

4 COUPE TECHNIQUE DU FORAGE AGRICOLE

Coupe technique et géologique du forage F1 captant la nappe de l'Eocène moyen et inférieur

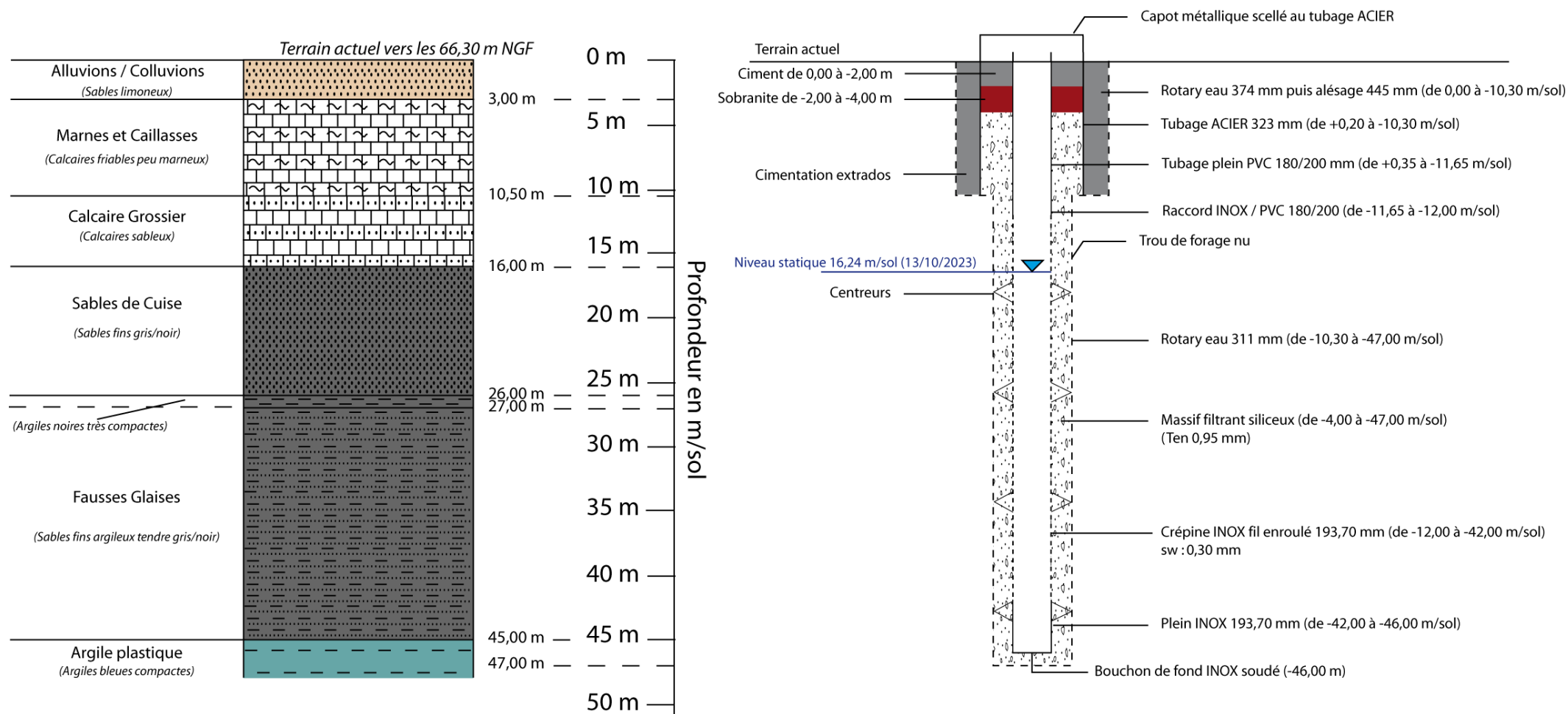


Figure 4 : Coupe technique et géologique du forage F1

5 ESSAIS DE POMPAGE

5.1 Caractéristiques du dispositif de pompage et de suivi

5.1.1 Présentation du dispositif de pompage

La pompe utilisée lors des essais était une pompe immergée 6", d'une longueur totale d'environ 3 m, avec une zone d'aspiration située vers les 0,70 m / base de pompe.

Ne disposant pas d'une chemise de refroidissement, cette pompe a été mise en place entre environ 39,00 et 42,00 m/sol, soit entre environ 39,35 et 42,35 m/HT.

Par conséquent, lors des essais, il a été retenu une profondeur de rabattement maximal admissible à 38,00 m/HT, correspondant à une cote de rabattement à ne pas dépasser afin d'éviter tout risque d'endommagement de la pompe immergée.

Théoriquement, cette pompe devait fournir des débits compris entre 18 et 42 m³/h, pour une HMT d'environ 50 m. Néanmoins, en condition d'essais, il n'a pas été possible de dépasser 37 m³/h en raison de l'ajout d'un compteur volumétrique DN50 entre deux tuyaux de refoulement car le débitmètre électromagnétique présentait un défaut de calibration.

La colonne d'exhaure était composée de tubages Inox DN60, d'une longueur d'environ 40 m, reliant la pompe aux tuyaux de refoulement souple DN60 puis DN50 après compteur.

Avant refoulement, les eaux ont transité par un débitmètre électromagnétique DN75, puis par un manomètre et une vanne papillon DN50 permettant de varier les débits. Un robinet "prise d'eau" a été mis en place après la vanne, permettant les prélèvements d'eaux

Lors de la phase de développement par pompage, il a été observé un défaut de calibration des débits instantanés sur le débitmètre électromagnétique.

Par conséquent, la société COMIREM SCOP a mis en place entre deux tuyaux de refoulement un compteur volumétrique DN50 afin de garantir une bonne lecture des débits lors des essais.

Ces différentes réductions de diamètre semblent expliquées le débit maximal à 37 m³/h.



Figure 5 : Photographies des appareils de contrôle et de surveillance de débits

5.1.2 Point de rejet des eaux d'exhaure

Lors des essais, le rejet des eaux d'exhaure s'est effectué directement sur site, à environ 100 m en aval du forage.

La zone de rejet correspondait à une cuvette topographique.



Figure 6 : Photographie du point de rejet des eaux d'exhaure

5.1.3 Matériels de mesure lors des essais de pompage

Lors des essais, le suivi des niveaux d'eau a été réalisé à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle, couplée avec une sonde automatique installée dans un tube " guide sonde " vers les 39 m/sol (et à une sonde barométrique).

La mesure des débits a été suivie tout au long des essais sur le compteur et également, sur le débitmètre électromagnétique, par lecture directe des débits et par comptabilisation des volumes à chaque heure de pompage.

5.2 Déroutement des essais

Le tableau ci-dessous présente la chronologie des essais de pompage :

Date	Phase
17 octobre 2023	Essai de puits comprenant : - 4 paliers à débits croissants d'une durée de 1 h par palier - débits par palier : environ 20, 26, 30 et 35 m ³ /h - un suivi de la remontée de la nappe de 1h30 min entre chaque palier
18 au 20 octobre 2023	Essai de nappe comprenant : - un pompage d'une durée de 12 heures à débit constant d'environ 27 m ³ /h - un suivi de la remontée de nappe pendant environ 35 heures après coupure

Tableau 8 : Chronologie des essais de pompage

5.3 Piézométrie lors de l'intervention

Le tableau ci-dessous présente les niveaux de nappe relevés lors de l'intervention avant pompage en début de journée.

F1	Date des relevés piézométriques					
	13/10/2023	16/10/2023	17/10/2023	18/10/2023	19/10/2023	20/10/2023
m/HT	16,59	16,58	16,92	16,99	17,59	17,07
m NGF	50,08	50,10	49,76	49,69	49,09	49,61
Phase	Réglage pompe	Développement	Essai de puits	Essai de nappe	Phase de remontée de nappe suite à l'essai de nappe	

Tableau 9 : Niveaux de nappe relevés lors de l'intervention

Selon ces données, le réel niveau statique de la nappe de l'Eocène moyen et inférieur était situé vers les 16,58 m/HT, soit vers les 50,10 m NGF.

Selon la coupe géologique du forage, la nappe d'étude correspond à une nappe libre.

Compte tenu des remontées relativement lentes de la nappe d'étude, les niveaux d'eau avant lancement des essais de pompage ne correspondaient pas à de réels niveaux statiques.

Enfin, compte tenu du niveau statique supposé, les formations du Lutétien n'étaient pas saturées par la nappe d'étude (base du Lutétien vers 16 m/sol).

Selon l'étude de pré faisabilité (rapport COMIREM SCOP n°22012-01), il est attendu un battement annuel de cette nappe d'environ 2 à 3 m.

Si le niveau d'eau observé en octobre 2023 correspond à un niveau de basses eaux, il est supposé qu'en période de hautes eaux, la nappe au droit du forage peut atteindre les 13,60 ou 14,60 m/HT, soit les 47,10 ou 48,10 m NGF.

5.4 Essai de puits (par paliers non enchainés)

5.4.1 Présentation des données d'essai

La figure page suivante présente la chronique de rabattement lors de l'essai de puits en F1.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres de l'essai de puits.

Paliers	Niveau nappe avant essai (m/HT)	Débit (m ³ /h)	Rabattement en fin de palier (m)	Durée de remontée avant palier	Rabattement spécifique ($\frac{m}{m^3/h}$)	Débit spécifique ($\frac{m^3/h}{m}$)
1	16,92	19,64	6,37	1h30min	0,32	3,08
2		25,80	8,80	1h30min	0,34	2,93
3		30,15	11,45	1h30min	0,38	2,63
4		35,41	15,25	Fin de l'essai	0,43	2,32

Tableau 10 : Paramètres de l'essai de puits

Entre chaque palier de pompage, l'état initiale de la nappe n'a pas été retrouvée, même après 1h30min de mise en repos.

Une correction sur les rabattements à chaque palier devrait être appliquée.

Néanmoins, le niveau de nappe avant lancement de l'essai de puits ne correspondait pas non plus au niveau réellement statique de la nappe (à savoir 16,58 m/HT).

Par sécurité et afin de ne pas biaiser l'interprétation en traitant excessivement les données brutes de l'essai, il a été convenu de ne pas appliquer de correction.

Une surestimation des pertes de charge linéaire et donc, une sous-estimation du débit critique sont donc attendues. Toutefois, cette sous-estimation permet de garder une sécurité compte tenu des rabattements observés dépassant les 30 m³/h.

Également, bien que le dispositif de pompage ne pût fournir un débit supérieur à 37 m³/h, selon les données du graphique présenté ci-après, un palier à Q ≈ 40 m³/h aurait entraîné vraisemblablement un dénoyage de la pompe immergée avant 1 h de pompage.

Enfin et de manière qualitative, dépassées les 30 m³/h, les courbes de rabattement aux paliers 3 et 4 présentent des pentes de plus en plus fortes vis-à-vis de celles des paliers 1 et 2.

Cette baisse de productivité de l'ouvrage et/ou du réservoir pourrait être :

- soit liée à des pertes de charge quadratique excessives dépassé les 30 m³/h,
- soit liée à la désaturation progressive de l'horizon supposée le plus productif, à savoir compris entre 16 et 26 m/sol, soit des rabattements compris entre 0 et 9 à 10 m.

Par conséquent, le rabattement maximal admissible pour cet ouvrage semble être de maximum 9 à 10 m, soit une cote à ne pas dépasser d'environ - 26 m/sol (hypothèse vérifiée lors de l'essai de nappe).

A priori, le débit critique de cet ouvrage semble être situé en-deçà des 30 m³/h.

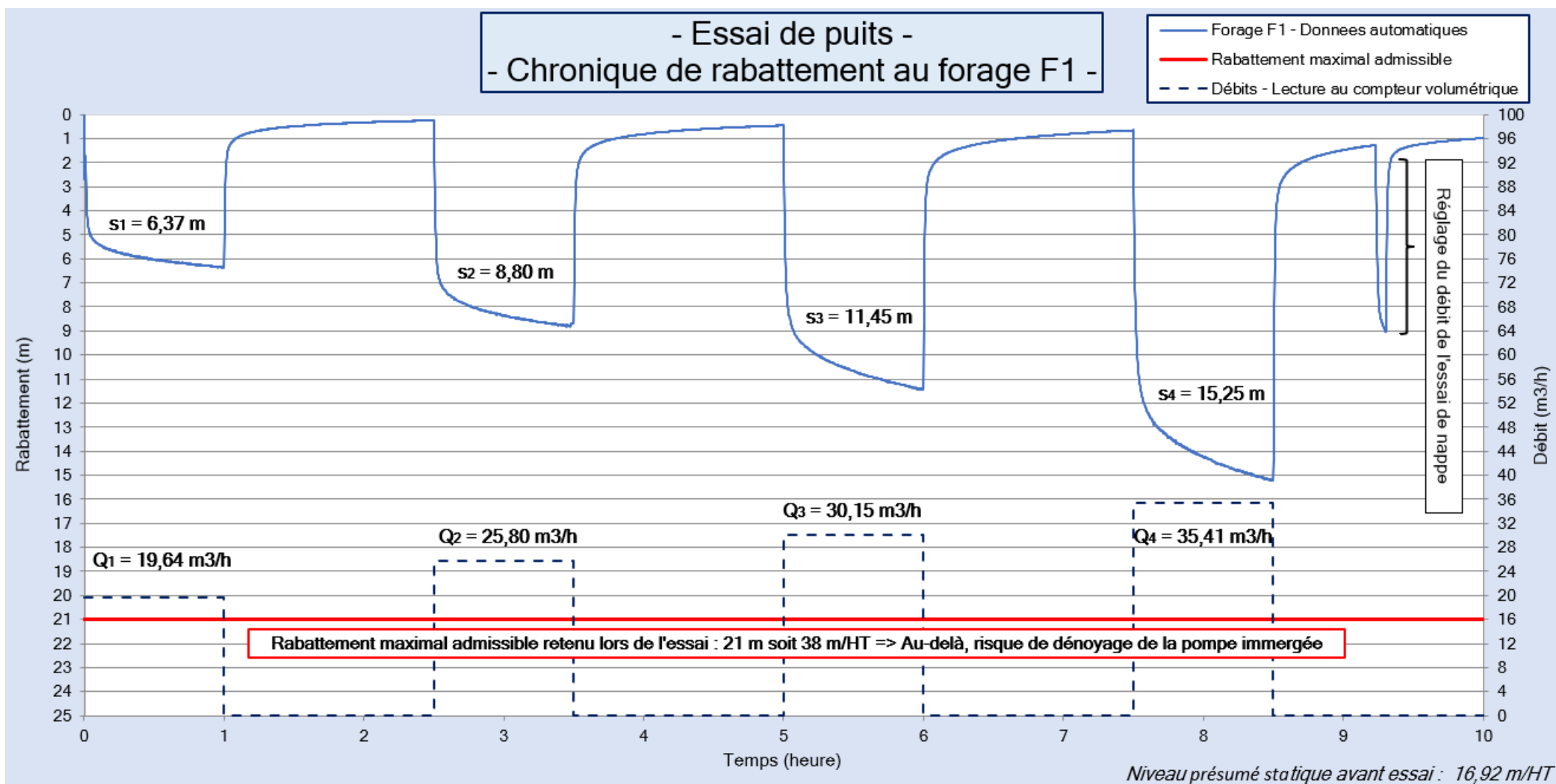


Figure 7 : Chronique de rabattement lors de l'essai de puits

5.4.2 Caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage

5.4.2.1 Equation caractéristique de l'ouvrage

L'équation caractéristique d'un ouvrage de pompage est donnée par la formule suivant :

$$s_p = B \cdot Q + C \cdot Q^n$$

Avec :

s_p = rabattement total observé au puits (m)

Q = débit de pompage dans le puits (m^3/h)

B = Coefficient de perte de charge linéaire (h/m^2)

C = Coefficient de perte de charge quadratique (h^2/m^5)

n = exposant compris entre 1,5 et 3,5 et dépendant du couple rabattement spécifiques / débits

Les pertes de charge linéaire (notées BQ) correspondent aux pertes de charge dues à l'écoulement laminaire, comprenant la perte de charge dans le milieu aquifère et celle due au remaniement autour de la crépine.

Les pertes de charge quadratique (notées CQ^2) correspondent aux pertes de charge dues à l'écoulement turbulent dans les crépines et le tubage.

Le graphique des rabattements spécifiques en fonction des débits permet de déterminer les coefficients de pertes de charge.

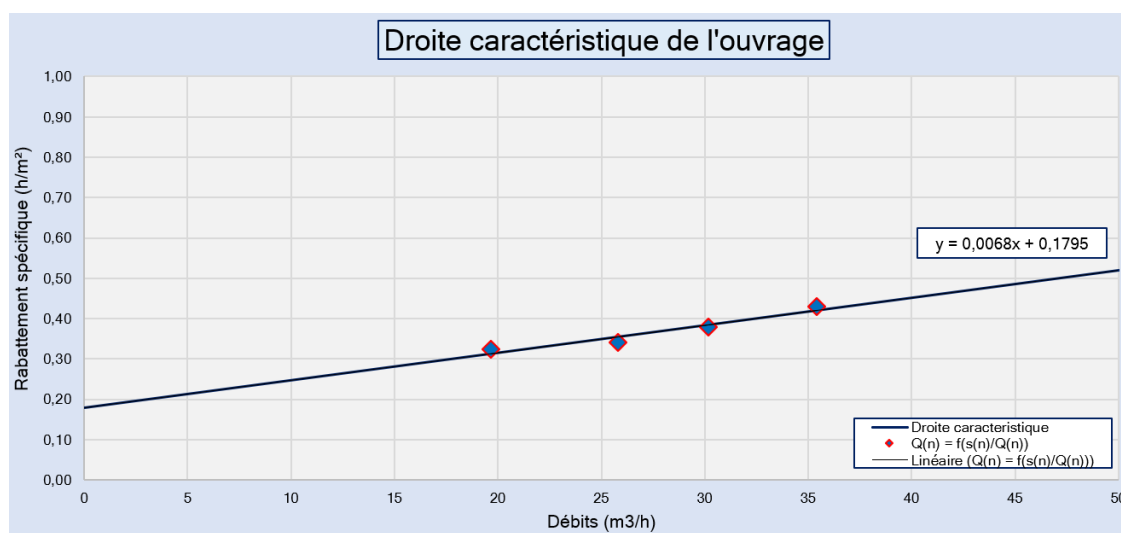


Figure 8 : Droite caractéristique du forage F1

L'équation caractéristique de l'ouvrage PP-01 est donnée comme suit :

$$s_p = 1,80 \cdot 10^{-1} \cdot Q + 6,80 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2$$

Avec :

Coeff. perte de charge linéaire (h/m^2)	Coeff. perte de charge quadratique (h^2/m^5)	Exposant (-)
$1,80 \cdot 10^{-1}$	$6,80 \cdot 10^{-3}$	2

Tableau 11 : Terme de l'équation caractéristique du forage F1

Le coefficient de pertes de charge quadratique reste relativement élevé (de l'ordre de 10^{-3}).

Ces fortes pertes de charge quadratiques sont vraisemblablement liées à l'équipement mis en place, à savoir des crépines dont les ouvertures sont de 0,30 mm.

Néanmoins, compte tenu :

- du retour d'expérience sur les forages captant le même réservoir dans le secteur d'étude (cf. rapport COMIREM SCOP n°22012-01Bis),
- du faciès relativement fins des formations des Sables de Cuise et des Fausses Glaises rencontrés lors du forage,

L'équipement mis en place (slot 0,30 mm et massif TEN 0,95) permet d'anticiper tout risque d'ensablement de l'ouvrage et de fournir une eau sans matière en suspension lors de la phase exploitation (cf. résultats des analyses d'eaux souterraines présentés en chapitre 6).

5.4.2.2 Définition du débit critique de l'ouvrage

Le débit critique d'un ouvrage est défini par le débit maximal pouvant affluer d'un aquifère à un forage en écoulement laminaire, c'est-à-dire sans dépassement de la vitesse critique.

Dépassés ce débit, les écoulements deviennent turbulents et peuvent déstabiliser l'ouvrage (perte de productivité à terme).

Le débit critique de l'ouvrage peut être déterminé par la méthode d'égalité des pertes de charge linéaire et quadratique, donné par la formule suivante :

$$Q_c = \frac{B \cdot Q}{B \cdot Q + C \cdot Q^n} \cdot 100$$

Selon cette approche, le débit critique de l'ouvrage est d'environ 26 m³/h.

5.4.2.3 Définition du débit d'exploitation de l'ouvrage

Par convention, le débit d'exploitation du forage doit respecter les préconisations suivantes :

- ne pas dépasser 80 % du débit critique,
- ne pas dépasser un rabattement total d'environ 1/3 de la colonne d'eau dans l'ouvrage, à savoir pour ce cas d'étude, un rabattement maximum d'environ 10 m,

compte tenu de la coupe géologique du forage, il peut être ajouté la règle suivante :

- ne pas dénoyer les horizons supposés les plus productifs, à savoir les Sables de Cuise situés entre 16 et 26 m/sol, soit un rabattement total équivalent de 9 à 10 m en prenant en compte un niveau statique vers les 17 m/sol.

En suivant ces préconisations, le débit d'exploitation du forage F1 serait d'environ 20 à 21 m³/h, pour un rabattement après 1 h de pompage à environ 6 à 7 m.

Néanmoins, ce débit doit être confirmé par les résultats de l'essai de nappe (cf. chapitre 5.5) et par la simulation du fonctionnement du forage en phase exploitation (cf. chapitre 7).

5.4.2.4 Courbe rabattements / débits ou courbe caractéristique de l'ouvrage

La figure page suivante présente la courbe caractéristique de l'ouvrage.

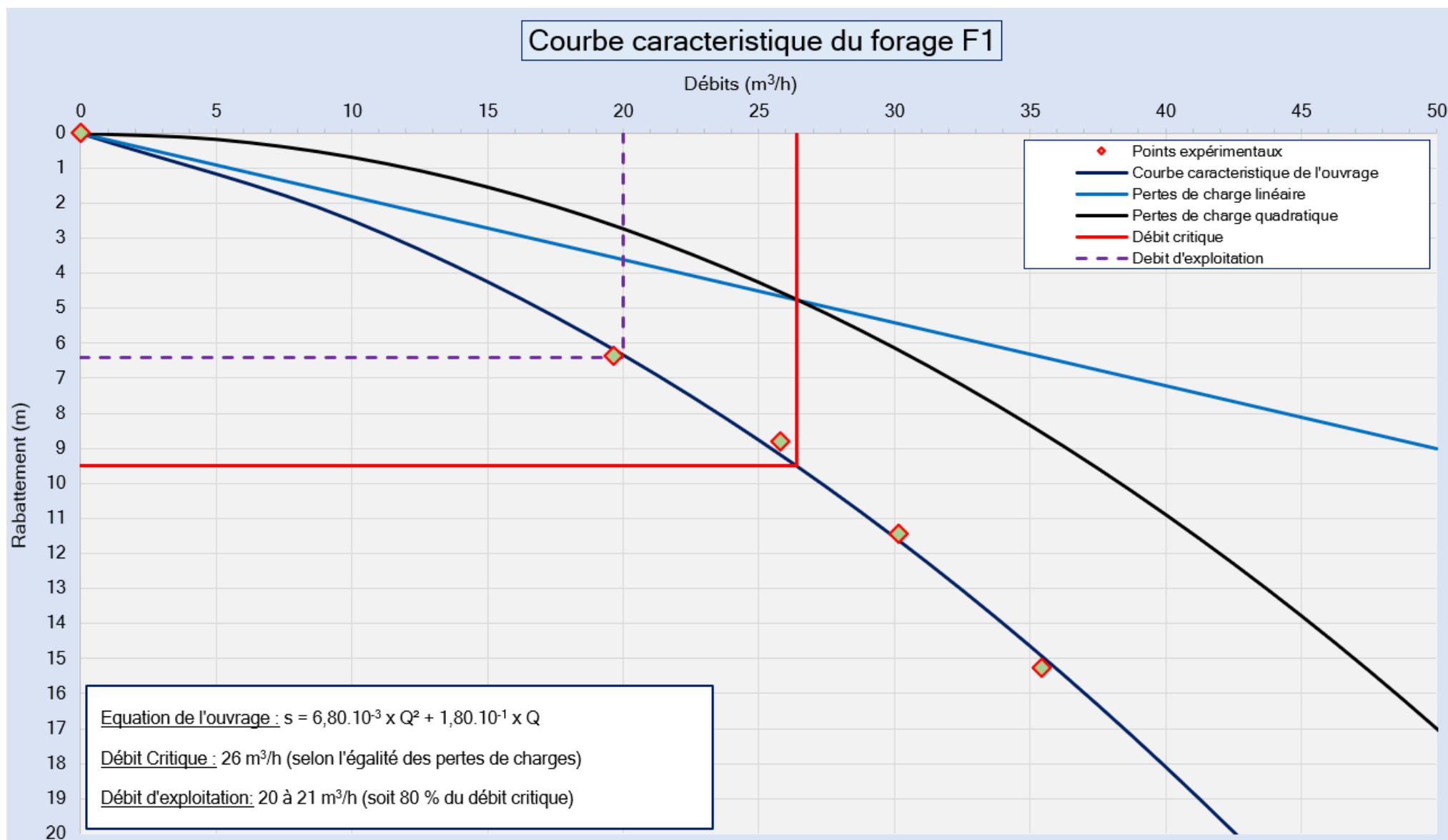


Figure 9 : Courbe caractéristique de l'ouvrage

5.5 Essai de nappe (essai longue durée)

5.5.1 Présentation des données d'essai

L'essai de nappe a été réalisé :

- pour la phase pompage, le 18 octobre 2023, sur une durée de 12 h,
- pour la phase de remontée, le 19 au 20 octobre 2023, sur une durée de plus de 35 h.

Le débit moyen de l'essai était de 27,07 m³/h et a été contrôlé tout au long de l'essai au compteur volumétrique.

Ce débit a oscillé entre 27,44 m³/h en début et 26,89 m³/h en fin de pompage, soit un débit pouvant être qualifié de stable tout au long de l'essai.

Le tableau ci-dessous présente les principaux paramètres de l'essai :

Ouvrage	Durée de pompage (h)	Débit moyen (m ³ /h)	Niveau supposé statique (m/HT)	Rabattement total (m)	Temps à 80 % de la remontée totale	Durée totale de la remontée
F1	12,00	27,07	16,99	13,20	36 min	> 35 h

Tableau 12 : Principaux paramètres de l'essai de nappe

A noter qu'il a été retenu un débit d'essai d'environ 26 / 27 m³/h afin :

- d'évaluer le comportement de la nappe soumise au débit critique de l'ouvrage,
- d'évaluer une potentielle stabilisation du rabattement dans le temps en-dessous de la cote de rabattement maximal admissible retenu à savoir 9 / 10 m (soit 26 / 27 m/HT).

Il est présenté en pages suivantes les données de l'essai observé au forage F1, à savoir :

- la chronique totale du rabattement sur graphique arithmétique,
- les chroniques du rabattement en phase pompage sur graphique semi-log,
- les chroniques du rabattement en phase remontée sur graphique semi-log,

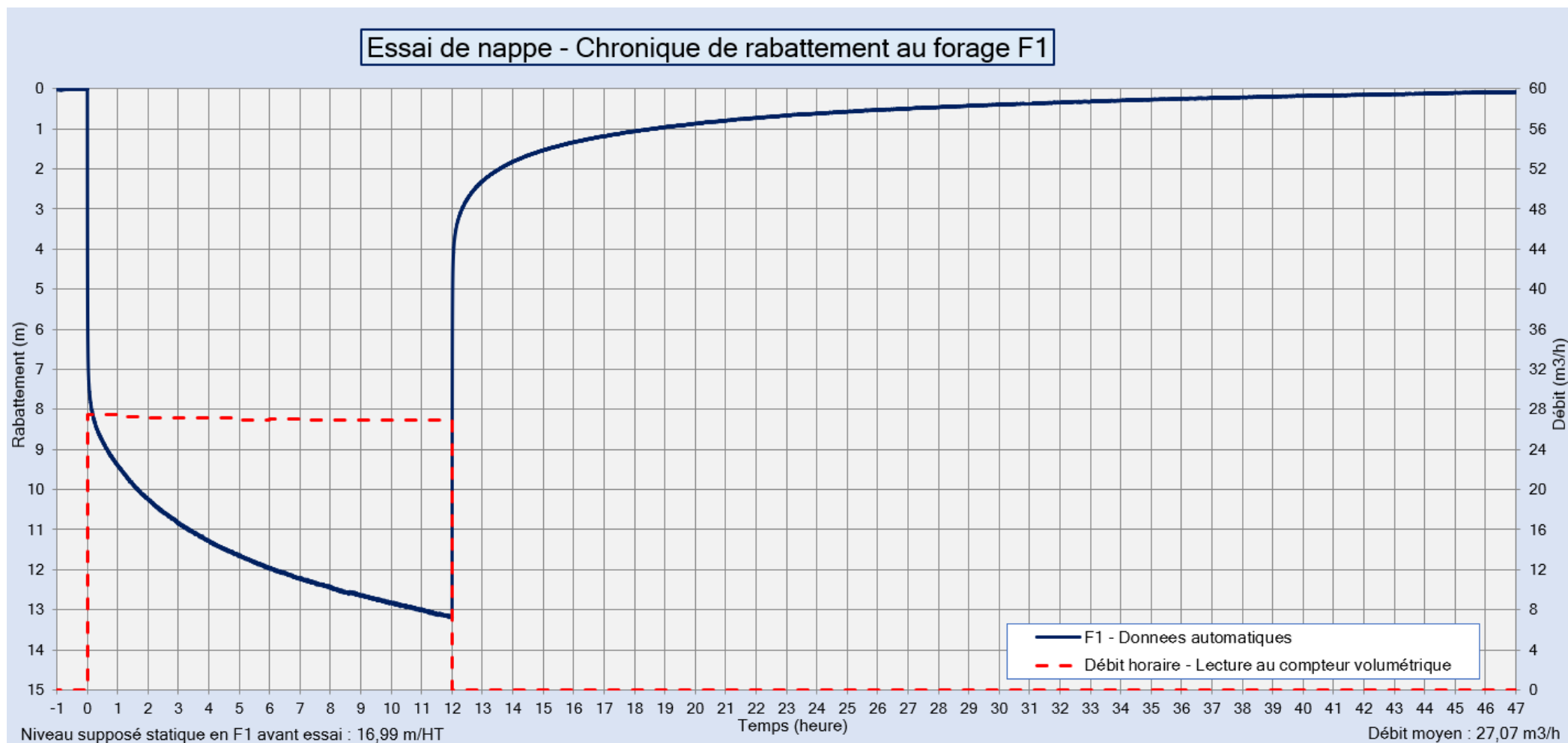


Figure 10 : Chronique de rabattement en F1 lors de l'essai de nappe - Graphique arithmétique

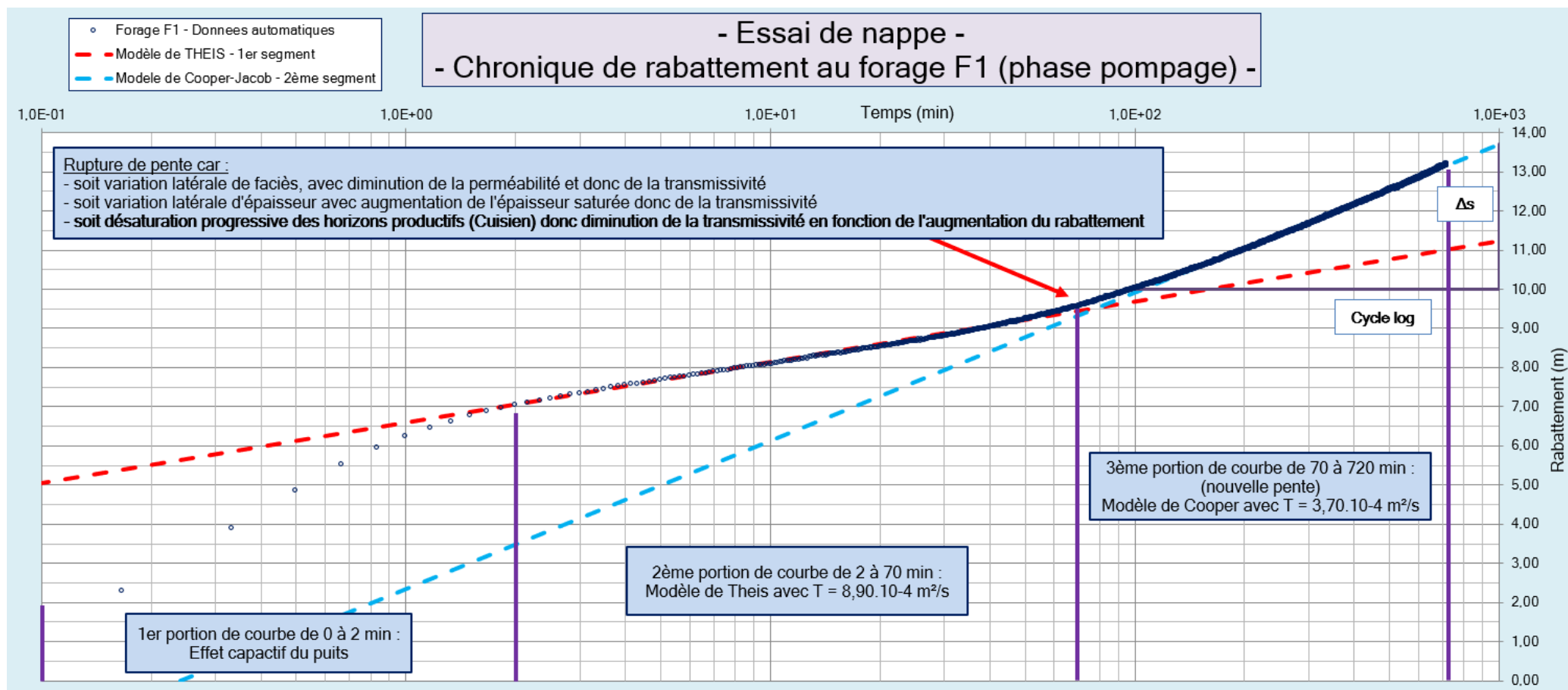
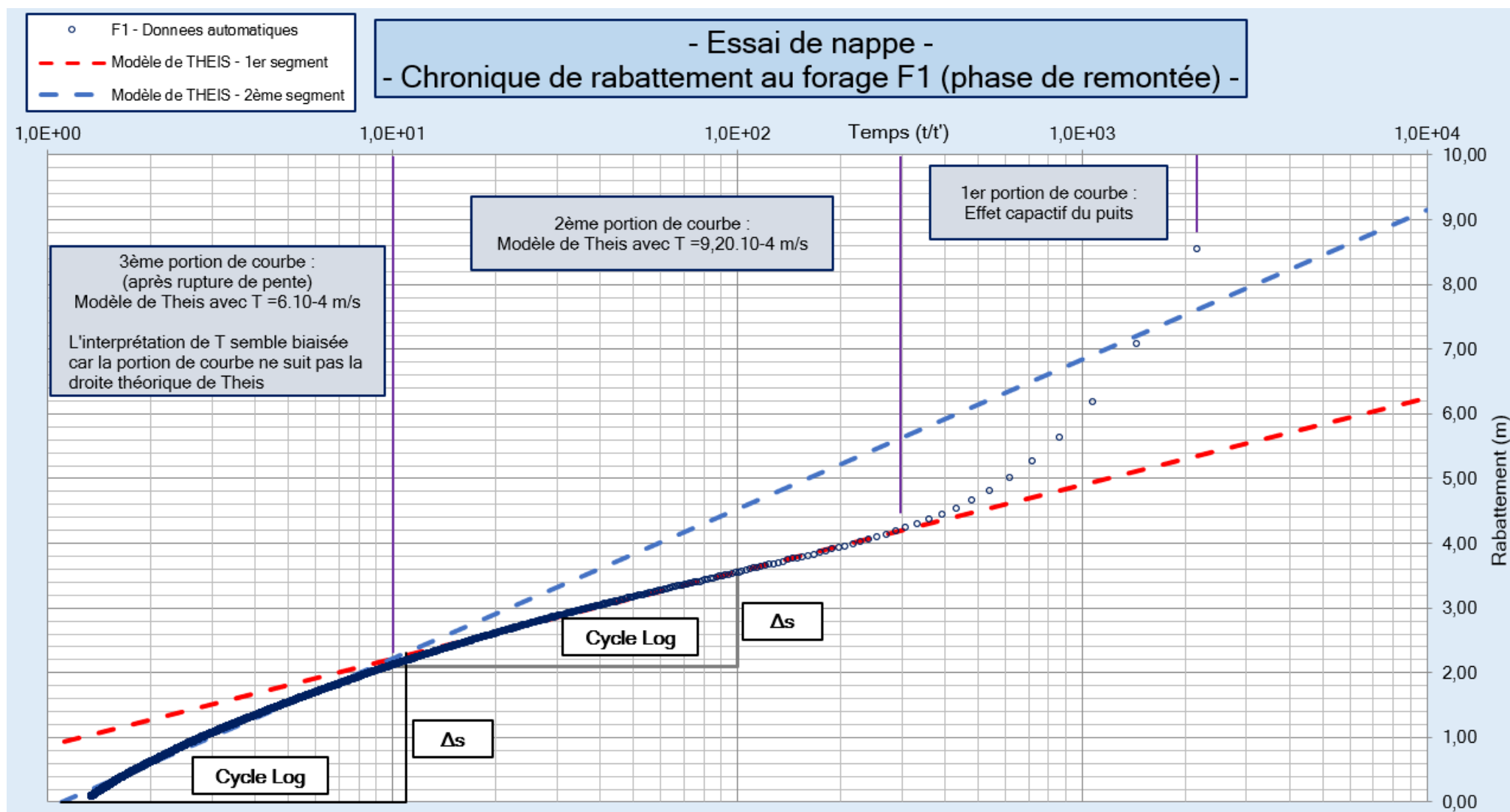


Figure 11 : Chronique de rabattement au forage F1 - Phase de pompage - Graphique semi-log

Figure 12 : Chronique de remontée au forage F1 - $s = f(t/t')$ - Graphique semi-log

5.5.2 Commentaires sur les données de l'essai de nappe

Les données sur graphique arithmétique permettent d'observer :

- à 27 m³/h, le rabattement dans le forage n'avait toujours pas stabilisé après 12 heures de pompage, avec un rabattement de 12,00 m observée à 6 h de pompage, puis de 13,20 m à 12 h de pompage,
- compte tenu de ces forts rabattements non stabilisés après plus de 12 h de pompage. Il peut en être conclu que le débit d'exploitation devra être bien en-deçà de 27 m³/h.
- la recharge de la nappe est relativement lente, avec un niveau observé en début d'essai de 17 m/HT non retrouvé après plus de 35 h de remontée,

Les données sur graphique en semi-log pour la phase de pompage permettent d'observer :

- de 0 à 2 min de pompage, une 1^{ère} portion de courbe avec un fort rabattement d'environ 0 à 7 m, traduisant l'effet capacitif de puits, c'est-à-dire la vidange de l'eau contenue dans le forage avant apport d'eau par le réservoir souterrain,
- de 0 à 70 min, une 2^{ème} portion de courbe se calant relativement bien au modèle théorique de Theis, traduisant la réelle transmissivité du milieu au voisinage du forage,
- de 70 à 720 m et à partir de 9 à 10 m de rabattement, une 3^{ème} portion de courbe à pente plus forte, traduisant l'apparition d'une transmissivité plus faible, expliquée :
 - soit par l'apparition d'une variation latérale de faciès, c'est-à-dire l'apparition de matériaux moins perméables en s'éloignant du forage de captage,
 - soit une baisse progressive de la transmissivité en raison de la désaturation des horizons productifs en tête d'aquifère saturée par une nappe libre,
- compte tenu de l'absence d'une rupture de pente franche, la deuxième hypothèse sera privilégiée. Cette observation est relativement importante car elle conditionne la productivité finale du forage, à savoir ne pas dépasser un rabattement maximum d'environ 9 à 10 m afin de garder la productivité du réservoir captée.

A noter qu'en comparant ces rabattements à ne pas dépasser et la coupe géologique du forage, pour un niveau statique supposé à 17 m/ HT et un rabattement d'environ 9 à 10 m, ce rabattement correspond vraisemblablement à la désaturation totale de l'horizon sableux des Sables de Cuise compris entre 16 et 26 m/sol.

Les données sur le graphique en semi-log pour la phase de remontée permettent d'observer :

- les mêmes portions de courbe qu'observées qu'en phase pompage,
- néanmoins, la dernière portion de courbe (comprise entre 1 et 10 t/t') ne présente pas une droite franche permettant de renforcer l'hypothèse d'une diminution de la transmissivité avec l'augmentation du rabattement au droit du forage.

De par ces données, il peut en être conclu que le rabattement maximal admissible au droit du forage devra être d'environ 9 à 10 m, soit environ 26,00 m/HT.

Le débit d'exploitation ne devra pas excéder les 20 à 21 m³/h comprenant une période de mise en repos de la nappe au minimum égale à celle de pompage afin de permettre une certaine recharge de nappe au droit du captage (cf. chapitre 7 - Validation du débit d'exploitation).

5.5.3 Paramètres hydrodynamiques du réservoir

5.5.3.1 Solutions analytiques retenues pour l'interprétation de l'essai

Compte tenu des courbes d'essai, il a été retenu la solution de Theis pour l'interprétation des deuxièmes portions de courbe et la solution de Cooper Jacob pour les dernières portions.

Interprétation en régime transitoire - Phase pompage - Solution de Theis

$$s = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u)$$

s = le rabattement mesuré dans un piézomètre à une distance r d'un puits (m),

Q = le débit de pompage (m³/d),

T = la transmissivité de l'aquifère (m²/d),

u = et donc S = ,

t = le temps depuis le début du pompage (d),

S = l'emmagasinement de l'aquifère (-),

W(u) = (Fonction de Theis).

Interprétation en régime transitoire - Phase remontée - Solution de Theis

$$s = \frac{2,30 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \log\left(\frac{t}{t'}\right)$$

Q = débit de pompage (m³/h)

s = rabattement (m)

t = temps de pompage (h)

t' = temps depuis l'arrêt du pompage (h)

T = transmissivité (m²/h)

Interprétation en régime transitoire - Phase pompage - Solution de Cooper-Jacob

$$s = \frac{2,30 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \log \frac{2,25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot S}$$

s = le rabattement mesuré dans un piézomètre à une distance r d'un puits

r = la distance entre le puits de pompage et un piézomètre

Q = le débit de pompage

T = la transmissivité de l'aquifère

t = le temps depuis le début du pompage

S = l'emmagasinement de l'aquifère

5.5.3.2 Résultats des interprétations

Les graphiques d'interprétation sont présentés en page 22 et 23 de ce document. Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'interprétation de l'essai de nappe.

Ouvrage	Phase pompage Transmissivité (m ² /s)		Phase remontée Transmissivité (m ² /s)	
	1 ^{ère} interprétation de 2 à 70 min	2 ^{ème} interprétation 70 à 720 min	1 ^{ère} interprétation de 2 à 70 min	2 ^{ème} interprétation 70 à 720 min
F1	8,90.10 ⁻⁴	3,70.10 ⁻⁴	9,20.10 ⁻⁴	6,00.10 ⁻⁴

Tableau 13 : Résultats des interprétations en régime transitoire

Il est possible d'observer que les résultats obtenus sur la 2^{ème} interprétation ne sont pas cohérents entre la phase de pompage et celle de remontée.

Cette différence s'explique par la diminution de la transmissivité vraie du réservoir en fonction de l'augmentation du rabattement dans le forage.

Par conséquent, la transmissivité du réservoir Yprésien / Sparnacien au droit du captage sera retenue à $T = 9.10^{-4}$ m²/s.