

**Convention Région wallonne et HGE-ULg**  
**Caractérisation complémentaire des masses d'eau dont le bon état dépend**  
**d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines**

*D3.2 Rapport technique relatif à la réalisation (mode opératoire et premiers résultats) des essais de traçage dans le continuum sol – zone non saturée – eau souterraine - rivière*

**Coordinateur du projet :**

Dr. ir. Serge Brouyère (HGE-ULg)

**Partenaires scientifiques :**

Ulg-HGE : Dr. ir. Philippe Orban, Pierre Briers

GxABT-ULg-AEESP : Prof. Aurore Degré, Dr. Catherine Sohier

UN-LEED : Prof. Jean-Pierre Descy, Bruno Leporcq

UN-GEOL : Prof. Vincent Hallet, Flore Schmit, Gaëtan Rochez

Rédaction : Pierre Briers, Philippe Orban, Serge Brouyère

## Table des matières

1. Résumé.....	3
2. Objectifs et mise en place du site expérimental.....	4
3. Description du site .....	5
4. Essais hydrodynamiques .....	9
a. Zone saturée .....	9
b. Zone non saturée .....	10
Description théorique des essais .....	10
Résultats et interprétations .....	11
Synthèse des essais d’infiltration de la zone non saturée .....	13
5. Essais de traçage .....	14
a. Zone saturée .....	14
Finite Volume Point Dilution Method (FVPDM) .....	14
Naphtionate – Pompage à 7.5m <sup>3</sup> /h .....	17
Naphtionate – Pompage à 30m <sup>3</sup> /h .....	18
Naphtionate / Eosine – Injection continue et débit variable.....	19
Synthèse des essais de traçage en zone saturée .....	20
b. Zone non saturée .....	21
Piézomètre P4 .....	21
Piézomètre P3 .....	24
6. Conclusions .....	25
7. Bibliographie .....	26
Annexes.....	27

## 1. Résumé

Pour pouvoir mieux paramétrer des outils d'évaluation et de prédiction des tendances en matière de qualité et de quantité des eaux souterraines, il est nécessaire de disposer de connaissances plus approfondies sur les mécanismes et les temps de transfert et de résidence des polluants entre la surface du sol où ils sont épandus jusqu'à la nappe d'eau souterraine (lessivage vers l'eau souterraine) et en son sein (dispersion et mélange). Pour cela, un site expérimental a été mis en place dans le bassin du Triffoiy à Hodoumont, avec deux forages crépinés dans la nappe d'eau souterraine (P1 : puis de restitution et P2 : puits d'injection) et deux forages dans la zone non saturée (P3 : crépiné à 3m et P4 : crépiné à 5m). Différents essais (infiltration, pompage et traçage) ont été réalisés tant au niveau de la zone saturée que de la zone non saturée.

### *Zone saturée*

Un essai de pompage par paliers a été réalisé sur le P1. Une interprétation sur base de la méthode de Birsoy-Summers a été appliquée et les valeurs de transmissivités ainsi calculées sont comprises entre 1.3 et  $2.6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Ces valeurs sont corroborées avec celle de conductivité hydraulique calculée sur base des courbes caractéristiques du puits et des débits spécifiques ( $1.2 \times 10^{-4}$  m/s).

Les essais de traçage réalisés dans la zone saturée ont mis en évidence la connexion entre le P2 (puits d'injection) et le P1 (puits de restitution). Les vitesses d'écoulement maximales sous condition de pompage varient entre 5 et 11m/h. Cependant, aucune diminution du temps de transfert n'a été mise en évidence lors d'un pompage plus important au puits de restitution, cette augmentation de débit induit même une plus grande dilution du traceur.

### *Zone non saturée*

Les tests d'infiltration ont mis en évidence une différence de comportement entre les deux piézomètres crépinés dans la zone non saturée. Plusieurs jours sont nécessaires pour l'infiltration de l'eau dans le P3 alors qu'il ne faut que quelques minutes pour le P4. Cette différence de comportement se reflète au niveau des conductivités hydrauliques calculées ( $1$  à  $9 \times 10^{-7}$  m/s pour le P3 –  $3$  à  $8 \times 10^{-5}$  m/s pour le P4).

Cette différence de comportement se reflète également au niveau des courbes de restitution des essais de traçage. Les différents essais réalisés sur le P4 présentent de temps de transit très courts (première arrivée : 1h30 et temps modal : 3h30) alors qu'aucune restitution n'a été enregistrée plusieurs semaines après l'injection réalisée au P4. Le mécanisme qui domine le transfert vertical est la gravité. Il en ressort également que les temps de transfert sont globalement courts, ne fût-ce qu'en comparaison à d'autres contextes géologiques.

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le comportement de l'eau et des solutés vers et dans la nappe. Les temps de transfert dans la zone non-saturée et dans la zone saturée ont été évalués et les données montrent que la dynamique des échanges est importante aux interfaces sol – zone non saturée – nappe.

## 2. Objectifs et mise en place du site expérimental

Pour pouvoir mieux paramétrer des outils d'évaluation et de prédiction des tendances en matière de quantité et de qualité des eaux souterraines, il est nécessaire de disposer de connaissances plus approfondies sur les mécanismes et les temps de transfert et de résidence des polluants entre la surface du sol où ils sont épandus jusqu'à la nappe d'eau souterraine (lessivage vers l'eau souterraine) et en son sein (dispersion et mélange). Pour cela, un site expérimental a été mis en place dans le bassin du Triffoiy à Hodoumont (Figure 1), avec des forages crépinés tant dans la nappe d'eau souterraine que dans la zone non saturée. L'objectif est d'améliorer les connaissances sur le transfert des polluants entre la surface du sol et les eaux souterraines dans les formations calcaires du Carbonifère et ce via des tests d'infiltration et des essais de traçage.

Un contexte particulier était recherché afin de tester l'écoulement de la nappe dans les formations calcaires, de faciliter la récupération des traceurs et d'être représentatif du contexte agricole :

- Calcaire fracturé et superficiel ;
- Epaisseur de la zone non saturée inférieure à 10m ;
- Culture/prairie.

En plus de ces critères géologiques/agricoles, d'autres impératifs pratiques étaient nécessaires :

- Facilité d'évacuation de l'eau pompée ;
- Raccordement électrique sur le réseau de distribution ;
- Sécurisation du site.

Sur base de ces critères, différents sites ont été envisagés. Des prospections géophysiques (Délivrable D2.2 : *Rapport technique décrivant les résultats de la prospection géophysique ainsi que les emplacements de forages*) ont été menées afin de caractériser le sous-sol et de définir le site adéquat. Le premier choix s'est porté sur un site situé à Hodoumont en bordure d'un champ qui remplissait l'ensemble des critères mentionnés.

Une poche de sable a été rencontrée lors du forage du site expérimental (Délivrable D2.3 : *Rapport technique relatif au forage des piézomètres et micropiezomètres*) et l'implantation du site à cet endroit a été abandonnée.

Un nouveau site a été défini 200m au sud-ouest sur base d'affleurements calcaires présents dans la prairie. De nouvelles prospections géophysiques (tomographie de résistivité électrique et potentiel spontané) ont été menées afin de définir les zones altérées et saines des calcaires ainsi que les zones d'écoulement préférentiel. Des essais de pénétration (CPT : *Cone Penetration Test*) ont également été réalisés afin de s'assurer de la présence et de la profondeur des calcaires (Figure 2). Les ouvrages ont été implantés au droit de la zone altérée, le plus haut possible afin de s'assurer d'une zone non saturée suffisamment épaisse pour réaliser des essais de traçage les plus représentatifs possibles des conditions d'infiltration et de recharge dans les calcaires.

### 3. Description du site

Les ouvrages suivent un axe global ouest-est dans une direction intermédiaire entre celles allant vers le Hoyoux (exutoire du bassin) et vers le Triffoy à proximité du site. Cette orientation a été choisie afin que le puits de récupération (P1) soit autant que possible à l'aval hydrogéologique des autres ouvrages (Figure 1 et Figure 2).

Quatre ouvrages ont été forés au total sur le site (Figure 3 et Figure 4) :

- P1 : puits foré (diamètre : 6 pouces) sous le niveau de la nappe qui sert de puits de récupération des traceurs ;
- P2 : puits foré (diamètre : 2x2 pouces) sous le niveau de la nappe et crépiné à deux profondeurs (double tubage avec crépines entre 8 et 18m et entre 30 et 45m par rapport à la surface du sol) ;
- P3 : puits foré (diamètre : 3 pouces) et crépiné dans la zone non saturée (3m de profondeur par rapport à la surface du sol), dans un banc de calcaire massif ;
- P4 : puits foré (diamètre : 3 pouces) et crépiné dans la zone non saturée (5,5m de profondeur par rapport à la surface du sol), dans du calcaire altéré.

Une description lithologique détaillée des ouvrages est fournie dans le livrable D2.3 : *Rapport technique relatif au forage des piézomètres et micropiézo-mètres* (les logs sont repris en annexe à la Figure 20).

La profondeur de la nappe après les forages était d'environ 7.2m par rapport au sol.

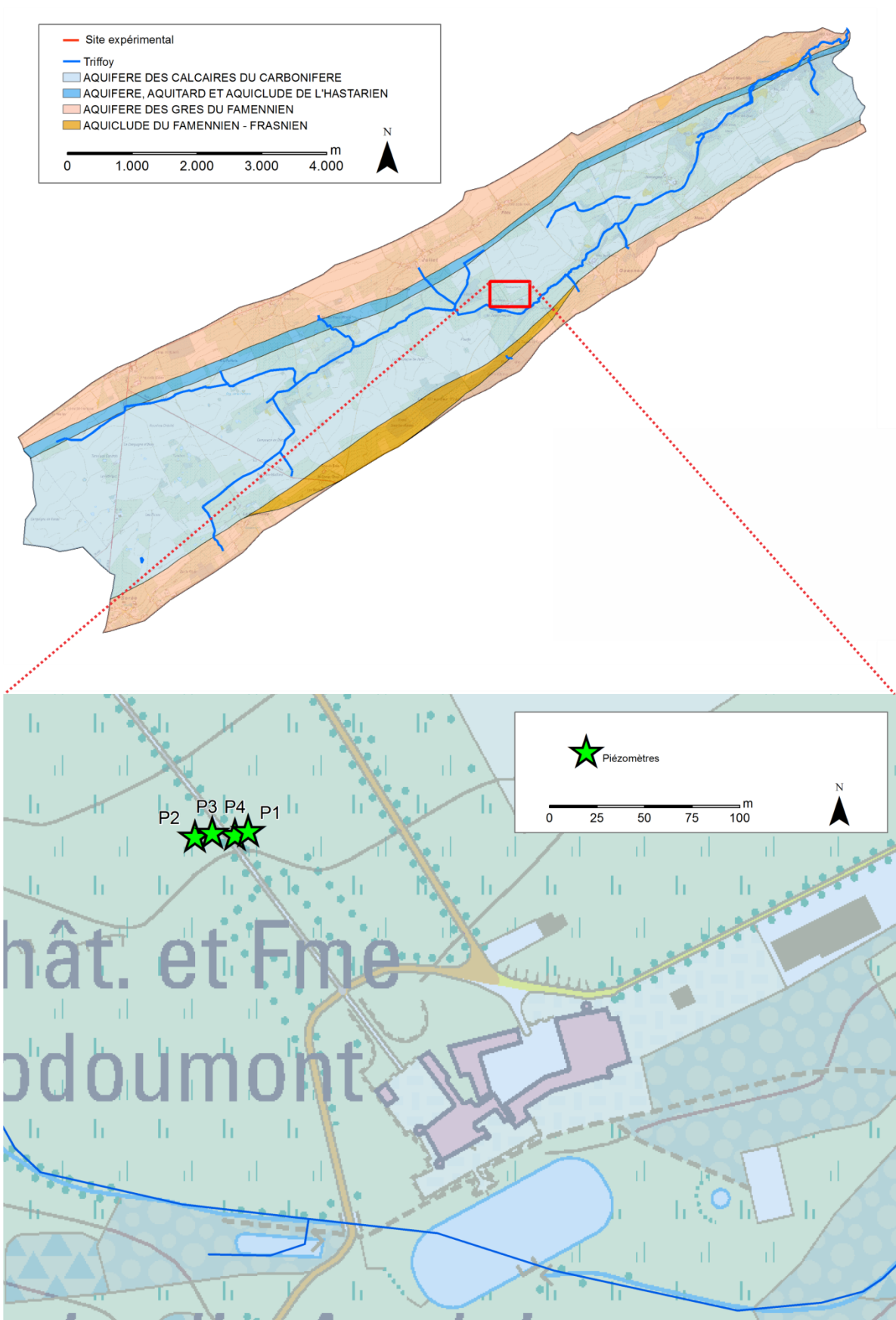


Figure 1 : Plan de situation et orientation du site expérimental

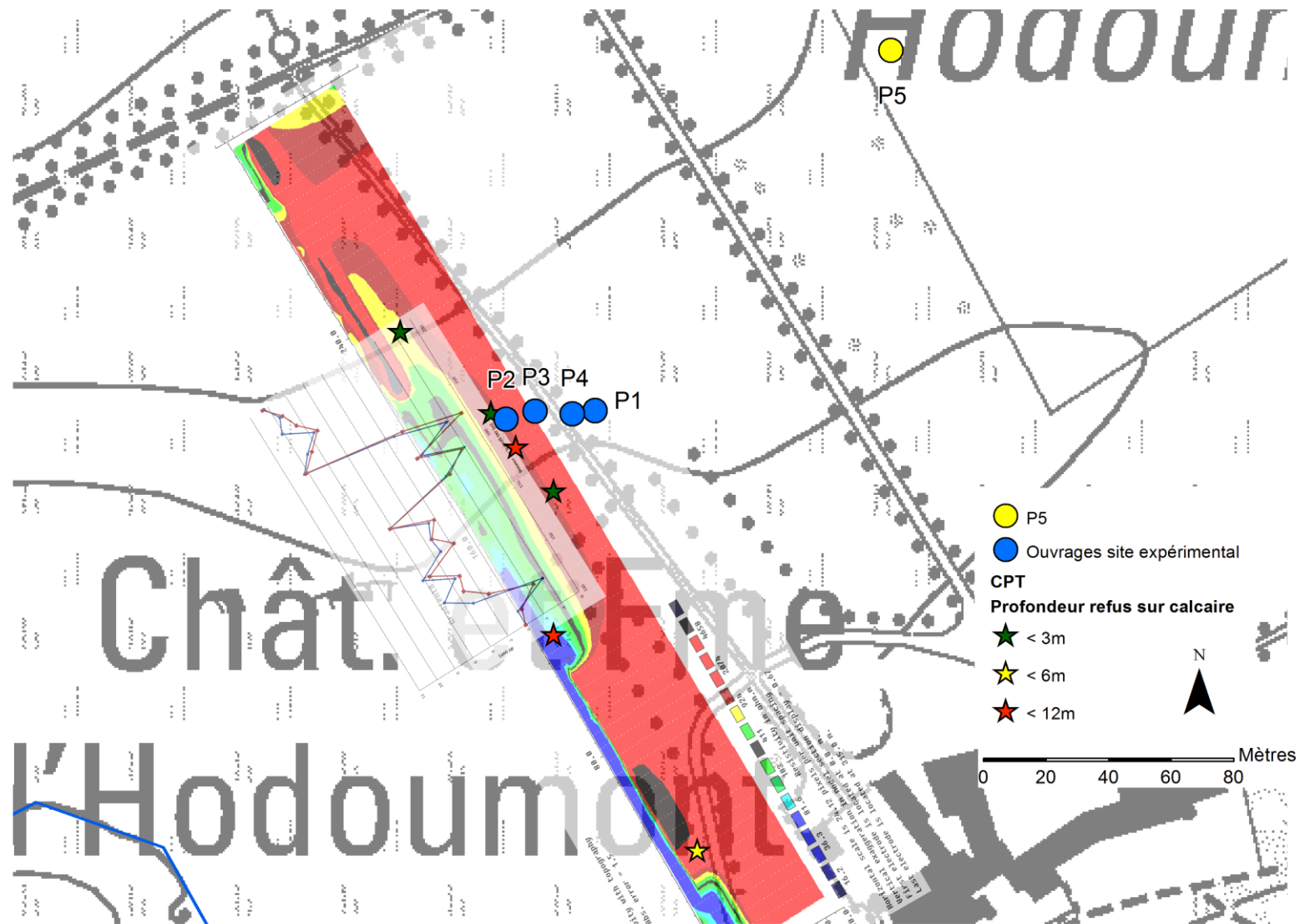


Figure 2 : Site expérimental et essais géophysiques (résistivité électrique et potentiel spontané) et géotechniques (CPT)



Figure 3 : Disposition du site expérimental

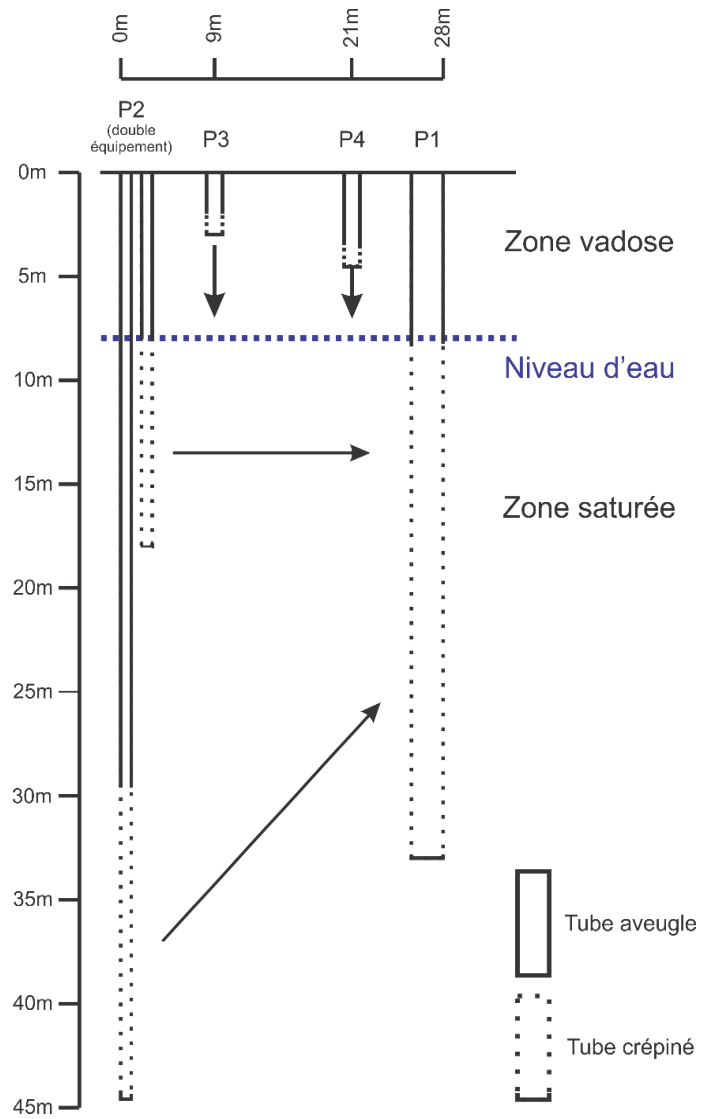


Figure 4 : Coupe schématique du site expérimental



## 4. Essais hydrodynamiques

Différents essais ont été réalisés tant dans la zone saturée que dans la zone non saturée afin de caractériser les propriétés hydrodynamiques du milieu.

### a. Zone saturée

Un essai de pompage par paliers a été réalisé sur le piézomètre P1 après la réalisation du forage (Figure 5). L'essai a consisté en un pompage à 3 débits enchaînés (5, 10 et 17 m<sup>3</sup>/h) de 140 minutes chacun. Le rabattement ainsi que la remontée de la nappe durant l'essai ont été suivis au niveau du puits de pompage ainsi qu'au piézomètre P2 (parties supérieure et profonde). Le rabattement induit par le pompage est plus important dans la partie supérieure du P2 que dans sa partie profonde. L'interprétation des données a été réalisée sur base de la méthode de Birsoy-Summers (1980) en effectuant une correction sur le rabattement mesuré afin d'être applicable en nappe libre (les graphes associés aux interprétations de l'essai sont présentés en annexe). Les transmissivités ainsi calculées varient entre  $1.3 \times 10^{-3}$  et  $2.6 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Ces valeurs sont corroborées par celle de conductivité hydraulique calculée sur base des courbes caractéristiques du puits et des débits spécifiques :  $K = 1.2 \times 10^{-4}$  m/s ( $T = 3.4 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s sur base de 30m d'épaisseur d'aquifère équivalent aux 30m d'épaisseur de la zone crépinée).

Aucun essai de pompage n'a été réalisé en pompant au P2, le diamètre des tubages ne permettant pas de mettre en place une pompe assez puissante (le piézomètre P2 n'a d'autre vocation que d'être un point d'observation piézométrique et hydrochimique ainsi que d'injection de traceurs).

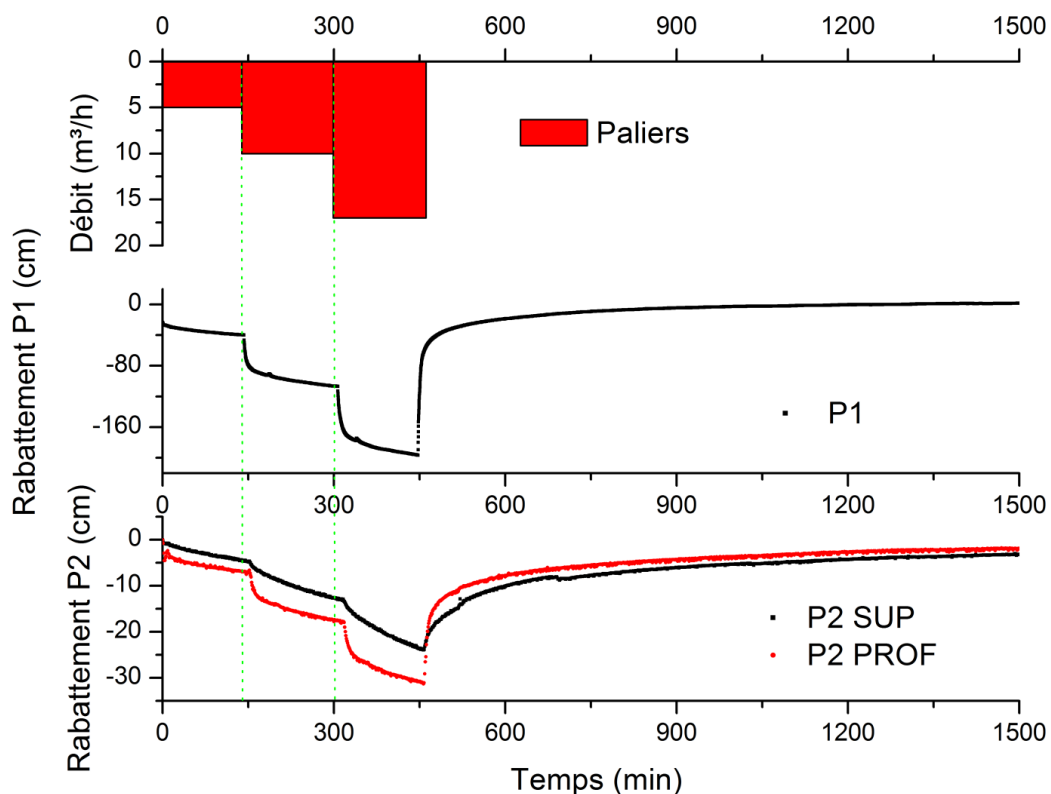


Figure 5 : Rabattement mesurés dans les piézomètres lors de l'essai de pompage par paliers

## b. Zone non saturée

Des essais d'infiltration d'eau ont été réalisés sur les 2 piézomètres de la zone non saturée (P3 et P4). Une interprétation de type « Lefranc » a été réalisée afin d'évaluer la conductivité hydraulique du milieu. Ces essais s'appliquent de manière générale en milieu saturé mais restent d'application en milieu non saturé si on fait l'hypothèse d'une saturation momentanée autour de l'ouvrage.

Deux types d'essais ont été effectués sur les piézomètres (Figure 6) :

- Essai à charge constante ;
- Essai à charge variable.

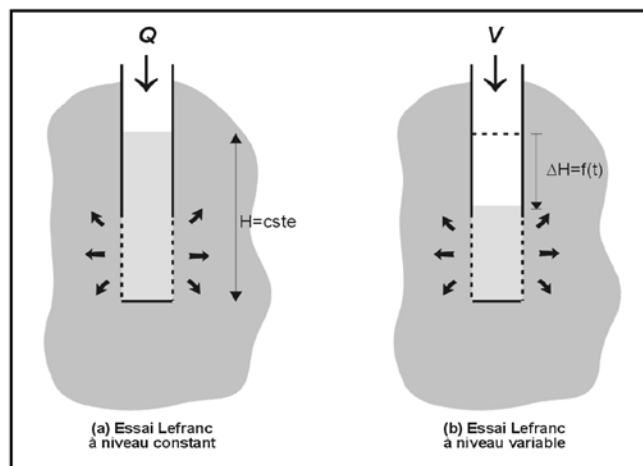


Figure 6 : Types d'essais Lefranc (Brouyère 2001)

### Description théorique des essais

#### Essai à charge constante

L'essai à charge constante consiste à injecter de l'eau à débit constant jusqu'à stabilisation du niveau. Le niveau d'eau est ainsi mesuré après stabilisation et permet de calculer la conductivité hydraulique sur base de la relation :

$$Q = K \times Cp \times H \quad [1]$$

Avec :

- Q : débit d'injection ( $m^3/s$ )
- K : conductivité hydraulique du milieu, supposé saturé à proximité directe de l'ouvrage (m/s)
- Cp : coefficient de Poche (m)
- H : niveau d'eau stabilisé mesuré par rapport à la base des crépines (m)

Le coefficient de Poche est un coefficient caractéristique de la géométrie de l'ouvrage. Dans le cadre d'un piézomètre, il s'agit d'un cylindre allongé dont la longueur est supérieure au diamètre (formule valide tant que  $L > 2d$ ). Le coefficient de Poche est calculé comme suit :

$$Cp = \frac{2 \pi L}{2.3026 \log \frac{L}{0.67957d}} \quad [2]$$

Avec :

- L : hauteur de la crépine (m)
- d : diamètre du puits (m)

### Essai à charge variable

L'essai à charge variable consiste à prélever ou injecter un volume donné dans le piézomètre et de suivre la variation du niveau d'eau en fonction du temps. Ce type d'essai permet de calculer la conductivité hydraulique sur base de la relation :

$$Q = K \times Cp \times H = -S \frac{dH}{dt} \quad [3]$$

Avec :

- Q : débit d'injection (m<sup>3</sup>/s)
- K : conductivité hydraulique du milieu, supposé saturé à proximité directe de l'ouvrage (m/s)
- Cp : coefficient de Poche (m)
- H : niveau d'eau stabilisé mesuré par rapport à la base des crépines (m)

La conductivité hydraulique calculée est fonction des caractéristiques géométriques de l'ouvrage de la pente  $\alpha$  du graphique dH/dt en fonction de H :

$$K = \frac{S \tan(\alpha)}{Cp} \quad [4]$$

L'interprétation de ces essais se base uniquement sur les mesures pour lesquelles la zone crépinée reste entièrement saturée.

## Résultats et interprétations

### Piézomètre P3

Un essai à charge constante a été réalisé sur le piézomètre P3 (Figure 7). Cependant, vu la faible infiltration de l'eau, aucune stabilisation du niveau d'eau n'a été atteinte. L'essai à charge constante s'est donc transformé en un essai à charge variable.

Le piézomètre a donc été entièrement rempli et la baisse du niveau d'eau a été enregistrée. L'infiltration de l'eau prend plusieurs jours (Figure 7).

Différentes conductivités hydrauliques ont été calculées en fonction du niveau de l'eau. Les conductivités estimées au droit du P3 varient entre de 1 et  $9 \times 10^{-7}$  m/s.

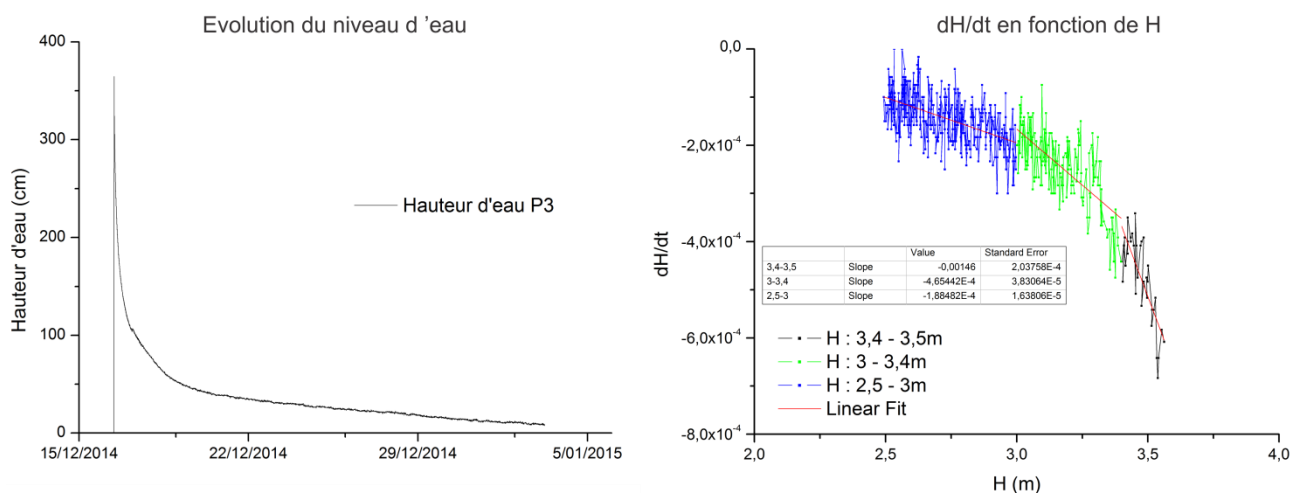


Figure 7 : Essai à charge variable sur le P3

### Piézomètre P4

Deux essais à charge constante ont été réalisés sur le piézomètre P4 (Figure 8). Le premier essai a consisté en l'enchaînement de deux injections successives à débit constant (1 et 2.5L/min) sur l'ouvrage. Le deuxième essai était une injection à un seul débit constant, plus important (9L/min).

La valeur de conductivité hydraulique calculée varie entre  $3 \times 10^{-5}$  m/s et  $5 \times 10^{-5}$  m/s pour les essais à respectivement 1-2.5L/min et 9L/min

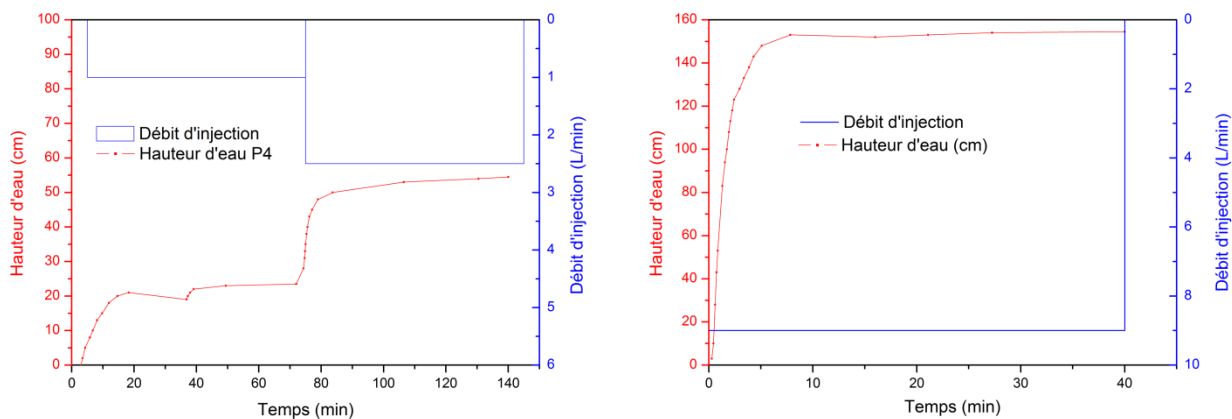
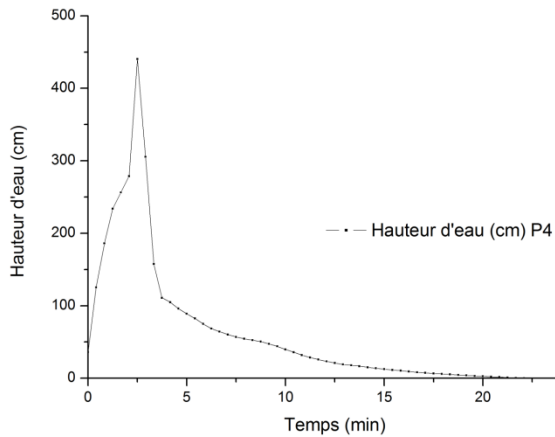


Figure 8 : Essais à charge constante sur le P4

Un essai à charge variable a été réalisé sur le P4 après les essais à charge constante (Figure 9). La valeur de conductivité hydraulique estimée est de  $8 \times 10^{-5}$  m/s. La vidange de l'ouvrage est très rapide, de l'ordre d'une dizaine de minutes. Les crépines sont donc très vite désaturées et peu de points sont disponibles pour calculer la conductivité hydraulique (afin de respecter l'hypothèse de saturation de la zone crépinée). Malgré un débit d'injection à  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ , il n'a pas été possible de remplir complètement le P4.

Evolution du niveau d'eau



Courbe dH/dt en fonction de H

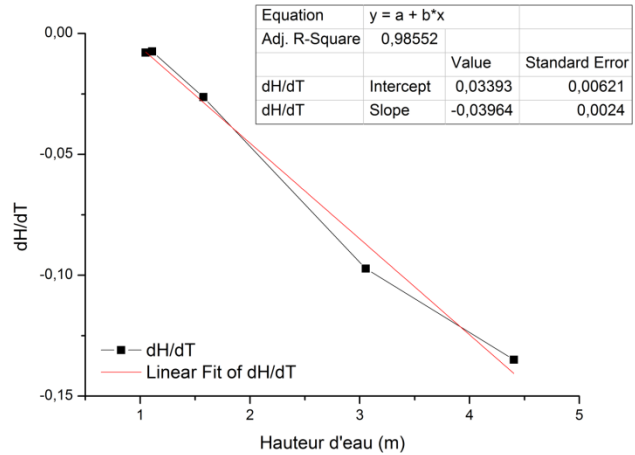


Figure 9 : Essai à charge variable sur le P4

### Synthèse des essais d'infiltration de la zone non saturée

Lors des essais d'infiltration, une différence de comportement a été mise en évidence entre les deux piézomètres crépinés dans la zone non saturée. Plusieurs jours sont nécessaires pour que l'eau dans l'ouvrage P3 s'infilte tandis que quelques minutes seulement sont nécessaires pour le P4 (Figure 10). Cette différence de comportement est expliquée par la lithologie dans laquelle les ouvrages sont crépinés. Le P3 est ainsi crépiné dans un banc de calcaire massif à 3m de profondeur tandis que le P4 est crépiné dans un calcaire altéré en dessous de ce calcaire massif (5m de profondeur).

Cette différence se reflète dans les valeurs de conductivité hydraulique calculées grâce aux essais d'infiltration (Tableau 1). L'ouvrage P3 présente des valeurs de conductivité hydraulique de 2 ordres de grandeur inférieures à celles observées au P4.

Tableau 1 : Comparaison des valeurs de conductivité hydraulique du P3 et du P4

K (m/s)	P3	P4
Charge constante	/	$3 \text{ à } 5 \times 10^{-5}$
Charge variable	$1 \text{ à } 9 \times 10^{-7}$	$8 \times 10^{-5}$

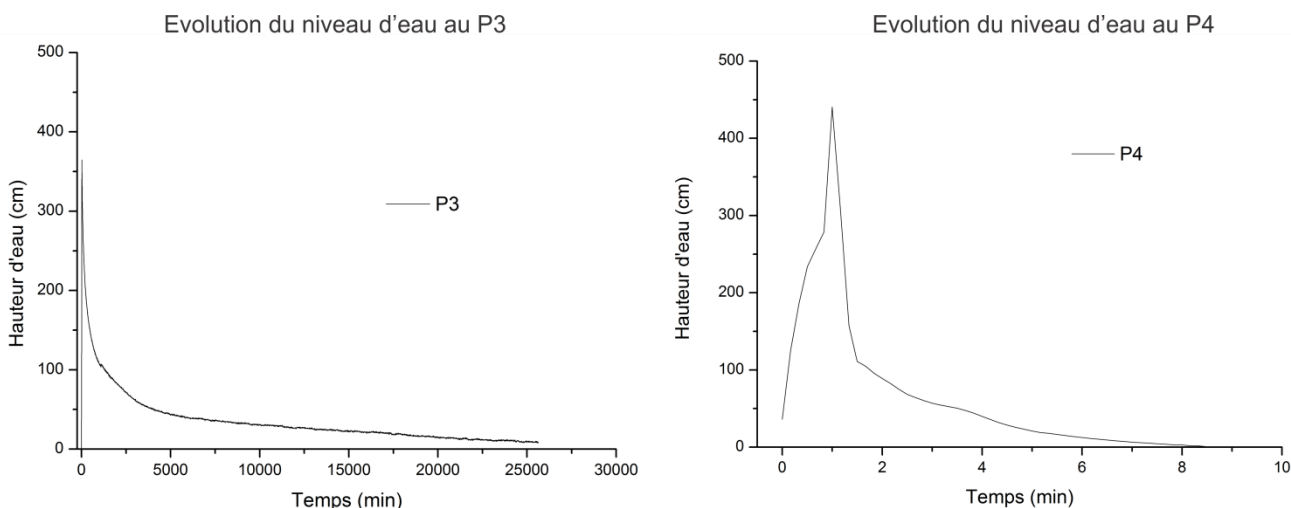


Figure 10 : Comparaison de l'évolution des hauteurs d'eau dans le P3 et le P4

## 5. Essais de traçage

### a. Zone saturée

Plusieurs essais de traçage ont été réalisés dans la zone saturée du site expérimental (synthétisés dans le Tableau 2).

Tableau 2 : Synthèse des essais de traçage réalisés dans la zone saturée à Hodoumont

Essai	Type d'injection	Pz injection	Pompage P1 (m <sup>3</sup> /h)	Distance (m)	Quantité injectée (g)	1ère arrivée (h) / Vitesse (m/h)	Temps modal (h) / Vitesse modale (m/h)	% restitué
Naphtionate	Brève	P2 Sup	7.5	29	30	2,5 / 11	5 / 6	6
Naphtionate	Brève	P2 Sup	30	29	60	/	/	/
Naphtionate + Eosine	Continue	P2 Sup	Variable (7.4–4.3)	29	NAP : 4530	7,5 / 3,8	/	3 NAP
					EOS : 2700	6,5 / 4,5	/	50 EOS

### Finite Volume Point Dilution Method (FVPDM)

L'essai 'FVPDM' est une méthode de quantification des flux d'eau souterraine par essai de traçage (Figure 11) et développée par Brouyère *et al.* (2008). L'essai consiste en une injection continue de traceur dans un puits, à débit contrôlé, avec un système de recirculation afin d'homogénéiser les concentrations en traceur sur toute la colonne d'eau. La concentration en traceur dans le puits est suivie au cours du temps. Trois phases sont distinguées :

- Phase transitoire : augmentation des concentrations en traceur, dépendant du volume d'eau dans l'ouvrage, du débit d'injection et du débit de transit ;

- Phase stationnaire : équilibre entre injection et lessivage du traceur, dépendant du débit d'injection et du débit de transit ;
- Phase de décroissance : fin d'injection et suivi de la diminution des concentrations, dépendant du volume d'eau dans l'ouvrage et du débit de transit.

Ce débit de transit est ajusté par une solution analytique.

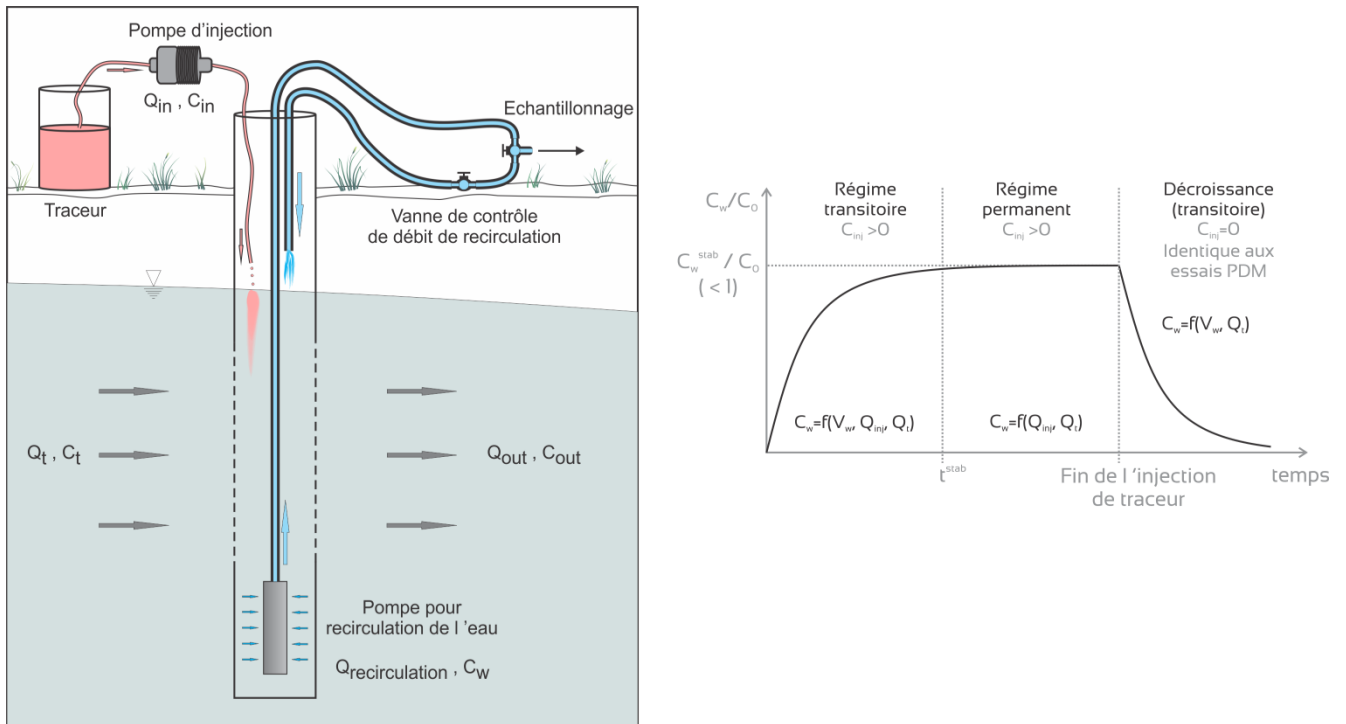


Figure 11 : Schéma expérimental et résultat théorique d'un essai FVPDM (Brouyère *et al.* 2008, modifié)

Lors de chaque essai de traçage, l'évolution des concentrations en traceur a été suivie afin de discuter des résultats également en fonction des données au piézomètre d'injection (Figure 12). Les débits de transit au P2 Supérieur ont ainsi pu être calculés sur base de cette fonction d'entrée de traceur dans la nappe et de la théorie de l'essai FVPDM. Ils ont été calculés pour les différents débits de pompage au P1 et varient entre  $2 \times 10^{-5}$  et  $9 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s (Tableau 3). Une augmentation des débits de transit au piézomètre d'injection en relation directe avec le débit de pompage était attendue, cependant, aucune influence de ce débit de pompage n'a été mise en évidence (Figure 13). Ces résultats tendent à prouver qu'un débit de pompage plus important attire de l'eau en provenance d'une zone d'alimentation différente de l'axe P2-P1.

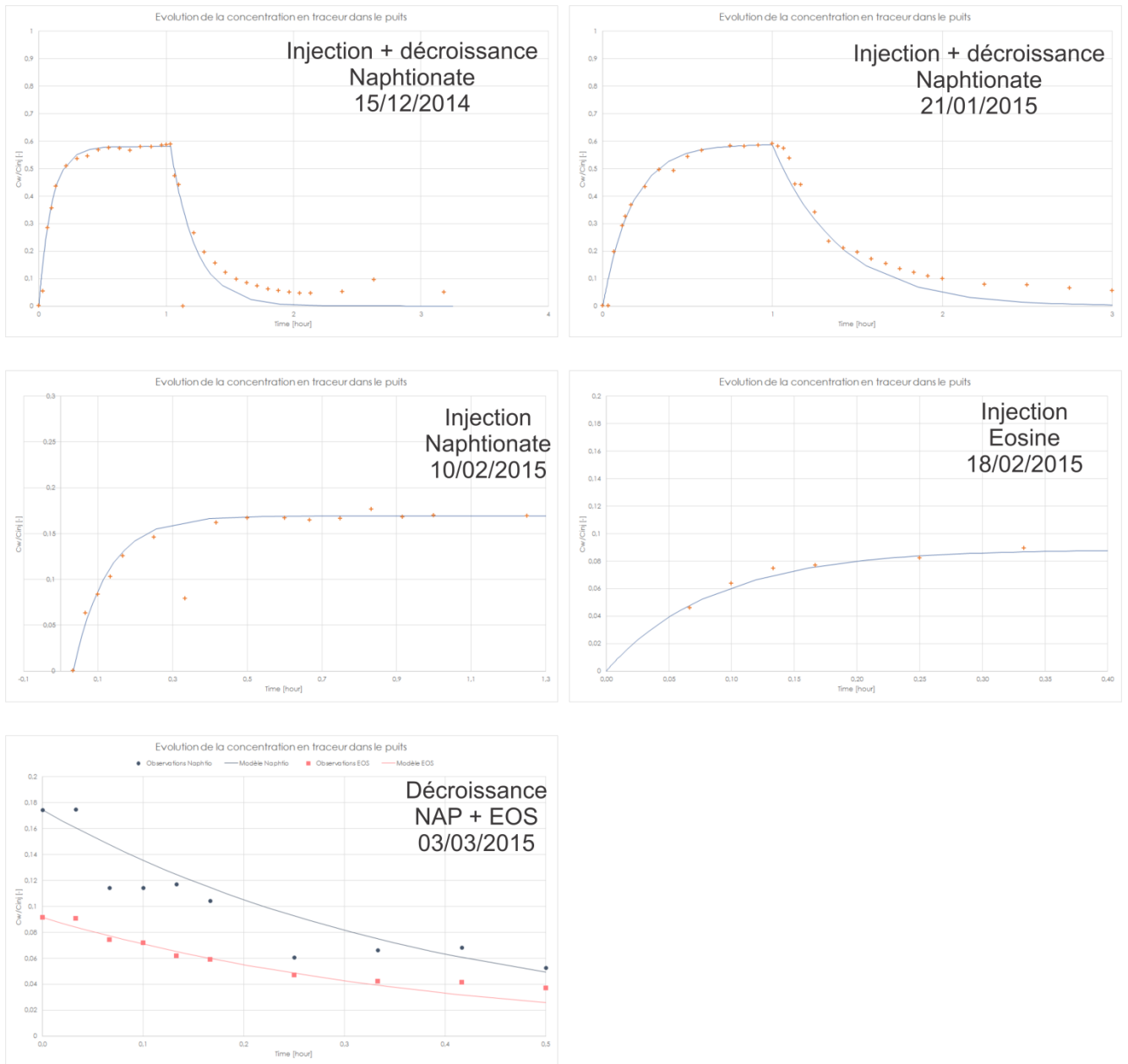


Figure 12 : Résultats des essais FVPDM (points : valeurs mesurées, courbes : valeurs calculées)

Tableau 3: Résultats des essais FVPDM (classé par débit de pompage au P1)

	Traceur	Type	Q pompage P1 (m <sup>3</sup> /h)	Q transit (m <sup>3</sup> /s)	Flux de Darcy (m/s)
18/02/2015	EOS	Injection	4,3	9,00E-05	1,80E-04
15/12/2015	NAP	Injection	7,5	6,20E-05	1,20E-04
15/12/2014	NAP	Décroissance	7,5	4,50E-05	8,90E-05
10/02/2015	NAP	Injection	7,5	9,00E-05	1,80E-04
3/03/2015	NAP/EOS	Décroissance	7,5	2,00E-05	3,90E-05
21/01/2015	NAP	Injection	30	5,50E-05	1,10E-04
21/01/2015	NAP	Décroissance	30	3,50E-05	6,90E-05



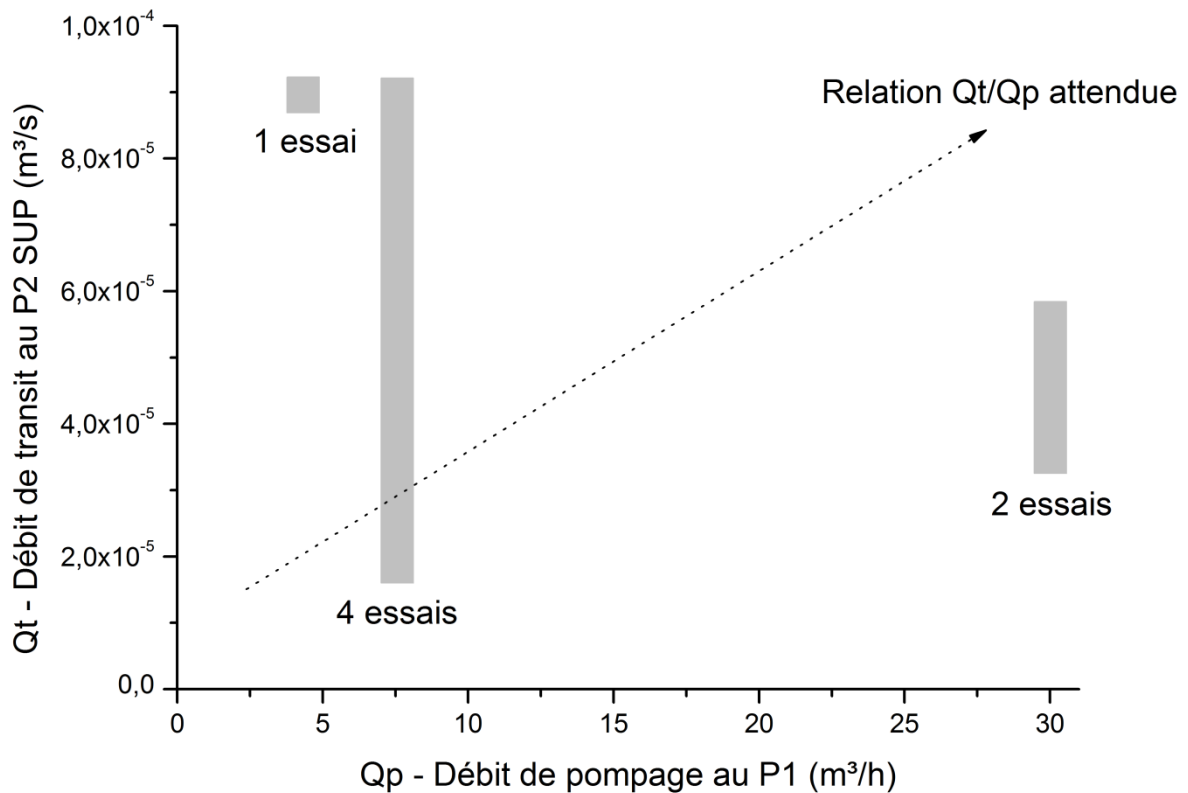


Figure 13 : Relation débit de pompage et débit de transit lors des essais de type FVPDM

### Naphtionate – Pompage à 7.5m³/h

Un premier essai de traçage en zone saturée a été réalisé afin de vérifier que la zone d'appel du puits de pompage P1 englobe bien les piézomètres de la zone non saturée et d'estimer les temps de transfert des traceurs dans la nappe (Figure 14). L'essai a donc été effectué entre le P2 Sup et le P1 (distance de 29m et débit de pompage de 7.5m³/h).

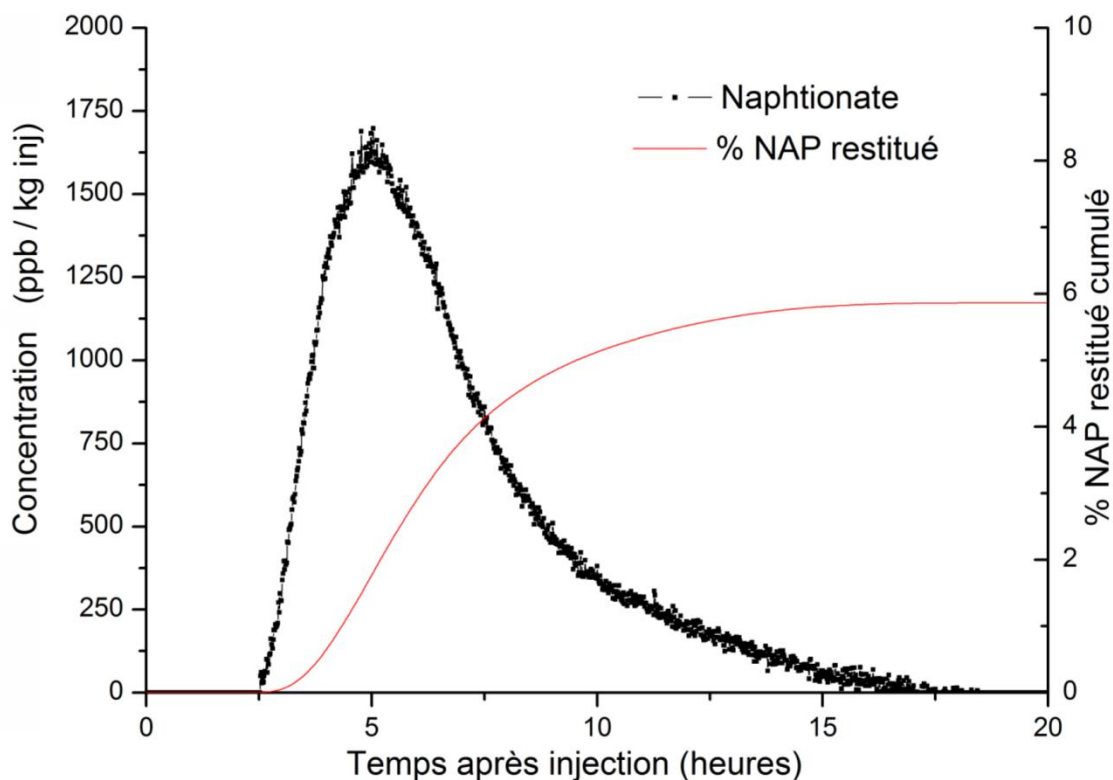


Figure 14 : Essai de traçage au naphtionate en zone saturée avec pompage à 7.5m<sup>3</sup>/h

La première détection du traceur s'effectue 2h30 après l'injection (vitesse maximale de l'ordre de 11m/h). Le maximum de la restitution a été enregistré 5h après l'injection (vitesse modale de l'ordre de 6m/h).

Le taux de restitution du naphtionate, de l'ordre de 6%, est étonnamment faible vu que la distance tracée est relativement courte. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cela. Premièrement, il se peut que le naphtionate se dégrade (du moins qu'il perde sa fluorescence). Cela a déjà été observé dans d'autres contextes (e.g. Brouyère 2001). Deuxièmement, il se peut tout simplement que l'hétérogénéité du milieu soit telle qu'une majeure partie du traceur reste piégée dans des zones moins transmissives. Enfin, dernière hypothèse, il se pourrait que les écoulements souterrains soient tellement importants dans ce secteur de la nappe que l'on ne fait que dévier une partie du panache de traceur prenant en réalité un cheminement orienté vers le sud (direction du Triffoy) plutôt que vers le puits P1.

#### Naphtionate – Pompage à 30m<sup>3</sup>/h

Un essai similaire au premier mais à débit de pompage plus important (30m<sup>3</sup>/h) a donc été effectué afin de vérifier si le fait d'augmenter les flux d'eau souterraine et, normalement, d'attirer plus efficacement le panache de traceur vers le puits de restitution contribuent à un meilleur taux de restitution observé.

Lors de ce deuxième essai à gros débit, le traceur a à peine été détecté (analyses en laboratoire, concentrations mesurées de l'ordre de 50x inférieurs au 1<sup>er</sup> traçage) (Figure 15). L'interprétation

qu'on peut tirer de ces deux essais est qu'une augmentation du débit de pompage au P1 n'a pas pour effet d'accélérer le transfert du traceur suivant l'axe des piézomètres d'injection mais que cela contribue essentiellement à drainer de l'eau souterraine dans une direction différente de l'orientation P2-P1. A priori, pour les essais de traçage à partir de la zone non saturée, il ne sert donc à rien de vouloir à tout prix pomper au débit maximum possible puisque cela ne contribue qu'à diluer les traceurs injectés aux P3 et P4 situés le long de cet axe P2-P1.

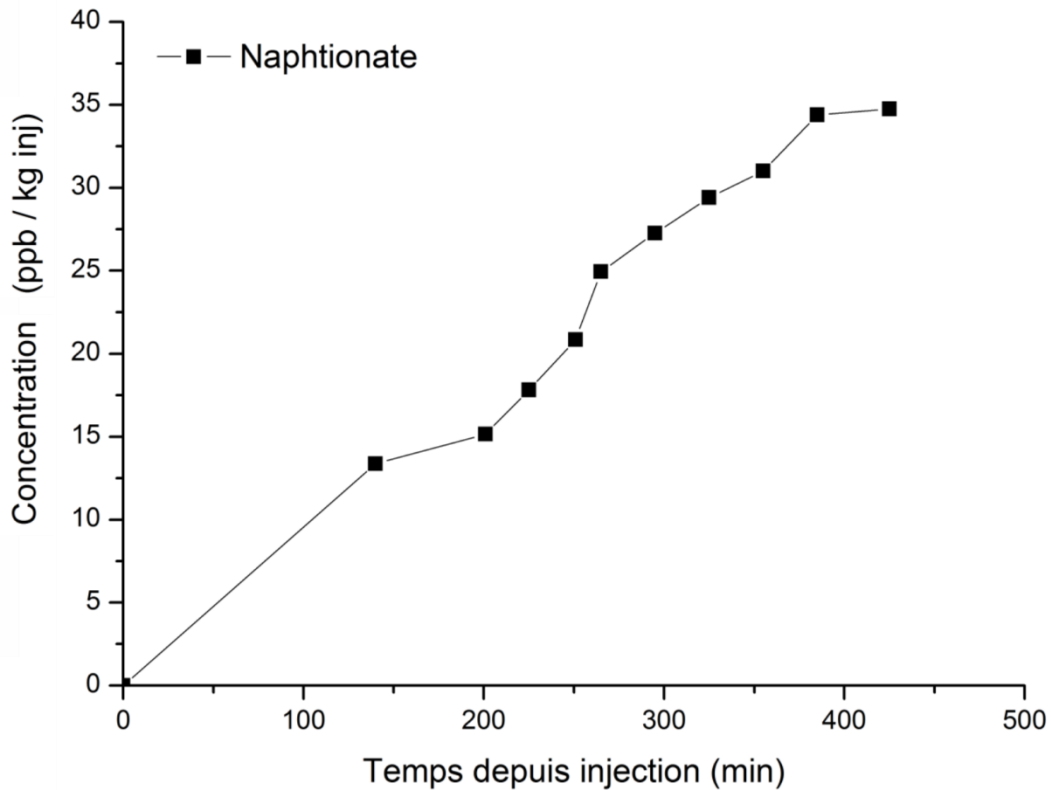


Figure 15 : Essai de traçage au naphtionate en zone saturée avec pompage à 30m<sup>3</sup>/h

### Naphtionate / Eosine – Injection continue et débit variable

Un troisième essai a été réalisé afin d'établir l'impact du débit de pompage sur la restitution du traceur. Cet essai a consisté en une injection en continu de naphtionate (début d'injection 10/02/2015) avec un débit pompage Q1 au puits de restitution (7.4m<sup>3</sup>/h) (Figure 16). Lors de la stabilisation de concentration du traceur, une diminution du débit de pompage (Q2 – 18/02/2015) a été effectuée (4.3m<sup>3</sup>/h). En parallèle à cette diminution de débit, un deuxième traceur fluorescent (éosine yellowish) a été ajouté au naphtionate (la concentration d'injection de traceur est identique). L'injection des traceurs a été arrêtée le 03/03/2015 avec un pompage augmenté à 7.4m<sup>3</sup>/h le 10/03/2015 et maintenant jusqu'au 01/05/2015 pour évaluer le résidu des traceurs injectés.

Les premières arrivées de naphtionate et d'éosine sont relativement similaires et ont été détectées 7h30 après le début de l'injection pour le naphtionate (vitesse de l'ordre de 3.8m/h) et 6h30 après le début de l'injection pour l'éosine (vitesse de l'ordre de 4.5m/h). Les masses restituées sont

cependant fort différentes l'une de l'autre (~3% pour le naphthionate contre ~50% pour l'éosine) mettant apparemment en évidence une dégradation du naphthionate dans le milieu souterrain.

La diminution du débit de pompage au puits de restitution induit une augmentation des concentrations de naphthionate, ce qui tend à prouver une dilution lors d'un pompage trop important. Cependant, aucune stabilisation des concentrations n'a été mesurée au 2<sup>ème</sup> débit de pompage (Q2) malgré l'injection en continu pendant plus de 10 jours.

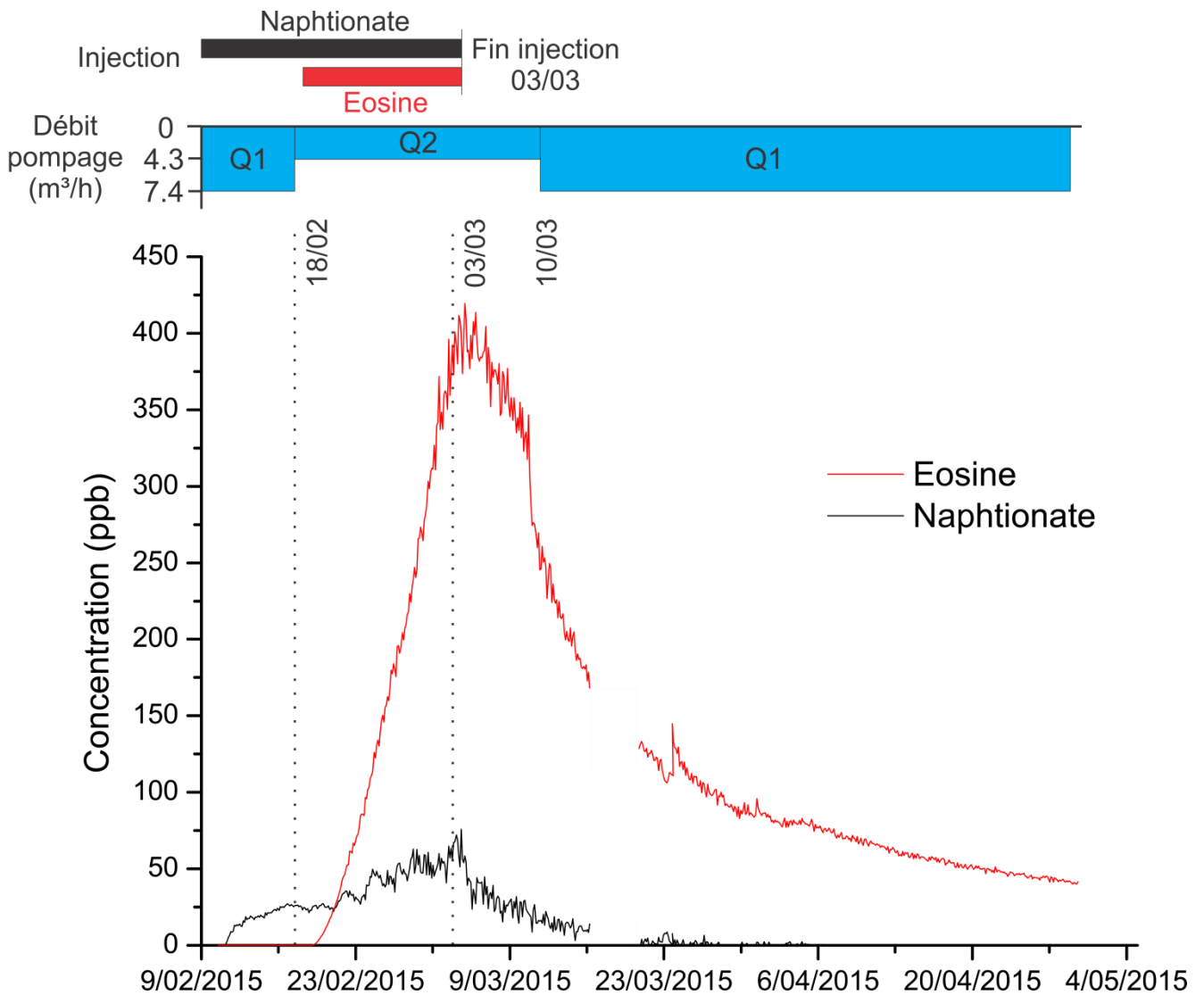


Figure 16 : Essai de traçage au naphthionate et éosine avec débit de pompage variable

### Synthèse des essais de traçage en zone saturée

Les essais réalisés ont montré des résultats différents les uns des autres. Le pompage au puits de restitution (P1) attire effectivement les traceurs provenant du puits d'injection (P2 Sup), et donc également des piézomètres de la zone non saturée. Lors des injections réalisées dans les piézomètres

de la zone non saturée (P3 et P4), on doit donc s'attendre à les retrouver également au P1 si les traceurs migrent effectivement verticalement et atteignent le puits à des concentrations détectables.

Le débit de pompage influence fortement la restitution. Un débit élevé n'a pas d'impact sur le débit de transit au P2 et a pour conséquence une dilution du traceur. Un débit de pompage de 7.5m<sup>3</sup>/h semble optimal afin de récupérer les traceurs.

Les conditions hydrogéologiques, surtout en milieu fracturé, pouvant influencer les essais, de nouveaux traçages seront réalisés en condition de basses eaux afin de mettre en évidence l'impact du niveau de la nappe sur les temps de transfert et sur le taux de restitution.

### b. Zone non saturée

Des essais de traçage ont également été réalisés dans la zone non saturée afin d'estimer la vitesse d'infiltration vers la nappe (synthétisés dans le Tableau 4).

Tableau 4 : Synthèse des essais de traçage réalisés dans la zone non saturée à Hodoumont

Essai	Date	Pz d'injection	Débit de pompage au P1 (m <sup>3</sup> /h)	Distance horizontale au puits de pompage (m)	Épaisseur estimée ZNS (m)	Volume de dilution (L)	Quantité traceur (kg)	Durée d'injection (min)	Mise en charge	Masse restituée (%)
KCl	10/02/2015	P4	7.5	7	2	115	25	75	2L/min pendant tout l'essai	50 (K) - 63 (Cl)
KBr	10/03/2015	P4	7.5	7	2	35	10	5	Aucune (condition naturelle d'infiltration)	10 (K) - 30 (Br)
KBr	27/05/2015	P3	7.5	19	4-5	25	5	30	Remplissage quotidien de l'ouvrage	/

#### Piézomètre P4

Deux essais ont été réalisés à partir du Pz P4 (Figure 17), un traçage au chlorure de potassium (KCl) avec une mise en charge permanente du piézomètre (pendant toute la durée de restitution du traceur au puits de reprise) afin de favoriser l'infiltration et un traçage au bromure de potassium (KBr) sans mise en charge afin d'avoir un résultat dans des conditions plus naturelles d'infiltration. Il faut noter que, suite à la remontée importante de la nappe durant l'hiver 2014-2015, l'épaisseur de la zone non saturée a été substantiellement réduite par rapport à ce qui était prévu (+/- 4m entre la base du niveau crépiné du P3 et le sommet de la nappe et +/- 2m entre la base du niveau crépiné du P4 et le sommet de la nappe).

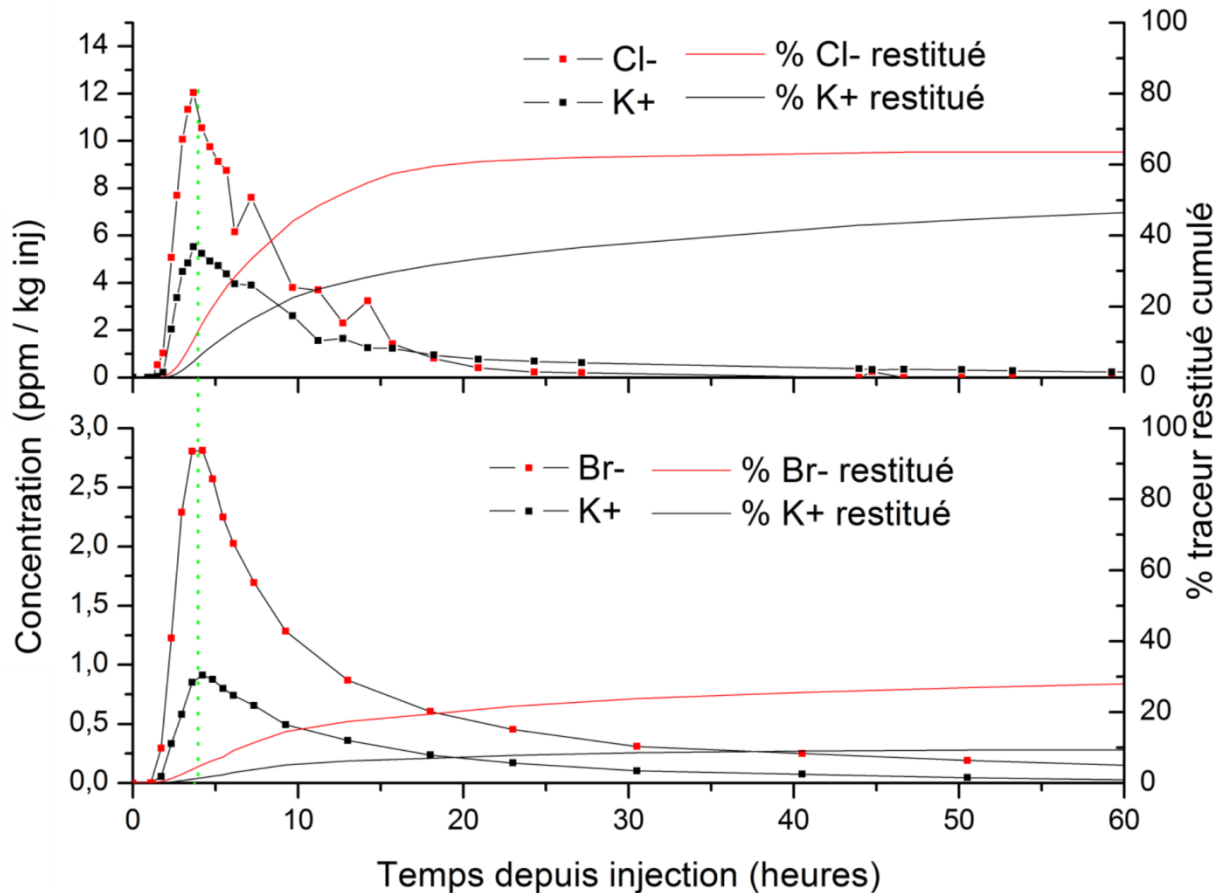


Figure 17 : Restitution de KCl (avec charge) et de KBr (sans charge) au P1 (injection au P4)

Dans les deux cas, la première arrivée du traceur est observée 1h30 après l'injection (vitesse maximale de transfert de l'ordre 1.3 m/h si l'on ne prend en compte que le transfert dans la zone non saturée) tandis que le maximum de la restitution se situe 3h30 après l'injection (vitesse modale de transfert de l'ordre 0.6 m/h si l'on ne prend en compte que le transfert dans la zone non saturée). La mise en charge de l'ouvrage ne semble donc pas avoir d'influence significative sur l'infiltration du traceur. On observe par contre une différence assez marquée en matière de taux de restitution du chlorure (63%) et du bromure (30%). Ces deux traceurs étant des anions, ils ne doivent pas s'adsorber sur le milieu poreux traversé. Cette différence reflète donc probablement le fait que, lors du premier essai (KCl), la mise en charge du piézomètre a quand même favorisé le passage du traceur par des niveaux préférentiels à travers la zone non saturée (fractures...) et de lessiver plus efficacement le traceur en profondeur. Dans les deux cas, le potassium présente des taux de restitution moins importants (respectivement 50 et 10%) que l'anion (Cl<sup>-</sup> ou Br<sup>-</sup>) qui l'accompagne dans le sel utilisé comme traceur (KCl et KBr).

Ceci est le reflet de mécanismes d'adsorption dans la zone non saturée par échange cationique avec d'autres éléments chimiques (Figure 18). La différence de concentration entre le cation et l'anion utilisé (K – Cl ou K – Br) est balancée par l'augmentation de concentrations des autres cations, essentiellement le calcium mais également le magnésium et le sodium (~90 % de balance pour les deux traçages).

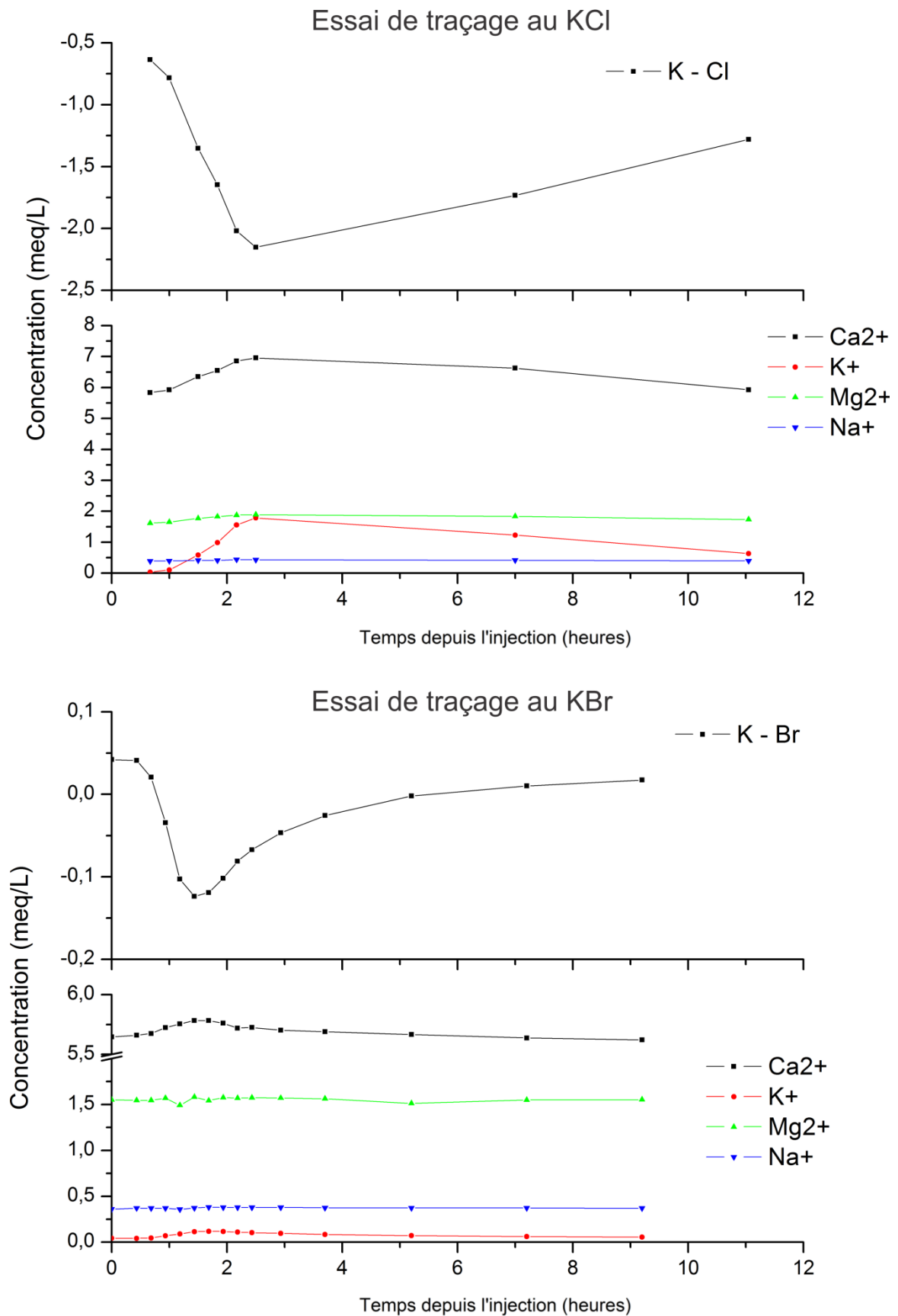


Figure 18 : Augmentation des concentrations en cations suite aux échanges cationiques (K étant le traceur utilisé lors des essais)

Malgré ces différences en matière de taux de restitution, il ressort de ces essais que le mécanisme qui domine le transfert vertical de l'eau et des solutés à travers la zone non saturée qui surmonte les calcaires est la gravité. Il ressort également que les temps de transfert sont globalement très courts et donc, qu'à l'échelle de l'année hydrologique, et sous réserve de résultats contradictoires sur d'autres sites, on peut considérer que le temps de séjour de l'eau et des solutés dans la zone non saturée des calcaires du Carbonifère est très court, ne fût-ce que contrairement à ce qui avait été observés dans d'autres contextes géologiques (e.g. traçage dans la zone non saturée des craies à Bovenistier, Brouyère 2001, Brouyère *et al.* 2004).

Cependant, comme cela a été déjà mentionné, l'épaisseur de la zone non saturée testée est faible (de l'ordre de deux mètres). D'autres essais de traçage seront donc réalisés sur le site de Hodoumont lorsque la nappe sera en niveau piézométrique bas.

### Piézomètre P3

Un traçage au bromure de potassium (KBr) été réalisé à partir du Pz P3 (Figure 19). Vu le faible taux d'infiltration d'eau observé lors des tests, une mise en charge à niveau constant était difficilement applicable. Un remplissage quotidien de l'ouvrage a donc été réalisé comme alternative.

Une augmentation des concentrations en potassium et en bromure est visible 100h après l'injection. Cependant, un seul échantillon présente des concentrations significativement différentes des autres, bien que, pour le potassium, ce pic semble être inférieur à la variation naturelle des concentrations dans le milieu. Aucune arrivée de traceur n'est donc clairement identifiée, mais l'échantillonnage est poursuivi en vue notamment de voir si le traceur arrivera plus tard, par exemple lors du retour de conditions de recharge naturelle de la nappe en hiver.

Différentes hypothèses peuvent expliquer ce résultat :

- Le piézomètre est foré dans un banc de calcaire massif provoquant une infiltration très lente (comme le montre d'ailleurs les essais hydrodynamiques) ;
- Le pompage induit une dilution trop importante par rapport à l'infiltration très lente du traceur dans le milieu, et donc une non-détection du traceur.



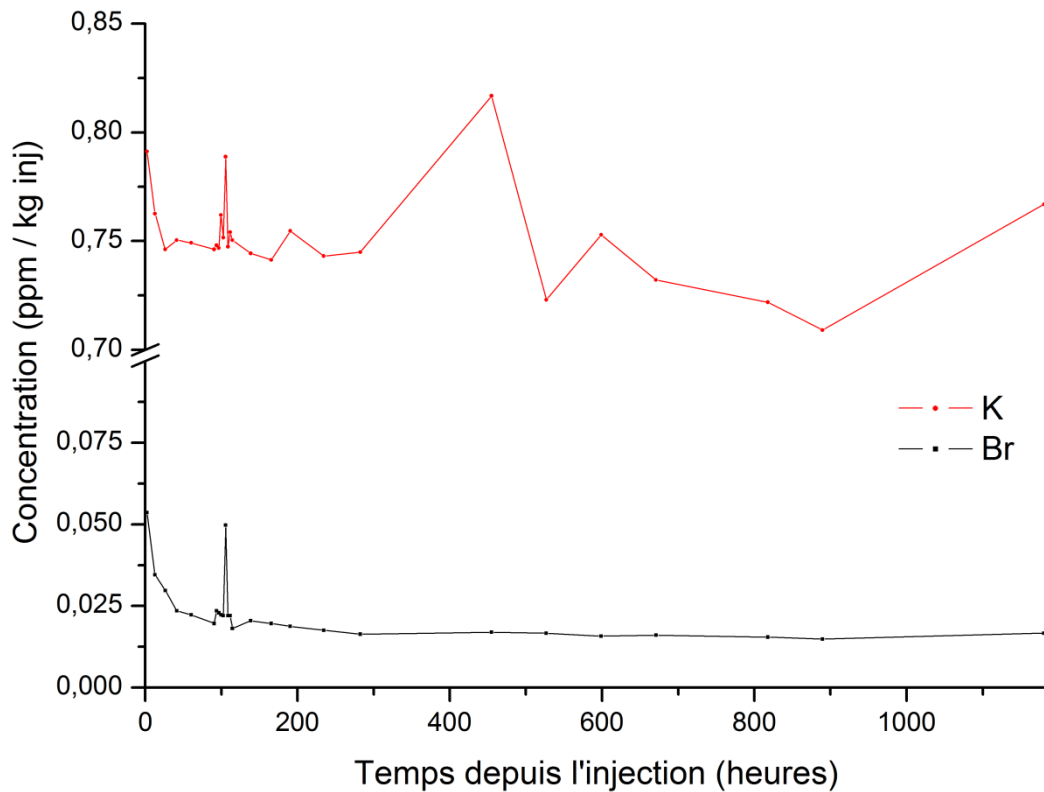


Figure 19 : Restitution de KBr au P1 (injection au P3)

## 6. Conclusions

Les résultats obtenus lors des essais réalisés sur le site expérimental permettent de mieux comprendre le comportement de l'eau des solutés vers et dans la nappe d'eau souterraine des calcaires. Les temps de transfert dans la zone non-saturée et dans la zone saturée ont été évalués et les données montrent que la dynamique des échanges est très grande aux interfaces sol – zone non saturée – nappe.

Au point de vue de la zone non saturée, le mécanisme qui domine le transfert vertical est la gravité. Il en ressort également que les temps de transfert sont globalement très courts (lorsque le premier banc de calcaire massif est franchi) et donc, qu'à l'échelle de l'année hydrologique et sous réserve de résultats contradictoires sur d'autres sites, on peut considérer que le temps de séjour de l'eau et des solutés dans la zone non saturée est pratiquement négligeable dans les calcaires du Carbonifère.

Les essais réalisés dans la zone saturée ont montré des résultats différents les uns des autres. Les vitesses d'écoulement maximales sous condition de pompage varient entre 5 et 11m/h. Aucune diminution du temps de transfert n'a été mise en évidence lors d'un pompage plus important au puits de restitution. Cette augmentation de débit induit cependant une plus grande dilution du traceur.

Les conditions hydrogéologiques, surtout en milieu fracturé, pouvant influencer les essais, de nouveaux traçages seront réalisés en condition de basses eaux afin de mettre en évidence l'impact du niveau de la nappe sur les temps de transfert et le taux de restitution des traceurs.

## **7. Bibliographie**

Birsoy Y.K., Summers W.K., 1980, Determination of aquifer parameters from step tests and intermittent pumping data, *Groundwater*, Volume 18, Issue 2, p.137-146.

Brouyère S., 2001, Thèse de doctorat, Etude et modélisation du transport et du piégeage de solutés en milieu variablement saturé, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège.

Brouyère S., Dassargues A., Hallet V., 2004, Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation, *Journal of Contaminant Hydrology* 72, p.135-164.

Brouyère S., Battle-Aguilar J., Goderniaux P., Dassargues A., 2008, A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes : The Finite Volume Point Dilution Method, *Journal of Contaminant Hydrology* 95, p.121-140.

# Annexes

## Fiche technique du site expérimental

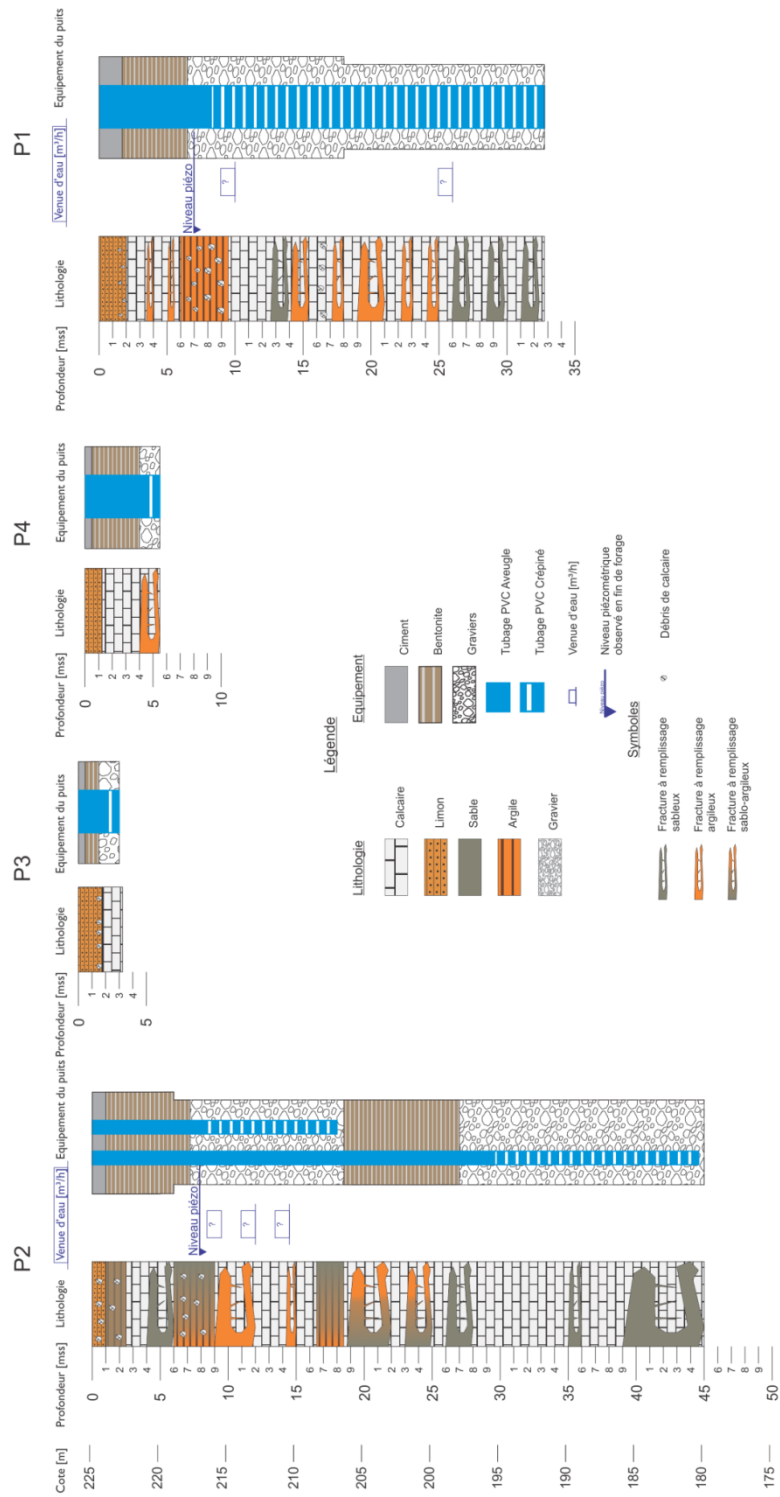


Figure 20 : Description technique du site expérimental

Essai de pompage par palier

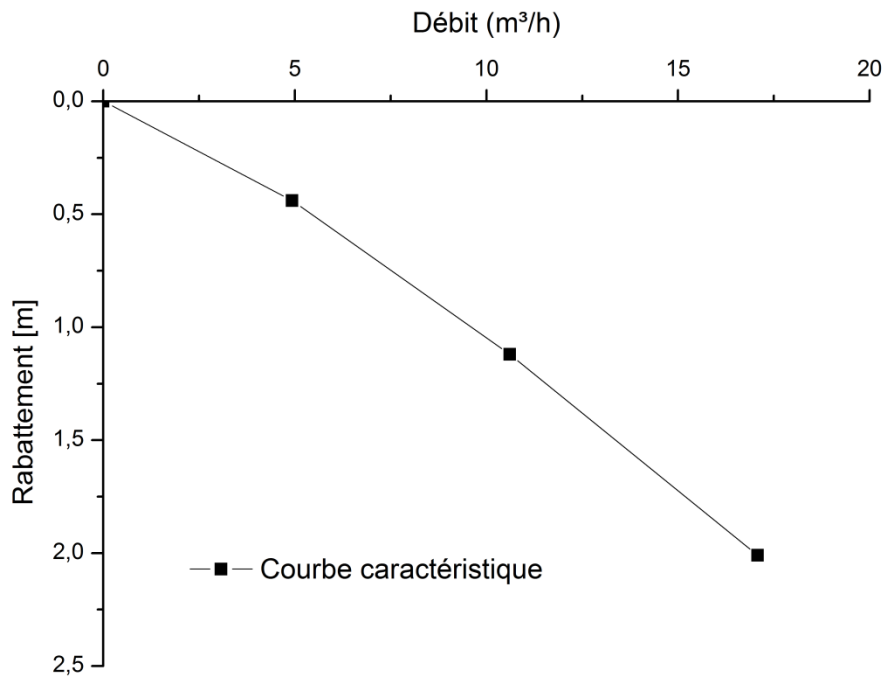


Figure 21 : Courbe caractéristique du P1 lors de l'essai de pompage par paliers

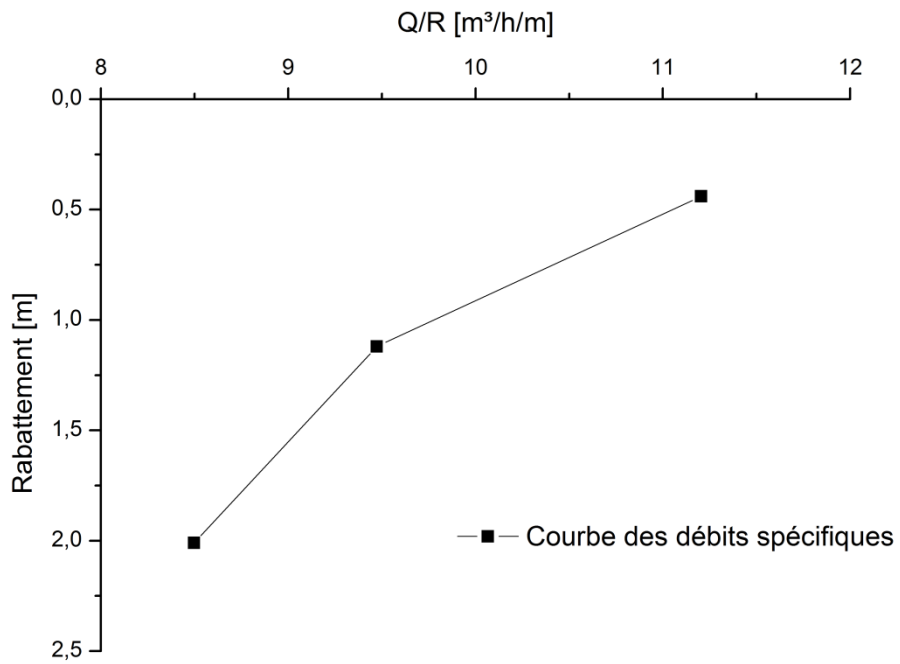


Figure 22 : Courbe des débits spécifiques du P1 lors de l'essai de pompage par paliers

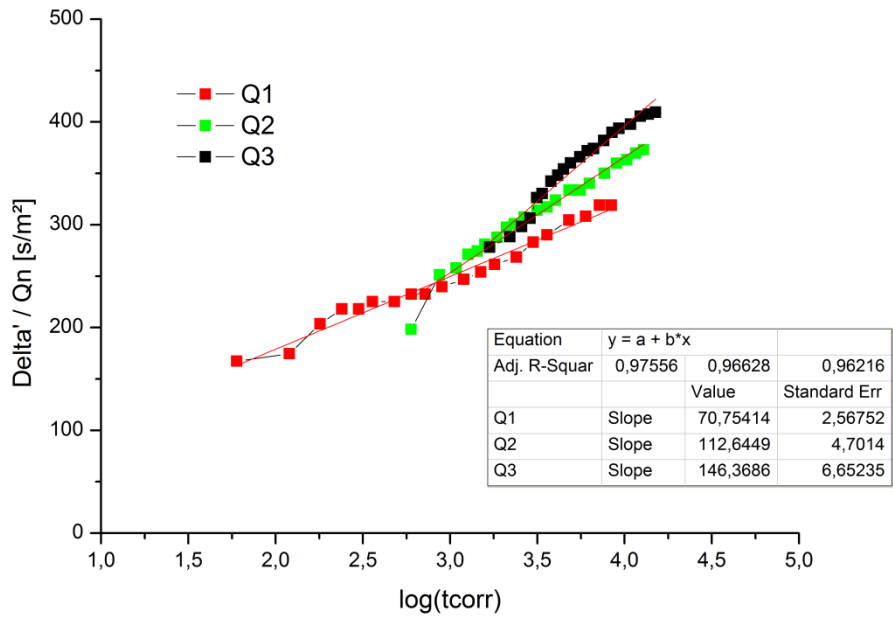


Figure 23 : Interprétation de l'essai de pompage par paliers (phase de pompage) selon la méthode de Birsoy-Summers

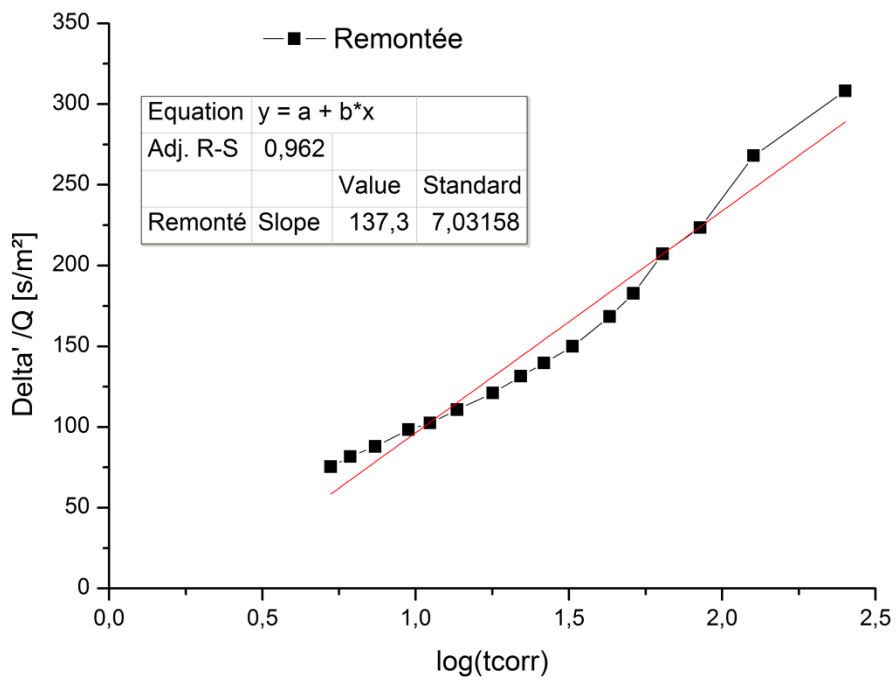


Figure 24 : Interprétation de l'essai de pompage par paliers (phase de remontée) selon la méthode de Birsoy-Summers