

Site Expérimental Hydrogéologique de Poitiers : Un champ applicatif pour la modélisation expérimentale

Afzal Chamroo¹, Régis Ouvrard¹, Thierry Poinot¹, Gilles Porel², Benoit Nauleau²

Université de Poitiers

¹LIAS, Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes (EA 6315)
Bâtiment B25, 2 rue Pierre Brousse, 86022 Poitiers, France

²IC2MP, Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (UMR CNRS 7285)
Bâtiment B35, rue Michel Brunet, 86022 Poitiers, France

{afzal.chamroo, regis.ouvrard, thierry.poinot, gilles.porel, benoit.nauleau}@univ-poitiers.fr

Résumé

Dans le domaine de l'hydrogéologie, il est intéressant de disposer d'un site expérimental permettant de tester les hypothèses théoriques sur les milieux hétérogènes. C'est dans cet objectif que le Site Expérimental Hydrogéologique (SEH), d'une superficie de 12 hectares a été réalisé sur des terrains appartenant à l'Université de Poitiers. D'un point de vue géologique, le SEH est implanté sur le versant nord du " Seuil du Poitou ", vaste plateau carbonaté Mésozoïque marquant la transition entre les bassins sédimentaires Aquitain et Parisien. Trente cinq forages composent actuellement le SEH avec un emboîtement d'échelle permettant des investigations de 10 à 600 mètres [9]. Les mesures disponibles sur le SEH ainsi que les possibilités d'excitation par pompage ou par choc hydraulique permettront l'interprétation de différents phénomènes en milieux fracturés (écoulement, transport de polluant, investigation métrologique, etc.).

L'identification et la modélisation expérimentale a beaucoup à apporter à l'étude des aquifères. D'une part, les modèles comportementaux permettront de valider les modèles analytiques de l'hydrogéologie, et d'autre part, cette modélisation boîte noire ou boîte grise offrira des modèles plus facilement manipulables pour des perspectives de localisation des pollution ou d'étude d'impact.

Mots-clés: *Aquifère, Essais de pompage, Chocs hydrauliques, Modélisation hydrogéologique, Modélisation expérimentale, Identification.*

1 Introduction

La modélisation des flux au sein des milieux calcaires fracturés est une réelle problématique en hydrogéologie étant donnés les différents types et échelles d'hétérogénéités prévalant dans les roches calcaires. Il est difficile d'expliquer tous les phénomènes sur le plan pratique si les modèles utilisés ne se reposent pas sur des fonctionnements réalistes fournissant une quantité significative de données. Dans l'optique de mettre à disposition une plate-forme grandeur nature, l'équipe HydrASA (Hydrogéologie, Argiles, Sols et Altérations) du laboratoire IC2MP a entrepris le développement du Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) situé à 2 km du Campus de l'Université de Poitiers.

Représentant une superficie de 12 hectares, ce site déploie 35 forages permettant d'atteindre des profondeurs allant jusqu'à 120 mètres. D'un point de vue géologique, le SEH est implanté sur le versant nord d'un plateau d'altitude moyenne (une centaine de mètres) nommé " Seuil du Poitou ". Ce dernier est un vaste plateau carbonaté Mésozoïque marquant la transition entre les

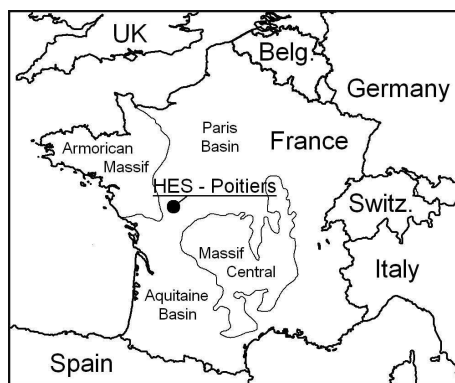


FIGURE 1 – Localisation géographique du Site Expérimental Hydrogéologique (SEH)

bassins sédimentaires Aquitain et Parisien (figure 1). Les calcaires jurassiques, qui reposent sur un socle cristallin Hercynien, renferment deux aquifères superposés :

- l’aquifère du Lias inférieur et moyen, dit aussi Infra-Toarcien (de 5 à 10 m d’épaisseur),
- l’aquifère du Dogger, dit aussi Supra-Toarcien (100 m d’épaisseur).

Ces deux aquifères sont séparés par l’aquitard marneux du Toarcien (20 m d’épaisseur). Les études menées sur le SEH se focalisent essentiellement sur l’aquifère du Dogger. L’aquifère représentant le SEH de Poitiers est défini comme un aquifère calcaire fracturé karstique. Le réseau d’écoulement est principalement constitué d’un ensemble de fractures pseudo-verticales connectant trois niveaux karstifiés pseudo-horizontaux. Le stockage de l’eau est assuré en grande partie par les calcaires poreux du Bajocien supérieur et du Bathonien. On suppose que l’importante fracturation (ou fissuration) des calcaires à ces niveaux est la raison de l’augmentation de porosité et donc de la capacité de stockage [2]. Les intérêts scientifiques de ce site sont nombreux. Cette plate-forme expérimentale grande nature étant instrumentée, elle permet de réaliser divers essais de pompage et d’analyses associées afin de comprendre les écoulements en milieu fracturé. Il est donc désormais possible de vérifier plusieurs théories sur un cas réel, dont on maîtrise certaines parties, et ainsi de participer à une meilleure exploitation des ressources en eau souterraine. L’acquisition des données va bien évidemment servir à des analyses immédiates, mais une conservation à long terme peut par la suite faire l’objet d’autres études, de type statistiques par exemple. Grâce au SEH, il est possible d’étudier, en milieu fracturé, l’écoulement et le transport de polluants, et une investigation métrologique du milieu permettrait des applications comme l’aide à la prise de décision, la formation et la sensibilisation en ce qui concerne la gestion et la protection de la ressource “ eau ”. C’est pourquoi le SEH a été inscrit au plan national dans de grands programmes de recherche amont comme le Programme National de Recherche en Hydrologie. Aujourd’hui, il s’inscrit dans le Service National d’Observation H⁺ (SNO H⁺). Le lecteur pourra se référer à [2] et [4] pour s’informer sur le contexte géologique et hydrogéologique du SEH.

Dans son fonctionnement, comme décrit en section 2, le SEH peut être vu comme un réseau de puits interconnectés. La section 3 illustre les excitations que l’on effectue pour stimuler l’aquifère en un puits donné. Dans une optique d’analyse des interactions, il est possible de considérer la dépendance du niveau d’un puits par rapport à un autre sous la forme “ système ”. Les hydrogéologues de IC2MP ont déjà procédé à une modélisation du fonctionnement de ce système en adoptant le modèle analytique de Theis présenté en section 4. Cette approche consiste à mettre en équation les phénomènes physiques de l’aquifère. Plus récemment, les automaticiens du LIAS se sont également intéressés à cette modélisation, mais sous une approche “ boîte noire ” (section 5). Un protocole expérimental, permettant une excitation plus riche de l’aquifère, a été défini. Une première étude, basée sur l’estimation de modèle type fonction de transfert, a permis de montrer

un comportement dynamique différent lors de la montée et de la descente du niveau d'eau dans l'aquifère. Les perspectives immédiates de travaux s'orientent donc vers des modèles commutés. Une modélisation boîte grise basée sur des modèles 2D est également envisagée pour s'approcher du modèle analytique de Theis utilisé en hydrogéologie.

À court-terme, l'enjeu est de valider les résultats déjà obtenus par les hydrogéologues. Par la suite, la modélisation expérimentale devrait offrir des modèles plus facilement manipulables pour des perspectives de localisation de pollution ou l'étude d'impact.

2 Description du SEH

2.1 Les forages

- Les travaux du SEH ont commencé en 2002, date à laquelle les 8 premiers forages verticaux destructifs¹ dans l'aquifère du Dogger ont été réalisés. La profondeur moyenne est de 130 m et le diamètre final de 222 mm. Deux forages carottés² ont également été réalisés à cette époque. Les forages suivants ont été implantés selon un dispositif géométrique " five-spot ". Le principe du five spot est simple : le motif élémentaire est constitué d'un puits central entouré de quatre forages situés aux quatre extrémités d'un carré.
- En 2003, 10 forages destructifs supplémentaires du même type qu'en 2002 ont été réalisés. Deux forages carottés ont aussi vu le jour : un premier de profondeur de 130 m et de diamètre final de 120 mm a été fait dans l'aquifère du Dogger et un deuxième de profondeur de 165 m et de diamètre final de 80 mm a été réalisé dans l'aquifère du Lias inférieur et moyen.
- L'année 2004 a connu la finalisation du dispositif five-spot avec la réalisation de 13 forages destructifs de profondeur moyenne de 130 m et de diamètre final de 222 mm dans l'aquifère du Dogger et celle d'un forage destructif de profondeur de 165 m et de diamètre final de 150 mm dans l'aquifère du Lias inférieur et moyen.

Le SEH comporte aujourd'hui (figure 2) :

- 31 forages de 130 m : M01..M24, P1..P3, MP4..MP7,
- 1 carotté de 130 m : C1,
- 1 carotté de 165 m : C2,
- 1 destructif de 165 m,
- 3 piézomètres de 35 m,
- 2 carottés obliques : C3, C4.

Concernant la nomenclature des forages :

- " M " représente " Massé ", l'entreprise ayant réalisé les forages Mxx,
- " P " représente " Portejoie ", l'entreprise ayant réalisé les forages Px,
- " MP " indique la participation des deux entreprises,
- " C " signifie " carotté " - C1 pour le Dogger, C2 pour l'Infra-Toarcien, C3 et C4 sont les forages obliques,
- " PZ " correspond à " piézomètre ".

Tous les forages destructifs ont été forés en diamètre de 222 mm (8 pouces) et sont équipés d'un tubage interne d'au minimum 160 mm de diamètre pour permettre le passage d'une pompe de forte capacité (jusqu'à 100 m³/h). Les forages sont réalisés au " marteau fond de trou ". Les échantillons de roches récupérées tous les mètres se présentent sous la forme de " cuttings ".

1. Mode de forage le plus rapide consistant à désagréger le sol à l'aide d'un outil adapté et à remonter vers la surface les débris appelés " cuttings " à l'aide d'un fluide (air, eau, boue).

2. Mode de forage consistant à récupérer la totalité de la roche sous forme de carottes de 96 mm de diamètre. Les forages carottés permettent d'obtenir une connaissance fine de la géologie locale à partir d'études pétrographiques et sédimentologiques, de porosité et de perméabilité.

2.2 Exemples d'équipements des forages

Tous les forages sont équipés en surface d'une dalle béton. En profondeur, et selon la tenue des terrains, ils sont équipés d'un ou deux tubages en acier sur une profondeur maximale de 60 mètres. Les forages qui fournissent des débits importants sont équipés de tubes PVC crépinés (M5, M6 par exemple) alors que les forages peu productifs restent en "trou nu" (M8, M9, M10 par exemple).

2.3 Le réseau de puits

Les travaux sur le SEH ont donné lieu à un réseau de puits interconnectés (figure 2), respectant une disposition dont les différents types sont illustrés figure 3.

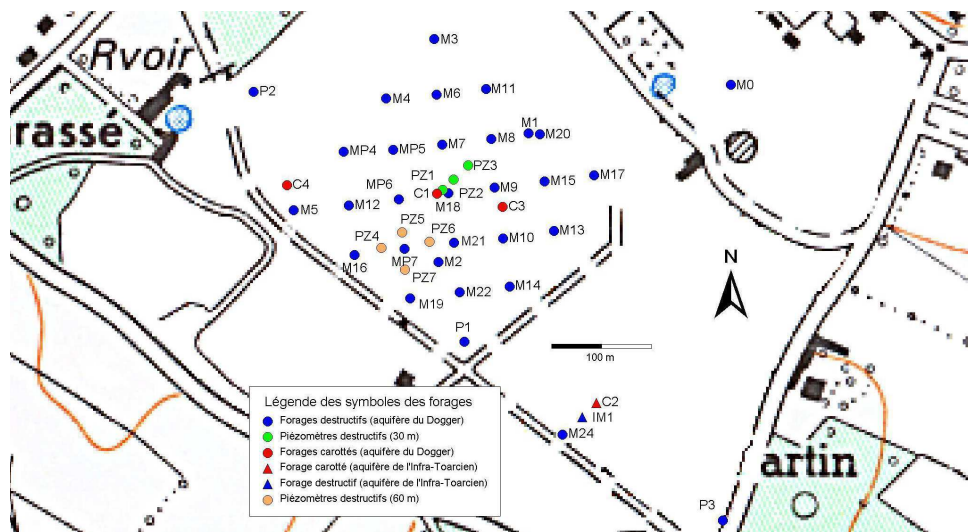


FIGURE 2 – Emplacement des 35 forages du SEH

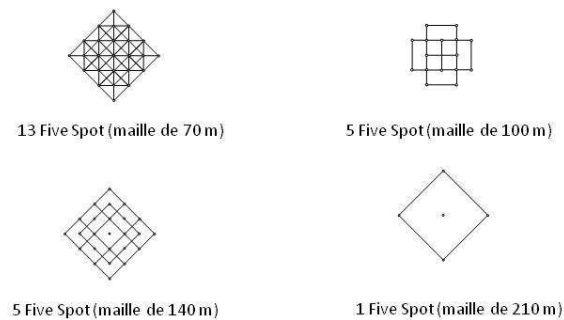


FIGURE 3 – Maillages des forages du SEH

En vue d'étudier, voire de modéliser, l'écoulement dans un milieu fracturé, l'idée est de pouvoir réaliser des campagnes de collecte de données avec un protocole d'expérimentation défini. On peut, par exemple choisir de réaliser un pompage dans un puits donné et d'analyser le comportement dynamique du niveau dans d'autres puits avoisinants. Ce type d'expérience est d'ailleurs utilisé pour cartographier l'interdépendance des puits. La première campagne d'essais avait déjà dévoilé [3] que les rabattements³ ne sont pas proportionnels à la distance au puits de pompage.

3. En hydrogéologie, le terme rabattement ou *drawdown* en anglais correspond à une baisse du niveau

L'auteur de [3] déduit dans son ouvrage qu'il existe une hétérogénéité des écoulements en relation avec le caractère fracturé du milieu.

3 Les essais hydrodynamiques

Afin d'avoir une vision précise des écoulements, des études ont été faites sur les diagraphies⁴ de puits, les essais de pompage, les relevés piézométriques et les chocs hydrauliques. Dans un premier temps, les diagraphies fournissent des indications sur les niveaux producteurs et leur corrélation avec la géologie. Dans un second temps, les essais de pompage et la piézométrie permettent de déterminer les paramètres hydrauliques des niveaux producteurs et leur connectivité. Enfin, les chocs hydrauliques sont étudiés car les essais de puits ne permettent pas, comme on le verra, de caractériser la structure hydraulique à l'intérieur de la zone d'étude où sont forés la plupart des puits. Deux types d'essais ont été menés sur ce site afin de connaître les productivités des puits :

- les essais de pompage,
- les chocs hydrauliques.

3.1 Les essais de pompage

Les essais par palier (essais de puits) sont des tests de durées moyennes (de l'ordre de l'heure). Ils visent à connaître la productivité des puits et fournissent une information sur la qualité des puits. Dans la démarche des études sur le site SEH, ils ont été réalisés pour définir les puits les plus productifs sur lesquels les tests de pompage de longue durée sont réalisés. Comme le précise [2], trois campagnes d'essais de pompage ont été réalisées sur le SEH entre 2003 et 2005. La première campagne, réalisée en 2003 sur les puits M01, M02, M03, M04, M05, P1 et P2 montre que les rabattements ne sont pas proportionnels à la distance au puits de pompage. On en déduit l'existence d'une hétérogénéité des écoulements en relation avec le caractère fracturé du milieu. La seconde campagne initiée en 2004 sur les puits M06 - M11 et MP4 - MP7 confirme l'hétérogénéité de l'écoulement et montre des rabattements qui évoluent plus rapidement qu'une fonction linéaire du log du temps. La dernière campagne d'essais de pompage sur les puits M12 - M23 (réalisée en 2005) montre un changement du comportement hydraulique du milieu par rapport aux campagnes précédentes. Les courbes de rabattement aux puits d'observation présentent le même comportement, en termes d'évolution au cours du temps, de forme et de rabattement maximum malgré des distances au puits pompé différentes. Comme le soulignent [3, 5], cette modification de comportement du milieu pourrait être liée à la succession des tests hydrauliques réalisés sur le SEH qui aurait entraîné le décolmatage des chenaux d'écoulement, augmentant ainsi la connectivité entre les puits (figure 4).

3.2 Les chocs hydrauliques

Les chocs hydrauliques, dits " slug test " sont, quant à eux, des essais de courte durée (de l'ordre de quelques minutes). Le principe de ce type d'essai est d'injecter ou de prélever le plus brièvement possible un certain volume d'eau dans un puits et à suivre dans le temps le ré-équilibre du niveau piézométrique jusqu'à son niveau initial. Cependant ce type d'essai présente deux inconvénients majeurs : il ne permet pas de déterminer la valeur du coefficient d'emmagasinement et le volume d'aquifère testé est *a priori* relativement réduit (de l'ordre d'une dizaine de

piézométrique d'une nappe par rapport à la surface du sol. Mesuré à l'aide d'un piézomètre à un point de captage, le rabattement est donc positif pour un niveau qui diminue.

4. Une diagraphie ou *well log* en anglais consiste à mesurer, à l'aide de différentes sondes, les caractéristiques des roches traversées lors d'un forage.

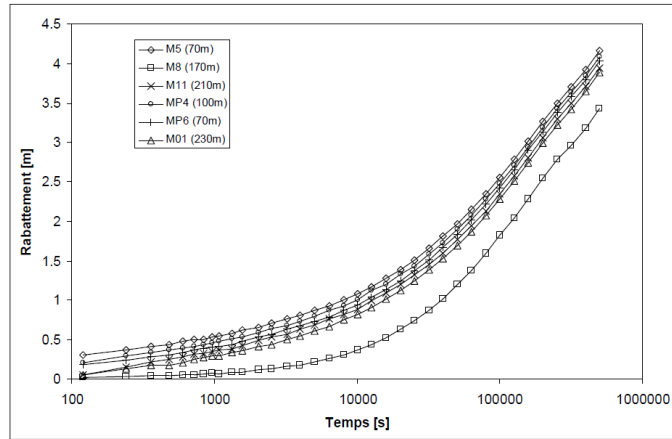


FIGURE 4 – Rabatements en différents points d’observation en réponse à un pompage en M16

mètres). Il permet toutefois d’estimer les caractéristiques hydrodynamiques de l’aquifère, mais à une échelle spatiale locale. Souvent le rayon d’investigation est restreint à l’ordre métrique autour du forage testé.

En interprétant les chocs hydrauliques sur le SEH, une carte de diffusivité (figure 5) a pu être construite, illustrant le degré de dépendance d’un puits à un autre.

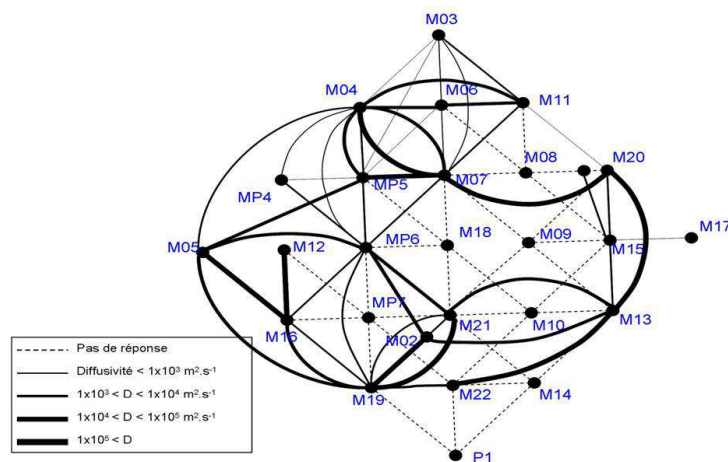


FIGURE 5 – Carte de diffusivité

4 Modélisation analytique

En ce qui concerne l’étude de comportement des aquifères, il est possible de se baser sur un modèle analytique reprenant les équations décrivant la physique. Le modèle analytique fondamentalement utilisé pour l’interprétation des essais de pompage est celui de Theis [7]. Les hypothèses faites pour l’utilisation du modèle de Theis sont les suivantes :

- l’aquifère est supposé horizontal, homogène, isotrope, infini et d’épaisseur constante ; ses paramètres hydrauliques (transmissivité T et coefficient d’emménagement S) sont supposés constants ;
- l’aquifère est considéré comme une nappe captive ;
- toute l’eau pompée provient du stockage dans l’aquifère et elle est relâchée instantanément ;

- on suppose que le puits de pompage pénètre totalement l'aquifère et que son diamètre est infiniment petit ;
- le puits est pompé à débit constant ;
- l'écoulement est supposé laminaire.

L'équation locale de conservation pour un écoulement souterrain, quand la perméabilité est isotrope, s'écrit :

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}h) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

où h est la charge (le potentiel) hydraulique, S le coefficient d'emmagasinement, T la transmissivité et t le temps. En coordonnées polaires, l'équation devient :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

La solution de cette équation fournie par Theis est :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3)$$

avec

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

où

- s est le rabattement à l'instant t (mesuré depuis le début du pompage) et à la distance r du puits pompé,
- Q est le débit constant du pompage,
- $W(u)$ est la fonction de Theis dite fonction " puits " correspondant à une exponentielle intégrale pouvant donc être écrite comme :

$$W(u) = -\gamma - \ln(u) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1} u^k}{k k!}, \quad (4)$$

- u est la variable de Theis,
- γ est la constante d'Euler-Mascheroni valant approximativement 0,577216.

En ce qui concerne les dimensions des variables, nous avons :

$$h \text{ [L]} \quad S \text{ [-]} \quad T \text{ [L}^2 \cdot \mathbf{T}^{-1}] \quad t \text{ [T]} \quad Q \text{ [L}^3 \cdot \mathbf{T}^{-1}] \quad s \text{ [L]} \quad W \text{ [-]} \quad u \text{ [-]}$$

En théorie, la méthode de Theis ne requiert qu'un seul piézomètre pour déterminer les paramètres hydrodynamiques T et S . En pratique, on obtiendra autant de couple (T , S) que l'on aura installé de piézomètres car les conditions de terrain ne respectent jamais toutes les conditions d'établissement des équations théoriques. Pour bien connaître un aquifère, il est préférable d'avoir plusieurs points d'observation (piézomètres) pendant un essai de pompage, ce qui permet de faire une évaluation beaucoup plus précise qu'avec un seul piézomètre.

Ce type de modélisation analytique faisant intervenir les équations de la physique donne lieu à un modèle de connaissance qualifié donc de " boîte blanche ". La démarche de la section suivante qui tient compte des signaux d'entrée et de sortie sans se soucier des équations, permet d'obtenir un modèle de comportement qualifié de " boîte noire ".

5 Modélisation boîte noire

Une approche souvent utilisée en automatique consiste à faire une analyse des signaux d'entrée et de sortie d'un système afin de procéder à sa modélisation [6]. En effet, au regard de l'évolution des sorties du système, il est possible de définir la structure d'un modèle. Ensuite, des algorithmes d'identification permettent de caractériser ce modèle, c.-à-d. d'estimer la valeur de chaque paramètre de manière à ce que la sortie du modèle ressemble au mieux à celle du système pour un même jeu de signaux d'excitation. Le modèle est appelé modèle "boîte noire" ou comportemental dans le sens où il ne fait pas appel aux équations explicites des phénomènes physiques mis en jeu.

Dans le présent cas, il est tout à fait possible d'imposer la forme des signaux d'entrée et de faire une analyse des sorties correspondantes afin de proposer un modèle boîte noire. Plus précisément, on va considérer un pompage au niveau d'un puits pour ensuite analyser le comportement des autres puits avoisinants. Un modèle de comportement devra être proposé pour chaque puits avoisinant de manière à pouvoir cartographier leur dépendance avec le puits pompage. Cette étude pourra venir conforter la carte de diffusivité (figure 5) obtenue par une approche analytique.

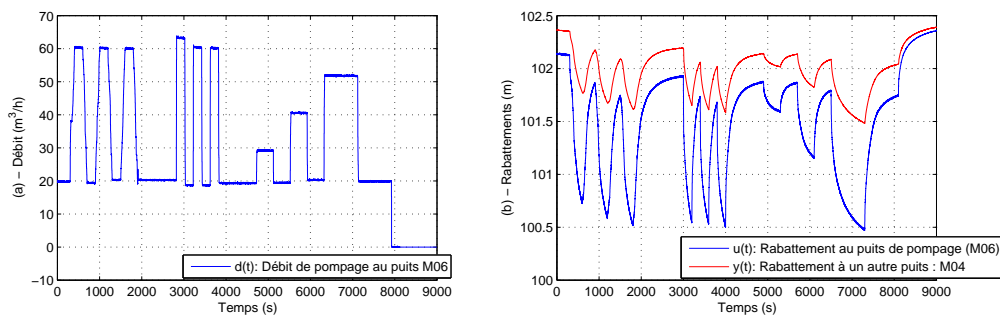


FIGURE 6 – Données expérimentales : les signaux d'entrée et de sortie

Dans ce but, une campagne d'essai a été lancée en mars 2012. Sur la figure 6(a), on peut voir l'évolution du débit de pompage appliqué au puits M06. Ce pompage donne lieu à un rabattement $u(t)$ au même puits indiqué en bleu sur la figure 6(b). Par conséquent, si on analyse un autre puits (ex. M04), on obtient un rabattement $y(t)$ tel qu'illustré en rouge sur la même figure. L'idée est de modéliser le lien qui existe entre le rabattement du puits M06 et celui du puits M04.

On constate une lente décroissance du rabattement sur l'horizon expérimental. Ce phénomène, qui est logique puisque l'apport d'eau extérieur à l'aquifère est négligeable pendant la durée de l'expérience, ne sera pas considéré dans les premières études de modélisation par soucis de simplicité.

Considérons comme modèle la fonction de transfert suivante :

$$H_1(p) = \frac{G}{1 + \tau p} \quad (5)$$

Grâce aux signaux d'entrée $u(t)$ et de sortie $y(t)$, il est possible d'identifier le gain statique G et la constante de temps τ du modèle $H_1(p)$ à l'aide d'un algorithme à erreur de sortie tel que celui de Levenberg-Marquardt [8]. Ce genre d'algorithme connu également comme la méthode du modèle fait appel à une programmation non-linéaire dans le but de minimiser l'écart entre la sortie du modèle et celle du système par le biais de la minimisation d'un critère.

Comme proposé dans [1], l'estimation paramétrique de la fonction de transfert $H_1(p)$ est réalisée sur deux phases distinctes :

- une phase dite de *descente* : en présence d'un pompage forcé, les niveaux des puits baissent,
- une phase dite de *remontée* : en arrêtant le pompage forcé, les niveaux remontent.

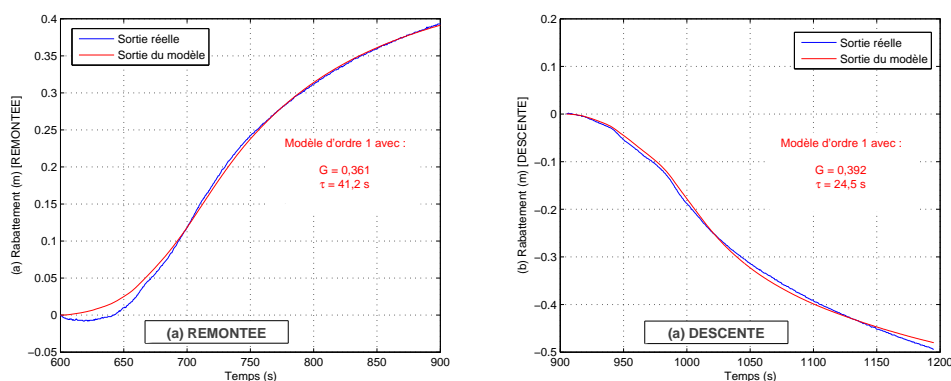


FIGURE 7 – Résultat de modélisation : (a) en remontée, (b) en descente

La figure 7 montre les résultats d'identification de $H_1(p)$ pour chacune des deux phases. On peut constater que, même si les gains statiques sont du même ordre de grandeur, les constantes de temps des deux modèles obtenus sont clairement différentes. Ceci montre le comportement non linéaire de l'aquifère, phénomène bien connu des hydrogéologues.

Les modèles linéaires classiques ne sont donc pas adaptés pour représenter ce comportement. Dans ce sens, nous proposons une modélisation à deux modèles avec une commutation à chaque changement de mode (descente/remontée). Concrètement, si on considère une structure de transfert du premier ordre, nous obtiendrons une constante de temps et un gain statique pour chacun des deux modes. Le modèle envisagé peut être décrit comme suit :

$$H_2(m, p) = m \frac{G_1}{1 + \tau_1 p} + (1 - m) \frac{G_2}{1 + \tau_2 p} \quad (6)$$

où $m = 1$ pour une phase de descente et $m = 0$ pour une phase de remontée.

6 Conclusion et perspectives

Le SEH de Poitiers représente un banc d'essai très prometteur dans le domaine de l'hydrogéologie. Inscrit au plan national comme Service National d'Observation H^+ , le SEH offre une opportunité pour les chercheurs d'étudier, en milieu fracturé, l'écoulement et le transport de polluants. Le SEH constitue aujourd'hui une plateforme scientifique opérationnelle pour l'accueil de projets scientifiques d'envergure nationale et internationale.

Le SEH peut également devenir une plateforme d'application pour la communauté de l'automatique, et plus particulièrement pour les chercheurs spécialisés en identification et modélisation expérimentale. Des collaborations peuvent être envisagées en vue de confronter de nouveaux modèles à la modélisation d'un aquifère. A plus long terme, d'autres compétences de l'automatique pourront être mises en œuvre pour la localisation de pollution, l'étude d'impact, etc.

Les premiers travaux réalisés par le LIAS ont mis en évidence le comportement non linéaire d'un aquifère. *In fine*, les modèles comportementaux obtenus pourront servir à la validation des modèles analytiques, à la compréhension du fonctionnement des aquifères et au développement d'un simulateur parcimonieux. Ces modèles seront plus facilement manipulables que les modèles analytiques.

Les travaux en cours concernent l'identification d'un modèle commuté pour permettre la représentation des dynamiques différentes en descente et en remontée, comportement propre aux aquifères. Il est également envisagé d'utiliser une modélisation 2D. En effet, comme l'équation

analytique (2) fait intervenir des dérivées partielles, il nous semble intéressant de proposer un modèle à deux dimensions : le temps t et la distance r du puits considéré au puits de pompage. D'autres aspects de l'automatique comme les systèmes MIMO, non linéaires ou à retard peuvent être envisagés, laissant ainsi le SEH ouvert à d'autres automaticiens pour effectuer une application réelle.

En ce qui concerne les hydrogéologues, il est à souligner que cette démarche de caractérisation de l'inter-dépendance des puits constitue une étude préliminaire à une étude de transfert de masse. En effet, l'idée est de pouvoir simuler la propagation de polluants en injectant un marqueur particulier (un traceur fluorescent par exemple) en un puits donné et en observant sa propagation à un autre puits préalablement désigné comme " sensible ". Les chercheurs s'intéresseront notamment à la quantité de molécules propagées ainsi que la vitesse de propagation.

Références

- [1] Abdelmoula M., *Modélisation expérimentale de l'aquifère du Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers*, Mémoire de Stage Recherche M2, Master Sciences, Technologies, Santé, mention Informatique, Télécommunications, Université de Poitiers, 2012.
- [2] Audouin O., *Intégration-inversion de données géologiques et mesures hydrodynamiques in situ pour le conditionnement d'un modèle 3D d'aquifère calcaire : Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers, France*, Thèse, Université de Poitiers, 2007.
- [3] Bernard, S., *Caractérisation hydrodynamique des réservoirs carbonatés fracturés : Application au site expérimental hydrogéologique (SEH) de l'université de Poitiers*, Université de Poitiers, 2005.
- [4] Chatelier M., *Faisabilité d'un pilote de dénitrification in situ dans un aquifère karstifié*, Thèse, Université de Poitiers, 2010.
- [5] Kaczmaryk A., Delay F., *Improving dual-porosity-medium approaches to account for karstic flow in a fractured limestone : Application to the automatic inversion of hydraulic interference tests (Hydrogeological Experimental Site, HES - Poitiers - France)*, Journal of Hydrology, n 347, pp. 391-403, 2007.
- [6] Ljung L., *System identification. Theory for the user*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2nd edition, 1999.
- [7] Theis C. V., *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. Transactions, American Geophysical Union, n 16, pp. 519-524, 1935.
- [8] Trigeassou J. C., Poinot T., *Identification des systèmes*, chapitre *Identification des systèmes à représentation continue*, pp. 177-212, Hermes, I.D. Landau and A. Besançon-Voda edition, 2001.
- [9] *Le Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de l'Université de Poitiers*, Bilan 2000-2006, XIIème CPER - Programme EAUX - Opération RES'EAUX, Université de Poitiers, 2006.