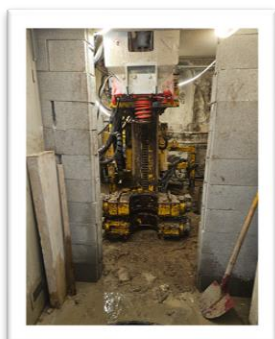


CCI

Quincieux, le 10 juillet 2024

CCI

## Création d'un forage de géothermie sur nappe pour le bâtiment situé 3 place de la Bourse à Lyon (69)



**Compte-rendu des travaux et  
interprétation des essais**

**Dossier N° 2402 – Version A**

## 3.2. DEVELOPPEMENT DU PUIT

### 3.2.1. Principe

Le développement des puits consiste à nettoyer la zone de l'aquifère à proximité immédiate des crépines afin d'augmenter le débit d'exploitation du puits.

Lorsque la formation aquifère présente une granulométrie grossière, le développement de la formation permet aussi d'extraire les fines pour créer derrière la crépine, un massif de gravier à granulométrie décroissante sur une épaisseur de 30 à 60 cm avec les éléments plus grossiers restés en place.

De plus, des pistonages de la pompe par des « marche-arrêt » permettent d'éliminer des « ponts de sable » s'étant formés autour de la crépine (figure 4). Ces pistonages créent de brèves et puissantes variations de pression sur la couche aquifère, inversant le flux à travers la crépine, ce qui facilite la destruction de ces ponts de sable. En effet, un flux unidirectionnel (de l'aquifère vers le puits) provoque des ponts de sable ; alors qu'un courant alterné disloque et détruit ces ponts de sable (*Le forage d'eau, Michel DETAY, 1993*).

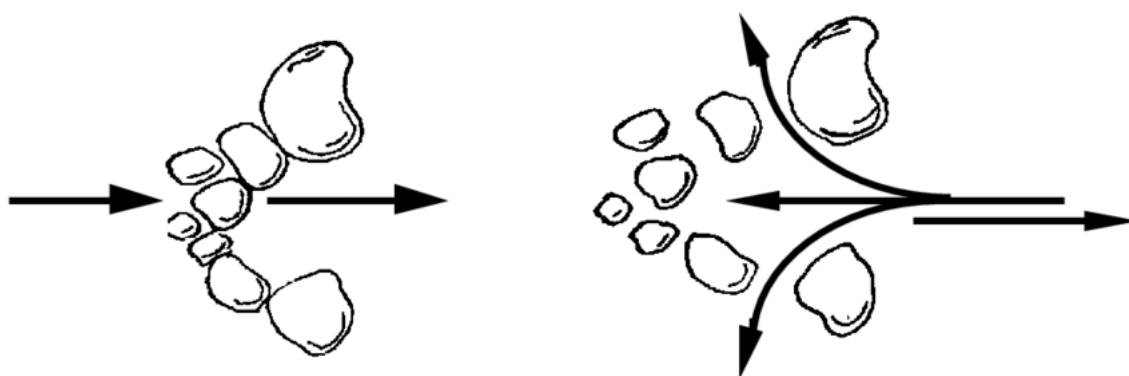


Figure 4 : Création et élimination des « ponts de sable » autour de la crépine  
(d'après A. MABILLOT, 1971).

### 3.2.2. Développement sur le puits

Le développement du puits a été effectué le 06 mai 2024.

Le développement a consisté en l'enchaînement de 7 paliers de débits croissants (5, 10, 16, 20, 25, 30, 36m<sup>3</sup>/h) associés à des pistonages en fin de paliers. Des prélèvements au cône Imhoff ont été effectués à intervalles réguliers : 1 grain de sable grossier pouvait être observé au démarrage du développement, et aucun grain n'a été observé sur la suite du développement (tableau 4).

Palier 1 à 5m <sup>3</sup> /h			Palier 2 à 10m <sup>3</sup> /h		
Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)	Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)
2	1 grain	2,34	2	Ø de grain	2,355
9	Ø de grain	2,34	10	Ø de grain	2,355
16	Ø de grain	2,34	15		2,355
21	1 grain	2,34	20	Ø de grain	2,355
26	Ø de grain	2,34	25		2,355
31		2,34	30		2,355
Pistonnage			Pistonnage		
2	Ø de grain		2	Ø de grain	

Palier 3 à 16m <sup>3</sup> /h			Palier 4 à 20m <sup>3</sup> /h		
Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)	Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)
2	Ø de grain	2,37	2	Ø de grain	2,375
10		2,37	10	Ø de grain	2,375
15	Ø de grain	2,37	15		2,375
20		2,37	20	Ø de grain	2,375
25	Ø de grain	2,37	25		2,375
30		2,37	30		2,375
Pistonnage			Pistonnage		
2	Ø de grain		2	Ø de grain	

Palier 4 à 25m <sup>3</sup> /h			Palier 4 à 30m <sup>3</sup> /h		
Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)	Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)
2	Ø de grain	2,385	3	quelques grains fins	2,39
7	Ø de grain	2,385	8		2,39
12		2,385	13	Ø de grain	2,39
17	Ø de grain	2,385	18		2,39
22		2,385	23	Ø de grain	2,39
30		2,385	30		2,39
Pistonnage			Pistonnage		
2	Ø de grain		2	Ø de grain	

Palier 4 à 36m <sup>3</sup> /h		
Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)
4	Ø de grain	2,4
14		2,4
19	Ø de grain	2,4
24		2,4
30	Ø de grain	2,4
Pistonnage		
2	Ø de grain	
Pistonnage		
2	Ø de grain	
Pistonnage		
2	Ø de grain	

Tableau 4 : synthèses des prélèvements au cône Imhoff (suivi du sable) ainsi que du niveau d'eau par rapport à la dalle béton.

Ce puits est apparu propre, et le pompage n'a pas fait advenir de sable aux différents paliers (hormis de rares grains grossiers au démarrage du pompage).

Un prolongement du développement a été effectué durant la nuit, comptabilisant 12h23 de pompage nocturne à 36.6 m<sup>3</sup>/h. Le pompage a été réalisé avec une pompe de surface NKP G 40-160 dont la crépine était située à 3m au-dessus du fonds du puits.

Les résultats graphiques (figure 5) ainsi que le tableau récapitulatif (tableau 5) sont présentés ci-dessous.

Les résultats graphiques (figure 6) ainsi que le tableau synthétisant les rabattements obtenus par paliers (tableau 6) obtenus par sonde automatique sont également présentés. A noter que pour les données enregistrées avec le capteur de pression, une barre d'erreur a été intégrée aux graphiques comprenant une précision de 0.005m (donnée fabricant pour les capteurs de pression Solinst Levellogger 5 M10).

La température monitorée durant l'essai est présentée en figure 7.

Développement du puits (relevé manuel des niveaux et rabattements par paliers)

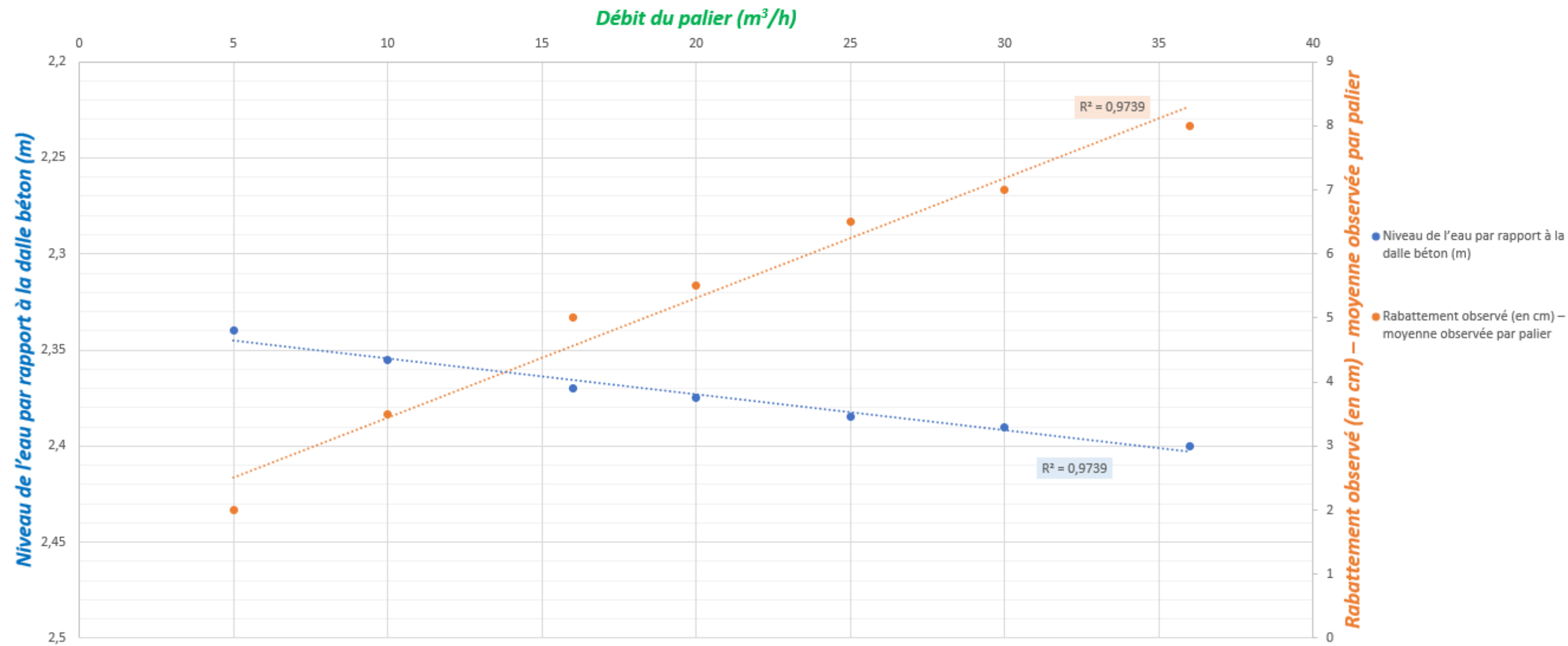


Figure 5 : développement du puits (relevé manuel)

Débit du palier (m³/h)	Niveau de l'eau par rapport à la dalle béton (m)	Rabattement observé (en cm) – moyenne observée par palier
5	2.34	2
10	2.355	3.5
16	2.37	5
20	2.375	5.5
25	2.385	6.5
30	2.39	7
36	2.40	8

Tableau 5 : développement du puits – synthèse des niveaux et rabattements relevés

Développement du puits de captage (avec incertitude de mesure à 0,005m)

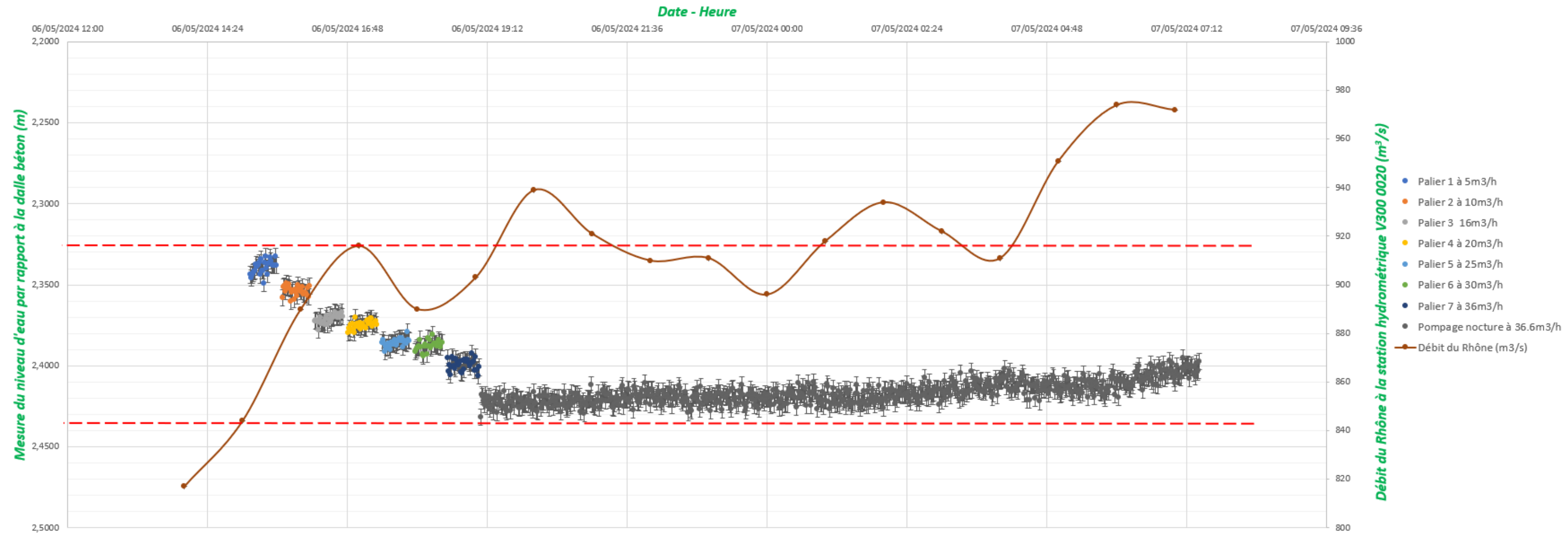


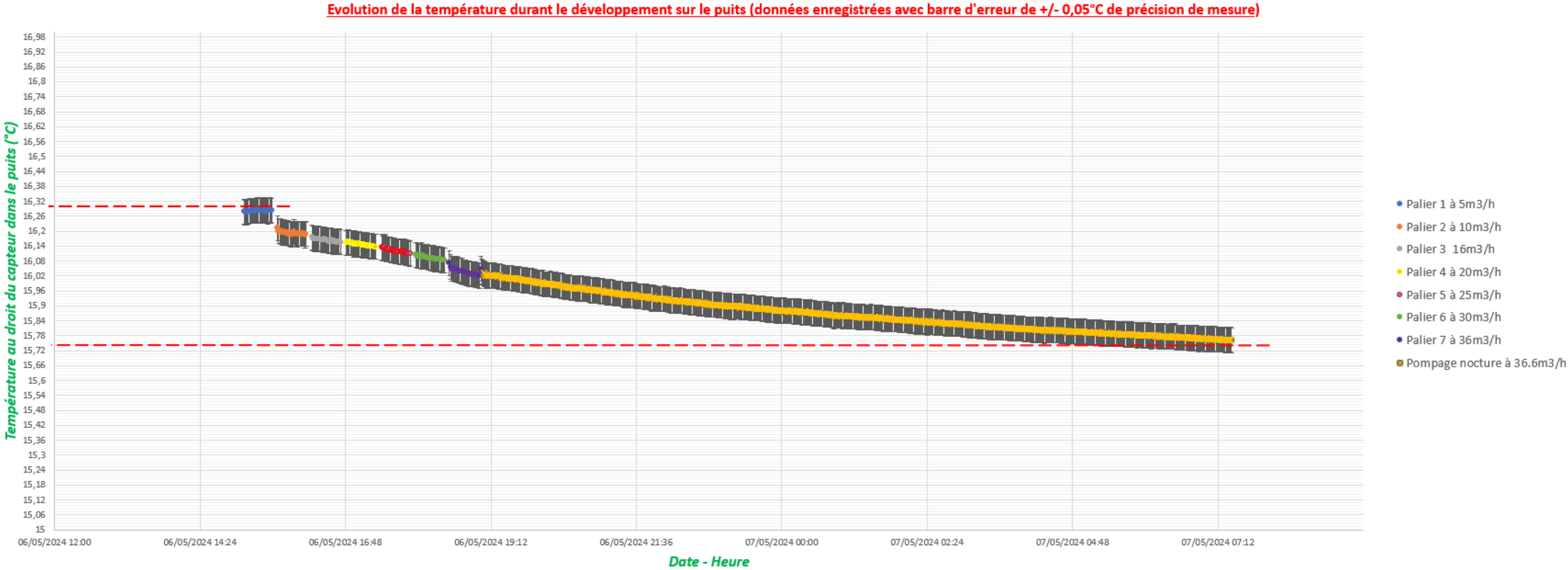
Figure 6 : développement du puits de captage – capteur de pression

Echelle verticale de la mesure du niveau d’eau = 25cm

Tableau 6 : données de rabattement lors du développement – capteur de pression

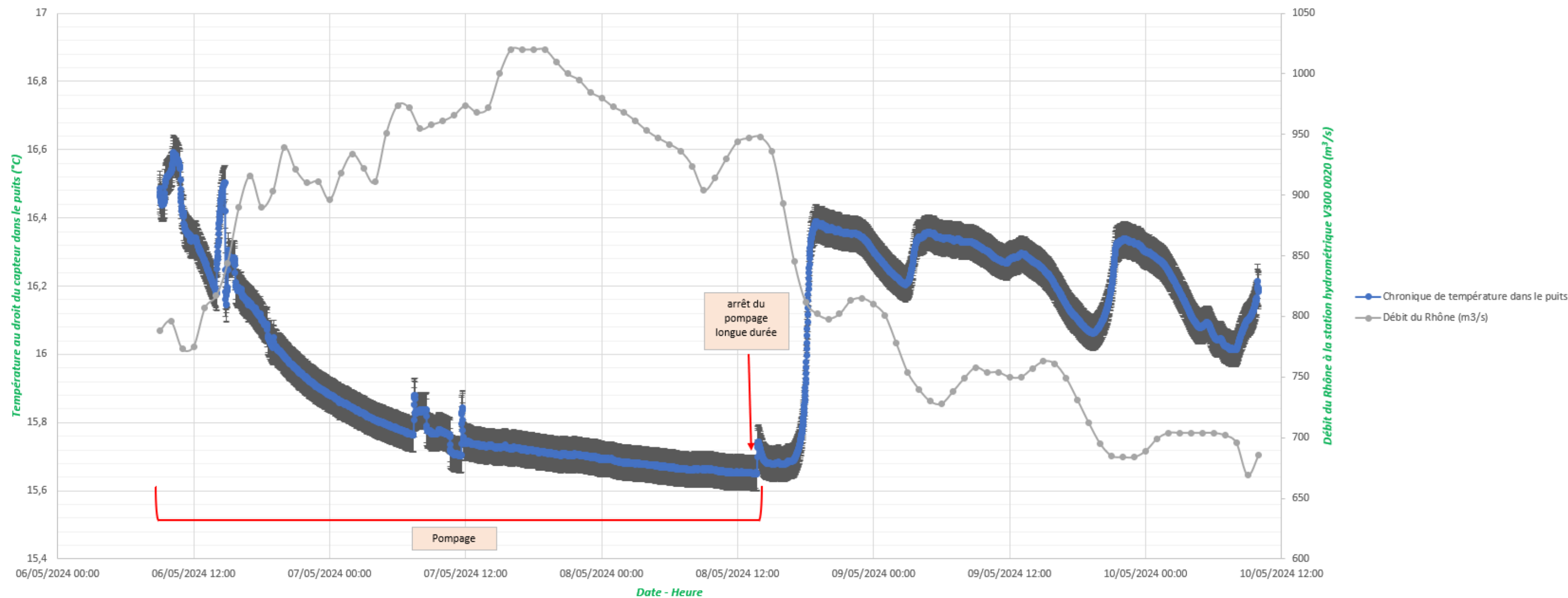
Débit du palier (m³/h)	Rabattement observé (en cm) – moyenne observée par palier
5	2.5
10	4
16	5.7
20	6
25	7.2
30	7.4
36	8.5

Figure 7 : suivi de la température dans le puits durant le développement (monitorée par capteur)





### Chronique de température dans le puits (+/- 0,05°C) & évolution du débit du Rhône durant la période de suivi



**Figure 8 : chronique de la température monitorée dans le puits entre le 06/05/2024 et le 10/05/2024 & évolution du débit du Rhône**

L'échelle verticale de la température a été réduite pour mettre en perspective le débit du Rhône et la température dans le puits post-pompage (échelle de 1,6°C)



Le capteur de pression se situait à 2m60 en dessous de la crépine d'aspiration de la pompe. Une influence liée à l'aspiration de la ficelle relié au capteur de pression durant le pompage se retrouve sur les mesures de pression du capteur. Un ajustement manuel a été effectué sur l'ensemble des données liées au pompage durant ces essais afin que les mesures automatiques soient représentatives de la réalité ; des coefficients d'ajustement ont été affectés aux différents paliers. Ainsi, les données représentées sur la figure 6 sont issues des données automatiques du capteur auxquelles un coefficient a été appliqué.

En outre, le rabattement observé sur les différents paliers évolue de manière linéaire (tableau 5, tableau 6) par rapport au débit selon un coefficient de détermination de 97% (figure 5).

Au débit maximum (36 m<sup>3</sup>/h), le rabattement est de 8cm (données manuelles, ou 8.5cm données du capteur de pression).

La température monitorée diminue progressivement au cours de l'essai, passant de 16.3°C à 15.75°C (figure 7). La figure 8 illustre, sur un pas de temps de 4 jours, l'évolution de la température dans le puits. Cette température tend à diminuer durant la phase de pompage et réaugmente progressivement après l'arrêt du pompage de longue durée. La figure 8 souligne également des fluctuations de cette température (après l'arrêt du pompage longue durée) pouvant *hypothétiquement* être corrélées à la fluctuation du débit du Rhône (la nappe alluviale constituant la nappe d'accompagnement du Rhône).

En raison de la hauteur d'aspiration, la pompe a commencé à « *caviter* » sur des débits >30m<sup>3</sup>/h.

### 3.3. L'ESSAI DE PUIITS

#### 3.3.1. Principe

A l'issue de l'opération de nettoyage/développement et afin de déterminer le débit critique du puits, un essai de puits (pompage par paliers) a été réalisé sur l'ouvrage au débit maximal dépassant celui de l'exploitation future de ce dernier : 4 paliers enchaînés de débit croissant, d'une durée d'une heure chacun. Les eaux pompées ont été rejetées dans le réseau d'eaux de la Métropole.

Les données des rabattements et de débits mesurés ont permis l'établissement de la courbe caractéristique, le calcul de son équation et des valeurs des différentes pertes de charges.

L'équation générale du rabattement dans un forage est définie par la relation :

$$s = BQ + CQ^2$$

avec :

**s** : rabattement total observé au puits ;

**Q** : débit de pompage en m<sup>3</sup>/h ;

**BQ** : est proportionnel au débit et fonction des caractéristiques de l'aquifère (transmissivité) et des pertes de charges linéaires (colmatage, pénétration partielle, ...) ;

**CQ<sup>2</sup>** : est proportionnel au carré du débit et représente les pertes de charges quadratiques dues à un écoulement turbulent avec mise en vitesse anormale dans les crépines ou les fissures.

Les pertes de charges quadratiques génèrent un écoulement turbulent qui se produit généralement au niveau des crépines. Cette part de pertes de charges doit rester faible puisqu'elle génère des désagréments physiques (entraînement de particules), chimiques (oxydation) et donc financier (usure pompe, forage).

#### 3.3.2. Essai de puits

L'essai de puits par paliers enchaînés à débits croissants a été effectué le 07 mai 2024, à la suite du développement sur le puits s'étant prolongé sur un pompage nocturne au débit maximum.

L'essai de puits a consisté en l'enchaînement de 4 paliers de débits croissants (8/7.5, 16, 24, 32 m<sup>3</sup>/h). Des prélèvements au cône Imhoff ont été effectués, aucun grain n'a été observé dans les eaux pompées (tableau 7).

*Nota bene : lors du premier palier, le positionnement de la vanne en aval de la pompe, servant à contrôler le débit, s'est dérégulée de -0.5m<sup>3</sup>/h au cours de l'essai. Aucun ajustement de la vanne n'a été appliqué afin de ne pas impacter plus l'essai. Le traitement des données qui suit a été effectué en considérant les mesures du palier à 7.5m<sup>3</sup>/h.*

Le pompage a été réalisé avec une pompe de surface NKP G 40-160 dont la crépine était située à 3m au-dessus du fonds du puits.

Les rabattements observés en fonction du débit pompé par paliers sont synthétisés dans le tableau 3.

Palier 1 à 8/7,5m <sup>3</sup> /h			Palier 1 à 16m <sup>3</sup> /h		
Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)	Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)
10	Ø de grain	2,29	10	Ø de grain	2,302
20	Ø de grain	2,29	20	Ø de grain	2,302

Palier 1 à 24m <sup>3</sup> /h			Palier 1 à 32m <sup>3</sup> /h		
Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)	Temps (min)	Cône imhoff	Niveau d'eau/dalle (m)
10	Ø de grain	2,32	14	Ø de grain	2,34
25	Ø de grain	2,32	30	Ø de grain	2,34

*Tableau 7 : synthèses des prélèvements au cône Imhoff (suivi du sable) - essai de puits*

Essai du puits (relevé manuel des niveaux et rabattements par paliers)

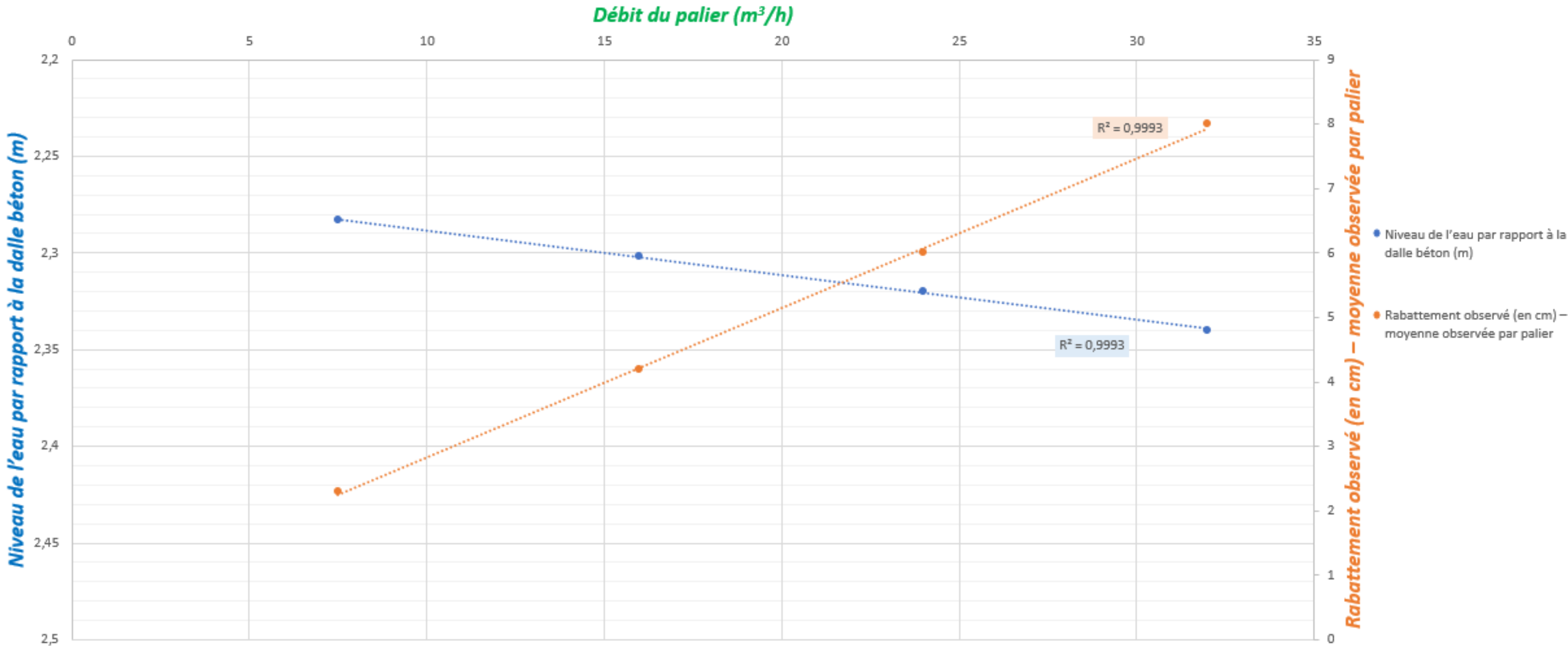


Figure 9 : essai du puits (relevé manuel des niveaux et rabattements par paliers)

Débit du palier ( $m^3/h$ )	Niveau de l'eau par rapport à la dalle béton (m)	Rabatement observé (en cm) – moyenne observée par palier
7,5	2,283	2,3
16	2,302	4,2
24	2,32	6
32	2,34	8

Tableau 8 : synthèse des niveaux et rabattements par paliers (manuel)

Essai sur le puits de captage (avec incertitude de mesure à +/- 0,005m)

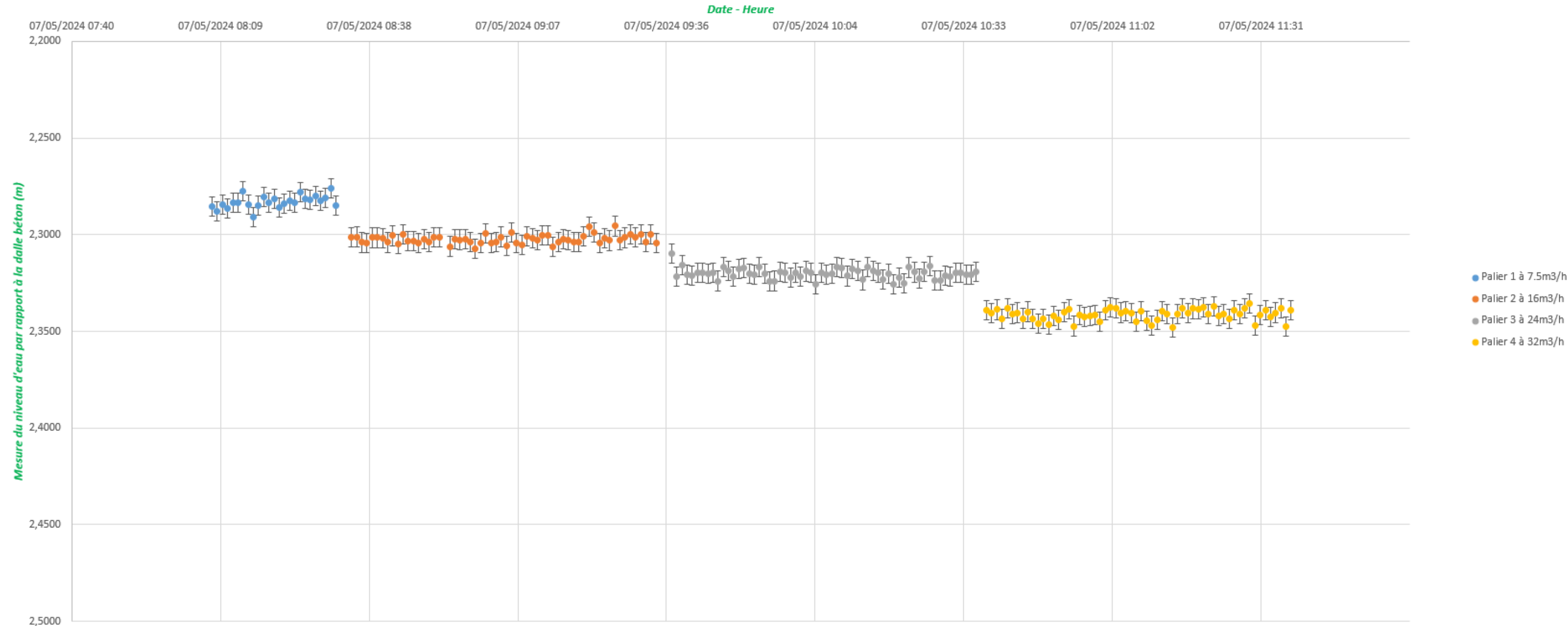


Figure 10 : essai du puits (relevé par capteur de pression des niveaux)

Débit du palier (m <sup>3</sup> /h)	Niveau de l'eau par rapport à la dalle béton (m)	Rabattement observé (en cm) – moyenne observée par palier
7,5	2,2852	2,52
16	2,3028	4,28
24	2,3147	5,46
32	2,3392	8

Tableau 9 : synthèse des niveaux et rabattements par paliers (capteur automatique)

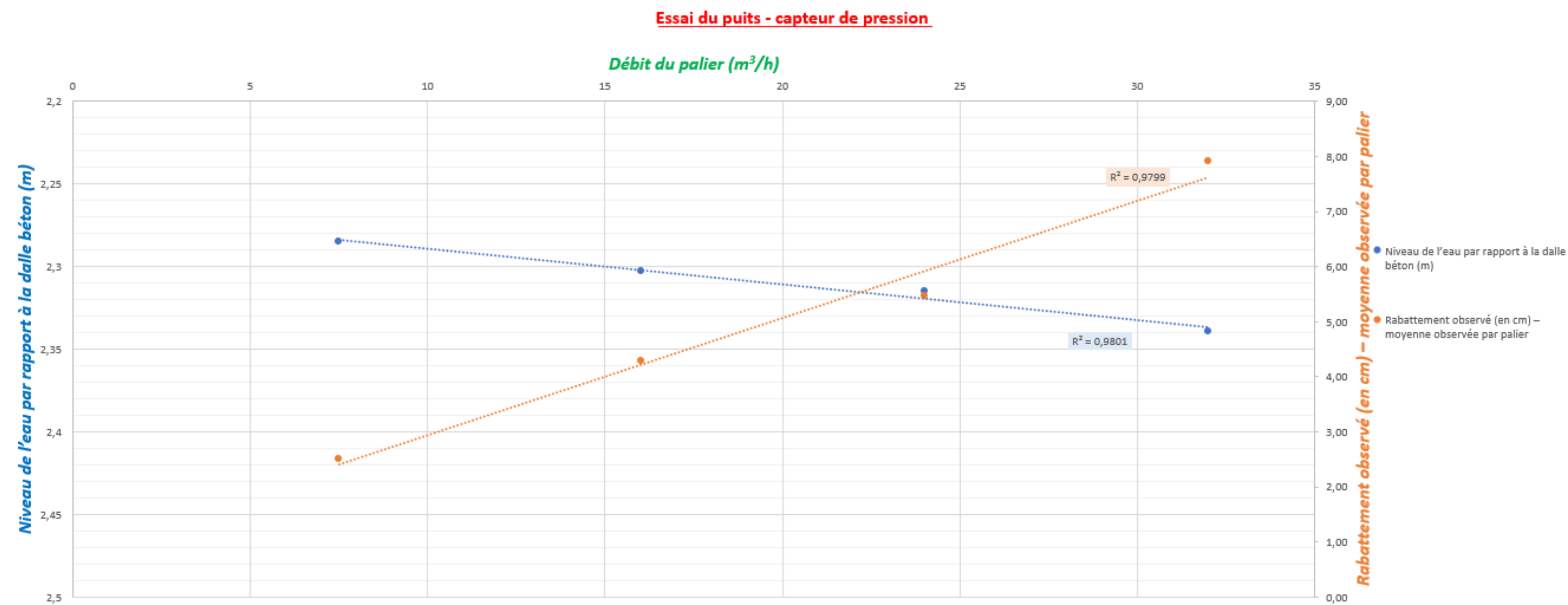
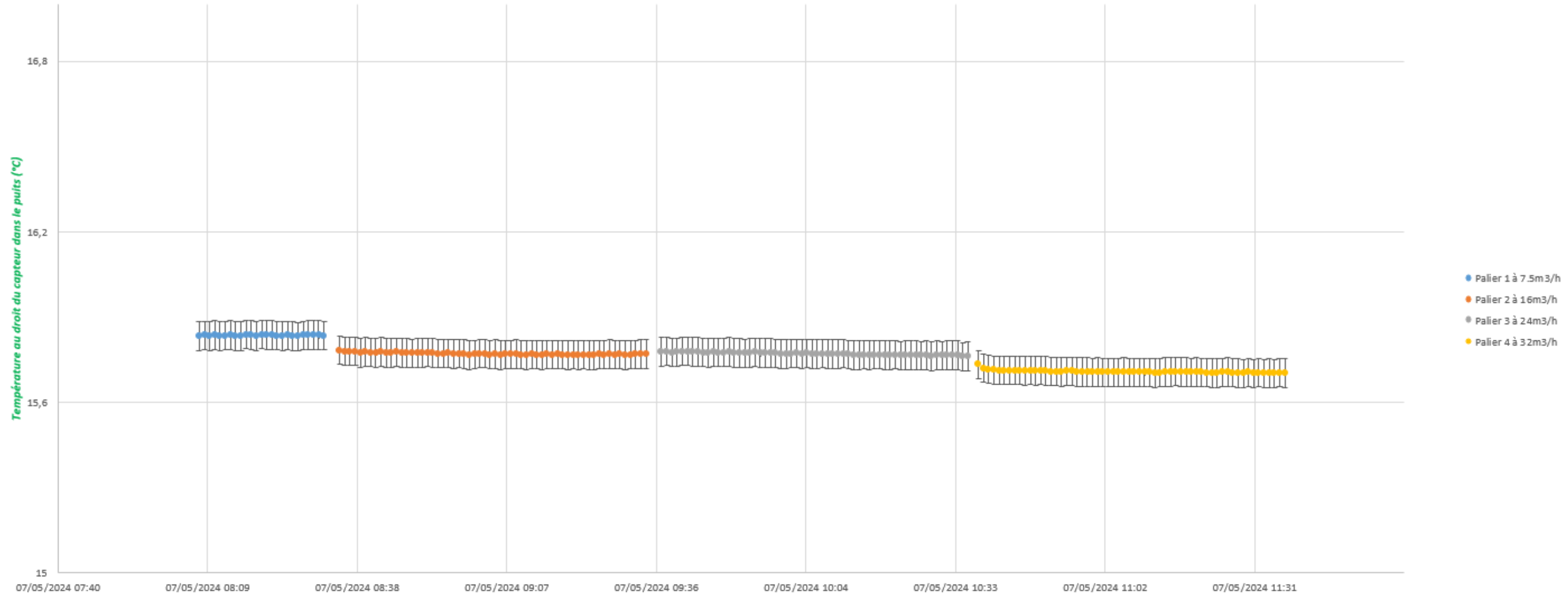


Figure 11 : essai du puits (relevé par capteur de pression des niveaux et rabattements par paliers)

**Evolution de la température durant l'essai de puits (données enregistrées avec barre d'erreur de +/- 0,05°C de précision de mesure)****Figure 12 : évolution de la température durant l'essai de puits**



## Courbe caractéristique de l'ouvrage - essai de puits

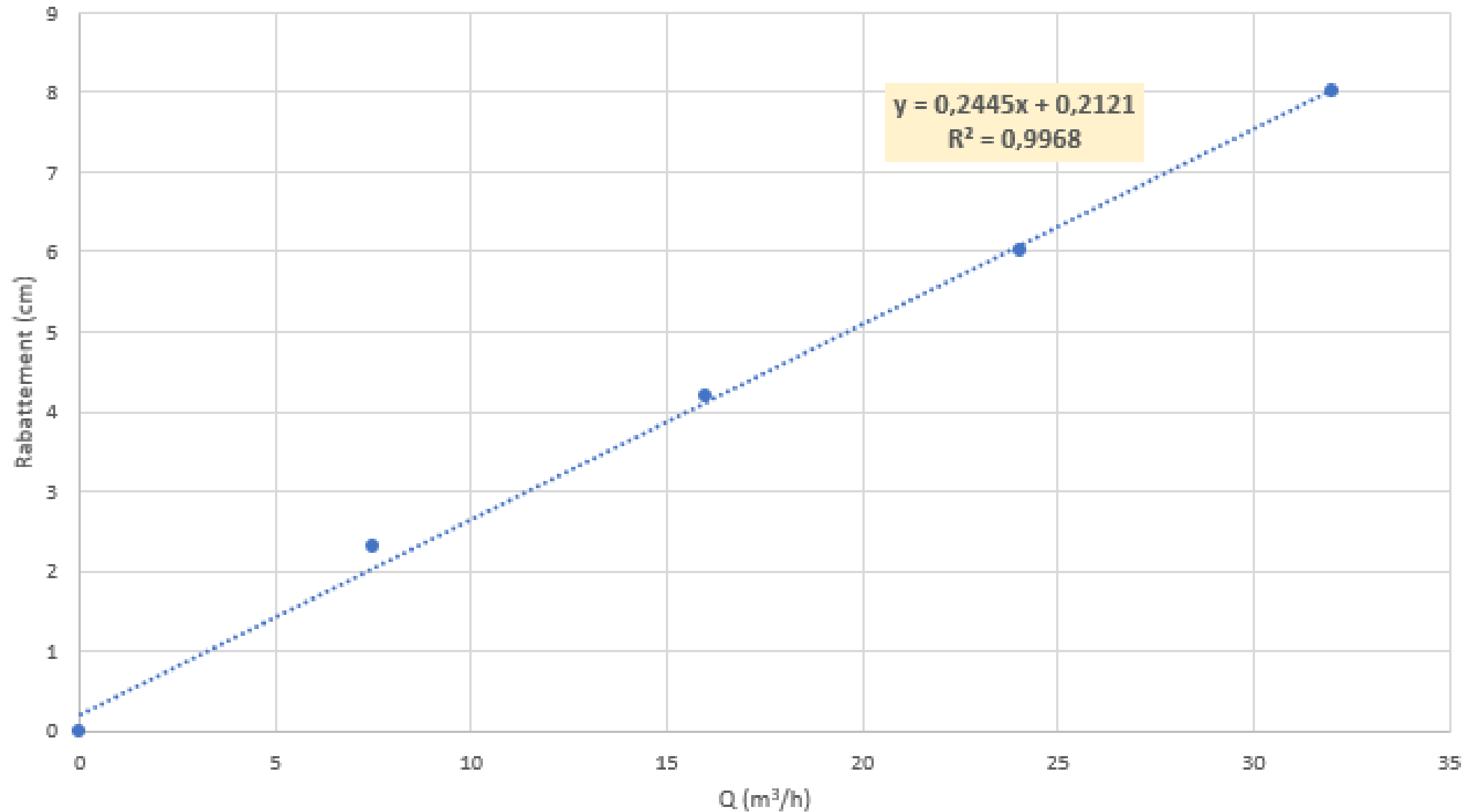
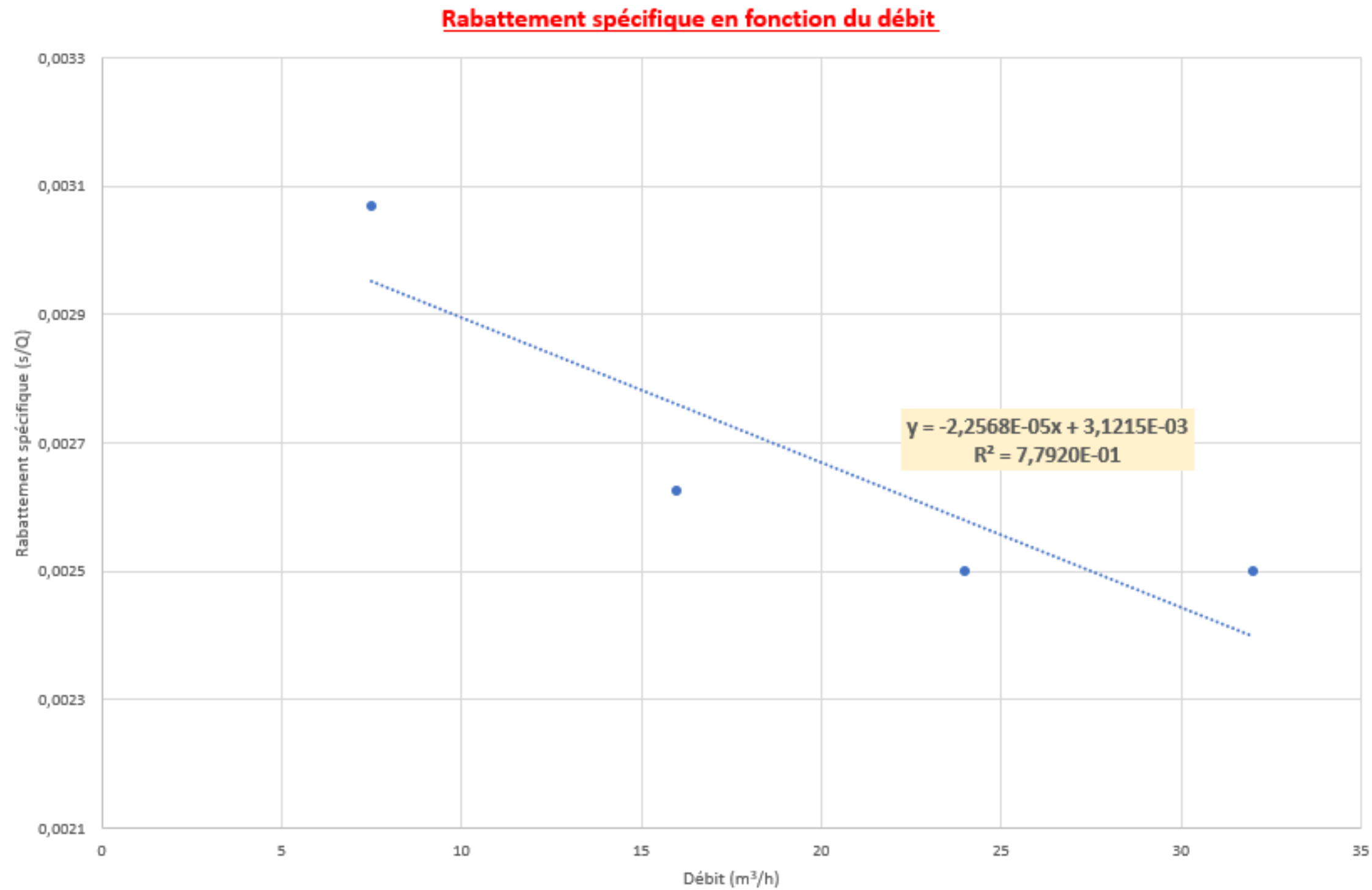


Figure 13 : courbe caractéristique de l'ouvrage



**Figure 14 : rabattement spécifique en fonction du débit**

Q (m <sup>3</sup> /h)	niveau eau/repère (m)	
7,5	2,7230	moyenne palier
16	2,7420	moyenne palier
24	2,7600	moyenne palier
32	2,7800	moyenne palier

niveau statique à 2,7m (par rapport au repère)

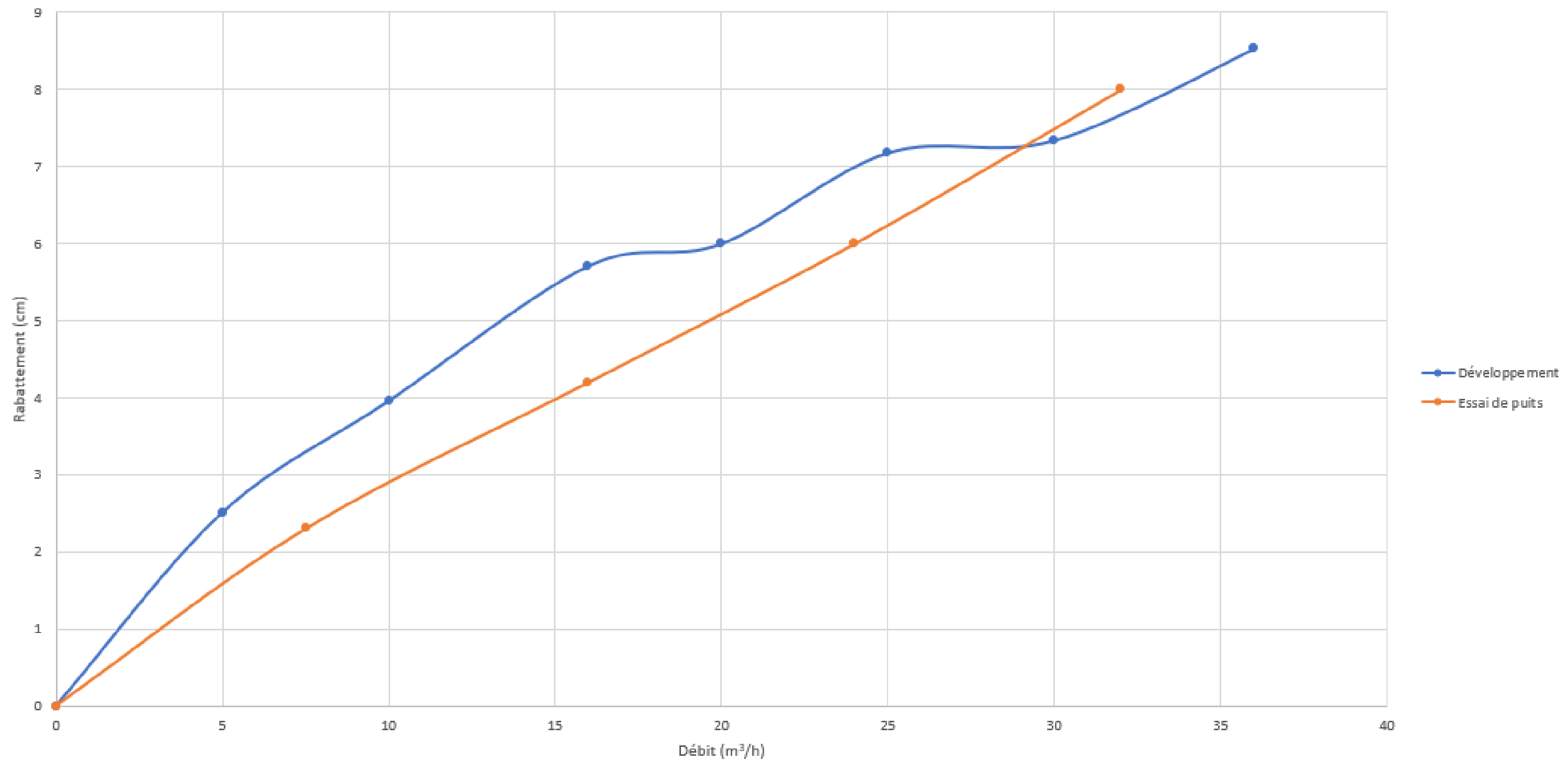
palier	Q (m <sup>3</sup> /h)	s(m)	s/Q
0	0	0	0
1	7,5	0,0230	0,00307
2	16	0,0420	0,00263
3	24	0,0600	0,00250
4	32	0,0800	0,00250

B	0,0031215
C	0,000022568

Q (m <sup>3</sup> /h)	sL(m)	sQ(m)	sQ(%)	%SL
7,5	0,02341125	0,00126945	5,14%	94,86%
16	0,049944	0,005777408	10,37%	89,63%
24	0,074916	0,012999168	14,79%	85,21%
32	0,099888	0,023109632	18,79%	81,21%

Tableau 10 : détermination des pertes de charges de l’ouvrage

### Courbes caractéristiques de l'ouvrage - développement et essai de puits



**Figure 15 : courbes caractéristiques de l'ouvrage pendant le développement et pendant l'essai de puits**

Au maximum du débit de l'essai (à savoir 32 m<sup>3</sup>/h), le rabattement était de 8cm (tableau 9).

D'après l'équation de la droite caractéristique de l'ouvrage (figure 13), le rabattement projeté du puits en phase d'exploitation (à savoir 20-22 m<sup>3</sup>/h) serait de 5 à 5.6cm respectivement et ne présenterait pas de pertes de charges quadratiques entravant le bon fonctionnement de l'ouvrage (tableau 10).

En effet, au débit maximal de l'essai, le pourcentage des pertes de charges quadratiques dans l'ouvrage était de 18.79%. Même si le coefficient de détermination de la droite des rabattements spécifiques est de 77.9% et qu'une marge d'erreur réside quant à la détermination des pertes de charges de l'ouvrage, ce pourcentage de pertes de charges est bien en deçà de celui d'un débit critique. Ainsi, le fonctionnement en phase d'exploitation de l'ouvrage qui produira à un débit inférieur de 10m<sup>3</sup>/h ne devrait donc pas générer des pertes de charges notables.

D'ailleurs, le débit critique n'a pas été atteint durant l'essai (figure 13) malgré les 36 m<sup>3</sup>/h mis en œuvre.

Cet ouvrage présente un bon fonctionnement général en vue d'une mise en exploitation au débit de 20-22 m<sup>3</sup>/h.

La température (figure 12) a peu varié durant l'essai, avec néanmoins une tendance diminutive lors des pompages.

#### **4. POMPAGE LONGUE DUREE**

Le pompage longue durée de 24h s'est déroulé entre le mardi 07 mai 2024 à 11h49 et le mercredi 08 mai 2024 à 13h43. La durée totale du pompage étant de 25h54 pour un débit moyen de 23.4m<sup>3</sup>/h. Aucun grain de sable n'a été relevé durant l'essai, et l'eau demeurait limpide.

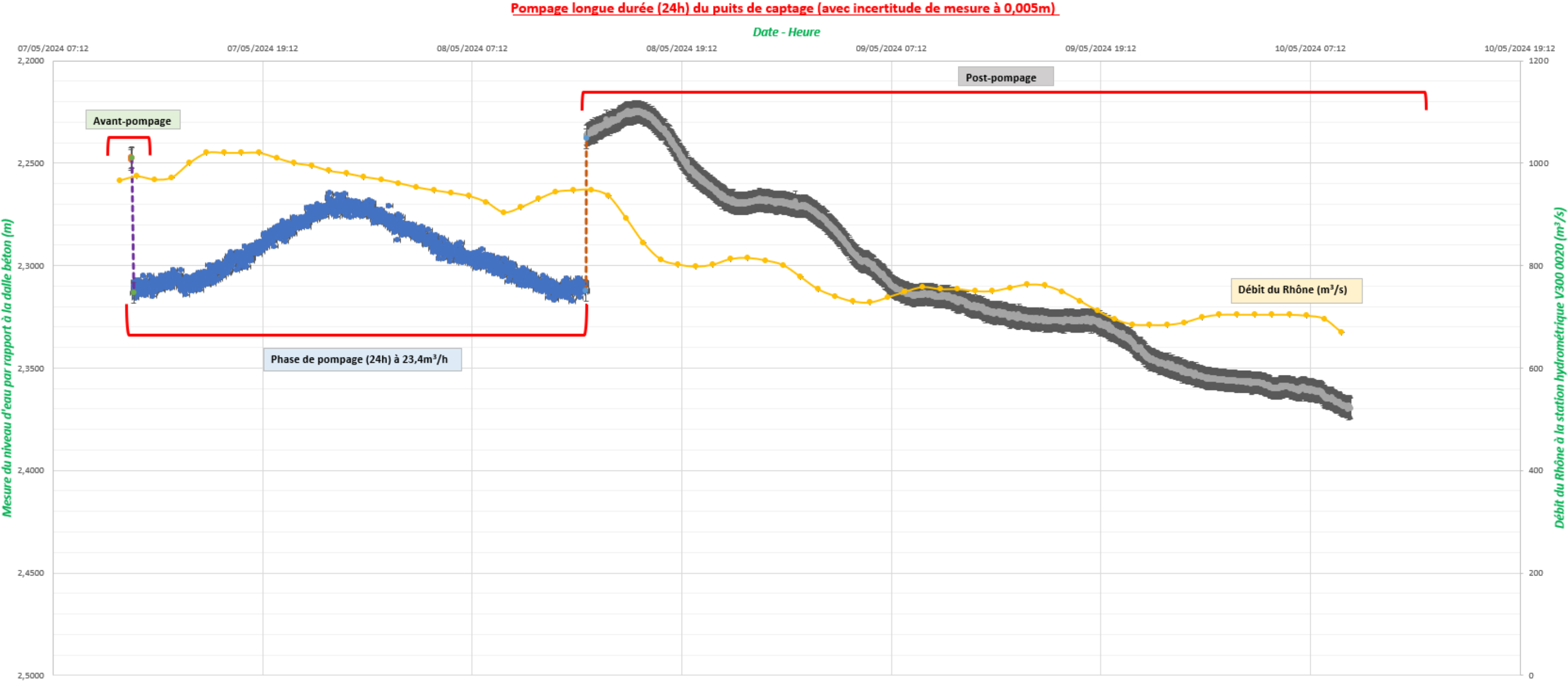


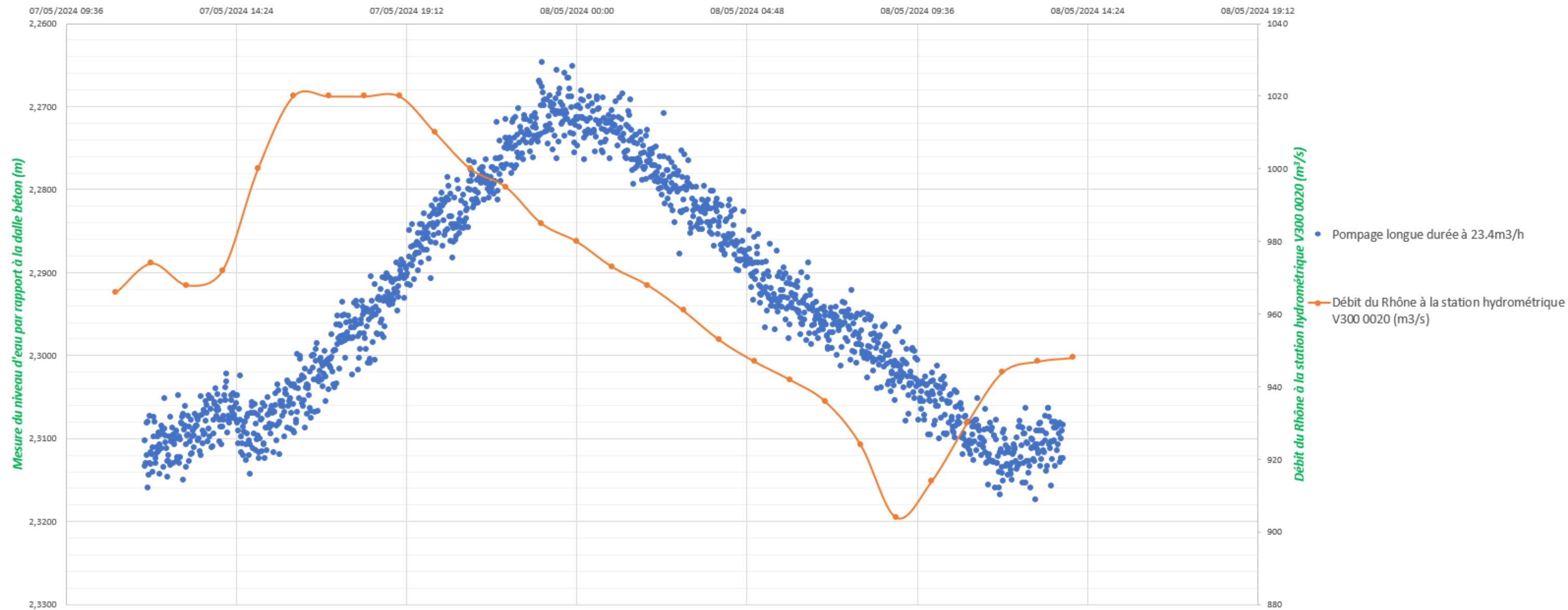
Figure 16 : pompage longue durée (24h) – suivi par capteur de pression du niveau pendant le pompage et après le pompage

Echelle verticale de la mesure du niveau d'eau = 30cm

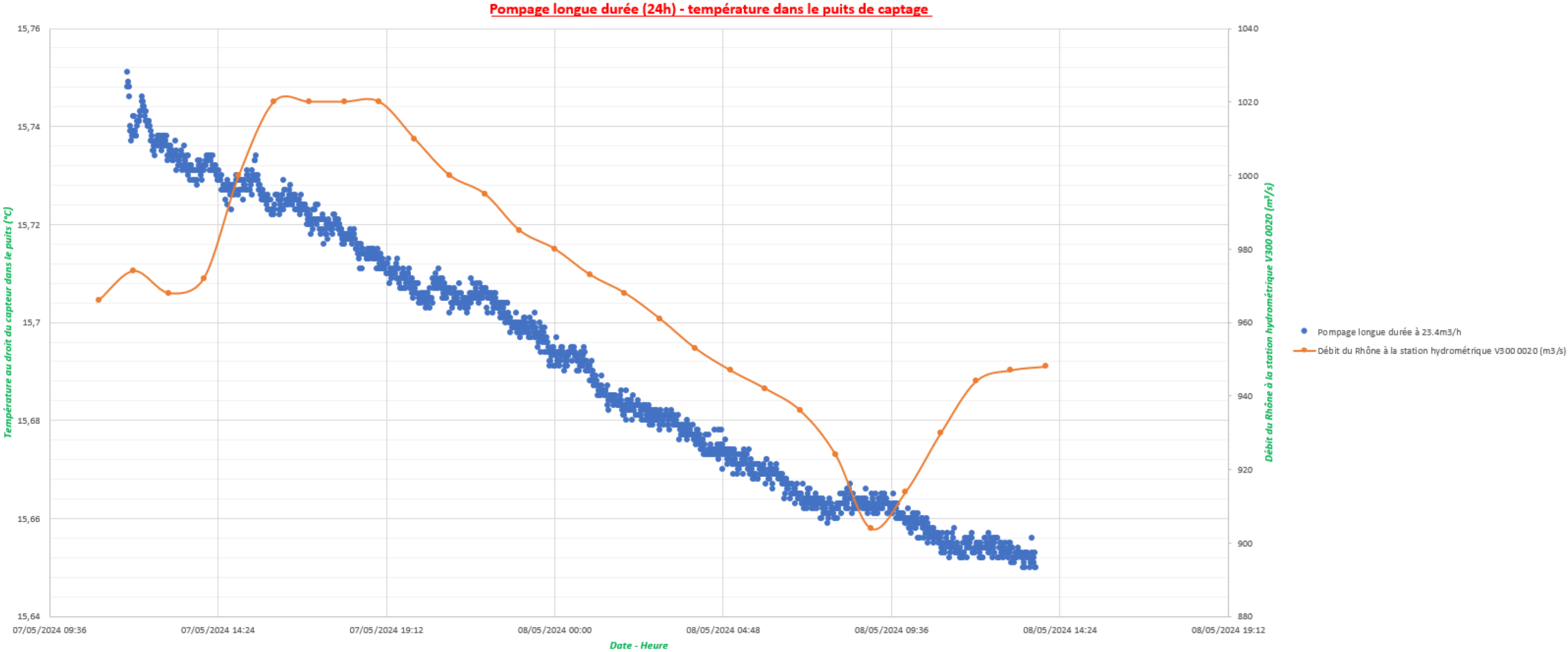


**Pompage longue durée (24h) du puits de captage**

Date - Heure

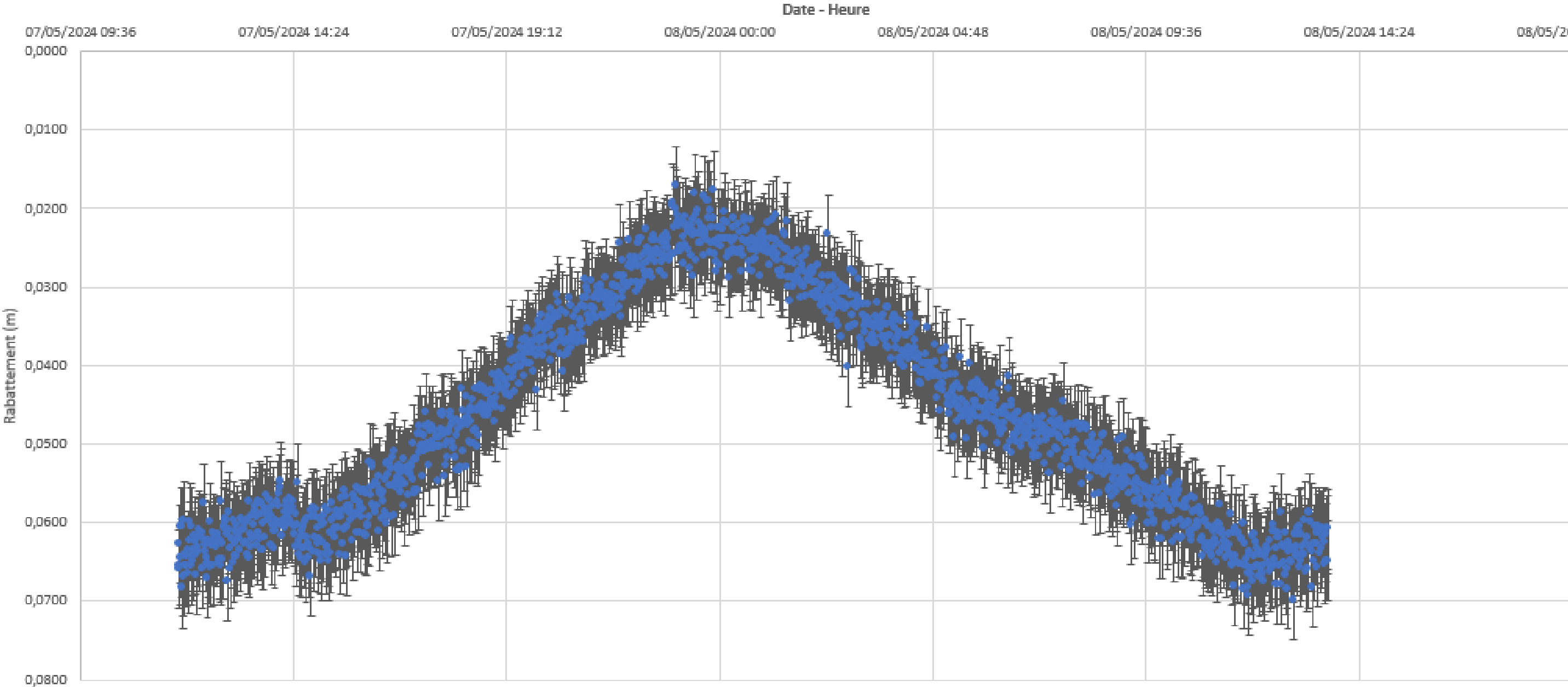
**Figure 17 : pompage longue durée – focale sur la phase de pompage**

L'échelle verticale du niveau d'eau a été réduite pour mettre en perspective le débit du Rhône et le niveau d'eau dans le puits (échelle de 7cm)



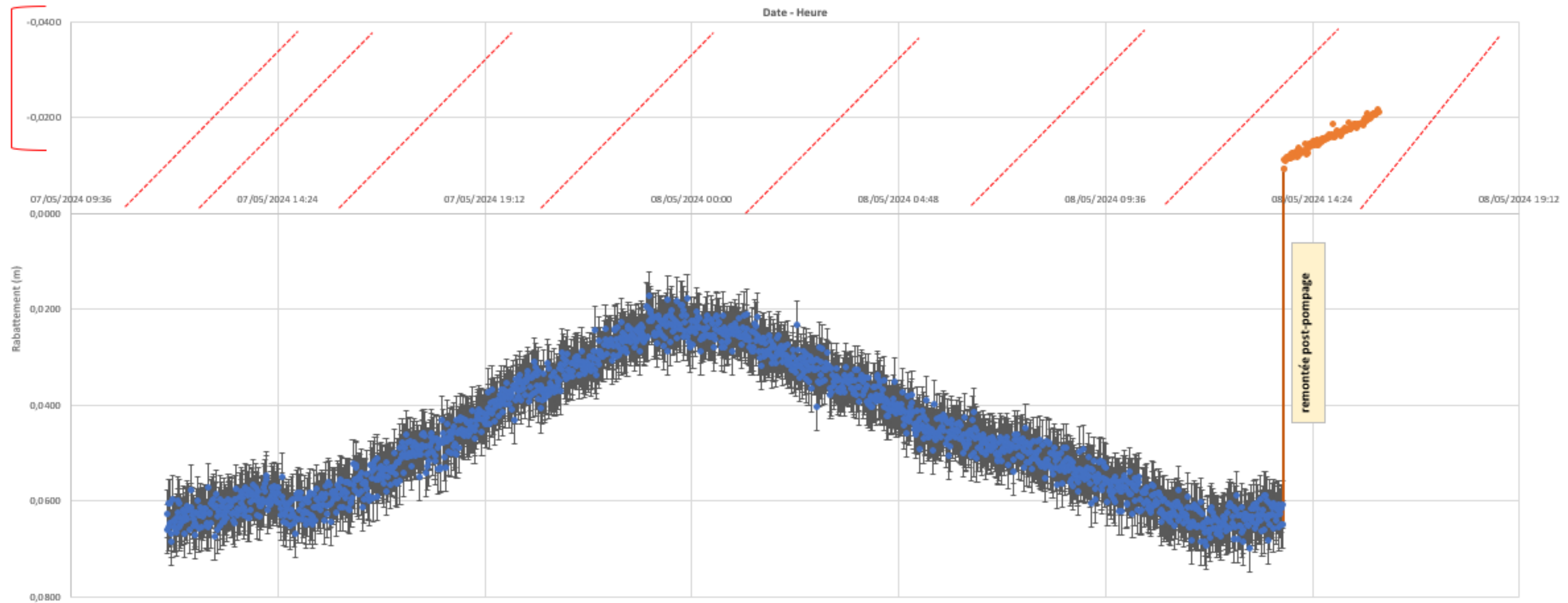
L'échelle verticale de la température a été réduite (échelle de 0.12°C)

**Pompage longue durée (24h) du puits de captage (avec incertitude de mesure à 0,005m)**



**Figure 18 : rabattement durant le pompage longue durée par rapport au niveau statique avant pompage**

**Pompage longue durée (24h) du puits de captage (avec incertitude de mesure à 0,005m)**



**Figure 19 : mise en perspective de la non pertinence de l'interprétation de la remontée post-pompage dans le cas présent**

La figure 16 illustre la *rapidité* de la réponse de la nappe au pompage et à l'arrêt de pompage. En effet, autant sur les mesures automatiques que sur les mesures manuelles, la descente ainsi que la remontée du niveau de la nappe dans le puits sont si rapides qu'elles ne peuvent être mesurées ni manuellement ni par le capteur de pression (en ce qui concerne le capteur de pression, le pas de mesure était de 1min).

En outre, cette figure illustre aussi les oscillations de la nappe, non corrélées au pompage (exemple : dans la nuit du 08/05/2024 où le niveau de l'eau a augmenté progressivement pour redescendre ensuite). Le pompage n'impacte pas le régime hydrodynamique de la nappe en question.

Aussi, entre l'arrêt de pompage et la fin de la chronique piézométrique (10/05), le niveau statique de la nappe a oscillé de 14cm.

La figure 17 met en relation le débit du Rhône lors de la phase de pompage sur le puits. Les oscillations du niveau du puits semblent être corrélées au débit du Rhône. La figure 18 renvoie à la température dans le puits durant le pompage (tendance diminutive).

La figure 18 renvoie au rabattement mesuré par rapport au niveau statique relevé à 11h39 le 07/05, soit avant la phase de pompage.

Cependant, tel qu'expliqué ci-dessus, il y a certes un rabattement lié au pompage, mais le niveau dynamique du puits oscille, très probablement, par rapport au débit du Rhône (*il peut également y avoir une influence de pompes alentours*).

Le rabattement mesuré au début de la phase de pompage par rapport au niveau statique relevé à 11h39 le 07/05 est de 7cm. En fin de pompage, il est de 5.5cm par rapport à ce même niveau, ou à 6.5cm par rapport au niveau statique relevé après la phase de pompage (niveau statique 1cm plus haut après le pompage par rapport à avant).

En ce qui concerne l'étude de la remontée post-pompage (en vue de déterminer la transmissivité de la nappe), en considérant le niveau statique avant la phase de pompage, le rabattement devient négatif (ce qui n'a pas de sens réel) (ceci est illustré par la figure 19) ; soulignant de nouveau le caractère fort transmissif de la nappe et des influences autres que seulement notre pompage (réalimentation de la nappe par le Rhône, autres puits de géothermie dans le secteur...).

## 5. **CONCLUSION**

Le chantier mené par la société DPG Pompage pour la CCI à Place de la Bourse, Lyon (69) a comporté la réalisation :

- de 1 puits de pompage en sous-sol :
  - de 14.6 mètres de profondeur par rapport à la dalle béton captant la nappe des alluvions du Rhône
- un développement par paliers
- un essai de puits par paliers enchaînés
- un pompage de longue durée

Les travaux, mesures et pompages d'essais réalisés ont permis de tester et d'optimiser le fonctionnement du puits en vue d'un fonctionnement en phase d'exploitation pour la géothermie.

**Afin d'avoir un meilleur rendement thermique, il nous semblerait préférable de positionner la pompe au fond de l'ouvrage pour préférentiellement capter les eaux de nappe en partie basse.**

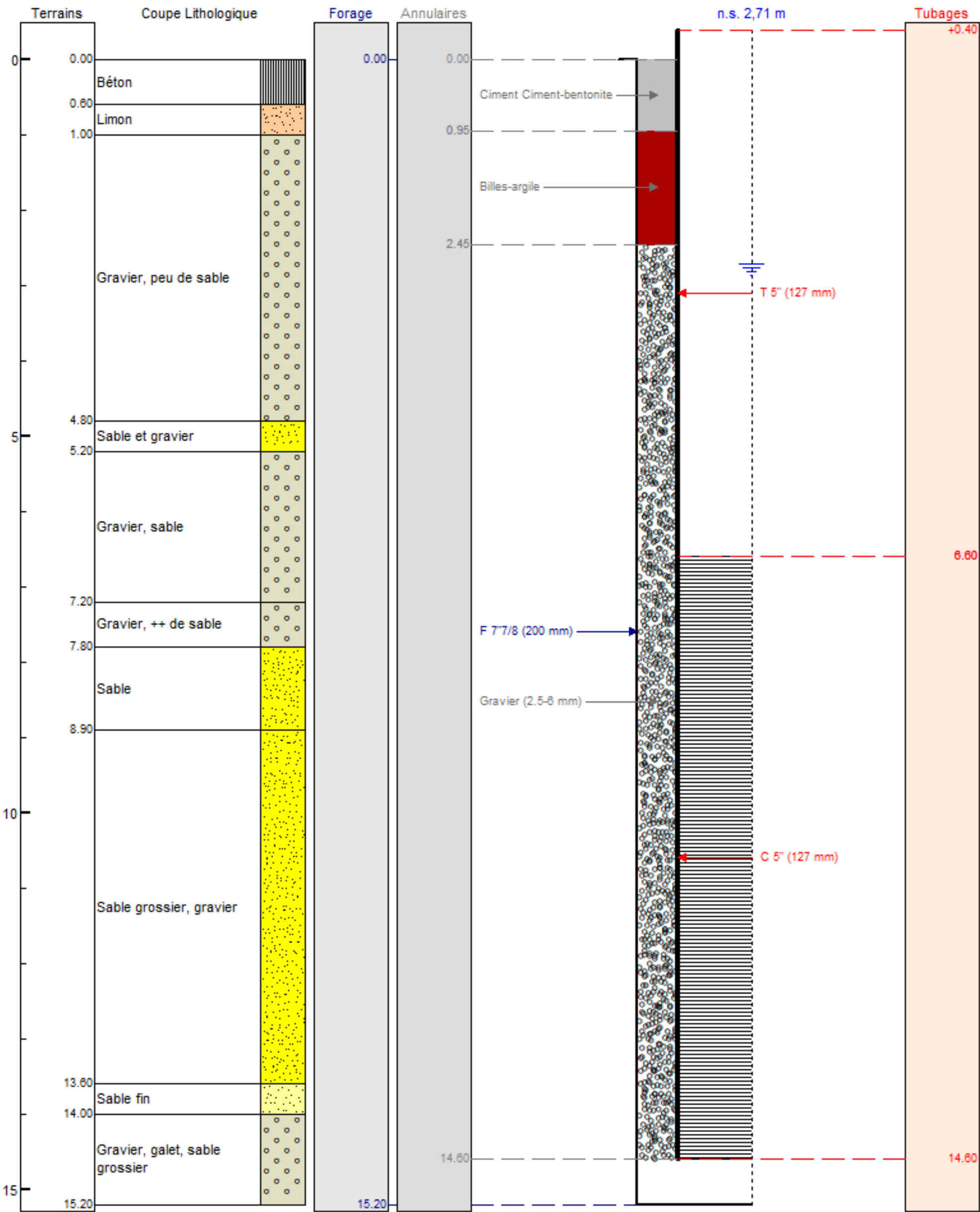


**CREATION D'UN FORAGE DE GEOTHERMIE SUR  
NAPPE POUR LE PROJET DE LA \_\_\_\_\_ ,  
(69)**

\_\_\_\_\_  
**CCI**  
\_\_\_\_\_

**ANNEXE 3 : Coupe géologique et  
technique du puits de captage  
réalisé**





# Puits de captage réalisé