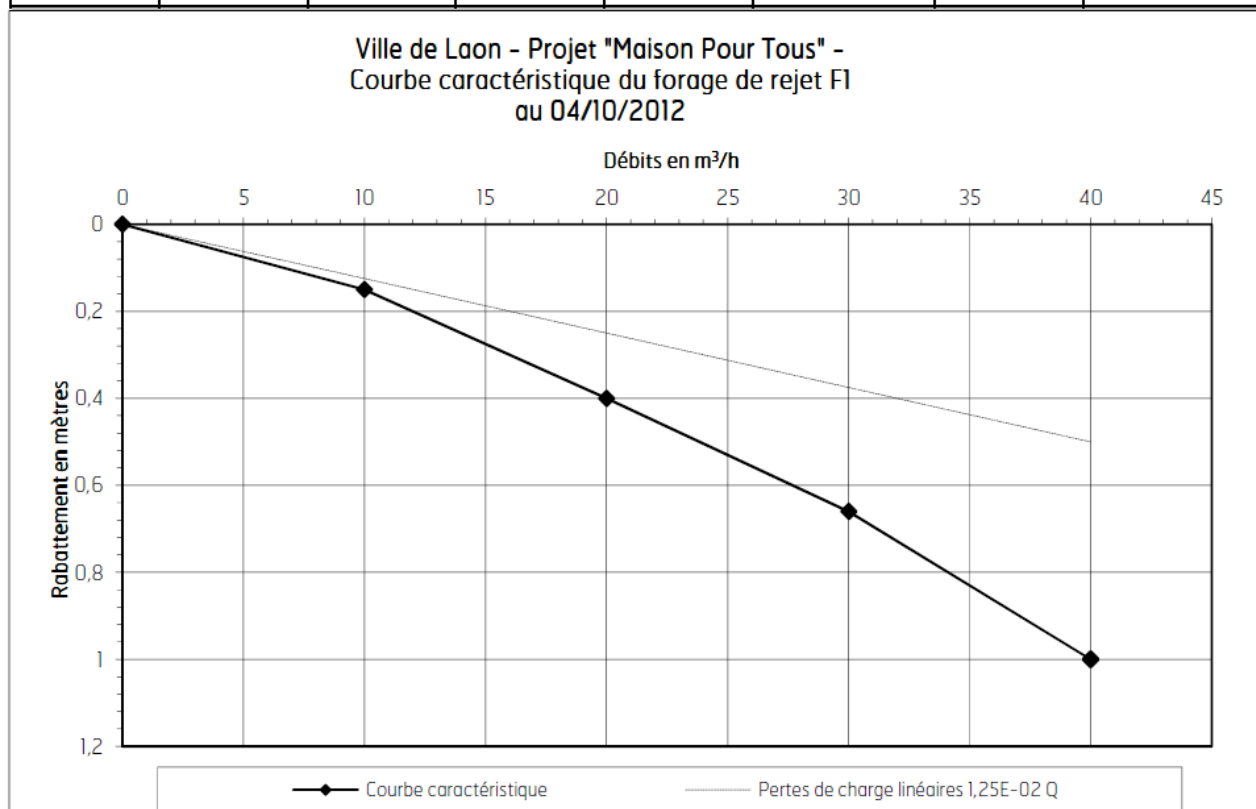
Heure début: 09:00

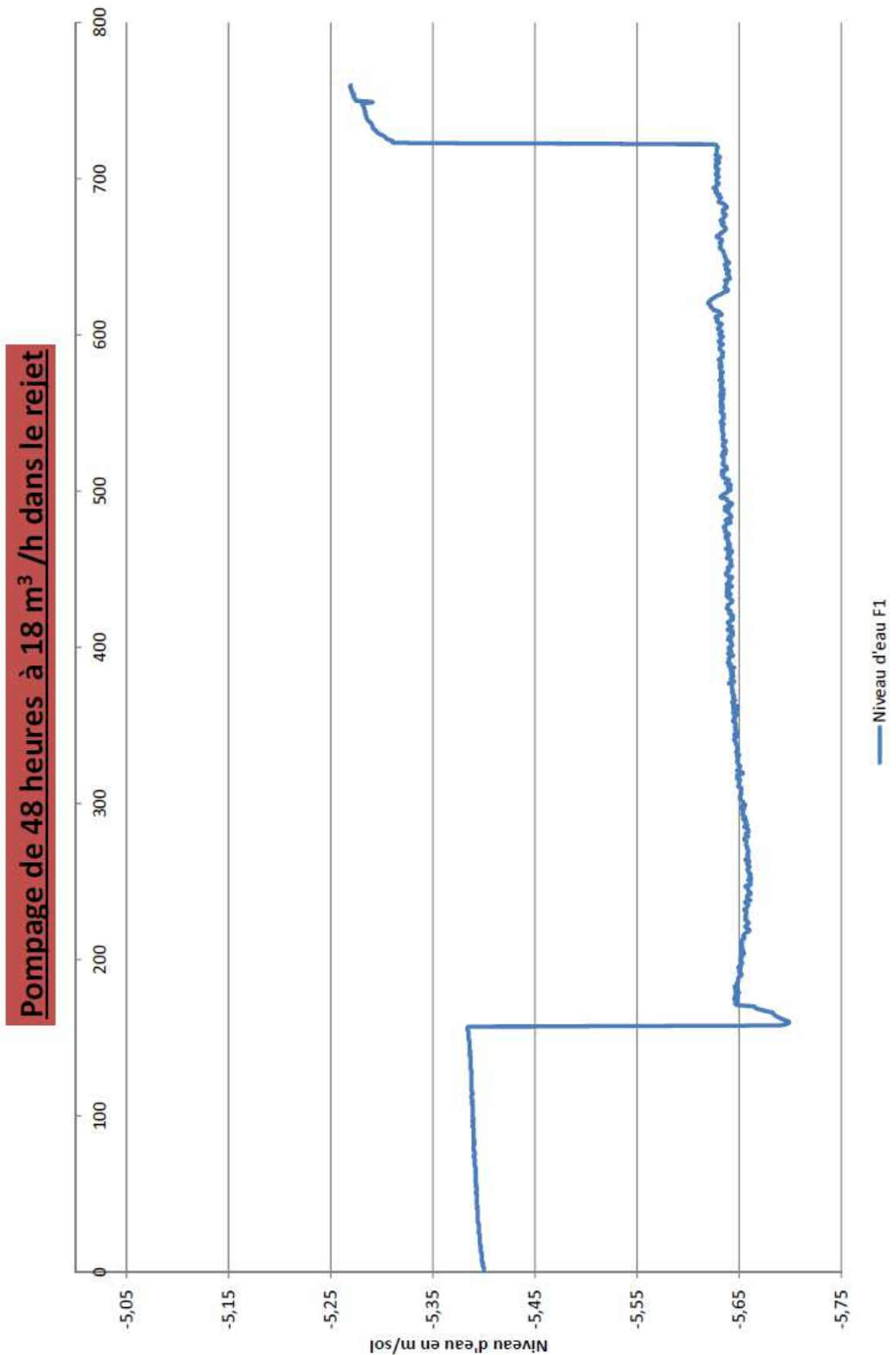


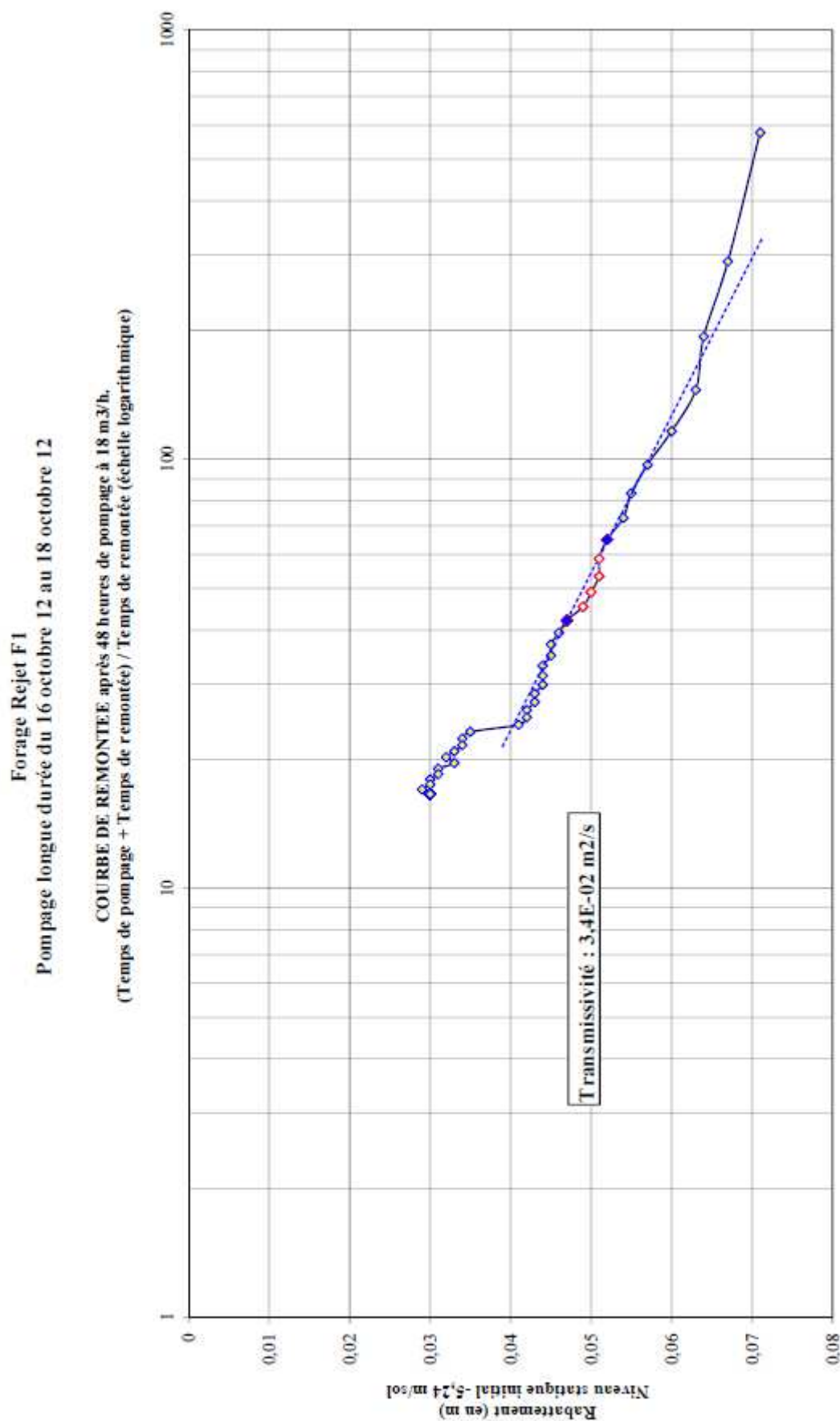
Débits:

0h00 - 1h00	=	10.00 m <sup>3</sup> /h	3h00 - 4h00	=	40.00 m <sup>3</sup> /h
1h00 - 2h00	=	20.00 m <sup>3</sup> /h	4h00 - 5h30	=	0.00 m <sup>3</sup> /h
2h00 - 3h00	=	30.00 m <sup>3</sup> /h			

Palier	Durée	Débit	Niveau initial	Niveau dynamique	Rabatement	Débit spécifique	Rabatement spécifique
n°	h	m <sup>3</sup> /h	m/repère	m/repère	m	m <sup>3</sup> /h/m	m/m <sup>3</sup> /h
1	1	10,0	5,24	5,39	0,15	66,67	0,015
2	1	20,0	5,24	5,64	0,40	50,00	0,020
3	1	30,0	5,24	5,90	0,66	45,45	0,022
4	1	40,0	5,24	6,24	1,00	40,00	0,025









## **ANNEXE 4**

### **DONNEES HYDRAULIQUES FORAGE DE CAPTAGE F2**

**HYDROGRAMME PALIERS  
COURBE CARACTERISTIQUE  
HYDROGRAMME LONGUE DUREE  
COURBES DE DESCENTE ET DE REMONTEE**



PICARDIE FORAGES SARL

## COURBE DE POMPAGE

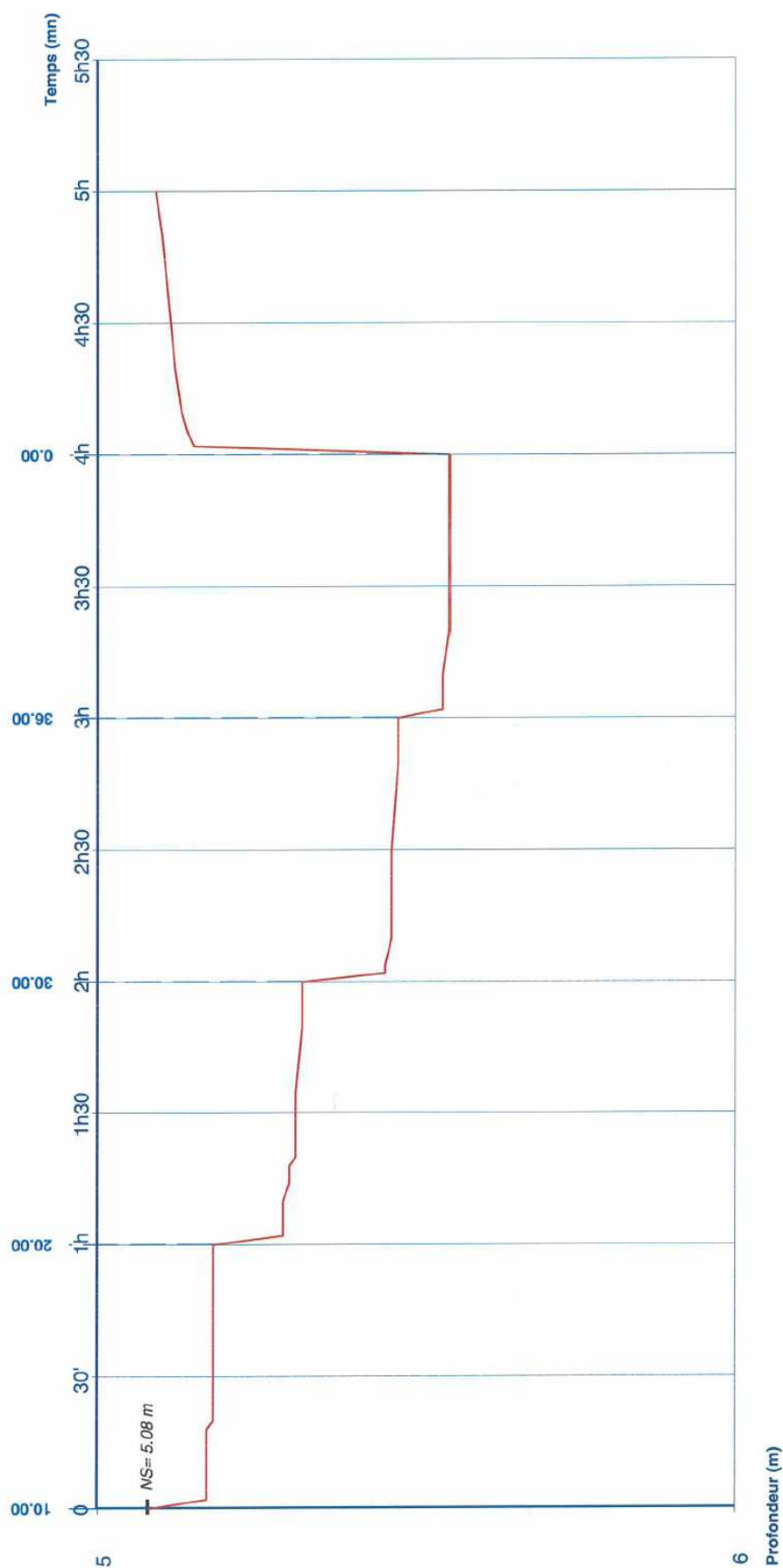
### RAPPORT DE TRAVAUX : CAPTAGE F2

#### POMPAGE PAR PALIER



Date début: 11/10/2012

Heure début: 09:00

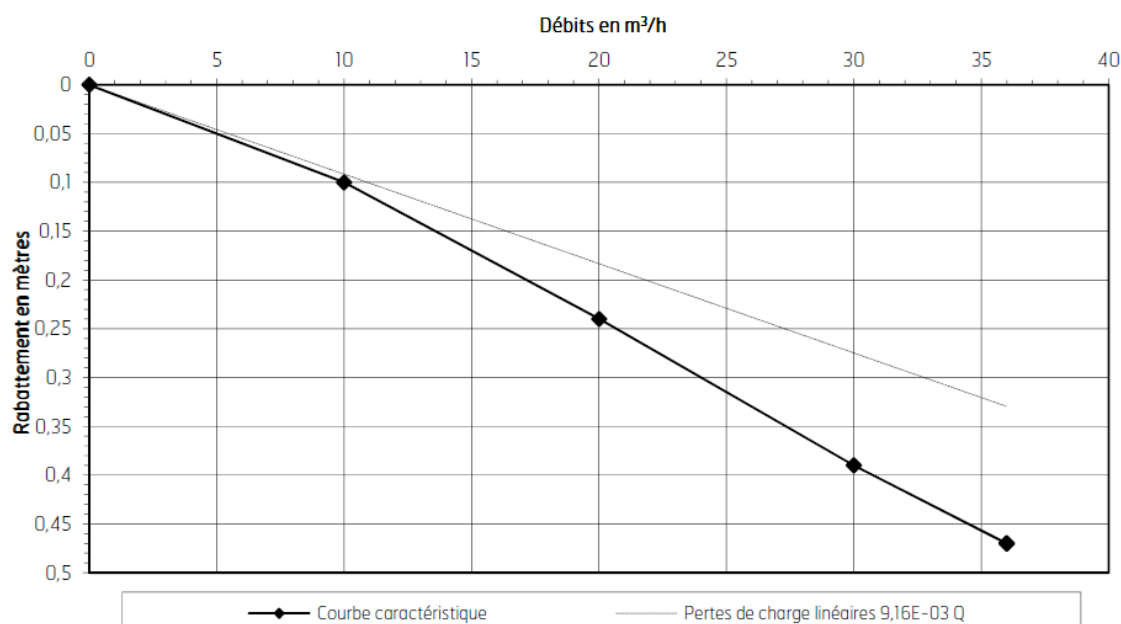


Débits:

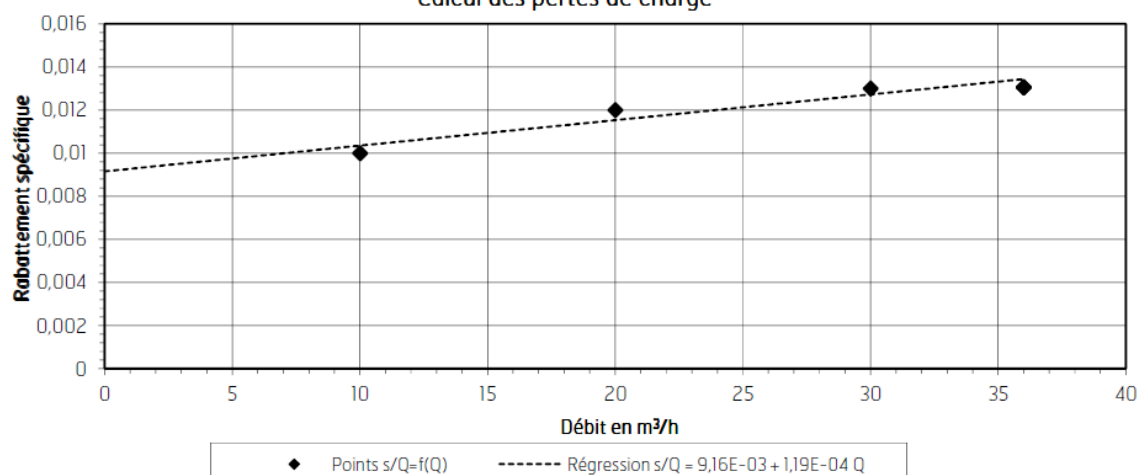
0h00 - 1h00	=	10.00 m <sup>3</sup> /h	3h00 - 4h00	=	36.00 m <sup>3</sup> /h
1h00 - 2h00	=	20.00 m <sup>3</sup> /h	4h00 - 5h00	=	0.00 m <sup>3</sup> /h
2h00 - 3h00	=	30.00 m <sup>3</sup> /h			

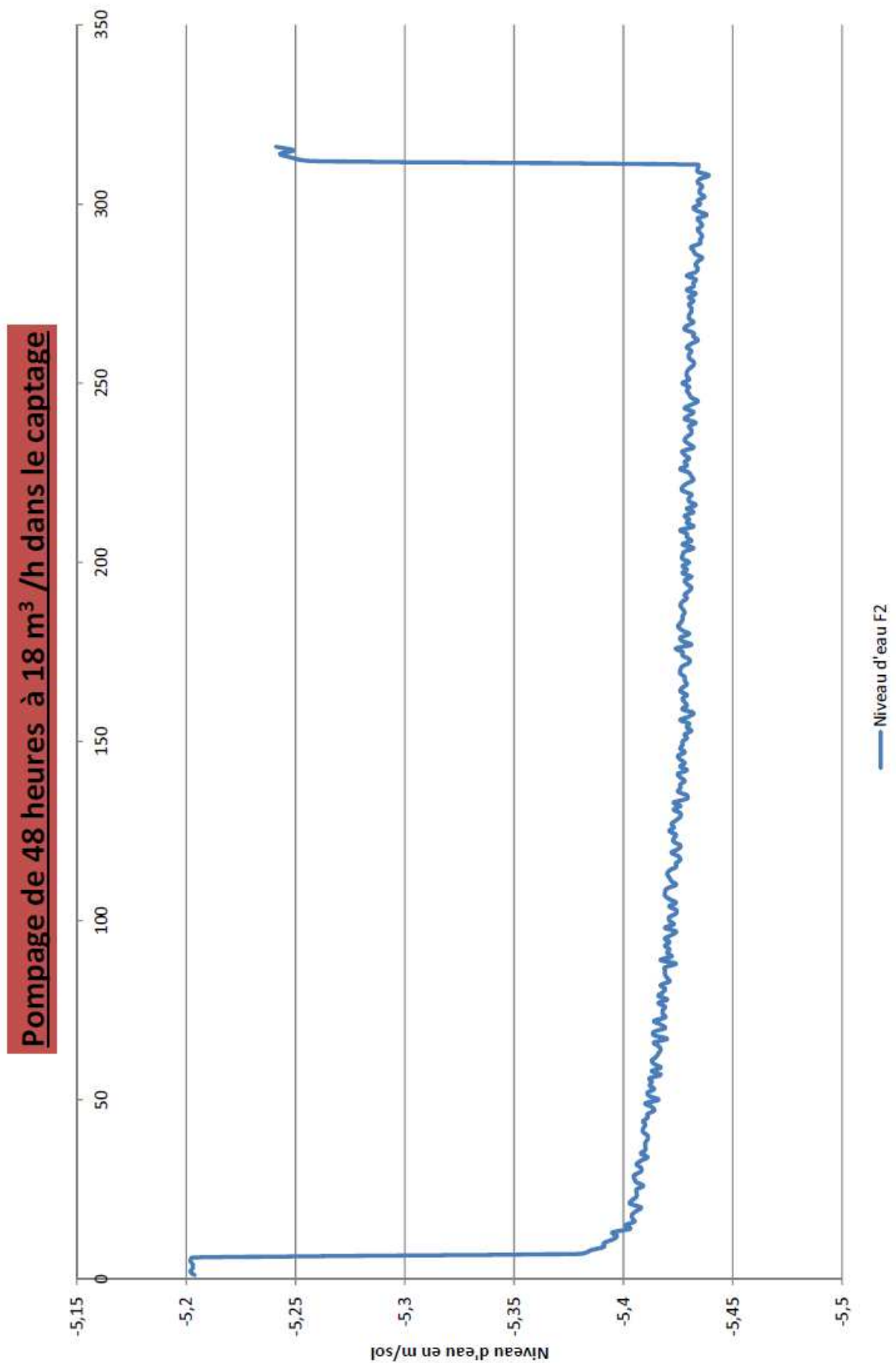
Palier	Durée	Débit	Niveau initial	Niveau dynamique	Rabatement	Débit spécifique	Rabatement spécifique
n°	h	m <sup>3</sup> /h	m/repère	m/repère	m	m <sup>3</sup> /h/m	m/m <sup>3</sup> /h
1	1	10,0	5,08	5,18	0,10	100,00	0,010
2	1	20,0	5,08	5,32	0,24	83,33	0,012
3	1	30,0	5,08	5,47	0,39	76,92	0,013
4	1	36,0	5,08	5,55	0,47	76,60	0,013

Ville de Laon - Projet " Maison Pour Tous " (02) -  
Courbe caractéristique du forage de captage F2  
au 11/10/2012

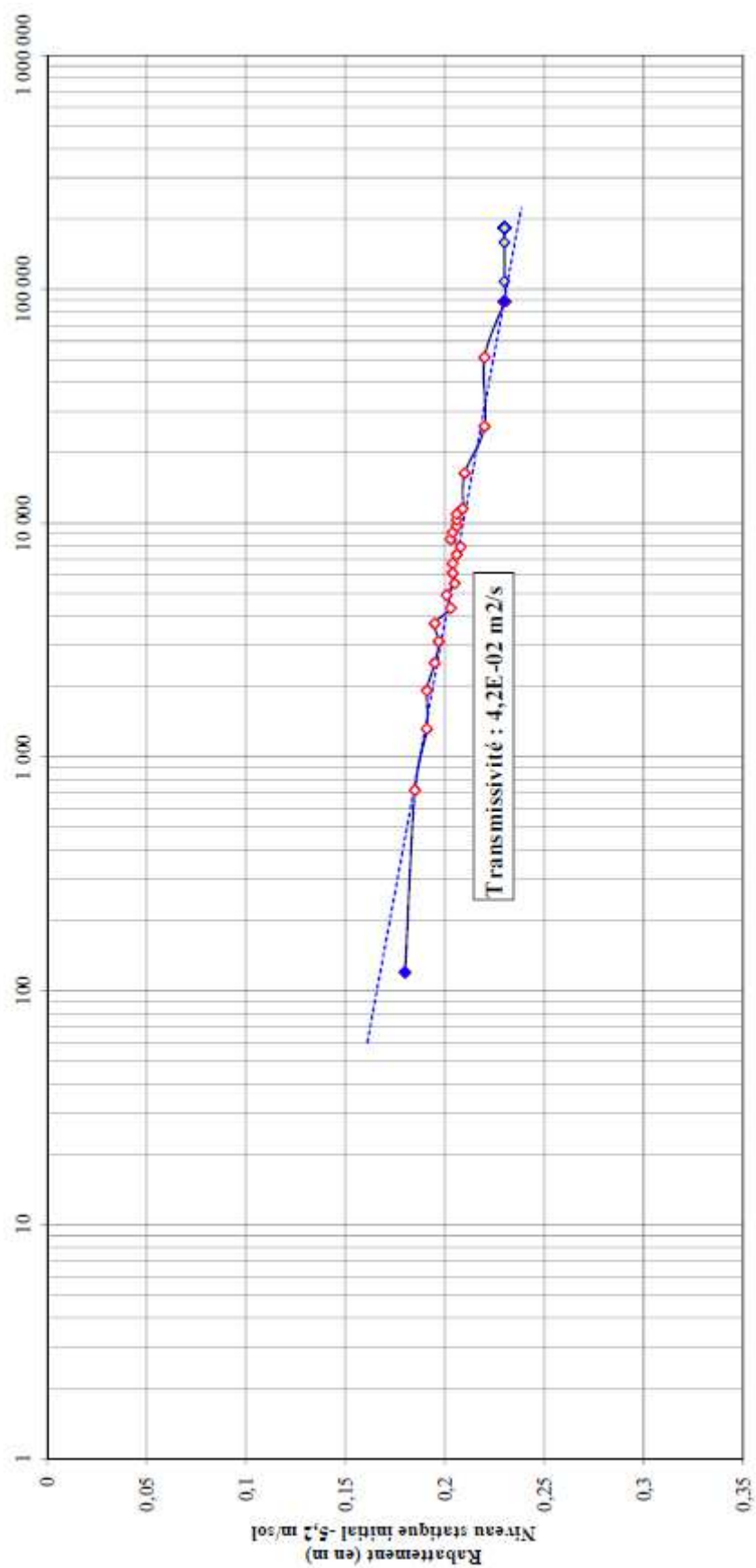


Calcul des pertes de charge



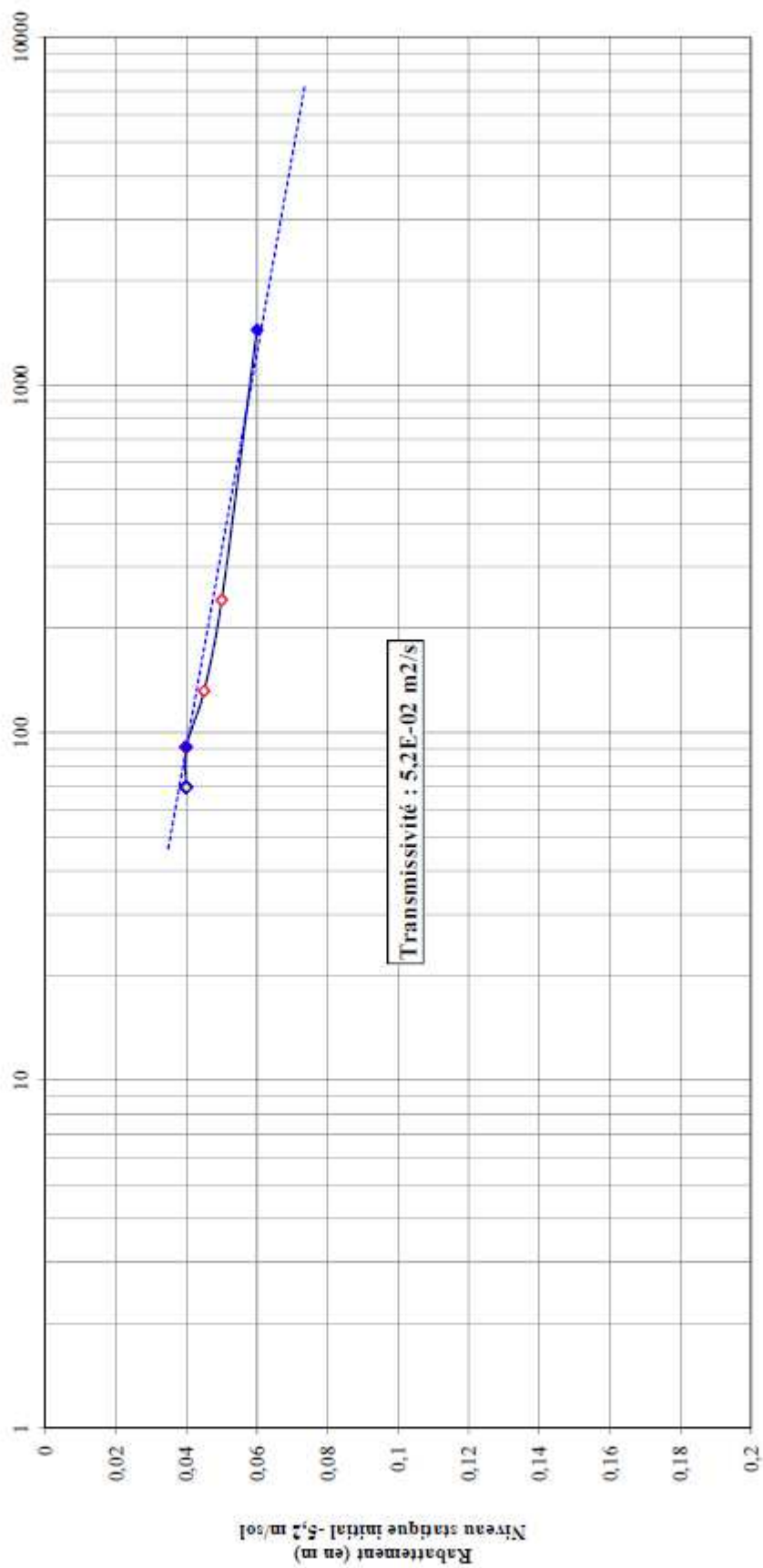


Forage Captage F2  
 Pompage longue durée du 22 octobre 12 au 24 octobre 12  
 COURBE DE DESCENTE : 48 heures de pompage à 18 m<sup>3</sup>/h.  
 Temps en secondes (échelle logarithmique)



Forage Captage F2  
 Pompage longue durée du 22 octobre 12 au 24 octobre 12

COURBE DE REMONTEE après 48 heures de pompage à 18 m<sup>3</sup>/h.  
 (Temps de pompage + Temps de remontée) / Temps de remontée (échelle logarithmique)



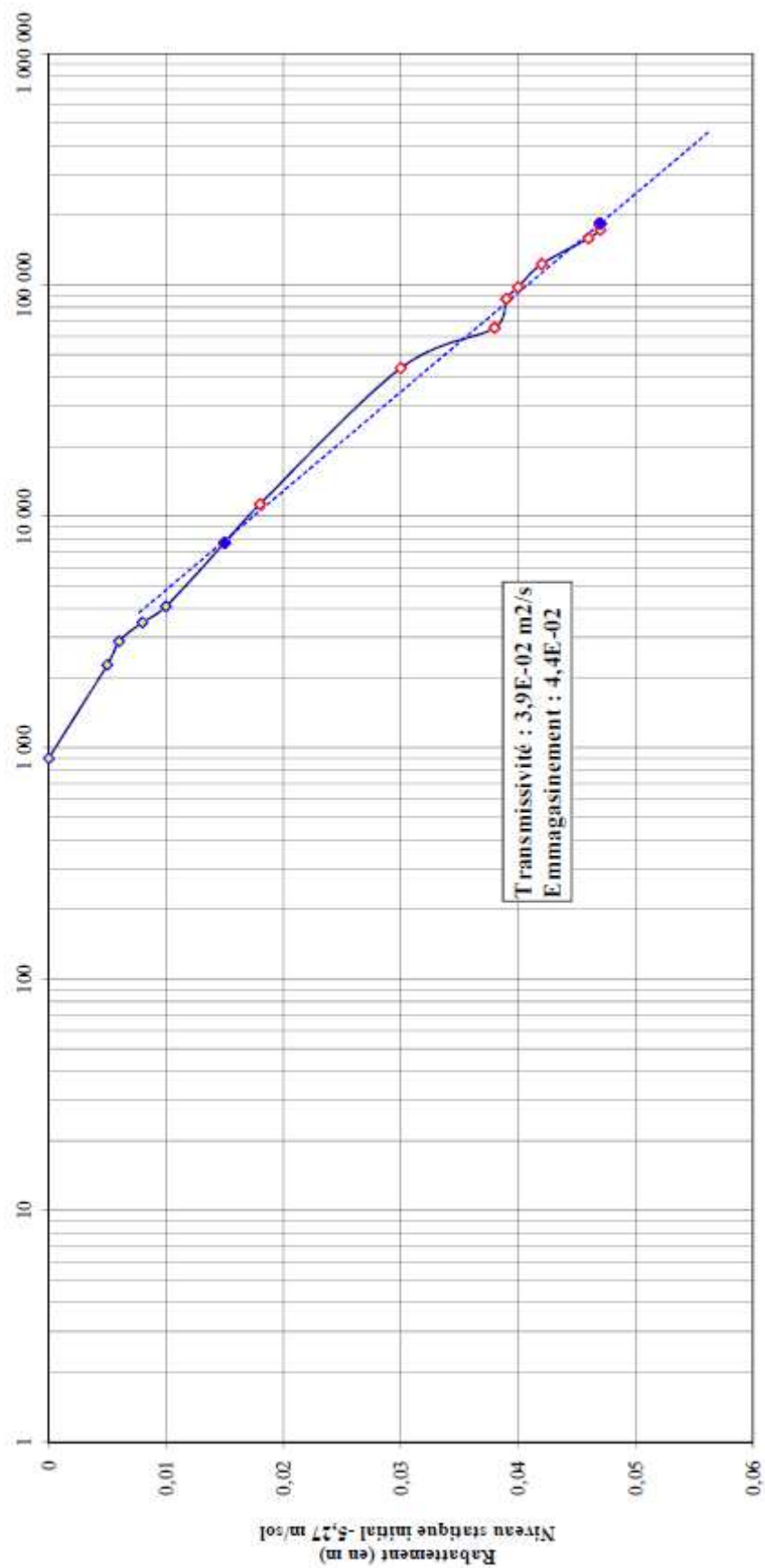
## **ANNEXE 5**

### **COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT, COURBES DE DESCENTE ET DE REMONTEE**



Piézomètre Rejet F1  
 Pompage longue durée sur F2 (à 60 m) du 22 octobre 12 au 24 octobre 12

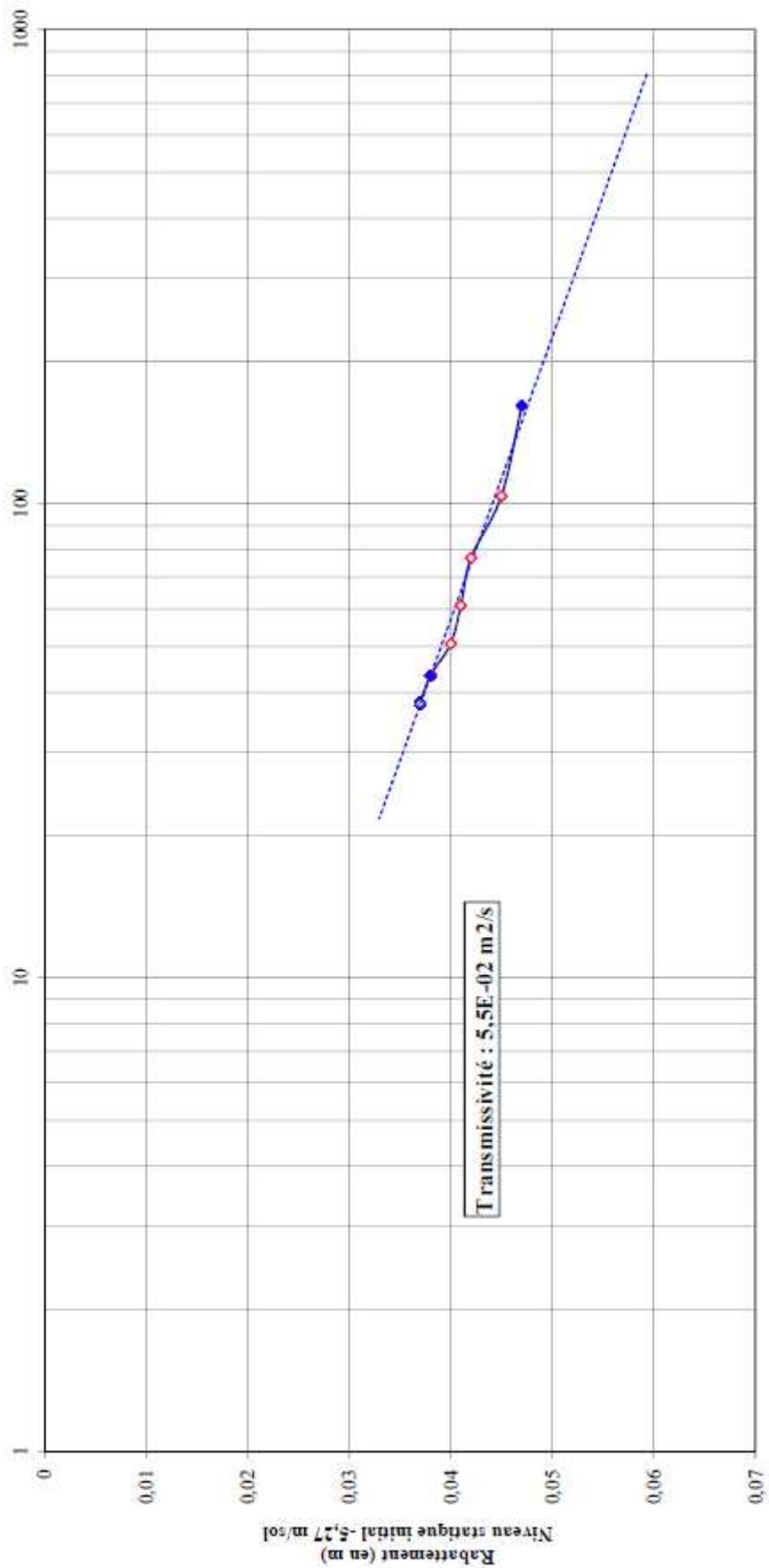
COURBE DE DESCENTE : 48 heures de pompage à 18 m<sup>3</sup>/h.  
 Temps en secondes (échelle logarithmique)





Piézomètre Rejet F1  
 Pompage longue durée sur F2 (à 60 m) du 22 octobre 12 au 24 octobre 12

COURBE DE REMONTEE après 48 heures de pompage à 18 m<sup>3</sup>/h.  
 (Temps de pompage + Temps de remontée) / Temps de remontée (échelle logarithmique)

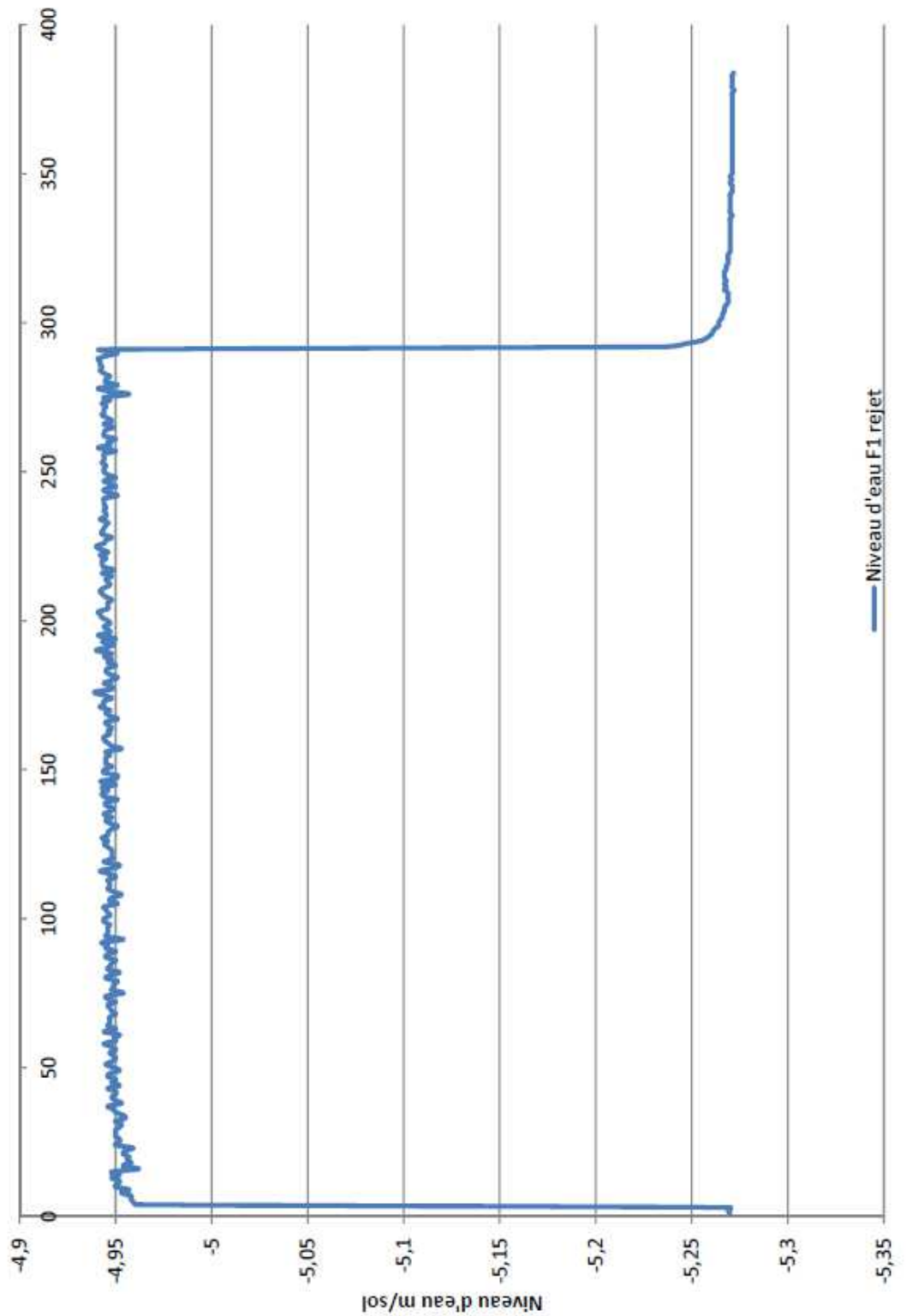


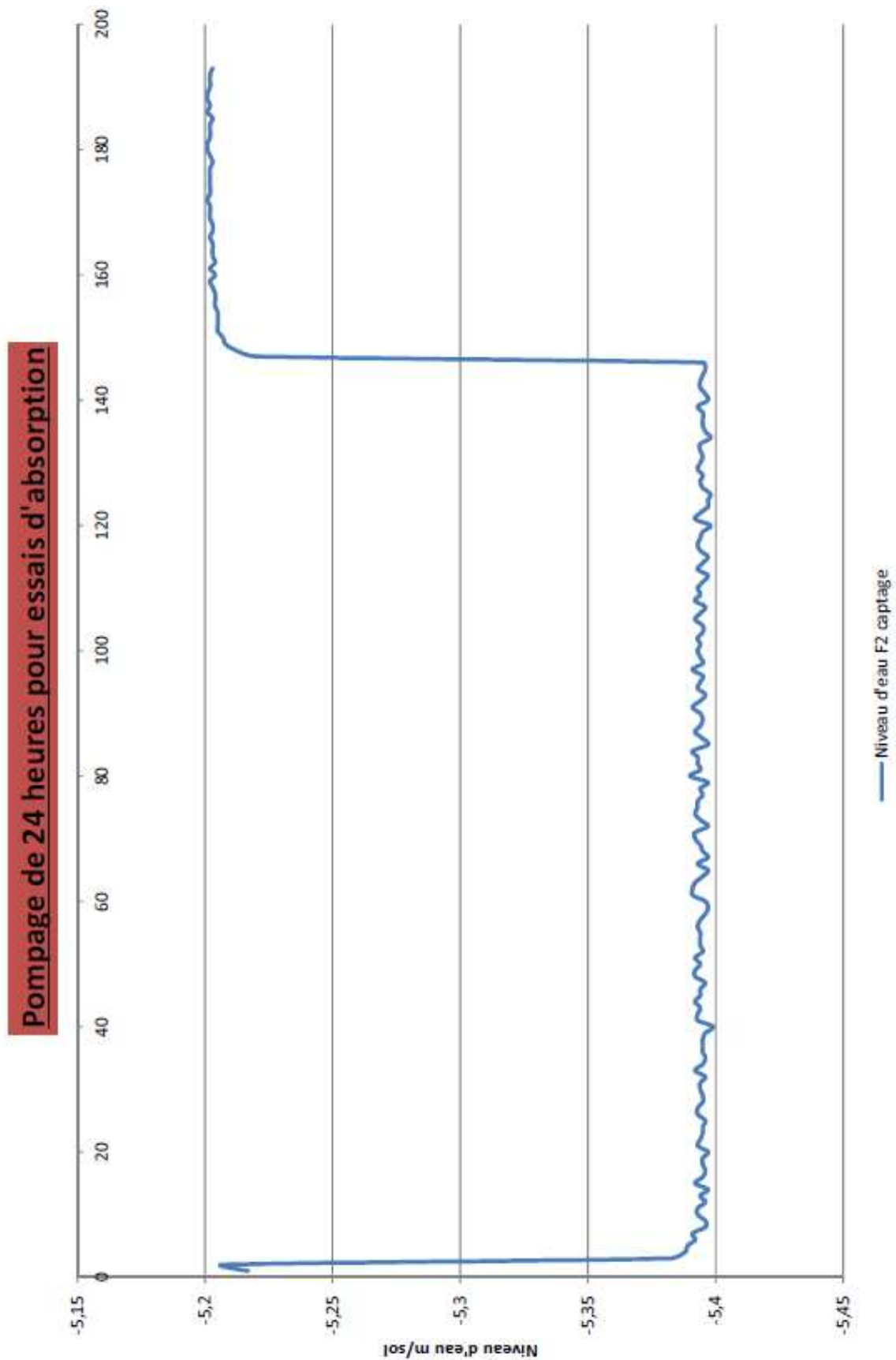
## **ANNEXE 6**

### **ESSAI D'INJECTION GRANDEUR NATURE DE F2 VERS F1**



**Essais d'absorption dans le rejet pendant les 24 heures de pompage dans le captage**

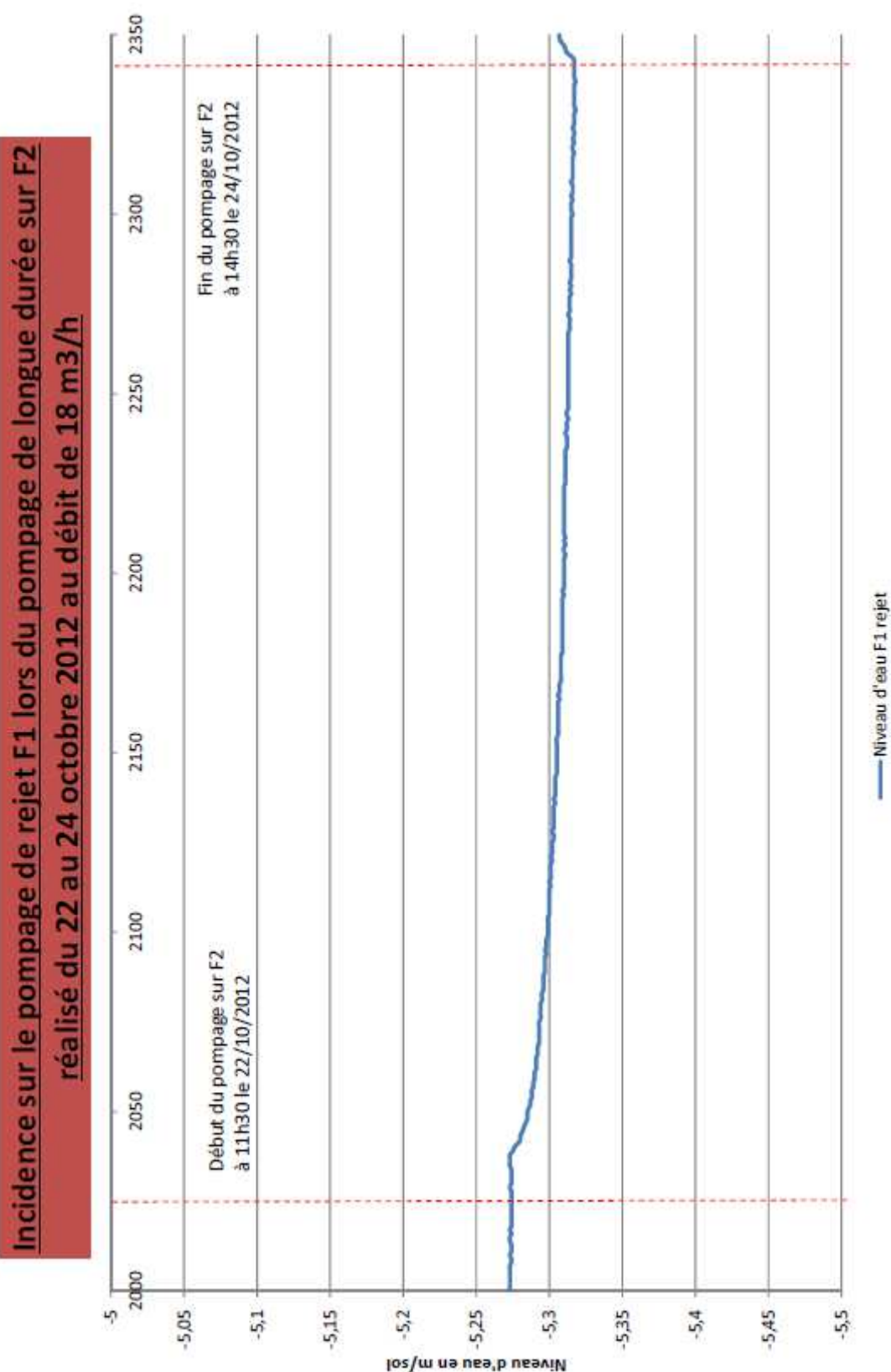




## **ANNEXE 7**

### **INCIDENCE DU POMPAGE DE F2 SUR F1**





## **ANNEXE 8**

### **RESULTATS D'ANALYSE SGS DES EAUX PRELEVEES A L'ISSUE DU POMPAGE DE LONGUE DUREE – EXTRAIT DU SEQ'EAU SOUTERRAINE A USAGE GEOTHERMIQUE DIAGRAMME DE PIPER**



COMMUNE DE LAON  
PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –  
COMPTE RENDU DE TRAVAUX

**SGS**



Accréditation  
N° 1-1386  
Portée  
disponible sur  
[www.cofrac.fr](http://www.cofrac.fr)

REFERENCES FOURNIES PAR LE CLIENT

**Cde :** MS12-05937  
**Devis :**  
**Reçu, le** 25/10/12 **Prélevé le**  
**Demandeur:** Franck MOURLEVAT  
**ClientID:** MS12-05937.001  
**Description:** prélèvement et analyse d'eaux de forage  
**Nature:** EAU DE CONSOMMATION HUMAINE  
**Commentaire:**  
prélèvement après 60s (écoulement en continu)  
désinfection du point de prélèvement par flambage sans démontage du point de  
prélèvement (vanne)  
oxygène dissous= 4,56 mg/l et 43,9%

SGS MULTILAB - LILLE EAU  
AGENCE NORD - E259E1  
15 bis rue Plouvier

59175 TEMPLEMARS  
FRANCE

EVRY, le 20 - nov. - 12

RAPPORT D'ESSAI  
EV12-30910.001

Page 1 sur 2

INFORMATIONS RELATIVES AU PRELEVEMENT/ ECHANTILLON

ORGANISME DE PRELEVEMENT	SGS MULTILAB LILLE
PRELEVEMENT REALISE SOUS ACCREDITATION COFRAC	OUI
N° D'ACCREDITATION ORGANISME DE PRELEVEMENT	1-2390
TYPE DE PRELEVEMENT	Ponctuel
DATE DE PRELEVEMENT	24/10/2012
TEMPERATURE DE L'ENCEINTE A RECEPTION (°C)	8
pH IN SITU (unité pH) (*)	7,17
TEMPERATURE IN SITU (*)	13,8
CONDUCTIVITE IN SITU (µS/cm) (*)	949
TURBIDITE IN SITU (NTU) (*)	1
OXYGENE DISSOUS IN SITU (mg/L) (*)	4,56 mg/L
CHLORE LIBRE IN SITU (*)	<0,03
CHLORE TOTAL IN SITU (*)	<0,03
Couleur	Limpide
NOM DU PRELEVEUR	WAELEKENS

		Commencé	Résultats	Unités	Min / Max
CO2 LIBRE	NFT 90-011 : 01 Feb 01	25/10/2012	72	mg/L	
CONDUCTIVITE à 25°C (Correction par compensation de température)(*)	NF EN 27888 selon l'ISO 7888 : 01 Jan 94	25/10/2012	970	µS/cm	200 / 1 100
CO2 AGRESSIF	calculé par logiciel CIEC	20/11/2012	<5	mg/L	
pH A TEMPERATURE CI-DESSOUS(*)	NF T 90 008 : 01 Feb 01	25/10/2012	7,20	Unité pH	6,50 / 9
TEMPERATURE DE MESURE		25/10/2012	20,2	°C	
METALLS SOLUBLES A pH=2(*)		28/10/2012	-		
METALLS PAR ICP	NF ISO 11885				
ALUMINIUM(*)		16/11/2012	<10,00	µg/L	/ 200
CALCIUM(*)		16/11/2012	141,00	mg/L	
CUivre(*)		16/11/2012	<0,01	mg/L	/ 2
FER(*)		16/11/2012	14,10	µg/L	/ 200
MAGNESEIUM(*)		16/11/2012	32,33	mg/L	
MANGANESE(*)		16/11/2012	<10,00	µg/L	/ 50
SODIUM(*)		16/11/2012	26,17	mg/L	/ 200
TH CALCULE(*)		16/11/2012	49	°p	

Les prestations rapportées dans ce document et couvertes par l'accréditation COFRAC sont identifiées par le symbole (\*)

Le présent rapport ne concerne que le produit soumis à l'analyse.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 page(s).

Le présent rapport est émis par la Société conformément à ses conditions Générales de Services (copie disponible sur demande).

SGS MULTILAB ZI Saint Guénault 7 rue Jean Mermoz Courcouronnes 91031 Evry Cedex t +33 (0)1 69 38 72 72 f +33 (0)1 69 38 51 88 [www.sgs.com](http://www.sgs.com)

Membre du groupe SGS (SGS SA)



ARCHAMBAULT CONSEIL

Agence Nord-Est-IDF – Rapport CNT02554-décembre 12



COMMUNE DE LAON  
PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –  
COMPTE RENDU DE TRAVAUX



RAPPORT D'ESSAI  
EV12-30910.001

Page 2 sur 2

		Commencé	Résultats	Unités	Min / Max
METALLS PAR ICP	NF ISO 11885				
ZINC(*)		16/11/2012	<0,01	mg/L	/ 5
POTASSIUM(*)		16/11/2012	4,10	mg/L	
TITRE ALCALIMETRIQUE(*)	NF EN ISO 9963-1 : 01 Feb 96	25/10/2012	<1	°F	
CARBONATES(*)	NF EN ISO 9963-1 : 01 Feb 96	25/10/2012	0,0	mg/L	
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET(*)	NF EN ISO 9963-1 : 01 Feb 96	25/10/2012	33	°F	
TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET en Ca( HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (*)	NF EN ISO 9963-1 : 01 Feb 96	25/10/2012	533,8	mg/L	
HYDROGENOCARBONATES(*)	NF EN ISO 9963-1 : 01 Feb 96	25/10/2012	402	mg/L	
NITRITES(*)	selon NF EN 26777 / ISO 6777	25/10/2012	<0,01	mg/L	/ 0,50
CHLORURES(*)	selon NF EN ISO 15682	25/10/2012	44	mg/L	/ 250
SULFATE(*)	selon NF T 90-040	29/10/2012	106	mg/L	/ 250
NITRATES(*)	selon NF EN ISO 13395	25/10/2012	36	mg/L	/ 50
ORTHOPHOSPHATES(*)	selon NF EN ISO 6878	25/10/2012	0,04	mg/L	
GERMES AEROBIES 22°C(*)	NF EN ISO 6222 : 01 Jul 99	25/10/2012	130	germe/1 mL	
ESCHERICHIA COLI(*)	NF EN ISO 9308-1 : 01 Sep 00	25/10/2012	0	germe/100 mL	/ 0
GERMES AEROBIES 36°C(*)	NF EN ISO 6222 : 01 Jul 99	25/10/2012	84	germe/1 mL	
COLIFORMES(*)	NF EN ISO 9308-1 : 01 Sep 00	25/10/2012	0	germe/100 mL	/ 0
ENTEROCOQUES INTESTINAUX(*)	NF EN ISO 7899-2 : 01 Aug 00	25/10/2012	0	germe/100 mL	/ 0
BACTERIES SULFITE REDUCTRICES + SPORES(*)	NF EN 26461-2 : 01 Jul 93	25/10/2012	0	germe/100 mL	/ 0
TURBIDITE(*)	NF EN ISO 7027 : 01 Mar 00	25/10/2012	<0,3	NTU	/ 2
FERRO-BACTERIES	sous traitance externe	15/11/2012	Absence	germe/500 mL	
analyse réalisée après filtration de 500 mL d'échantillon. présence de particules minérales en très faible quantité.					
Essai au marbre	Méthode RODIER				
Propriété de l'eau		12/11/2012	Eau incrustante		
RESIDU SEC 180°C(*)	NF T 90 029 : 01 Aug 02	25/10/2012	597	mg/L	
MATIERES EN SUSPENSION(*)	NF EN 872 - Filtre C.A.S : 01 Jun 05	25/10/2012	<1	mg/L	
Sulfures aisément libérables	ISO 13358/Ampérométrie	12/11/2012	<0,05	mg/L	

Cette eau présentait le jour du prélèvement des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques CONFORMES aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine, définies par l'arrêté du 11 janvier 2007.

LIMITES de qualité obligatoires : paramètres définis par le code de la santé publique comme pouvant directement représenter un danger pour la santé humaine.

REFERENCES de qualité : valeur indicative à respecter établi par le code de la santé publique à des fins de suivi des installations de production et de distribution d'eau et d'évaluation des risques pour la santé humaine.

EMILIE ROQUES  
INGENIEUR MATRICIEL

Les prestations rapportées dans ce document et couvertes par l'accréditation COFRAC sont identifiées par le symbole (\*)

Le présent rapport ne concerne que le produit soumis à l'analyse.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 2 page(s).

Le présent rapport est émis par la Société conformément à ses conditions Générales de Services (copie disponible sur demande).

SGS MULTILAB ZI Saint Guénault 7 rue Jean Mermoz Courcouronnes 91031 Evry Cadex t +33 (0)1 69 36 72 72 f +33 (0)1 69 36 51 83 [www.sgs.com](http://www.sgs.com)

Membre du groupe SGS (SGS SA)








ARCHAMBAULT CONSEIL

Agence Nord-Est-IDF – Rapport CNT02554-décembre 12

## 2.3. USAGE ENERGIE






L'eau souterraine est parfois utilisée à des fins énergétiques pour le chauffage (pompes à chaleur ou géothermie) ou pour la climatisation. L'utilisation géothermique de l'eau est de nature très ponctuelle par rapport à l'utilisation pour le fonctionnement de pompes à chaleur ou de climatisation. Les nappes alluviales, en raison de leur accessibilité, sont fréquemment sollicitées en site urbain, pour ce type d'usage. Pour l'usage énergie, il a donc été décidé de ne retenir que ces deux derniers aspects (pompes à chaleur et climatisation).

### Les différentes classes d'aptitude de l'eau pour l'usage énergie

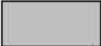
Classe	Aptitude pour satisfaire l'usage
Bleu 	Très bonne
Vert 	Bonne
Jaune 	Passable
Orange 	Mauvaise
Rouge 	Inapte à satisfaire l'usage

### Les altérations

Trois altérations décrivent l'usage de l'eau souterraine à des fins énergétiques : la température, la corrosion et la formation de dépôts. Les deux dernières altérations sont identiques à celles décrivant l'usage industrie. Le lien entre les différentes classes d'aptitude de l'usage exprimées ci-dessus et les classes de qualité de chacune de ces trois altérations est le suivant :

Classe	Climatisation / pompes à chaleur	Corrosion	Formation de dépôts
Bleu 	favorable à l'usage énergétique considéré	absence de corrosion	pas de risques de dépôts importants
Vert 	permet l'usage énergétique considéré	corrosion faible	peu de risques de dépôts
Jaune 	usage délicat pour raisons techniques ou économiques	corrosion modérée	risques de dépôts
Orange 	(1)	corrosion moyenne	(1)
Rouge 	(1)	corrosion forte	dépôts très importants

(1) classe non définie.

Le motif  indique dans les tableaux ci-après que le paramètre ne décrit pas la (ou les) classe(s) d'aptitude à l'usage

### Altération Température - Usage Climatisation

Les valeurs seuils des différents états dépendent des objectifs poursuivis en matière de climatisation. Les valeurs seuils proposées le sont sur la base d'une climatisation de locaux à usage d'habitation.

Paramètre	Unité	Bleu	Vert	Jaune
Température	°C	> 8 et <= 12	>12 et <= 15	<= 8 ou > 15

Des températures inférieures à 8°C peuvent occasionner des problèmes de dysfonctionnements au niveau des installations (problèmes de condensation par exemple).

### Altération Température - Usage Pompes à chaleur

Paramètre	Unité	Bleu	Vert	Jaune
Température	°C	> 15 et <= 60	> 8 et <= 15	<= 8 ou > 60

Des températures inférieures à 8°C peuvent occasionner des problèmes de dysfonctionnements au niveau des installations (problèmes de condensation par exemple).

### Altération Corrosion

Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
CO <sub>2</sub> dissous	mg/l	50		120	200	
O <sub>2</sub> dissous	mg/l	absence ou > 8	> 0 et <= 0.1		> 0.1 et <= 4	> 4 et <= 8
Salinité*	g/l NaCl	0.6		1.5	3	
Conductivité*	µS/cm	1300		3000	6000	
pH		> 9.8	> 7 et <= 9.8	>= 6 et <= 7		< 6
Chlorures*	mg/l	150		400	1000	
Sulfates*	mg/l	250		500	1500	
Ferro-bactéries		absence				présence
Bactéries sulfato-réductrices	N/ml	absence	10		100	
Sulfures	mg/l HS <sup>-</sup>	0.1		8	50	
Eh (potentiel d'oxydoréduction)	mV	<= -600 ou > 0		> - 600 et <= - 500	> -500 et <= - 400	> - 400 et <= 0

\* au moins l'un des quatre paramètres doit être mesuré. Le choix pourra être effectué en fonction des problématiques locales.

### Altération Formation de dépôts

Paramètres	Unités	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
<b>pH</b>		<b>5.00</b>				
<b>Eh - selon la valeur du pH <sup>(1)</sup></b>						
pH <= 3.5	mV	<b>1500</b>				
3.5 < pH <= 9.6		<b>- 800</b>				
pH > 9.6						
O <sub>2</sub> dissous	mg/l	<b>0.10</b>		5.5		
Ferro-bactéries		<b>absence</b>				
<b>Indice saturation - selon la valeur du TAC <sup>(2)</sup></b>						
TAC < 10°F		<b>0.2</b>		2		
10°F < TAC <= 25°F		<b>0.2</b>		1		
TAC > 25°F		<b>0.2</b>		0.5		

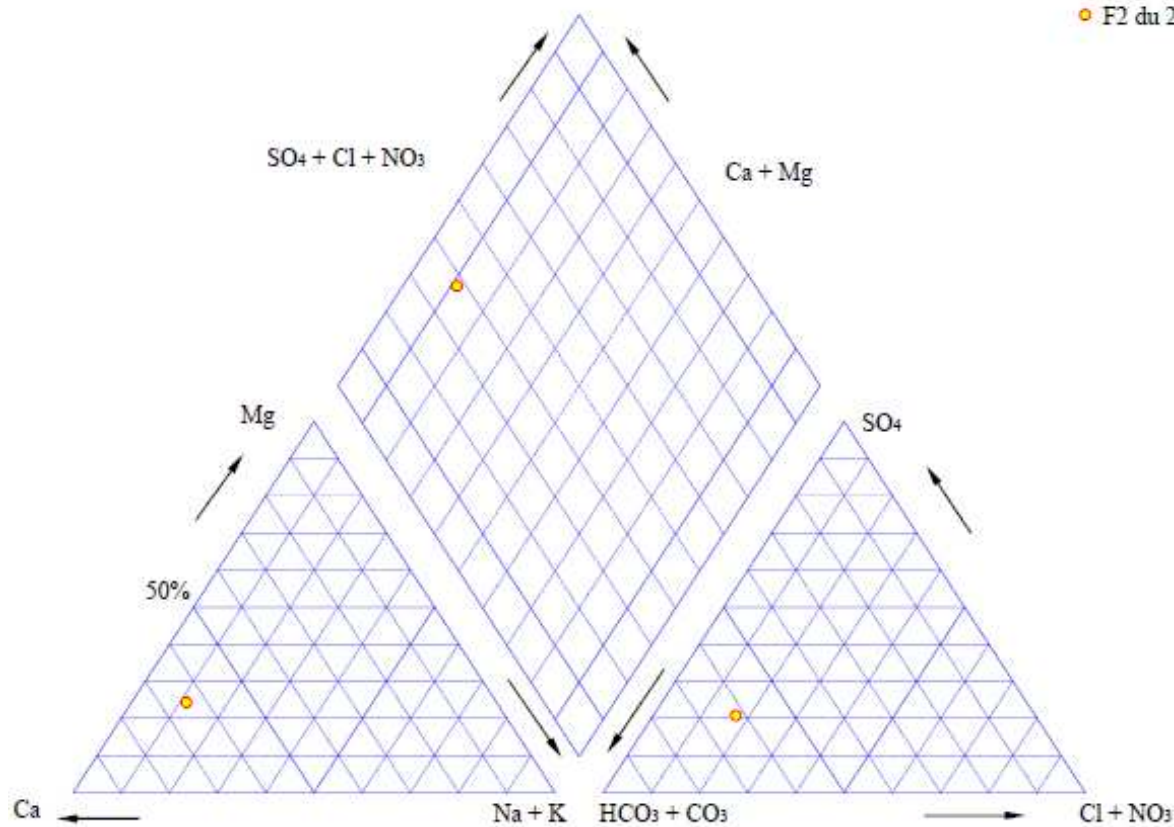
(1) Potentiel d'oxydo-réduction Eh = 1330 - 166 pH

(2) Indice saturation = pHs-pH. Le pHs est le pH d'équilibre ou de saturation après essai au marbre

*L'ensemble des valeurs seuils proposées provient d'avis d'experts basés sur la thermodynamique des équilibres électrochimiques et/ou la bibliographie jugée comme faisant référence en ce domaine. La justification des valeurs des seuils et les références bibliographiques sont données en annexe.*

### DIAGRAMME DE PIPER

● F2 du 24/10/2012



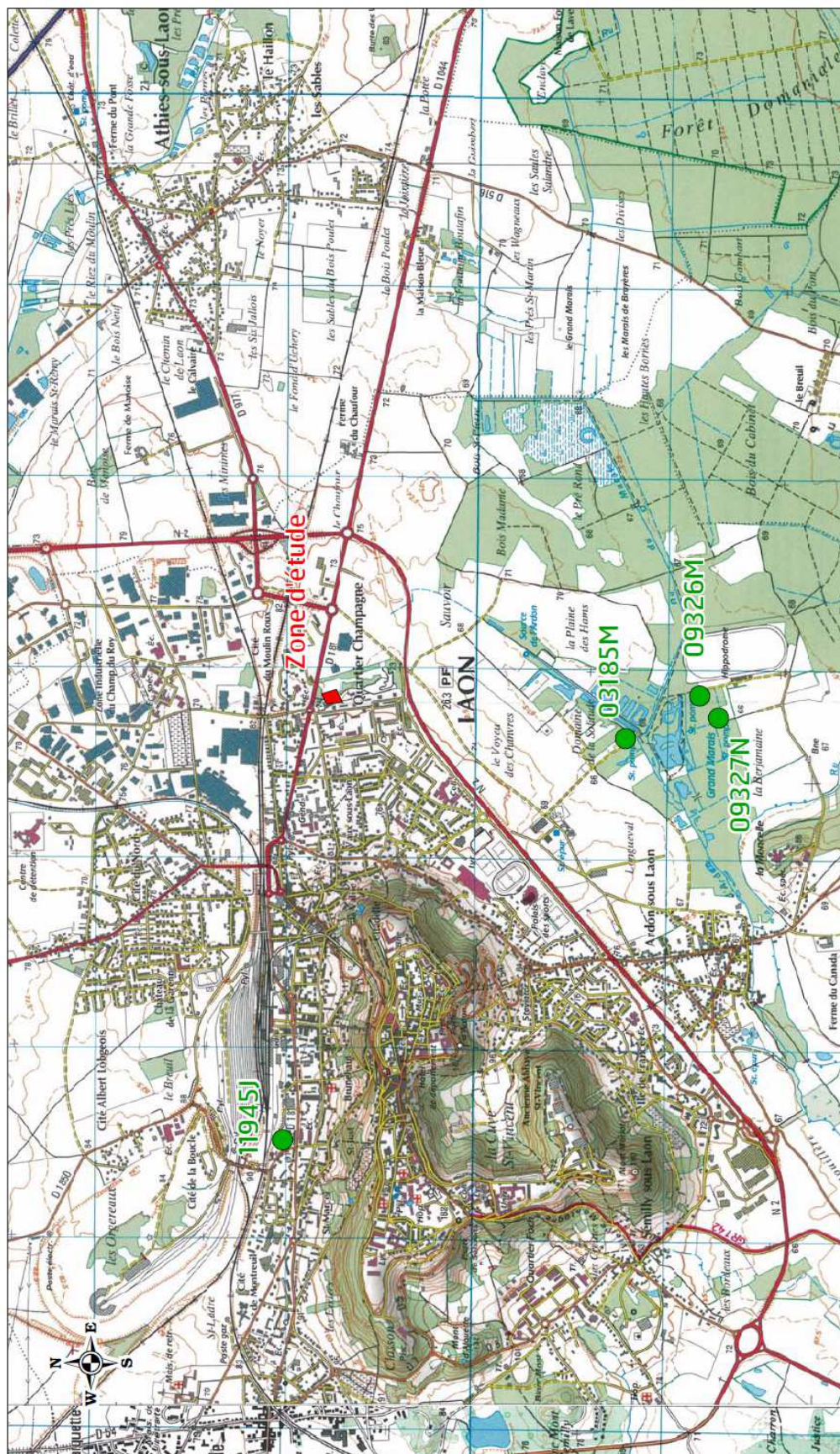
## **ANNEXE 9**

### **COURBE PIEZOMETRIQUE DU PIEZOMETRE DE LA NAPPE DE LA CRAIE ET POINTS ADES**





COMMUNE DE LAON  
 PROJET DE GEOTHERMIE TRES BASSE ENERGIE DANS LE CADRE DE LA CONSTRUCTION  
 D'UNE MAISON POUR TOUS SUR LA COMMUNE DE LAON –  
 COMPTE RENDU DE TRAVAUX



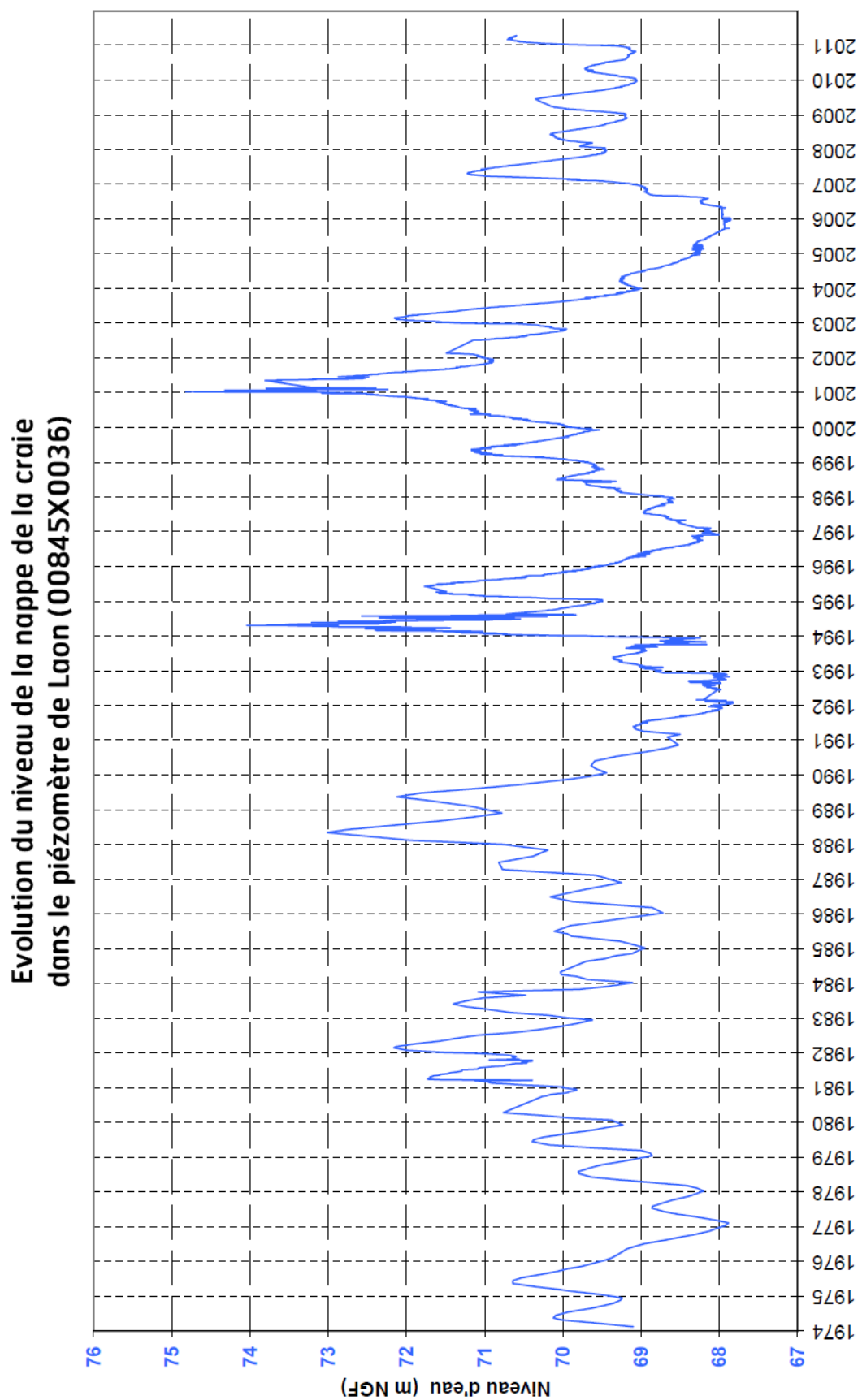
Inventaire des points d'eau AESN de la zone d'étude

Légende

● Point d'eau AESN

1 km

Source : fond IGN 2610 E et 2710 O





## **ANNEXE 10**

### **SIMULATIONS DE L'EVOLUTION DYNAMIQUE EN POMPAGE CONTINU A DIFFERENTS DEBITS, EN PERIODE DE BASSES EAUX**



