Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Écologie

Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

Modélisation des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère calcaire, fracturé et karstifié du Site Expérimental Hydrogéologique de Poitiers

Sandro Rinaldi

Directeurs de recherche : Christophe Grenier
Emmanuel Mouche

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (UMR 1572 CEA/CNRS/UVSQ)
Centre d'Etudes de Saclay, Orme des Merisiers,
91 191 Gif-sur-Yvette Cedex

Date : 01 / 09 / 2008

Résumé :

Cette étude vise d'abord à comprendre les caractéristiques hydrodynamiques du système aquifère à l'aplomb du Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers à l'état actuel. Le but est de simuler les essais de pompage de longue durée qui ont été fait sur ce site en 2005. Le système aquifère étudié est caractérisé par une forte complexité due à la grande hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques qui découlent de la nature à la fois fracturée et karstique des calcaires qui composent l'aquifère. Au cours du rapport un rappel des modèles analytiques utilisés en hydrogéologie pour décrire les milieux hétérogènes est fait. Ensuite sont présentés le site SEH et les résultats des études qui ont été jugé être les plus pertinents à la compréhension hydrogéologique du système. Au cours du stage nous avons retenu comme pertinente et nécessaire une analyse approfondie de la dernière campagne des pompages de longue durée effectuée au 2005 sur le site SEH. Les hypothèses issues de cette analyse sont exposées et discutées. Deux modèles conceptuels en deux dimensions ont été mis en place et calés sur les données de la campagne analysée. Les résultats obtenus sont ensuite exposés et commentés. L'objectif final du stage est la prédiction du comportement du site soumis à des tests en dipôle (extraction – injection), ces tests seront menés sur le site dans les mois à venir. Les tests en dipôle ont été simulés avec le modèle jugé le plus pertinent, ces simulations "prédictives" sont finalement présentées et commentées.

Abstract :

This study aim to understand the hydrodynamic characteristics of the aquifer system in the Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) of Poitiers to the current state. The aim is to simulate the long duration pumping tests that have been done on this site in 2005. The studied aquifer system is characterized by a high complexity due to the great diversity of hydrodynamic properties of the aquifer. The nature of limestone, both fractured and karst, making up the aquifer is the cause of this strong heterogeneity. The report begins with a reminder of analytical models used to describe the hydrogeological heterogeneous environments. Then are presented the site SEH and the results of studies that have been judged to be the most relevant for the understanding of the aquifer system. During the training period we have considered that it was necessary to conduct a thorough analysis of the last campaign of long-term pumping done on the site SEH (2005). The assumptions derived from this analysis are presented and argued. Two conceptual models in two dimensions have been established and aligned on data analysis of the campaign. The results are then exposed and commented. The ultimate objective is to predict the behavior of the site tested in dipole (extraction - injection), these tests will be conducted on the site in the coming months. The dipole tests were simulated with the model considered as the most relevant and these simulations are finally shown and discussed.

Table des matières

1 Introduction....4
2 Le Site Experimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers....4
2.1 Le contexte géologique....5
2.2 Les travaux menés jusqu'à présent sur le site SEH....6
3 Caractérisation géologique et géophysique....7
3.1 Caractérisation des lithologies de l'aquifère....7
3.2 Caractérisation des fractures et des conduits karstiques....8
3.3 Localisation des principaux niveaux de drainage....9
3.4 Conclusion sur les études géologiques....10
4 Les études hydrogéologiques....10
4.1 Les essais de nappe (tests d'interférence de longue durée)....11
4.1.1 Les caractéristiques communes aux deux campagnes :....12
4.1.2 Les caractéristiques de la C2004....13
4.1.3 Les caractéristiques de la C2005....13
4.2 Les interprétations des courbes....14
4.3 Les essais par choc hydraulique....15
4.4 Conclusions issues des études des tests hydrogéologiques....17
5 L'analyse détaillée de la campagne C2005....17
5.1 Comportements récurrents tout au long de la campagne....17
5.1.1 Puits avec les effets de la réinjection....17
5.1.2 Puits sans les effets de la réinjection....18
5.2 Anomalies enregistrées au long de la campagne....20
5.3 Conclusions issues de l'analyse....21
5.4 Extraction des courbes en vue du calage....21
5.5 Estimation des propriétés hydrodynamiques avec le modèle analytique Double Porosité (DP)....22
6 Les modèles conceptuels et les résultats des calages....23
6.1 Le modèle conceptuel type fracture verticale (FV)....24
6.1.1 Le modèle conceptuel à une fracture verticale....25
6.1.2 Analyse du comportement du modèle type fracture verticale après le calage sur le courbe expérimentale type drain....27
6.1.3 Modèle conceptuel à deux fractures perpendiculaires verticales....27
6.1.4 Conclusions sur le modèle conceptuel type fractures verticales....28
6.2 Le modèle conceptuel : Boite à Sucre Triple Milieu (BSTM)....29
6.2.1 Caractéristiques du modèle conceptuel BSTM et les résultats obtenus....30
6.2.2 Analyse du modèle conceptuel BSTM durant la simulation....33
6.2.3 Simulation de la campagne C2004 avec le modèle conceptuel BSTM calé sur la campagne C2005....34
6.3 Conclusions sur les modèles conceptuels FV et BSTM....35
7 Simulation prédictive des tests en dipôle....36
8 Conclusions....37
9 Perspectives....38
Bibliographie....39
ANNEXES....41
1 Annexe : Schéma résolution éléments finis mixtes hybrides (EFMH)....41
2 Annexe : Modèles classiques pour les milieux fracturées....42
1 Modèle d'écoulement radial généralisé (GRF)....42
2 Modèle double porosité (DP)....44
3 Modèle à une fracture verticale....47
3 Annexe : Tests de la campagne de pompages 2005....49

1 Introduction

Ce rapport s'inscrit dans le cadre des études menées par le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Unité Mixte de Recherche CEA/CNRS/UVSQ, sur les transferts en milieux hétérogènes complexes. Le travail fait partie du projet intitulé EC2CO/MACH-1 (Modélisation des Aquifères Carbonatés Hétérogènes – 1. Dynamique des écoulements). Ce projet est soutenu par l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), et depuis 2006 il rentre dans le programme de recherche nationale ORE H+ avec d'autres sites expérimentaux (Ploemeur, Cadarache, Montpellier). Les travaux de forage et les études annexes ont démarré en 2002. Ce site a fait l'objet de plusieurs études de différentes disciplines scientifiques dont les prédominantes sont l'hydrogéologie, la géophysique et les observations géologiques. Différents articles et deux thèses (*Bernard 2005* et *Audouin 2007*) ont été publiés jusqu'à présent, et actuellement d'autres études ou expérimentations sont en cours (traçages chimiques et modélisation numérique). Le projet MACH-1 vise à établir un benchmark hydrogéologique du Site Expérimental Hydrologique (SEH) de Poitiers à partir de différentes approches conceptuelles et numériques de modélisation. Différentes équipes travaillent donc afin de rejoindre l'objectif du projet MACH-1 : analyser la pertinence des différents modèles dans leur manière d'appréhender l'hétérogénéité multi-échelle du milieu.

La présente étude vise à proposer un modèle numérique capable de reproduire les principales caractéristiques hydrogéologiques du système étudié et de les distribuer spatialement. A cette fin deux modèles conceptuels ont été mis en place au cours de cette étude. Les deux modèles ont été implémentés dans le code de calcul Cast3M (ou Castem 2000) qui a été développé par le Département Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). Ce code de calcul, originellement développé en éléments finis pour la mécanique des structures, met désormais à disposition différentes approches numériques en fonction des applications (éléments finis, volumes finis, éléments finis mixtes hybrides). Dans cette étude, pour simuler les tests de pompage pour notre modèle hydrogéologique du site SEH, nous utiliserons un schéma aux Éléments Finis Mixtes Hybrides (EFMH) (cf. Annexe 1).

2 Le Site Experimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers

Le site expérimental hydrologique (SEH) est situé dans le département de la Vienne, à environ trois kilomètres au sud-est de Poitiers : au Deffend, Mignaloux Beauvoir (cf. Figure 1). Il rentre dans le versant sud du bassin parisien. Le site est localisé sur le plateau nommé géologiquement le "Seuil du Poitou" (en anglais : The "Poitou threshold"), ce plateau est placé entre le Massif Armoricain au nord-ouest et le Massif Central au sud-est (cf. Figure 2).

Figure 1 : Placement géographique du site SEH.

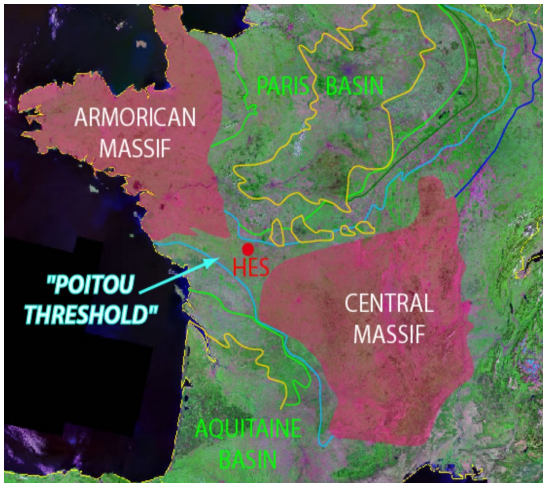


Figure 2 : Placement géologique (HES en anglais).

2.1 Le contexte géologique

Le seuil du Poitou constitue un vaste domaine surélevé par rapport aux bassins parisien et aquitain mais en dépression par rapport aux massifs anciens de la Vendée et du Limousin. Le seuil du Poitou est une zone surélevée passant par Parthenay, Vivonne, Champagné St. Hilaire et l'Isle Jourdain. L'altitude moyenne du plateau est entre 100 et 130 mètres. Au temps de la mer Mésozoïque cette zone séparait la France en deux bassins sédimentaires : le bassin parisien au nord-est et le bassin aquitain au sud-ouest (*Bernard 2005)*. Le seuil du Poitou a une base granitique "Hercynienne" (Ère Précambrienne et Ère Primaire) fortement érodée et qualifiée de socle. Ce substratum est couvert par des sédiments carbonatés et détritiques (Ère Secondaire et Ère Tertiaire) qui sont issus de plusieurs épisodes de sédimentation marine (cf. Figure 3) *(Gaumet 2007)*.

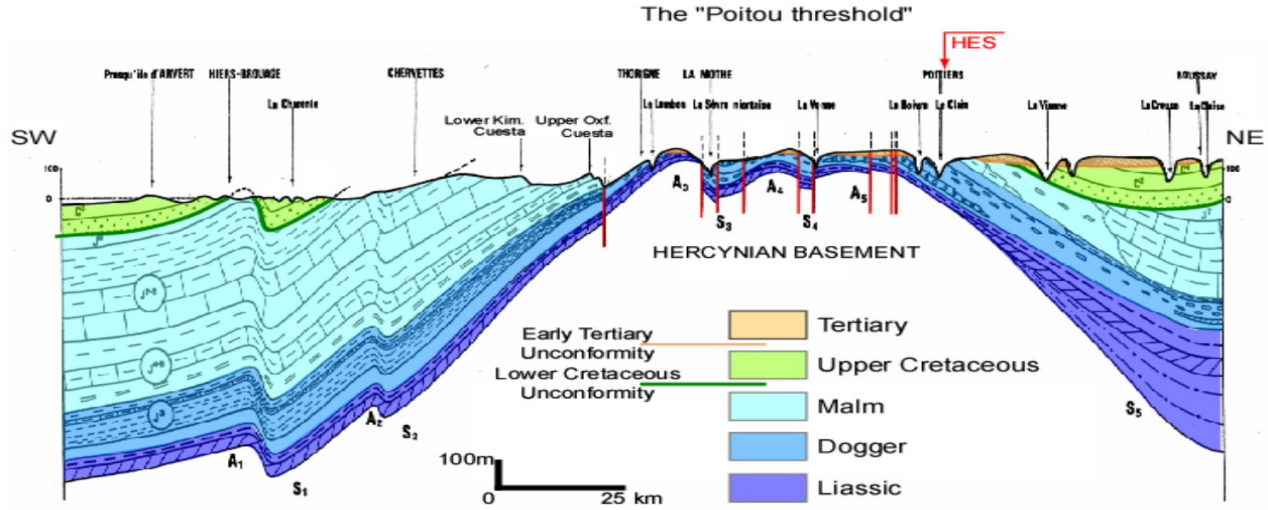


Figure 3 : Section géologique du Seuil de Poitou, la localisation du site SEH en rouge (A=anticlinal, S=synclinal)

Les sédiments carbonatés constituent la grande partie des roches mésozoïques du site SEH. Ils se sont mis en place pendant le Jurassique inférieur (Toarcien) et moyen (Bajocien, Bathonien et Callovien). L'intervalle temporel de formation de ce système est donc de 40 millions d'années environ. Le domaine des dépôts au cours de ces périodes a changé de lagune profonde / bassin (jurassique inférieure), à une marge de plateforme bas / profond (jurassique moyen). À l'époque des dépôts, sur le bassin de Paris et la partie Nord-Est du seuil de Poitou, les conditions climatiques prédominantes étaient tropicales.

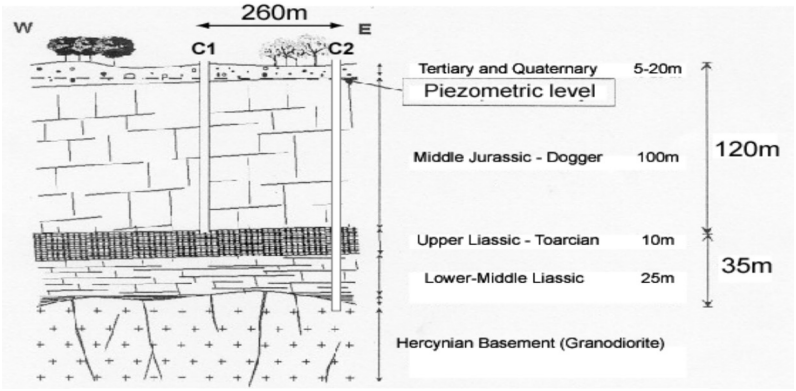


Figure 4 : Section géologique simplifiée à l'aplomb du site SEH (C1 et C2 sont les deux forages carottées)

Deux aquifères sont présents dans les sédiments du site : le plus profond dans les calcaires du Lias et le supérieur dans les dépôts calcaires jurassiques. Ces deux formations sont séparées par la couche imperméable des marnes du Toarcien (Lias supérieur). L'aquifère traité dans cette étude est l'aquifère supérieur du Dogger (jurassique moyen). Au niveau du site SEH, cette couche calcaire

présente une épaisseur moyenne de 100 mètres (cf. Figure 4) (*Gaumet 2007)*. La limite supérieure de l'aquifère est constituée par des dépôts détritiques du tertiaire qui forment une couche imperméable donnant le caractère captif au site. Au niveau du site, l'aquifère est donc captif avec des surpressions d'environ de 1 à 1,5 bars (*Bernard 2005*). Les calcaires du jurassique moyen sont caractérisés par une double porosité (matrice / fissures) et des chenaux karstiques. Ces chenaux engendrent des zones d'écoulement à forte transmissivité (*Audouin 2007*). Les formations constituant l'aquifère étudié (calcaires) sont visibles par des affleurements au sud, au centre et à l'est du département de la Vienne.

2.2 Les travaux menés jusqu'à présent sur le site SEH

Un grand nombre des puits a été foré pendant trois campagnes de forage : en 2002, en 2003 et en 2004. Les forages ont été soit destructifs (la majorité) soit carottés (nombre de quatre). La majorité des puits a été disposée afin d'obtenir une géométrie du type "five spot" "imbriqués". La disposition "five spot" (en français : "cinq lieux") est typique du domaine pétrolier, elle présente le puits de pompage au centre et quatre puits d'observation placés autour, formant un carré. Les puits d'observation sont donc équidistants du puits de pompage. Sur le site, 25 puits ont été placés pour obtenir plusieurs systèmes "five spot" avec 4 tailles caractéristiques différentes (imbriquées). Ainsi on a obtenu un système de puits qui permet d'étudier la même géométrie à des échelles spatiales différentes. Les dispositions possibles sont 24 en tout (cf. Figure 5).

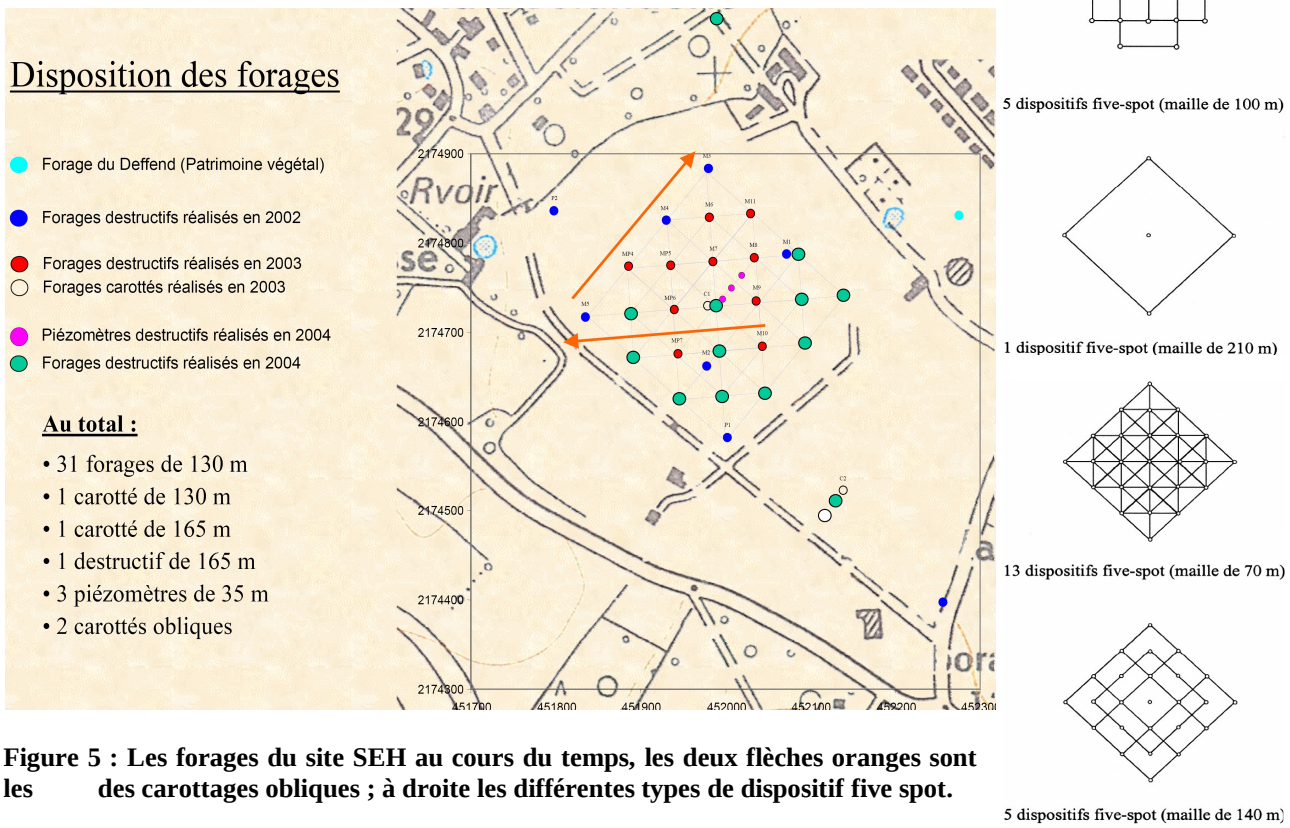


Figure 5 : Les forages du site SEH au cours du temps, les deux flèches oranges sont les des carottages obliques ; à droite les différentes types de dispositif five spot.

D'autres puits ont été forés sur le site en dehors de cette géométrie. Les puits carottés sont au nombre de quatre : les deux carottages plus anciens sont verticaux (C1 et C2) et les deux récents ont un pendage avec la surface de 26° et 33° (respectivement C3 et C4). Ces carottes sont actuellement en phase d'étude et elles permettront des études de stratigraphie et de facturation de la roche supplémentaires. Des campagnes de géophysique, en puits et de surface, ont été menées et elle ont permis de reconstituer les relations entre les puits. Cela sera détaillé par la suite. Trois campagnes de tests d'interférence ont été faites en 2003, 2004 et 2005, après les différentes campagnes de forage, elles seront détaillées ultérieurement.

3 Caractérisation géologique et géophysique

Des études géologiques et géophysiques ont été menées sur le site SEH et aux alentours. Plusieurs moyens d'investigation ont été utilisés pour explorer les propriétés de l'aquifère étudié. Dans ce chapitre nous résumons les études et les notions que nous avons jugées les plus utiles pour la compréhension hydrogéologique du système.

3.1 Caractérisation des lithologies de l'aquifère

L'analyse des forages carottés donne une reconstruction stratigraphique selon les époques (*Gaumet 2007)*. Ces différentes époques de sédimentation ont des caractéristiques lithologiques reconnaissables à partir des analyses des carottes issues des forages carottés, et des propriétés géophysiques, déterminables par des mesures de diagraphie (*Audouin 2007-08)*. Les données litho-stratigraphiques issues des forages carottés et les données diagraphiques issues de la géophysique en puits ont été confrontées et des relations ont été trouvées. Suite à ces travaux les couches et propriétés associées suivantes ont été identifiées. Ci-après, on reprend de la profondeur vers la surface les 5 niveaux qui constituent l'aquifère étudié (jurassique moyen) (*Gaumet 2007)*, les couches sont nommées selon l'époque de déposition :

1. *Toarcien* :

Il correspond à la transgression marine de hauteur maximale avec un régime marin franc. L'épaisseur de la couche varie entre 2 et 15 mètres, cette couche est composée de marnes bleues et calcaires argileux bioclastiques avec des bioturbations. Cette couche est la première au dessus du substratum de l'aquifère. À cause de la présence d'argiles elle présente une résistivité électrique relativement faible comparée aux carbonates de l'aquifère.

2. *Aalénien* :

Il est divisé en deux parties du fait du passage d'un dépôt clastique à un dépôt carbonaté. Cette évolution est due au changement climatique de cette époque. La première partie a une épaisseur de 10 mètres environ et elle est considérée comme étant la limite inférieure de l'aquifère étudié. La deuxième partie est une séquence de transgression - régression avec environ 10 m d'épaisseur (de 110 à 100 environ), cette couche présente de la dolomitisation. Relativement à la résistivité moyenne du site, l'Aalénien montre des valeurs faibles et décroissantes avec la profondeur à cause de l'augmentation des matériaux argileux.

3. *Bajocien* :

La couche du Bajocien présente une épaisseur importante (55 m) qui va de 100 à 45 mètres de profondeur par rapport à la surface. Elle a été formée par trois dépots successifs et différentiables par l'alternance des calcaires bioclastiques et clastiques qui correspondent respectivement aux cycles de transgression et de régression marine. Les matériaux montrent le passage d'une déposition de plateforme externe à ceux de barrière. Il y a la présence de quelques accidents siliceux. Une forte résistivité (4000 Ω.m) caractérise cette couche, des pics de plus faible résistivité sont observés, ils correspondent à des zones dolomitiques ou à macroporosité (vugs).

4. *Bathonien* :

Cette couche s'étale sur 20 m d'épaisseur (de 45m à 25m), elle présente un changement de "grainstone" non structuré en bas au "packstone" au centre et "wackstone" structuré *(nomenclature Dunham 1964).*

5. *Callovien* :

C'est la dernière couche de l'aquifère, elle est le toit des sédiments du Dogger. Elle prend les derniers 20 m d'épaisseur qui sont constitués par des calcaires et de la craie.

Enfin l'ensemble aquifère est recouvert par les argiles rouges bariolées du tertiaire. Le passage entre les époques est souvent marqué dans les signaux géophysiques. Une diminution de la résistivité, qui passe de 4000 à 2500 (Ω.m), marque la transition entre le Bajocien et le Bathonien. Un pic de résistivité est observé entre le Aalénien et le Bajocien, ce pic est observé sur tous les puits du site, il est donc très important comme marque stratigraphique. La distribution des marques sur le site indique une stratification des niveaux continue et globalement sub-horizontale (moins d'un degré vers l'ouest). Une émersion complète a eu lieu pendant tout le Crétacé inférieur. Cette époque est caractérisée par le fait que la région subit des climats très agressifs de type tropical qui provoquent une importante érosion. C'est probablement à cette époque que commence la karstification par la dissolution des calcaires du Dogger. Les poches de dissolution ont été ensuite remplies par des argiles riches en matière organique. L'imagerie de paroi identifie des drains karstiques ouverts et des passées argileuses dans la formation, ces passes correspondent au remplissage argileux des karst ou des fractures. Les valeurs du rayonnement Gamma Naturel (NG) sont généralement faibles, mais des pics ont été trouvés en correspondance avec des cherts siliceux. Ces cherts siliceux sont postérieurs à la sédimentation, ils sont donc liés à la circulation des fluides dans la roche calcaire. Le lien avec le NG indique que des solutions riches en silice et uranium ont circulé autour des cherts siliceux. On pourra se reporter à *Gaumet (2004)*, *Gaumet (2007)*, *Audouin (2007)* et *Bernard (2005)* pour plus de détails.

3.2 Caractérisation des fractures et des conduits karstiques

Les travaux d'observation des affleurements du calcaire jurassique composant l'aquifère ont permis d'établir des directions de facturation préférentielles. Ces fractures pouvant être mises en lien avec l'historique de la dynamique des contraintes. Deux campagnes d'observations ont été faites. Une analyse conséquente a été faite par *Burbaud et Vergneaud (1987)* (cf. Figures 6 et 7).

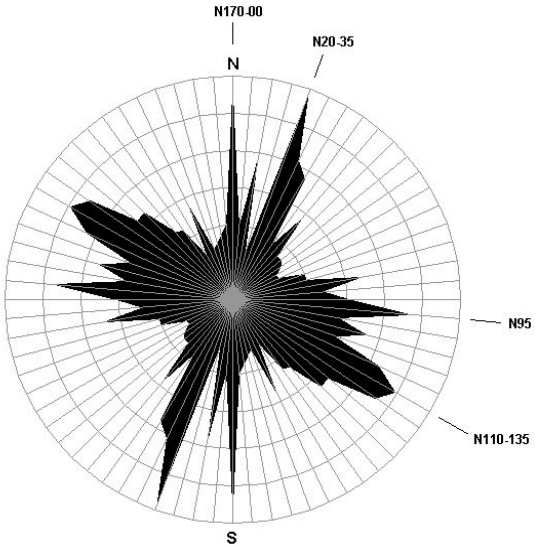


Figure 6 : Directions principales des fractures régionales.

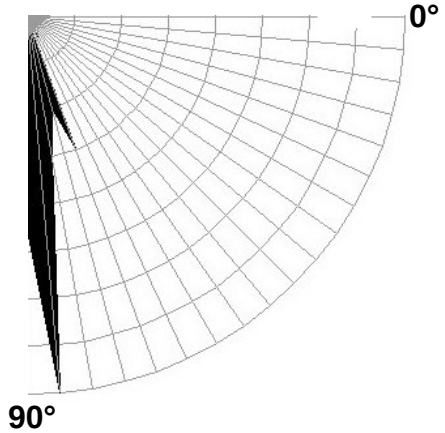


Figure 7 : Pendages prépondérants

De cette analyse ressortent quatre directions dominantes N20-30, N95, N110-135 et N0-170, les pendages sont aussi majoritairement sub-verticaux. Les résultats tels que reportés par *Bourbiaux (2007)* sont issus d'un travail mené par l'Institut Français du Pétrole (IFP) en 2005. Trois familles principales d'orientations ont été trouvées pour les niveaux du Bajocien et le Bathonien : N50 N120 et N170. Les fractures ne présentent pas ou peu de déplacement apparent et sont à pendage sub-vertical *(Bernard 2005).* L'espacement des fractures dans les deux études va des décimètres aux

décamètres. Des études ont été faites conduisant à une reconduction historique des contraintes liées aux phases tectoniques (*Bernard 2005)* (*Audouin (2007)*. Ce point ne sera pas développé plus avant dans la suite du présent document.

Des cartographies spéléologiques des principaux conduits karstiques (plus de 2 mètres de diamètre) qui ont été explorés aux alentours du site ont été analysées. On retrouve pour ces conduits les mêmes directions prédominantes de la facturation (N0 et N120), puis une nouvelle direction a été observée, N135 (cf. Figure 8).

Des études de la fracturation dans les puits du site SEH ont été faites avec de la géophysique des forages (sismique, imagerie de paroi et débitmétrie). La direction principale des fractures qui résulte de cette étude est différente par rapport aux études des observations des affleurements (*Audouin 2007)*. La direction principale est N90 et la direction secondaire est N120 (cf. Figure 9). Seulement un très faible pourcentage des fractures observées est actif : 11 fractures sur les 390 observées, donc moins de 3% présentent un écoulement significatif. En revanche nous rappelons que cette analyse de la fracturation par géophysique en puits au niveau du site à été faite sans prendre en considération les deux forages obliques et carottées faits récemment.

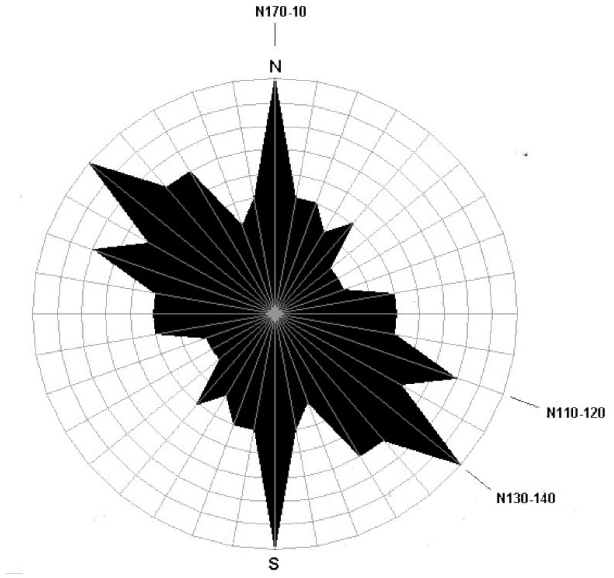


Figure 8 : Directions principales de karstification.

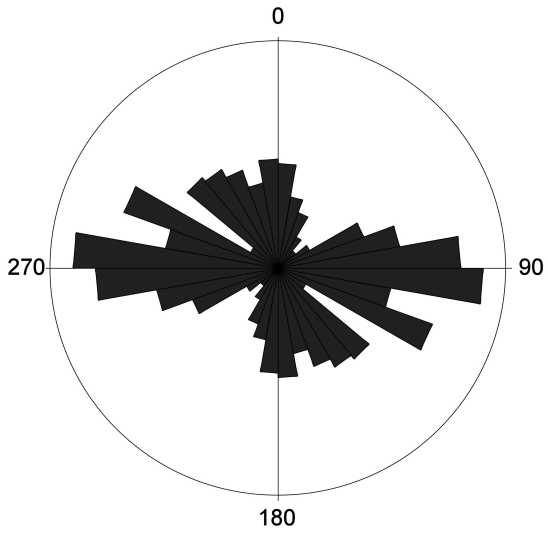


Figure 9 : Directions des fractures issues des études de l'imagerie de parois en puits.

Actuellement, les analyses de ces forages ne sont pas disponibles, ainsi seulement les puits verticaux ont été considérés pour cette étude. Concernant la pseudo verticalité des fractures, les résultats de l'analyse des nouveaux forages pourraient apporter des points de vue différents.

3.3 Localisation des principaux niveaux de drainage

Afin de localiser les principales zones d'alimentation de l'aquifère, des profils de débitmétrie verticale en puits ont été faits. Les résultats de cette campagne indiquent que, en conditions naturelles, aucun flux vertical n’est enregistrable dans les puits du SEH. Pendant le pompage, en revanche, 3 niveaux principaux de drainage ont été observés : à 50, à 85 et à 115 mètres de profondeur. Ensuite ces profils ont été mis en relation avec les observations issues de l'imagerie de paroi et des relations ont été observées. La relation montre une correspondance entre les observations des niveaux karstiques et les flux d'eau entrants (*Audouin 2007-08).* Chaque puits intercepte 0, 1 ou 2 de ces niveaux. Même la sismique en forage et de surface (*Bourbiaux 2007)* retrouve, aux mêmes niveaux, une diminution de signal qui indique la présence d'une cavité. Suite à ces études la distribution des niveaux débitants sur les puits du site SEH a pu être trouvée (cf. Figure 10).

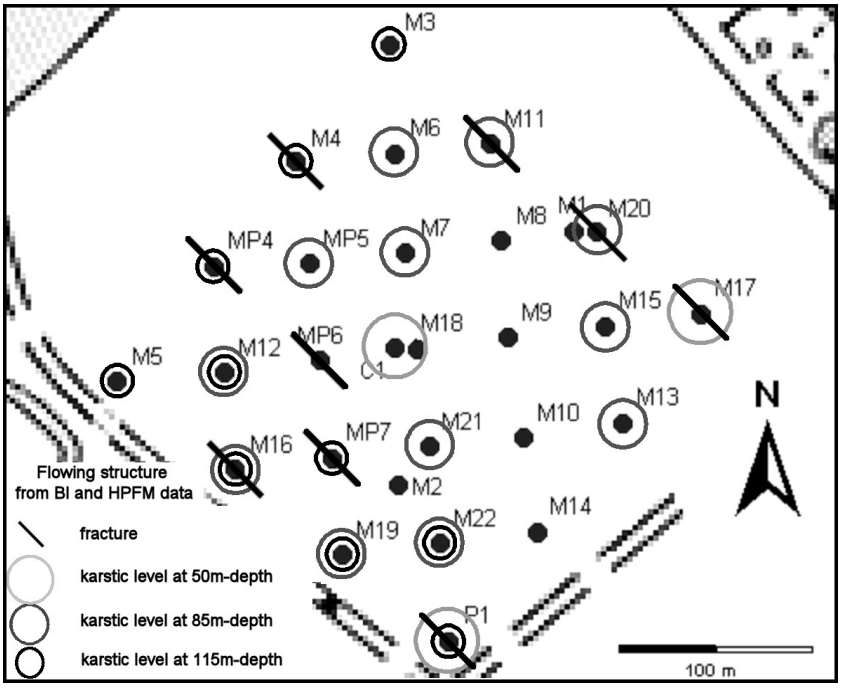


Figure 10 : Structures de drainage identifiées dans les puits du site SEH *(Audouin 2007-08).*

Le premier niveau karstique à partir du toit de l'aquifère est localisé autour de 50 mètres de profondeur. Il est caractérisé par un calcaire macroporeux (fracturé / fissuré) et par un débit à faible production (cf. Puits P1, M17 et C1). Le deuxième niveau est développé dans le Bajocien inférieur à une profondeur variable autour de 85 mètres. Les imageries de parois indiquent une épaisseur de couche qui a subi une karstification sur plusieurs mètres et une composition de calcaires dolomitiques poreux. Environ la moitié des puits du site montre une production importante à cette hauteur. Le troisième niveau (115 m) correspond au calcaire dolomitique du niveau des sédiments de l'époque de l'Aalénien (*Audouin 2007)*. Ce niveau apparait dans les puits à l'ouest du site.

3.4 Conclusion sur les études géologiques

L'aquifère investigué par 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 très 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 *(Audouin 2007).*

4 Les études hydrogéologiques

Trois types d'essais ont été menés sur ce site afin de connaître la distribution spatiale des paramètres hydrodynamiques et des productivités des puits forés:

1. Les essais de nappe ou tests d'interférence de longue durée (jours) : ils permettent d'identifier les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (T et S). Le rayon d'investigation (distance d'influence du pompage) de ces tests dépend de la durée du pompage et du débit pompé. En général ce rayon correspond à une échelle spatiale plutôt régionale.

2. Les essais de puits : ces sont des test de durées moyennes (heures), ils visent à connaitre les productivités des puits et ils fournissent une information sur la qualité des puits. On ne traitera pas de ces essais par la suite car ils n'apportent pas des informations sur les caractéristiques de la formation testée. Dans la démarche des études sur le site SEH ils ont été utilisés pour placer les tests de longue durée qui ont été faits sur les puits plus productifs.

3. Les chocs hydrauliques ou "slug test", essais de courte durée (minutes) : ils permettent aussi 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.

La carte des productivités des puits et des perméabilités sur le site (cf. Figures 15 et 16) donne une vue synthétique des résultats des essais menés sur le site SEH. La carte des perméabilités a été reconstruite après l'interprétation des essais par plusieurs méthodes.

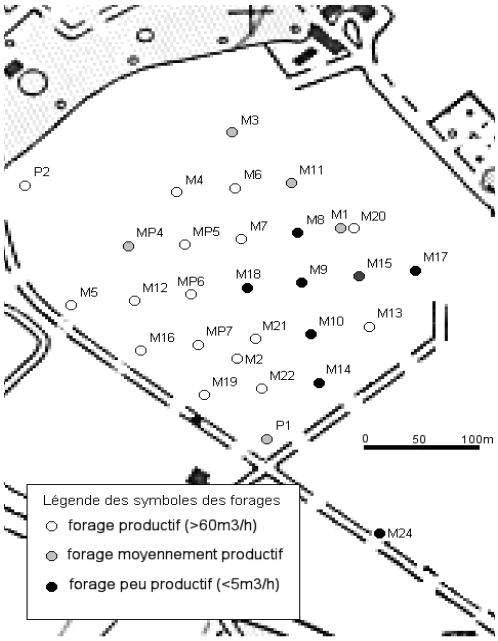


Figure 11 : Capacité de production des puits du site SEH *(Audouin 2007)*

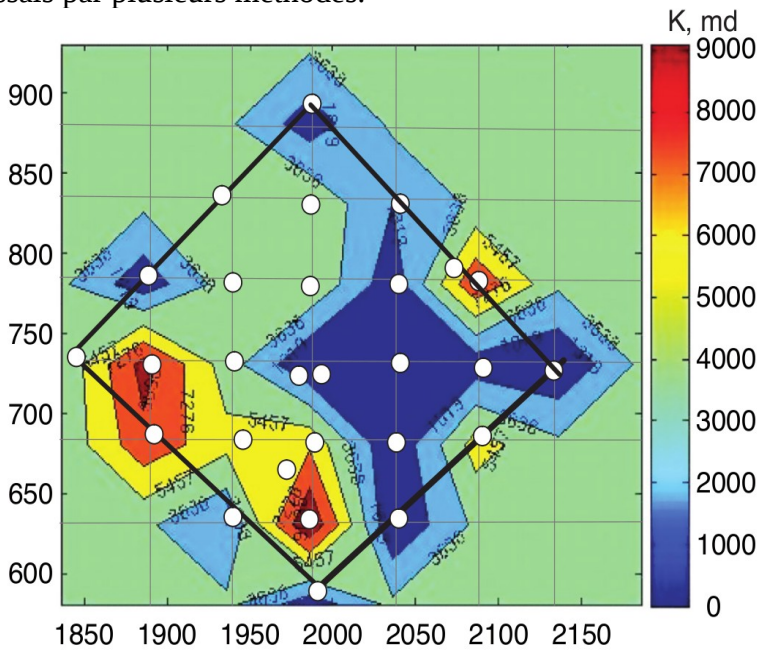


Figure 12 : Perméabilités des puits du site SEH en mDarcys *(Bourbiaux et al 2007)*

Les puits ont donc répondu avec des comportements très diversifiés, les perméabilités calculées sont comprises dans une gamme de 10^{-4} – 10^{-6} (m s^{-1}) soit 10^{2} – 10^{4} (md). Les méthodes d'interprétation les plus appropriées au milieu testé sont décrites plus bas dans le rapport.

4.1 Les essais de nappe (tests d'interférence de longue durée)

Trois campagnes de pompage ont été réalisées : en 2003, en 2004 et en 2005 après les campagnes de forage respectives en 2002, 2003 et 2004. Les durées et les débits des tests d'interférence ont été proportionnels aux rabattements observés. Les débits pompés ont varié entre 5 et 70 m^3 h^{-1} et les durées entre 1 et 200 heures en fonction de la capacité de production des puits (*Bernard 2005)*. Les campagnes de 2004 (C2004) et de 2005 (C2005) sont les seules qui ont été prises en considération pour la détermination des caractéristiques hydrodynamiques, car les pompages ont été faits sur des périodes plus longues et avec des débits plus importants par rapport à la campagne 2003. Les deux dernières campagnes fournissent une information plus complète du système étudié. Une forte hétérogénéité du milieu testé a été déduite de l'observation des tests. Des hypothèses particulières ont dû être considérées pour l'interprétation des réponses (des hypothèses d'écoulement de dimension non entière et double perméabilité (cf. Annaxe 2), (*Bernard 2005)*

(Kaczmarick 2007), (*Audouin (2007)*. Les réponses des tests d'interférence menés pendant les deux campagnes sont différentes (cf. Figures 13 et 14).

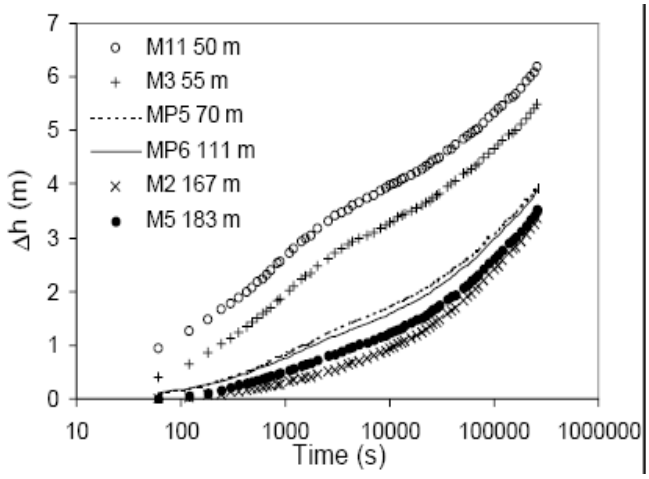


Figure 13 : Courbes de rabattement du pompage au puits M6 en 2004.

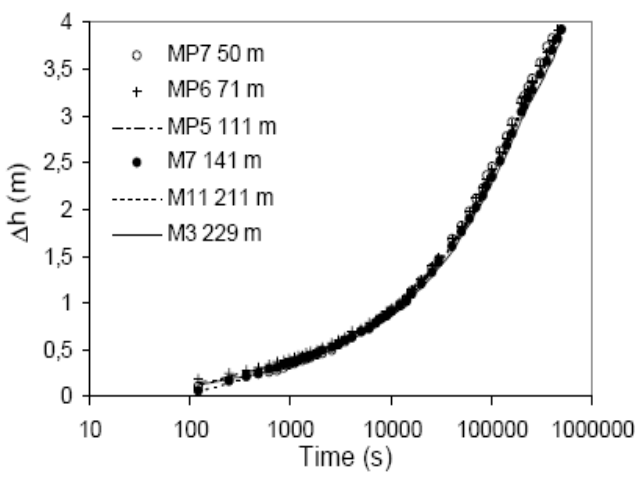


Figure 14 : Courbes de rabattement du pompage au au puits M16 en 2005.

En 2004 les courbes du rabattement en fonction du temps enregistrées dans les puits d'observation, ont des formes et des intensités très variables (cf. Figure 13). En 2005, au contraire, les courbes enregistrées ont la même forme et la même intensité de rabattement à tous les moments du pompage (cf. Figure 14), ces différences entre les deux campagnes seront reprises et détaillées par la suite. Une évolution des propriétés du système aquifère a donc été déduite entre le 2004 et le 2005. Les différences des réponses des deux campagnes concernent la variabilité des chroniques des puits d'observation. Pendant la première campagne de pompages considérée (C2004) un certain nombre des puits n'étaient pas encore réalisé (cf. Figure 5 à page 5 les points verts). Au contraire, la deuxième campagne considérée (C2005) a été menée après la finalisation des travaux de forage. La différence entre les deux campagnes n'est donc pas uniquement d'ordre temporel, car des puits ont été forés entre les deux campagnes de pompage. Ces forages supplémentaires sont probablement la cause principale du changement de la variabilité des réponses et donc du comportement hydrodynamique du site SEH. Même si les deux campagnes (C2004 et C2005) présentent des réponses différentes, nous retrouvons certaines caractéristiques communes. Ci-dessous, chaque groupe de caractéristiques, (commun aux deux campagnes, de la campagne C2004 et de la campagne C2005) est traité en particulier.

4.1.1 Les caractéristiques communes aux deux campagnes :

Les chroniques de rabattement au cours du temps des deux campagnes ont en commun :

1. Un rabattement en fonction logarithmique du temps non linéaire, mais convexe : cela est typique d'un régime transitoire d'un milieu fracturé, avec des paramètres hydrodynamiques qui varient dans l'espace et le temps (*Bernard 2005)*.

2. Le régime pseudo permanent n'est jamais atteint.

3. Il n'y a pas d'influence remarquable de la réinjection faite dans le puits P3 sur les puits du système carré "five spot" (*Bernard 2005).*

4. Pour les temps longs, tous les puits montrent des courbes d'évolution du rabattement en fonction du logarithme du temps parallèles. Cela peut indiquer qu'après un certain temps tous les puits sont compris dans un système unique de drainage (*Bourbiaux 2007).*

4.1.2 Les caractéristiques de la C2004

La campagne 2004 est caractérisée par une forte variation des réponses des puits d'observation aux pompages. Les puits d'observation réagissaient d'une façon différente selon le puits testé. Trois formes générales des courbes ont été enregistrées pendant la campagne de 2004 (cf. Figures 15, 16 et 17) *(Bernard 2005)*.

Les trois types de courbes de rabattement de la campagne C2004 (ordonnées en mètres et abscisses en secondes)

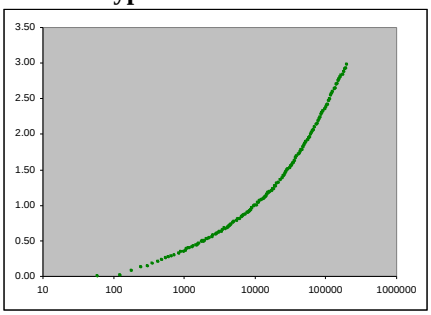


Figure 15 : Courbe type 1

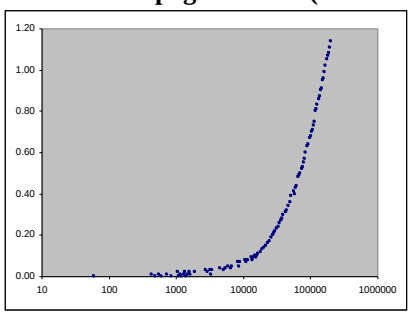


Figure 16 : Courbe type 2

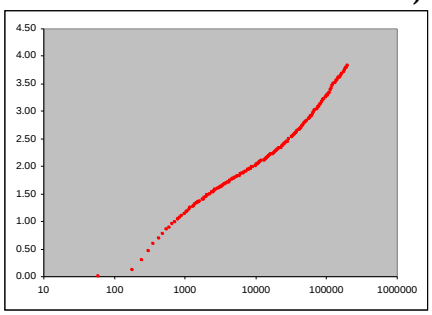


Figure 17 : Courbe type 3

La première courbe (type1) indique un ouvrage dont la connexion et la production sont potentiellement importantes. La deuxième courbe (type2) est typique des ouvrages où la connexion et les capacités de production restent faibles. La troisième courbe (type3) montre une forme à baïonnette : ce comportement est typique d'un milieu fracturé de type fractal, il fait référence à deux concepts possibles : soit un changement de dimension d'écoulement au cours du temps, soit un changement des caractéristiques hydrodynamiques au cours du temps (cf. Annexe 2). En général, les puits peu productifs présentent des courbes de type 2, et les puits très productifs, dépendent du puits testé, mais sont soit des courbes de type 1 soit des courbes de type 3. Pour plus des détail sur les ces courbes on consultera *Bernard (2005)*.

4.1.3 Les caractéristiques de la C2005

Pendant la campagne 2005 on observe la disparition de la variabilité des formes des courbes, en particulier, la forme de baïonnette (type 3) n'est plus enregistrée (*Kaczmarick 2007)*. Lors du test de pompage en M16 en 2005 tous les puits d'observation répondent de la même façon quelque soit leur distance au puits pompé (cf. Figure 14). L'hypothèse retenue pour expliquer l'homogénéisation des réponses et la disparition de la courbe à baïonnette est l'augmentation de la connexion du site. Les puits sont donc mieux connectés entre eux par un réseau principal de fractures ou drains très transmissifs. Deux raisons principales peuvent produire cette augmentation des connexions du réseau des canaux karstiques et fractures :

1. Les nouveaux forages effectués entre 2004 et 2005 (cf. Figure 5 à page 5 les points verts) qui ont pu créer de nouvelles connections entre les différents niveaux des conduites Karstiques (drains).

2. La destruction du colmatage partiel du réseau karst - fracture qui aurait été présent au départ (campagne 2004). *Audouin (2007)* remarque que l'eau pompée lors des premiers paliers de 2005 était très chargée en argile. Ainsi le long des campagnes de pompage ce colmatage serait de plus en plus réduit.

Cette variation de connexion se traduit par une augmentation du coefficient d'échange (*Bernard 2005)* qui repousse à des temps plus courts la réponse de la matrice au pompage en faisant disparaître la forme à baïonnette. Les caractéristiques des courbes de rabattement de la campagne

2005 (forte similarité entre eux et la forme convexe contre le logarithme du temps) sont imputables à deux phénomènes superposés (*Kaczmarick 2007)* :

1. L'onde de pression due au pompage est capable de se propager très rapidement.

2. Une propagation diffusive qui correspond au drainage d'un réservoir fracturé.

4.2 Les interprétations des courbes

Plusieurs études ont été faites pour interpréter les courbes des deux campagnes. L'inflexion convexe des courbes de rabattement versus le logarithme du temps est considérée comme un caractère anormal dû à la forte hétérogénéité du réservoir étudié. Cette inflexion peut être associée soit à un changement des caractéristiques hydrodynamiques au cours du pompage soit à un changement de la dimension de l'écoulement, (*Bernard 2006) (Delay 2007) (Kaczmarik 2007).*
Les analyses faites jusqu'à présent ont considéré les puits par "couple" : puits d'observation contre puits de pompage. La distribution spatiale en terme de champs de propriétés 2D ou 3D n'est pas prise en compte en compte par ces analyses.
Trois modèles analytiques avec différentes approches ont été utilisés pour l'interprétation des courbes, les trois sont fondées sur l'interprétation par couple de points :

1. Approche fractale à milieu unique (FUM) (*Bernard 2006)*;
2. Approche homogène à double milieu (HDM) (*Kaczmarick 2007)*;
3. Approche fractale à double milieu (FDM) (*Kaczmarick 2007)*;

Pour la C2004 comme pour la C2005 le modèle FUM ne réussit pas à reproduire les courbes de rabattement observées en homogénéisant le coefficient d'emmagasinement (paramètre de stockage). On observe une diminution importante du coefficient d'emmagasinement spécifique avec l'augmentation de la distance entre puits testé et celui d'observation. Donc ce modèle n'est pas adapté à l'interprétation de ces réponses. Les deux approches à double milieu permettent de reproduire les courbes de la campagne 2004, avec le milieu naturel (non perturbé) en homogénéisant les paramètres de stockage des milieux matrice et fracture. En revanche, pour l'inversion des courbes de la campagne 2005 les deux modèles double milieu ont le même problème que le modèle FUM (*Kaczmarick 2007).* Cela indique que l'approche double milieu est capable de reproduire des courbes de rabattement qui évoluent plus rapidement que le logarithme du temps de la campagne 2004. En revanche le milieu perturbé, la campagne 2005, présente une réponse trop rapide pour être reproduite correctement par ces approches. Le tableau 1 montre les valeurs trouvées par l'inversion selon les deux approches FDM et HDM ci-dessus.

	K fractures ($m.s^{-1}$)	Ss fractures (m^{-1})	Ss matrice (m^{-1})	Coef. Échange ($m^{-1}.s^{-1}$)
HDM 2004	$1,1x10^{-5} – 2,1x10^{-5}$	$4,8x10^{-6} – 2,4x10^{-7}$	$3,9x10^{-5} – 1,4x10^{-6}$	$2x10^{-9}$ - $8x10^{-11}$
HDM 2005	$1,3x10^{-5} – 1,8x10^{-5}$	$1,5x10^{-5} – 3,2x10^{-7}$	$2,4x10^{-4} – 4,5x10^{-6}$	$1,7x10^{-8} – 2,7x10^{-10}$
	K_{fo} ($m^{1+a}.s^{-1}$)	S_{so} (m^{-1+b})	(m^{-1+c})	($m^{-1+d}.s^{-1}$)
FDM 2004	$5,5x10^{-4} – 8,3x10^{-4}$	$5,5x10^{-6} – 6,7x10^{-7}$	$2,2x10^{-5} – 5,7x10^{-6}$	$1,3x10^{-9} – 2,3x10^{-10}$
coefficients	a = 0,672 – 0,722	b = 0,129 – 0,209	c = 0,147 – 0,206	d = 0,123 – 0,193
FDM 2005	$4,9x10^{-4} – 1,0x10^{-3}$	??	??	??
coefficients	a = 0,662 – 0,714	b = 0,15	c = 0,15	d = 0,1

Tableau 1 : Les valeurs issues de l'inversion selon les approches FDM et HDM (*Kaczmarick 2007*), les coefficients a, b, c et d sont typiques du modèle fractal, l'unité de mesure dépende de ces coefficients.

Les auteurs, *(Kaczmarick 2007)*, suggèrent l'intégration des effets de propagation de l'onde de pression du pompage, très rapide, dans les drains karstiques, afin d'inverser correctement les courbes de la campagne 2005. Les essais d'interférence longue durée donnent une information sur le système aquifère étudié en raison des longues durées (jours). Ainsi on obtient une réponse unitaire du réservoir à une échelle spatiale régionale. Même si les premiers temps du pompage peuvent fournir des informations locales, souvent les effets de skin et le coefficient d'emmagasinement du puits couvrent ces informations. Sur le site, les dispositifs pour la mesure du rabattement ont un pas de temps fixe de 120 secondes, cela est trop long pour permettre d'apprécier des caractéristiques locales. Pour la compréhension locale des connections entre les puits il a été donc nécessaire d'utiliser des tests de courte durée : le choc hydraulique.

4.3 Les essais par choc hydraulique

Le principe de ces tests est de faire varier très brièvement le niveau d'eau (la pression) dans un puits et de suivre, ensuite, le rééquilibrage progressif du niveau piézométrique. L'application de cette technique sur le site SEH a donné des réponses très variées. Quatre types de réponses ont été observées suite aux tests de choc hydraulique (*Audouin 2007)* :

1. Sur - atténuée : caractérisée par une décroissance exponentielle avec le temps, typique d'un milieu peu perméable,
2. Sous - atténuée : caractérisée par une fluctuation sinusoïdale amortie, associée aux aquifères fortement perméables,
3. Sur - atténuée à oscillation haute fréquence,
4. Sous - atténuées à oscillation haute fréquence.

Les oscillations à haute fréquence sont anormales, elles ont été associées à une fluctuation du niveau d'eau dans l'espace annulaire du tubage. Les deux causes de cette variabilité sont donc :

1. La forte hétérogénéité des caractéristiques hydrodynamiques due à la forte hétérogénéité du milieu au niveau régional et local.
2. Les tubages des puits et l'espace entre le tubage PVC interne et le tubage acier extérieur.

Les hautes fréquences ne contenaient aucune information relative au site et elles ont été donc supprimées afin de faciliter l'analyse des réponses (*Audouin et Bodin 2007)*.

Différents modèles ont été pris en considération afin d'interpréter au mieux les résultats des chocs hydrauliques dans le puits testé. Le modèle doit permettre de reproduire les comportements sous et sur atténués en prenant en compte les effets non linéaires qui ont été registrés, typiques d'un milieu fracturé (*Audouin 2007)*. Le modèle choisi a été celui général de *McElwee et Zenner (1998)*.

Dans un milieu de ce type, fracturé et karstique, la propagation de ces essais peut atteindre des distances plus importantes que dans le cas d'un milieu sédimentaire. Il a été donc possible de regarder les réponses des puits proches au puits testé et de déduire les connexions entre les forages. Un nouveau modèle d'interprétation des essais de choc hydraulique a été développé pour l'interprétation des réponses aux puits proches du puits testé. Ce modèle est donné par la combinaison et l'extension des travaux de *Barker (1988)* et de *Butlel et Zhan (2004)*, et il a été développé dans la thèse de *Audouin (2007)*. Ce modèle inclue une dimension non entière des écoulements dans les puits testés, il a été utilisé pour interpréter les réponses des essais de choc hydraulique menés sur le site SEH de puits à puits (1D)*(Audouin et Bodin 2008)*. Les distributions statistiques des valeurs de dimension de l'écoulement et de perméabilité des puits du site SEH ont pu être calculées (cf. Figures 18 et 19). Les dimensions d'écoulement obtenues sur le site SEH avec ce modèle sont comprises entre 1.6 et 2.5 avec une valeur moyenne de 2,15 et une déviation standard de 0,19 (cf. Figure 18).

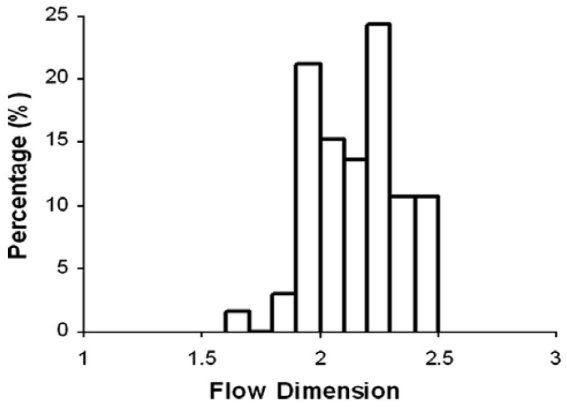


Figure 18 : Histogramme de la dimension de l'écoulement sur le site SEH, *(Audouin et Bodin 2008).*

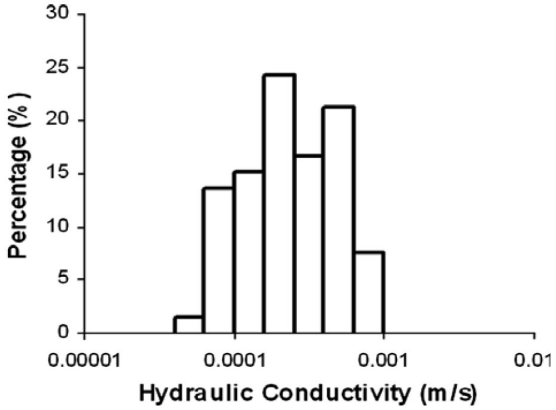


Figure 19 : Histogramme de la perméabilité du site SEH *(Audouin et Bodin 2008).*

Les conductivités hydrauliques varient entre $4.4x10^{-5}$ et $7.7x10^{-4}$ (ms^{-1}) et elles ont une distribution lognormal avec une valeur modale de 2,0 10^{-4} ms^{-1} (cf. Figure 19)(*Audouin et Bodin 2008)*.

On définit la diffusivité comme le rapport entre la transmissivité et le coefficent d'emmagasinement (D = T/S). Avec les mesures des chocs hydrauliques les valeurs de diffusivité entre deux puits peuvent être calculées. Les puits les plus connectés entre eux donnent les valeurs de diffusivité les plus importantes (cf. Figure 20). On remarque que seulement une partie des puits présente des connections élevées, ces puits correspondent aux puits trouvés productifs et avec des perméabilités élevées par les campagnes de pompage de longue durée. On note qu'entre deux puits il n'y a pas forcement la même valeur de diffusivité dans les deux sens, l'intensité de la réponse d'un couple de puits n'est pas toujours biunivoque. Ainsi la valeur de diffusivité peut varier si, pour un même couple de puits, on inverse le puits d'injection et celui d'observation. Ce résultat est dû au fait qu'un puits présente un plus ou moins grand nombre de "connections".

Les auteurs, *(Audouin 2007),* remarquent trois principales liaisons entre des puits : M19-M2-M21-M22-M13 au Sud, M5-M16-M12 à Est et M4-MP5-M7-M20 au Nord. Si on rapporte les niveaux karstiques observés par la géophysique de puits avec la carte des diffusivités, en général, les puits les mieux connectés interceptent un niveau karstique à la même profondeur.

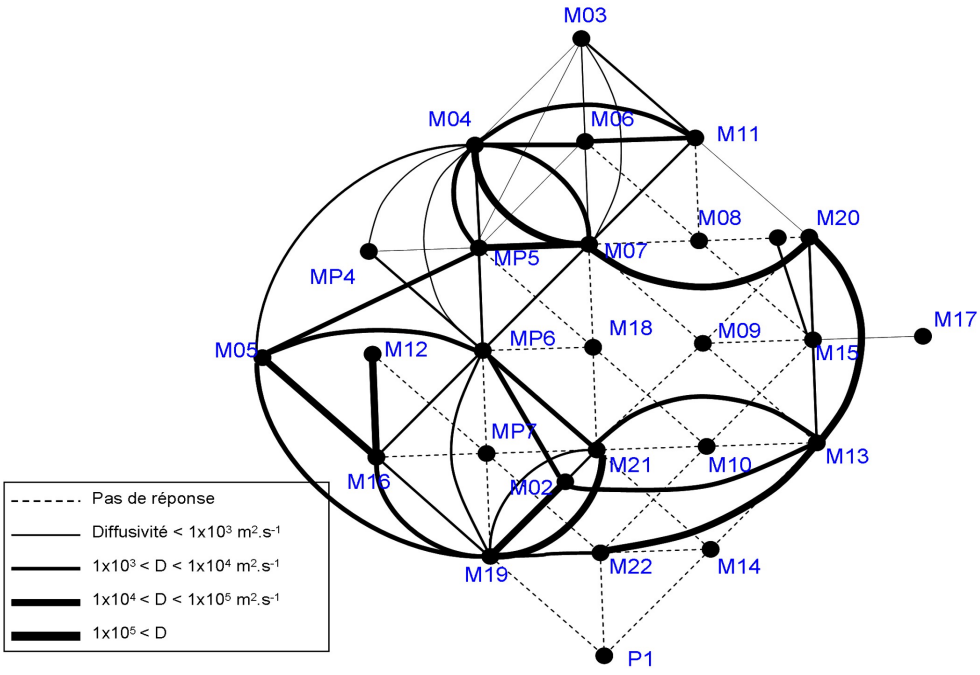


Figure 20 : Diffusivité (D = T/S) entre les forages résultant des essais de choc hydraulique *(Audouin 2007)*

Si nous supposons que cette formation est constituée par différents milieux, avec des diffusivités caractéristiques, la valeur de diffusivité entre deux puits donne l'information sur le milieu avec la diffusivité plus élevée qu'intercepte au même temps les deux puits. Si nous considérons les drains karstiques comme le milieu avec la diffusivité plus élevée, alors cette carte nous permet de reconstruire la partie du réseau des drains qui intercepte les forages. La comparaison entre les résultats issus de l'inversion des données des chocs hydrauliques et celles issues de l'inversion des tests d'interférence longue durée montre des différences. Ces différences sont dues au temps d'investigation de la méthode. La perturbation des chocs hydrauliques se propage à travers les canaux à conductivité hydraulique élevée. Ces essais fournissent donc des informations sur le système d'écoulement préférentiel à l'échelle du site.

4.4 Conclusions issues des études des tests hydrogéologiques

Les tests menés sur le site mettent en évidence une très forte hétérogénéité de la formation étudiée. Ainsi des hypothèses d'écoulement fractal et de double porosité (cf. Annexe 2) ont été prises pour les interprétations des tests. Une évolution des caractéristiques de l'aquifère a été observée entre les deux campagnes des pompages de longue durée (C2004 et C2005). Les réponses aux tests d'interférence de longue durée enregistrées pendant la C2004 montrent une relation avec la distance du puits d'observation et le puits de pompage. Les réponses de la C2004 ont pu être interprétées par une approche double milieu (soit double porosité). En revanche les réponses de la C2005 n'ont pas de relation avec la distance entre les puits, les puits d'observation donnent la même réponse. Ainsi jusqu'à présent les interprétations de ces réponses (C2005) ne permettent pas une homogénéisation des caractéristiques hydrodynamiques sur tous les puits du site. Dans cette étude on vise à comprendre et simuler le système à l'état actuel, à cette fin nous avons fait une analyse détaillée des réponses de la campagne des pompages C2005.

5 L'analyse détaillée de la campagne C2005

Nous considérons la campagne C2005 représentative de l'état hydrologique actuel. Nous avons extrait et analysé les chroniques des mesures du rabattement de 6 tests d'interférence longue durée faits en 2005. Tous les tests analysés ont été menés avec un débit constant d'environ 0,02 (m^3s^{-1}) et sur des durées comprises entre trois et six jours. La réinjection de l'eau extraite, ou pompée, a toujours été faite dans le puits P3 qui est placé au Sud Est, à environ 300 mètres, du système "five spot".

5.1 Comportements récurrents tout au long de la campagne

La majorité des puits ont des comportements très similaires et présentent une distribution spatiale des réponses stable et homogène (cf. Figure 21). Dans les annexes (cf. Annexe 3) figurent les trois autres pompages retenus comme les plus représentatifs car menés sur six jours. Par la suite les réponses sont triées selon les caractéristiques que nous avons jugées les plus opportunes.

5.1.1 Puits avec les effets de la réinjection

Les courbes des puits qui accusent les effets de la réinjection ou qui n'accusent pas les effets du pompage (cf. Figure 21 : les courbes M0, P1, M23 et M24) ont des réponses différentes par rapport à la majorité des puits du site SEH. La distinction en trois types de courbes peut être faite:

1. Des rabattements considérables, mais avec des allures différentes par rapport aux autres puits du site SEH (M0)
2. Des rabattements très faibles, de moins d'un mètre (M23 et P1)
3. Des rabattements très négatifs sur toute la durée du pompage (M24).

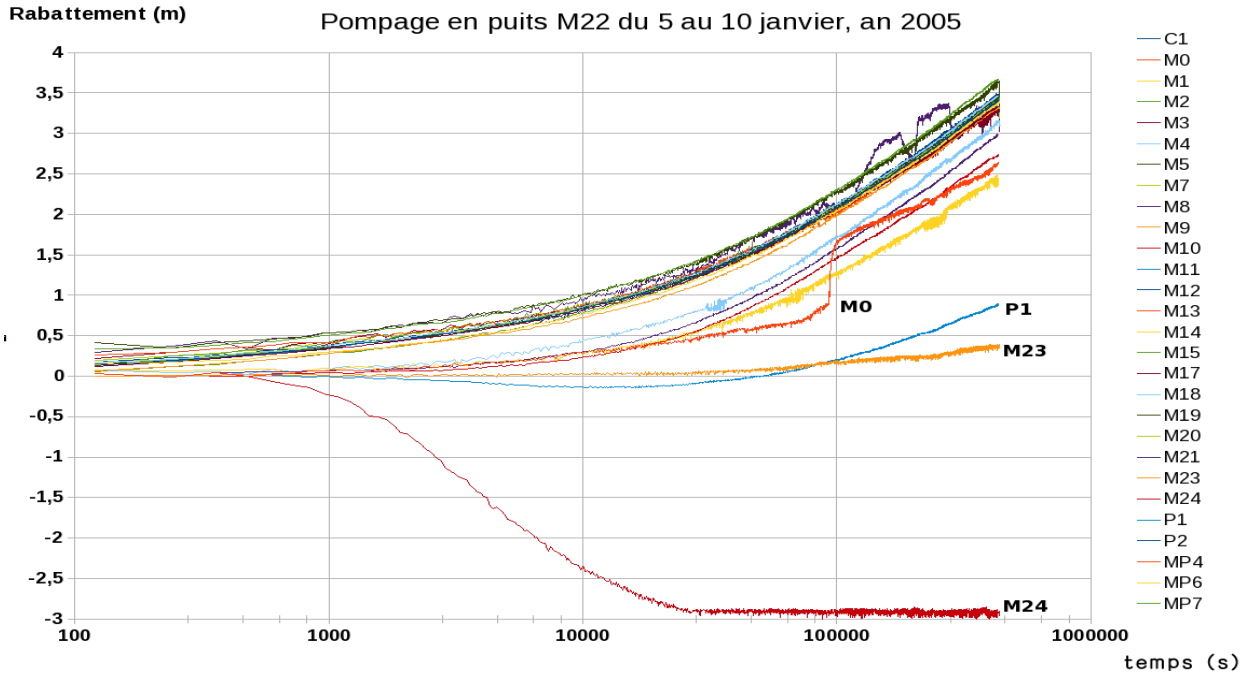


Figure 21 : Le test choisi pour effectuer l'analyse approfondie et le calage des simulations.

Suite à ces comportements nous supposons être en présence d'au moins deux zones de drainage séparées : la zone où l'eau est prélevée (majorité des puits du site SEH) et la zone où l'eau est réinjectée (M24). Une zone de transition existe, mais l'absence des connexions importantes entre les deux zones de drainage a été mise en évidence *Bernard (2005)*. Les courbes avec des influences de la réinjection ne seront pas prises en considération par la suite.

5.1.2 Puits sans les effets de la réinjection

Les puits du site SEH sans influence de réinjection ont tous des chroniques de rabattement en fonction du temps très similaires, mais une différenciation entre les courbes peut être faite. Elle concerne deux aspects : l'intensité du rabattement et la présence d'un rabattement conséquent pendant les 1500 premières secondes (cf. Figure 22). Ainsi les courbes ont été séparées en deux faisceaux :

1. le faisceau composé des quatre courbes qui ont un rabattement négligeable pendant les 1500 premières secondes et des rabattements plus faibles tout le long du pompage (cf. Figure 22 : M8, M10, M14 et M18) ;

2. le faisceau composé des courbes "égales" des puits du site SEH (cf. Figure 22 : points non marqués dans le graphe), ce faisceau est celui repris par *Kaczmarick (2007)* où les chroniques sont égales (cf. Figure 14, page 11). Les courbes de ce deuxième faisceau sont égales même si elles sont enregistrées dans des puits d'observation avec les distances variables, de 50 à 210 mètres, du puits de pompage.

En revanche une partie des courbes de ce deuxième faisceau ne se superposent pas parfaitement l'une l'autre (cf. Figure 23).

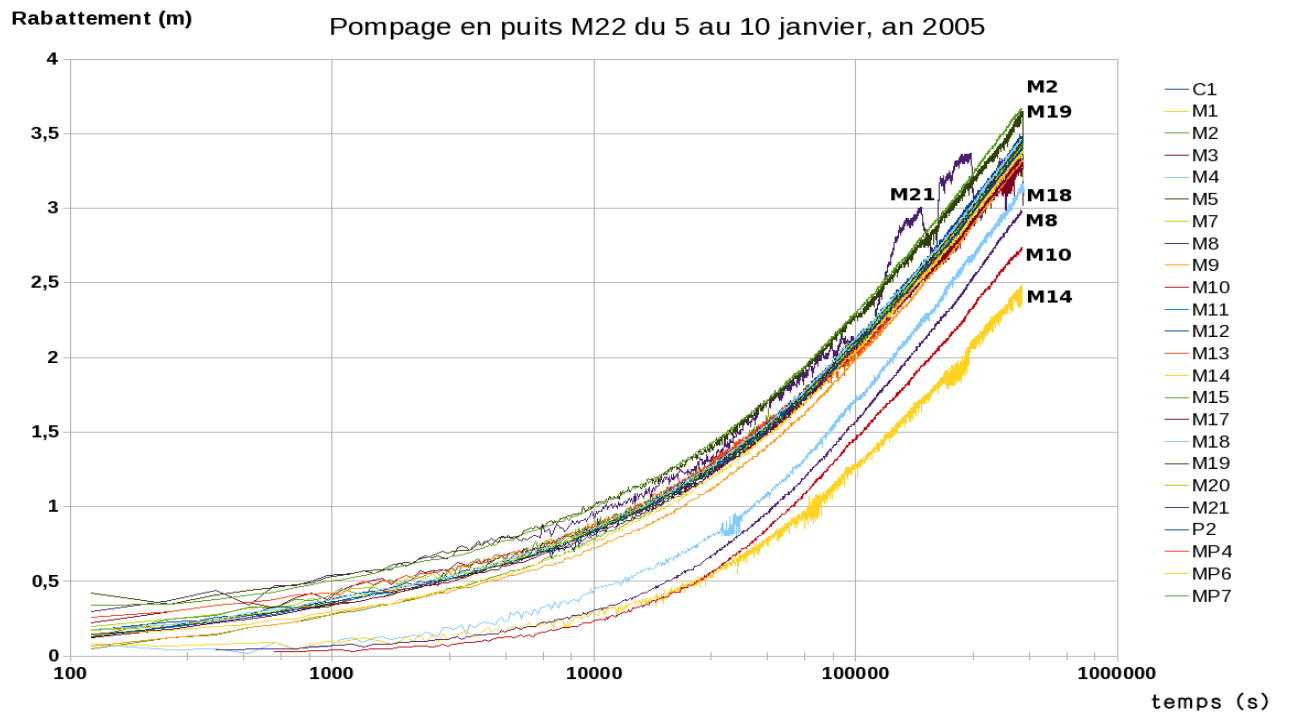


Figure 22 : Les courbes des puits d'observation du site SEH sans l'effet de la réinjection.

Le détail du deuxième faisceau montre, une partie des courbes ne s'écartent pas significativement entre elles et elles se superposent l'une l'autre (cf. Figure 23 : tous les puits qui ne sont pas marqués dans les graphe). En revanche, les six courbes restantes ont une différence de rabattement non négligeable, avec des rabattements soit plus importants soit moins (cf. Figure 23 : M2, M19, M21 et MP7, M1, M9). Sur la base de ces différences nous avons fait des hypothèses par rapport au sens physique des écarts entre les courbes et ainsi regroupé les courbes en quatre catégories.

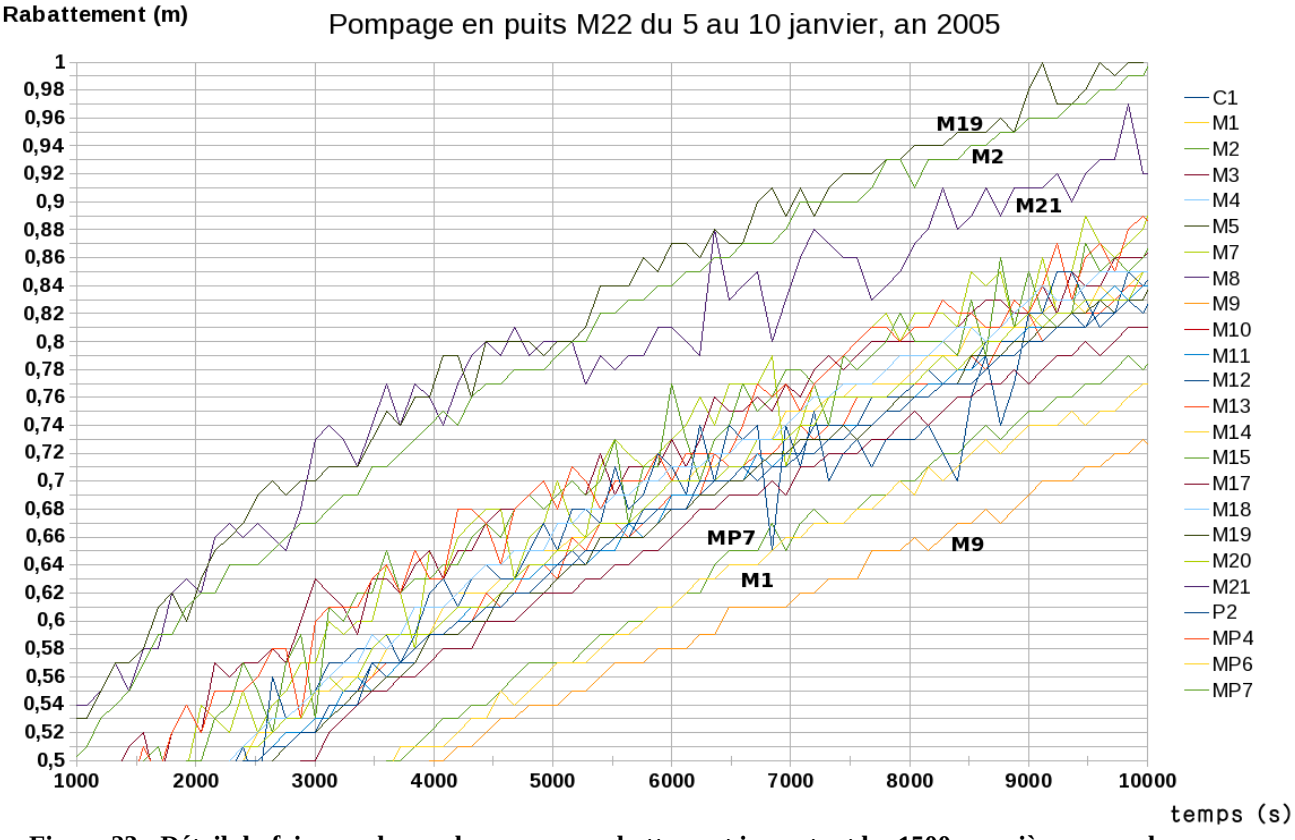


Figure 23 : Détail du faisceau de courbes avec un rabattement important les 1500 premières secondes

I) Courbes de type ''Drain'' :

Sont classifiées comme courbes de type "drain" toutes les courbes "égales", qui se confondent entre elles au centre du faisceau (cf. Figures 23 : tous les puits qui ne sont pas marqués dans les graphes). En accord avec les études vues nous faisons l'hypothèse que l'égalité de ces courbes indique la présence d'une structure très perméable, un drain karstique, qui relie ces puits entre eux. Ce drain serait assimilable à un tuyau et donc il serait capable de transporter l'onde de pression donnée par le pompage, cela fournirait donc le même rabattement à des distances différentes du puits de pompage. Cette réponse sera donc qualifiée par la suite de type "Drain". En général ces réponses sont données par les puits avec des productivités et perméabilités élevées (cf. Figure 11 et 12, page 10).

II) Courbes de type ''Quadratique'' :

Pendant plusieurs tests, de 0 à 2 puits donnent des courbes avec un rabattement plus important de celui de type drain . Ces augmentations de rabattement sont enregistrées systématiquement sur les puits les plus proches du puits de pompage et aux puits de pompage (cf. Figures 22 et 23, puits M2 et M19 (puits proches) et Annexe 3, Figures 57 et 58 respectivement puits M16 (puits de pompage) et MP4 (puits proche). Nous supposons que ce phénomène est dû à la présence des pertes de charges quadratiques qui augmentent le rabattement à proximité du puits de pompage. Ces pertes supplémentaires se forment au niveau du puits de pompage et elles sont causées par un changement de type d'écoulement : de laminaire à turbulent. En milieu poreux cet effet se produit sur les premiers décimètres du terrain entourant le puits de pompage (*de Marsily 1981)*. Si cette hypothèse est correcte l'augmentation de rabattement se propage à des dizaines de mètres car la distance minimale entre les puits est de 20 mètres (puits M2 - M21). Cela est cohérent avec les observations des chocs hydrauliques.

III) Courbes de type ''Matrice'' :

Ces réponses ont des rabattements inférieures par rapport à celles de Type "Drain" et elles ne présentent pas de rabattement les 1500 premières secondes de test (cf. Figure 22 : M8, M10, M14 et M18). Ces courbes sont toutes enregistrées dans les puits à faibles productivité et perméabilité (cf. Figure 11 et 12, page 10 : les puits M8, M10, M14 et M18). Les études faites jusqu'à présent montrent que ces puits n'interceptent pas le réseau de drains ou fracture à haute conductivité hydraulique (cf. Figure 10, page 9). Dans les résultats des slug-tests ces puits n'ont montré aucune connexion avec les autres puits du site (cf. Figure 20, page 16). Nous supposons qu'ils fournissent donc la réponse donnée par la matrice. Ensuite on appellera cette réponse de type "Matrice".

IV) Courbes de type ''Fracture'' :

Les puits MP7 M1 et M9 apparaissant sans connections à partir des résultats de la campagne de chocs hydraulique (cf. Figure 20, page 16), mais ils présentent un écartement du faisceau drain très faible (cf. Figure 23). Ainsi nous supposons que même s'ils ne sont pas reliées directement au réseau des drains, une structure avec une perméabilité intermédiaire entre les drains et la matrice, une fracture, connecte ces puits au réseau des drains.

5.2 Anomalies enregistrées au long de la campagne

Pendant l'analyse des tests de la campagne 2005 des comportements "irréguliers" ont été observés. Ces irrégularités des réponses sont des brusques variations du rabattement au cours du pompage (cf. Figure 21 et 22 puits M0 et M21, annexe 3 figures 56, 57 et 58 puits M17, M15 et M8). Ces irrégularités se présentent surtout, soit sur certains des puits mal connectés ou peu productifs (campagnes de slug-test et essais de puits) soit sur les puits qui sont influencés par la réinjection. Parfois les réponses ont même des variations de la tendance du rabattement au cours du pompage ; par exemple le rabattement augmente pendant la première partie du pompage, rejoint un maximum et diminue ensuite (cf. Annexe 3 puits M17 et M15). Nous supposons donc la présence

des phénomènes de "débouchage de drains" qui ont lieu pendant les pompages. En regardant les essais de nappe de manière chronologique le long de la C2005, nous voyons les irrégularités dans les réponses devenir de plus en plus fréquentes. Ainsi, selon la chronologie, on note une disparition progressive des réponses type matrice et fracture qui deviennent irrégulières. Elles prennent les caractéristiques des puits qui accusent la réinjection (cf. Annexe 2 puits M8). D'après ces observations nous supposons que les débouchages se font pendant le pompage, et il y a une tendance au rebouchage ensuite pendant les périodes de recharge de l'aquifère.

Une autre anomalie observée concerne les trois tests d'interférence plus longs qui durent environ 6 jours. Ces essais présentent un changement de comportement à des temps très longs. Dans un graphe du rabattement en fonction du logarithme du temps ces trois cas présentent un changement de la pente des chroniques des réponses régularisées (drain et matrice). Ce comportement pourrait signifier un changement de système drainé par le pompage en cours au delà d'un certain rabattement (ou une pression en hauteur d'eau). Une forte discordance est enregistrée, la chronique des tests faits du 18 au 24 janvier et du 22 au 28 février présente une diminution de la pente ; au contraire le test du 22 au 26 mars présente une augmentation de la pente (cf. Annexe 3). Même si le puits de pompage est différent dans les trois cas, par les hypothèses faites avant, le système drainé est toujours le même. Donc le système drainé dans les trois essais reste le même car aux temps longs le volume de milieu concerné dépasse la taille du site, ainsi la variation de la pente devrait être toujours la même. Il faudrait donc des tests menés sur de plus longues périodes afin de mieux comprendre ces comportements.

5.3 Conclusions issues de l'analyse

Suite aux observations faites ci-dessus nous faisons l'hypothèse que la réponse de type "drain" représente la réponse moyenne du site et elle est représentative de l'ensemble du milieu testé. La structure drain homogénéise toutes les chroniques du rabattement des puits qui l'interceptent. Ces puits ont donc la même charge hydraulique à tous les moments du pompage. Si les pertes de charges quadratiques ne se développaient pas dans le puits de pompage, alors, tous les puits qui interceptent le drain auraient la même réponse que le puits de pompage. Nous supposons que la méthode analytique la plus indiquée pour l'interprétation des courbes est donc celle du double milieu au puits de pompage (*Warren and Root 1963)*, appliquée à la courbe de type Drain. Avec cette hypothèse nous considérons que, à l'état actuel, il n'est pas possible de déduire des informations de caractère distribué de la formation étudiée à partir du test d'interférence longue durée (propriétés hydrodynamiques locales de matrice et fracture).

5.4 Extraction des courbes en vue du calage

Nous cherchons à reproduire les courbes expérimentales enregistrées pendant la campagne C2005 avec deux modèles conceptuels décrits par la suite. Le pompage de référence que nous avons choisi comme représentatif a été fait sur le puits M22 du 5 au 10 janvier. Nous l'avons choisi car, par rapport aux autres essais de la C2005, il présente un nombre maximal de réponses de type matrice sans "irrégularités". Afin de lisser les courbes expérimentales et faciliter le calage nous avons utilisé, en phase de calage, uniquement les moyennes des faisceaux de courbes expérimentales de type drain et de type matrice (cf. Figure 24). Pour calculer la chronique moyenne type drain nous avons choisi entre tous les puits d'observation ceux qui ont enregistré les chroniques qui se ressemblaient le plus. Nous observons pour les réponses de type matrice un écart à la moyenne plus important et des allures moins uniformes. Cela est en accord avec les hypothèses faites auparavant. La courbe moyenne matrice est plus écartée de la courbe moyenne de drain aux temps courts et elle se rapproche aux temps longs.

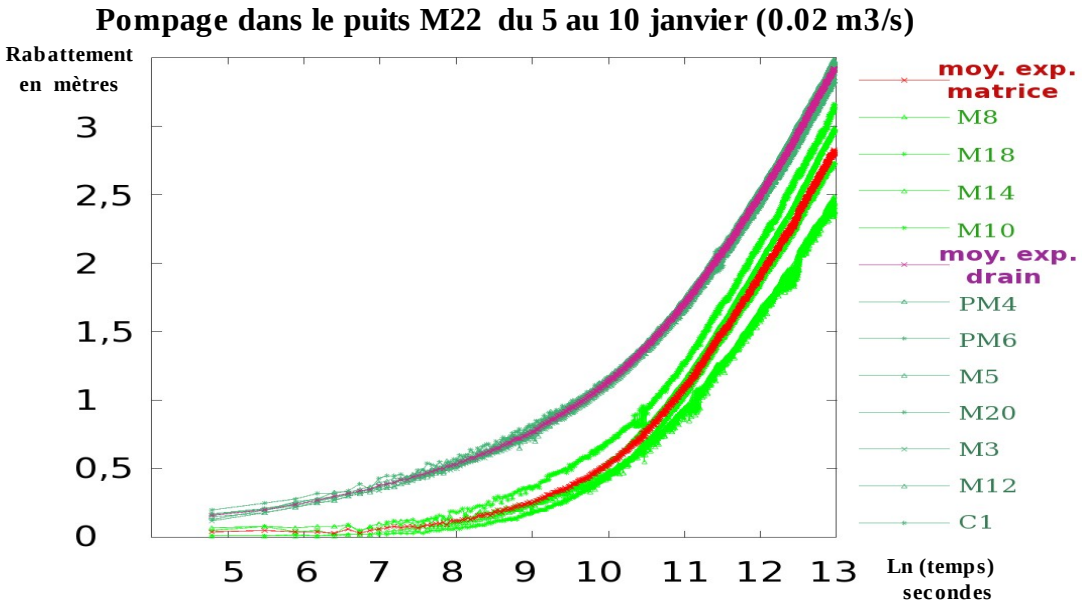


Figure 24 : Faisceau de courbes de type drain (vert foncé), moyenne drain (violet), faisceau de courbes de type matrice (vert clair) et moyenne matrice (rouge)

Les calages des modèles ont été faits par rapport à la courbe moyenne de type drain car nous estimons qu'elle est représentative du milieu testé. La moyenne matrice a été utilisée comme indicateur de comportement de la matrice simulée.

5.5 Estimation des propriétés hydrodynamiques avec le modèle analytique Double Porosité (DP)

Suite à l'analyse des données de la campagne C2005 une estimation des propriétés hydrodynamiques a été faite. De cette analyse résulte que tous les puits d'observation qui présentent la réponse de type "drain" sont reliés entre eux par un drain karstique, assimilable à un tuyau. Donc nous faisons l'hypothèse qu'en absence des pertes de charge quadratiques au puits de pompage, la même chronique du rabattement au cours du temps du puits de pompage serait enregistrée sur tous les puits d'observation reliés par le drain. Sur la base de cette hypothèse, la courbe expérimentale moyenne de type drain a été reproduite avec le modèle analytique double porosité en deux dimensions au puits de pompage de W*arren and Root (1963)* (cf. Paragraphe 2 de l'annexe 2 équations de 10 à 14 et figure 52). Le rayon du puits de pompage devient donc le rayon moyen des conduites karstiques. La variable prise pour donner l'intervalle de valeurs est donc le rayon du puits de pompage, car les drains ont la fonction de prolonger le puits de pompage et ils se comportent donc comme cela. L'incertitude est donc prise par rapport au rayon moyen des conduits karstiques (les drains) qui prolongent le puits de pompage en connectant entre eux les puits du système five spot du site SEH. Le résultat est encourageant, mais nous remarquons, par rapport à la courbe expérimentale, des courbes issues du modèle analytique avec des allures faiblement différentes. En phase de calage, ce modèle ne permet pas de varier la rapidité de la transition entre la phase de l'écoulement de transition et la phase de l'écoulement de l'ensemble matrice fissures (cf. paragraphe 2 de l'annexe 2 et figure 53).Les valeurs des paramètres rentrés dans le modèle sont partiellement cohérents avec les études précédentes (cf. tableau 2). Ce modèle analytique n'est donc pas capable de fournir une interprétation quantitative très satisfaisante des paramètres hydrodynamiques moyens issus de la courbe moyenne de type drain de la campagne C2005. Les valeurs des paramètres rentrés dans le modèle sont partiellement cohérents avec les études précédentes (cf. tableau 2). Ce modèle analytique n'est donc pas capable de fournir une interprétation quantitative très satisfaisante des paramètres hydrodynamiques moyens issus de la courbe moyenne de type drain de la C2005.

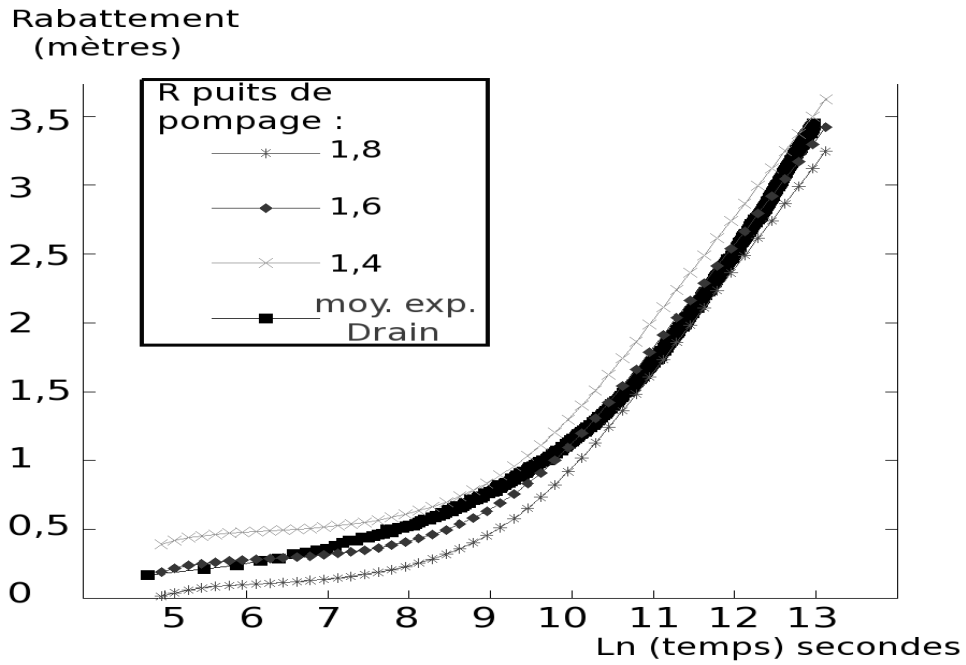


Figure 25 : Reproduction de la courbe expérimentale avec le modèle analytique DP au puits de pompage avec trois valeurs de rayon du puits de pompage (R) différents (1.8, 1.6 et 1.4)

Caractéristiques du Modèle Analytique DP	$K_{fracture}$	K_{Mat}/K_{Fr}	Ss_{mat+fr}	$Ss_{fracture}$	L_{Blocs}	Q	Rayon du puits pomp.	n_{dim}
Unités de mesure	m s^{-1}	-	m^{-1}	m^{-1}	m	m^3s^{-1}	m	-
Valeur obtenue	2,1 10^{-5}	0,7	1 10^{-1}	9,0 10^{-4}	8,0	2,0 10^{-4}	1,4 < r <1,8	2

Tableau 2 : Valeurs utilisées dans le modèle analytique DP au puits de pompage.

6 Les modèles conceptuels et les résultats des calages

Les équipes du projet MACH 1 ont utilisé différentes approches pour la modélisation du site SEH. Plusieurs modèles numériques ont déjà été mis en place et des simulations ont été faites. En général les différences entre ces modèles concernent deux aspects :

1. La dimension utilisée pour le maillage du modèle (2D ou 3D).
2. La prise en compte des statistiques de fracturation et/ou des lithologies issues des études.

Des études faites sur le site SEH, la présence des trois milieux (drain, fracture et matrice) avec les géométries différentes a été déduite. Une approche en trois dimensions (3D) serait la plus adaptée pour représenter la coexistence des drains, les fractures et les blocs matriciels dont les géométries sont respectivement linéaires, planaires et sphériques. L'approche en deux dimensions (2D) présente des limites par rapport aux géométries qui peuvent être reproduites. Néanmoins, les tests de pompage effectués prennent en compte toute la colonne de 100 mètres. De plus, il est moins coûteux (en temps de calcul) de générer des milieux 2D, de simuler (résolution transitoire) et de calibrer. Le 2D apparaît donc comme une bonne première approche pour comprendre et représenter le site. Au cours du stage deux modèles conceptuels en deux dimensions ont été mis en place et testés avec le but de reproduire à la fois :

1. Les chroniques moyennes expérimentales de type drain et matrice issues de l'analyse des tests d'interférence longue durée de la campagne C2005 (cf. Paragraphe 5.4).
2. La distribution spatiale des réponses dans les puits du système five spot (cf. Paragraphe 5).

La géométrie du maillage et la distribution des propriétés hydrodynamiques des modèles conceptuels ont été reprises de deux modèles analytiques déjà traités dans la littérature comme des approches analytiques pour les milieux fracturés (cf. Annexe 2) :

1. Le modèle à une fracture verticale.
2. Le modèle Double Porosité à blocs allumettes (2D).

Les maillages et la distribution des propriétés hydrodynamiques seront détaillées ensuite pour chaque modèle conceptuel. L'implémentation et la résolution numérique des modèles conceptuels a été faite avec le code de calcul Cast3M avec un schéma de discrétisation spatiale aux éléments finis mixtes hybrides (EFMH) (cf. Annexe 1). Les simulations sont faites en régime transitoire et elle se placent dans le cadre d'un écoulement darcéen. L'échelle de temps utilisée en phase de calage est logarithmique. Ainsi, afin d'obtenir un pas de temps à peu près constant avec cette échelle, la série des pas de temps du calcul a été obtenue avec la fonction exponentielle, selon l'équation :

$$\Delta t_N = e^{(N\,a+b)} \qquad \text{où :} \qquad a = \frac{t_{fin} - t_{ini}}{N} \qquad \text{et} \qquad b = t_{ini}$$

Où Δt est le pas de temps ; t_{ini} et t_{fin} sont respectivement le temps initial et final ; N est le nombre de pas de temps du calcul. Nous nous sommes appuyés sur la définition des nombres de Fourier pour le choix des pas de temps ci-dessus et nous avons vérifié la convergence numérique des solutions sur quelques cas test. Les paramètres utilisés pour la mise en place des modèles conceptuels résultent des analyses des études et des travaux faits sur le site jusqu'à présent. Dans les deux modèles conceptuels les suivantes paramètres ont été adopté:

1. Un maillage supplémentaire pour entourer le domaine simulé a été utilisé afin d'éliminer les conditions aux limites de type Dirichlet (charge imposée). La taille du domaine a du être suffisamment grande pour repousser l'influence des conditions aux limites à des temps plus longs de la simulation.
2. Sur la maille du puits de pompage a été imposé un flux sortant égal au débit pompé (0,02 m^3s^{-1}), sur les autres mailles le flux a été imposé nul.
3. La simulation transitoire à été menée avec des conditions initiales de charge égale sur tout le domaine.

Chaque modèle conceptuel a des caractéristiques propres par rapport au maillage, à la distribution des propriétés hydrodynamiques et à la distribution des points d'observation simulés. Ces caractéristiques seront discutées tout au long des deux prochains paragraphes.

6.1 Le modèle conceptuel type fracture verticale (FV)

Ce modèle type fracture verticale à été implémenté afin d'effectuer un étude générique pour comprendre la réponse à un pompage dans un milieu de ce type. La géométrie du modèle (cf. Annexe 2 figure 54 page 48) a été reproduite en 2D avec la division du domaine numérique en trois sous-domaines : le puits, la fracture et le milieu matrice homogène. Les trois sous-domaines ont été affectés de caractéristiques hydrodynamiques différentes. Le domaine maillé est un carré de la même taille que le système five spot (210 m^2) ; la discrétisation spatiale a été faite par des mailles carrées de 4 m^2. Deux géométries de fracture ont été testées, une classique d'une fracture verticale et l'autre avec deux fractures perpendiculaires de la même longueur qui se croisent au centre. Les deux cas seront traités distinctement, même si les résultats obtenus se ressemblent. Le centre de la fracture, ou des fractures, est positionné au centre du carré, le puits de pompage est positionné dans ce point, au centre à la fois du sous-domaine homogène et fracture. Une "couronne" dont les

caractéristiques hydrodynamiques sont homogènes et égales au domaine matriciel a été adjointe dans les deux cas. Cette couronne fait le lien avec les conditions aux limites qui doivent être repoussées assez loin pour honorer les formes de courbe de rabattement observées. Elle mesure 630 m de côté et elle est divisée en 10 trapézoïdes de 21 m (cf. Figure 26).

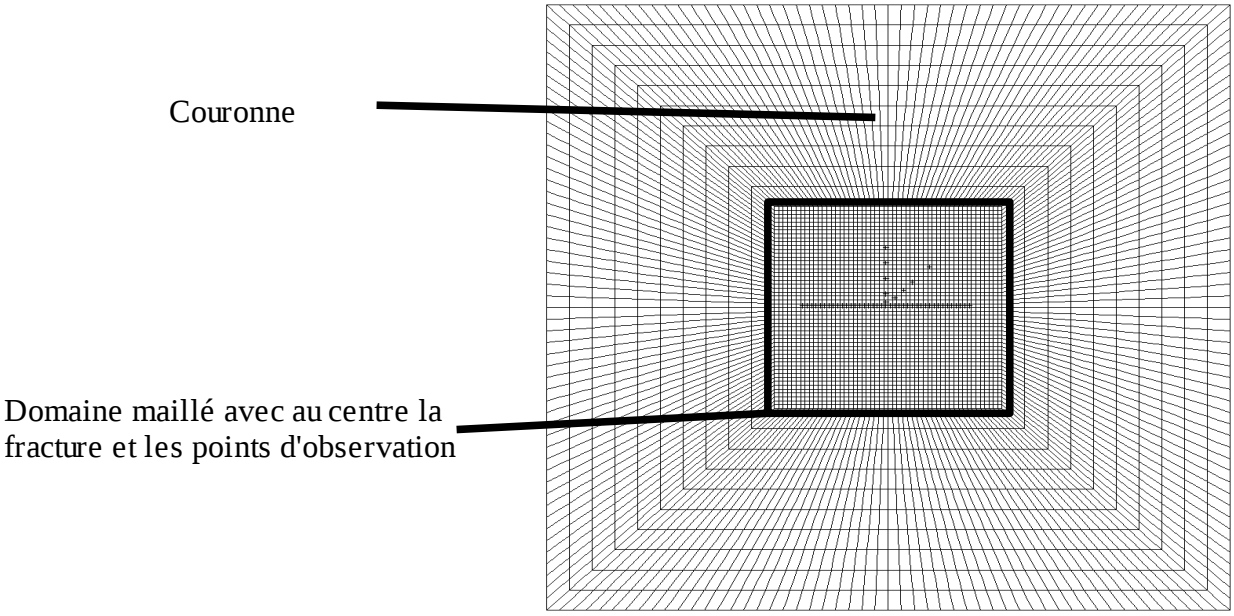
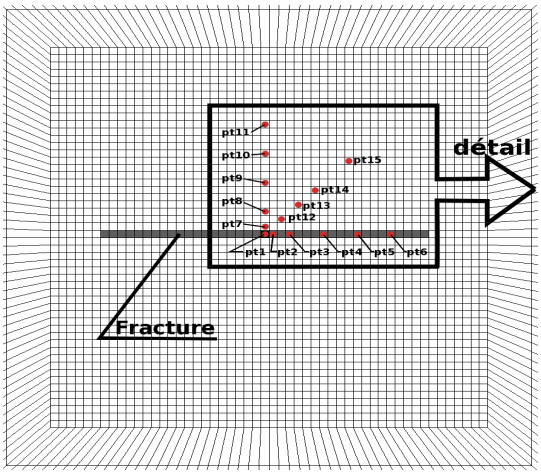


Figure 26 : Le domaine maillé plus la couronne utilisée dans les deux géométries du modèle conceptuel type FV.

Cette discrétisation spatiale, plus fine au centre, en correspondance de la fracture, et large à la périphérie, permet d'apporter une bonne définition où la simulation est plus complexe. Là où est nécessaire une précision élevée de l'évolution des charges hydrauliques au cours du temps. Cette discrétisation permet de diminuer le temps du calcul car la périphérie est maillée moins finement.

6.1.1 Le modèle conceptuel à une fracture verticale

La longueur de la fracture , 160 m (40 carrés), a été choisie en phase de calage afin d'obtenir un bon "fit"des courbes simulées avec les courbes expérimentales. Elle a été orienté le long de l'axe des abscisses (cf. Figure-27 : les carreaux en gris foncé) comme la direction prépondérante, N 90, des fractures des puits du site SEH (cf. Figure 9 page 8).



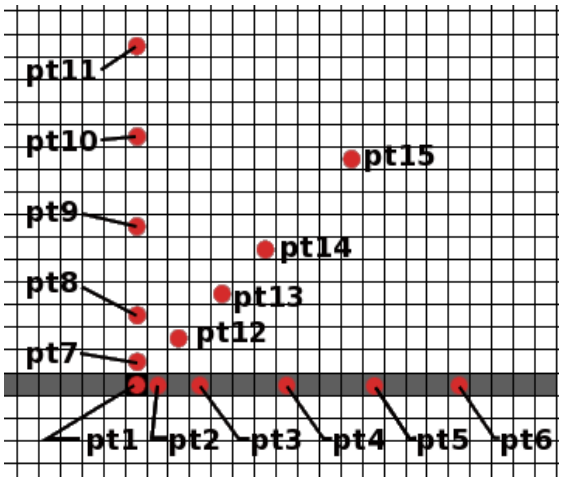


Figure 27 à gauche : le domaine maillé de 210 m² avec la fracture longue 160 mètres au centre en gris foncé;
Figure 28 à droit : le détail du positionnement des points d'observation : le point *pt 1* est le puits de pompage, les *pt 2-3-4-5-6* sont dans la fracture (en gris foncé), les points *pt 7-8-9-10-11* ont un éloignement du puits de pompage à 90° par rapport à la fracture et les points *pt 12-13-14-15* ont un éloignement à 45°.

Les points d'observation simulés ont été placés comme dans la littérature (cf. Paragraphe 3 de l'annexe 2), à partir de la maille "puits de pompage" (pt 1) vers l'extérieur le long des trois directions, dans la fracture, à 90° et à 45° par rapport à la fracture (cf. Figure 28).

La courbe expérimentale moyenne de type drain a été reproduite de façon satisfaisante avec la chronique du rabattement de la maille puits de pompage (cf. Figure 29). Les chroniques du rabattement des points d'observations sont de plus en plus retardées et faibles au fur et à mesure que l'éloignement du puits de pompage (pt 1) augmente. Le rapport entre l'éloignement du puits de pompage et le retard des courbes est plus important pour les points placés le long de la direction à 90° avec la fracture (points : 7-8-9-10-11). Ce rapport est moins important pour les points d'observation placés dans la fracture (points : 2-3-4-5-6).

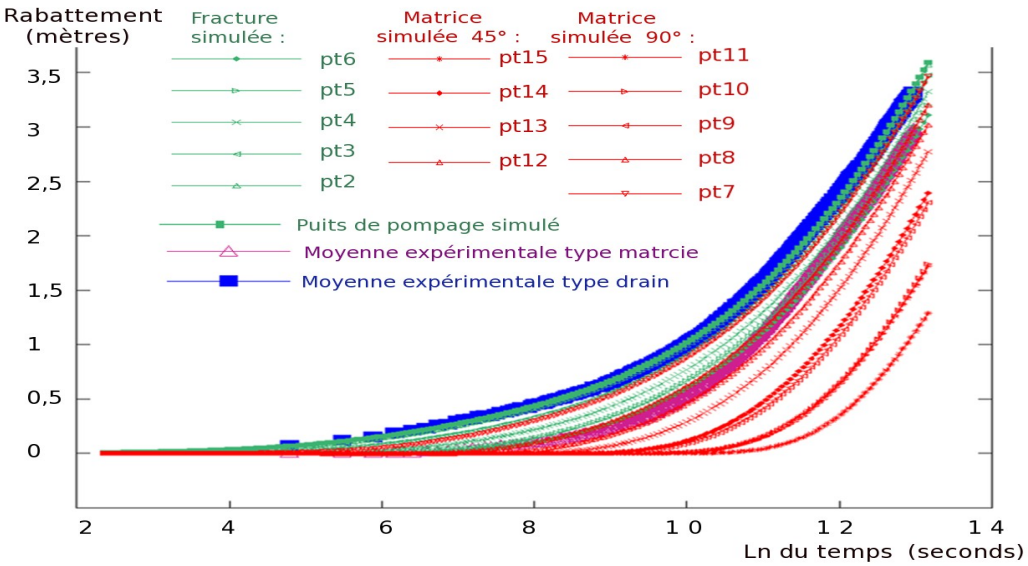


Figure 29 : Comparaison entre les chroniques du rabattement expérimentales (bleu et violet) et les chroniques simulées par le modèle à fracture verticale (rouge et vert).

La forme et l'écartement des courbes des points d'observation "moyennement" éloignés du puits de pompage sont très similaires ceux de la moyenne expérimentale de type matrice. Nous déduisons que le comportement du milieu naturel est bien approché par cette simulation (cf. Figure 29).En revanche, les valeurs des caractéristiques hydrodynamiques retrouvées ne sont pas réalistes (cf Tableau 3). Ces valeurs changent les caractéristiques du modèle conceptuel numérique par rapport au modèle analytique à une fracture verticale. Aux temps courts, le modèle analytique impose un rabattement égal sur toute la fracture et en conséquence un écoulement linéaire (1D) (cf. Paragraphe 3 de l'annexe 2), le modèle numérique ne respecte pas ce comportement lorsque les coefficients d'emmagasinement sont aussi élevés.

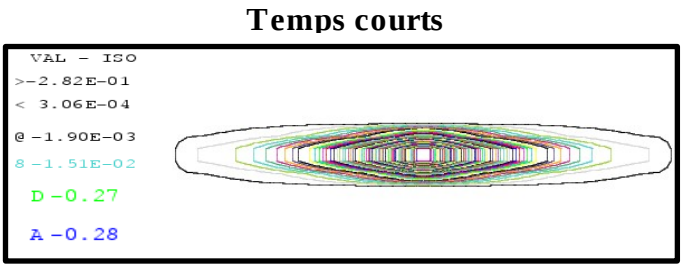
Caractéristiques Hydrodynamiques	T_f	S_f	T_m	S_m
Unités de mesure	m^2s^{-1}	-	m^2s^{-1}	-
Ordre de grandeur	10^{-1}	0,3	10^{-3}	0,15

Tableau 3 : Caractéristiques hydrodynamiques issues du calage du modèle conceptuel fracture verticale

Le modèle numérique réussit donc à reproduire les courbes expérimentales, mais sans le respect des hypothèses du modèle analytique duquel il reprend la géométrie. Afin de mieux comprendre le comportement de l'écoulement simulé durant la simulation du pompage, une analyse de l'évolution des lignes isopièzes du modèle conceptuel à une fracture verticale calée sur la courbe moyenne expérimentale de type drain a été faite. Les lignes isopièzes sont des lignes d'égales charges hydrauliques, le gradient de l'écoulement est donc perpendiculaire à ces lignes (l'écoulement se fait perpendiculairement aux isopièzes).

6.1.2 Analyse du comportement du modèle type fracture verticale après le calage sur le courbe expérimentale type drain

Les valeurs élevées des paramètres de stockage (S_f et S_m) rentrés dans le modèle conceptuel provoquent un ralentissement de l'avancement du front d'écoulement dans la fracture. Ainsi aux temps courts deux écoulements se font : un à l'intérieur de la fracture et un autre dans le milieu homogène. L'évolution des lignes isopièzes dans le temps nous indique la présence de ce double écoulement aux temps courts (cf. Figure 30). Nous appellerons cet écoulement de départ "bilinéaire" car nous supposons que les deux écoulements, de la fracture et de la formation sont linéaires. Aux temps longs, en accord avec le modèle analytique, les lignes isopièzes indiquent un écoulement de type pseudoradial (cf. Figure 31).



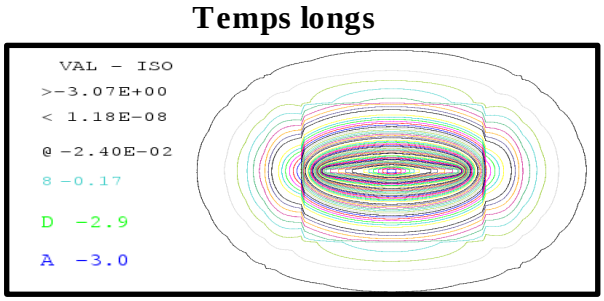
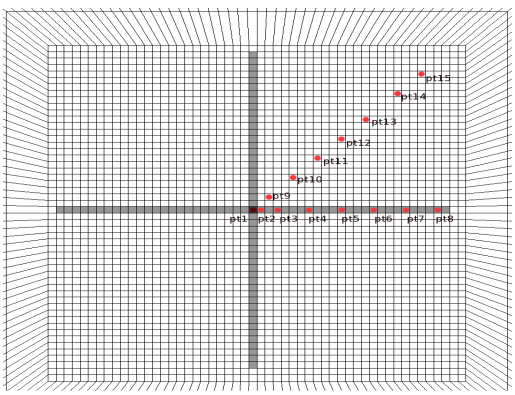


Figure 30 : à gauche, lignes isopièzes aux temps courts (rabattement en mètres, A = centrale; @ = extérieur).
Figure 31 : à droite, lignes isopièzes aux temps longs (rabattement en mètres, A = centrale; @ = extérieur)).

Le front de l'écoulement met donc un temps considérable à joindre les limites de la fracture, ainsi nous obtenons un écoulement avec une dimension comprise entre 1 et 2 pour des temps courts, et égal à 2 pour des temps longs. Par rapport à ce modèle conceptuel la courbe moyenne expérimentale de type drain, en un graphique rabattement versus le logarithme du temps, peut être vue comme deux droites avec deux pentes caractéristiques : une de début et une de fin. Ces droites sont reliées par une zone de transition convexe. La droite de début caractéristique de l'écoulement bilinéaire est due à un écoulement linéaire dans la fracture et un écoulement linéaire dans la formation. La droite de fin résulte de l'écoulement pseudo radial qui implique le milieu homogène. La zone de transition entre ces deux droites est la transition d'un écoulement bilinéaire à un écoulement pseudoradial.

6.1.3 Modèle conceptuel à deux fractures perpendiculaires verticales

Une autre géométrie similaire à la fracture verticale a été testée afin de se rapprocher d'un écoulement avec une dimension entre 1 et 2 aux temps courts.



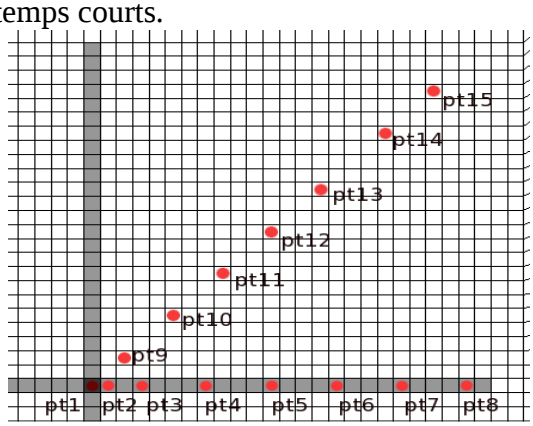


Figure 32 à gauche : Domaine maillé du modèle à deux fractures perpendiculaires et verticales.
Figure 33 à droite : Détail de la distribution des points d'observation du modèle à deux fractures perpendiculaires et verticales (pt1 est le puits de pompage).

Au lieu d'une seule fracture, deux fractures perpendiculaires de la même longueur (160 mètres chaque fracture) ont été placées au centre d'un domaine homogène et carré (cf. Figures 32 et 33). Le puits de pompage a été placé toujours au croisement des fracture qui est aussi le centre des deux fractures et du domaine. La courbe a une allure légèrement différente et les conditions aux limites commencent à avoir une faible influence aux temps longs (cf. Figure 34). Les courbes dans la matrice sont plus rapprochées entre elles, comme attendu.

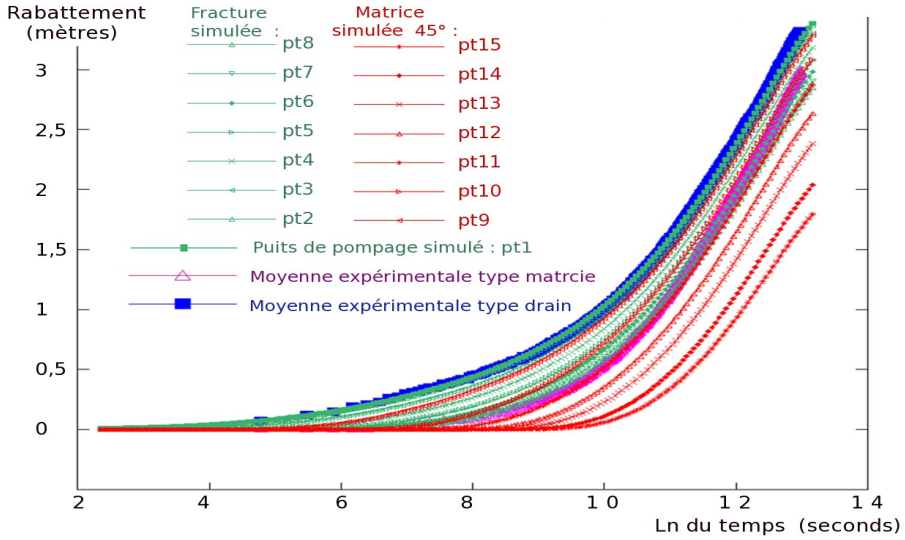


Figure 34 : comparaison entre les chroniques du rabattement expérimental (bleu et violet) et les chroniques simulées par le modèle à deux fractures verticales perpendiculaires (rouge et vert).

Le comportement de l'écoulement de cette géométrie à deux fractures verticales perpendiculaires est similaire à celui à la géométrie à uniquement une fracture. La différence est qu'aux temps courts les lignes isopièzes avancent le long de deux axes au lieu d'un seul. Des valeurs des paramètres hydrodynamiques faiblement différents de ces qui ont été obtenues de la géométrie à une fracture verticale.

Caractéristiques Hydrodynamiques	T_f	S_f	T_m	S_m
Unités de mesure	m^2s^{-1}	-	m^2s^{-1}	-
Ordre de grandeur	$1,5\ 10^{-1}$	0,06	$1,5\ 10^{-3}$	0,02

Tableau 4 : Caractéristiques hydrodynamiques issues du calage du modèle conceptuel à deux fractures perpendiculaires et verticales.

En général nous avons observé une diminution des paramètres de capacité lorsqu'il y a un meilleur "fit" des courbes simulées avec les courbes expérimentales pour un domaine de la même taille. Nous supposons que la géométrie à deux fractures perpendiculaires et verticales approxime mieux la géométrie du milieu naturel. Cela est cohérent avec les études géologiques sur la facturation (cf. Paragraphe 3.2) qui indiquent plusieurs orientations prédominantes de fracturation.

6.1.4 Conclusions sur le modèle conceptuel type fractures verticales

Deux géométries du même modèle conceptuel ont été testées : à une et à deux fractures. Les deux géométries permettent de reproduire de façon satisfaisante l'allure des courbes expérimentales. En revanche les valeurs du coefficient d'emmagasinement de la fracture sont trop élevées. Les études géologiques montrent que le milieu naturel est composé par des drains karstiques pseudo horizontaux qui interceptent et croisent des fractures pseudo verticales qui se croisent entre elles plus ou moins perpendiculairement. La géométrie qui approxime le mieux cette situation serait,

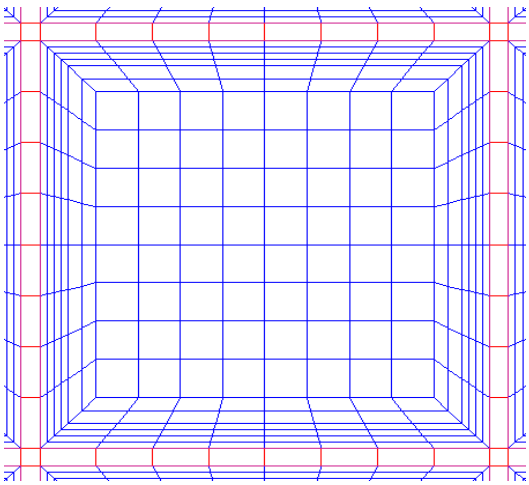
probablement, une géométrie en trois dimensions, avec un puits qu'intercepte deux plans de fracture très perméables perpendiculaires à la fois entre eux et leur intersection perpendiculaire à la direction du puits. Le tout, les fractures et le puits, entouré par un milieu homogène moins perméable (matrice). Ce stage vise à l'utilisation d'un modèle en deux dimensions donc ce modèle en trois dimensions n'a pas été implémenté. En revanche, le cas plus simple en deux dimensions qui a été traité a mis en évidence deux aspects :

1. Des types d'écoulements qui permettent de reproduire les courbes expérimentales avec les géométries implémentées, bilinéaire aux temps courts et pseudoradiale aux temps longs.
2. Les améliorations dues au changement de géométrie pour la même taille de domaine simulé, de une fracture verticale à deux fractures verticales perpendiculaires.

Même si le modèle conceptuel à une fracture verticale permet de simuler les deux courbes moyennes expérimentales, il ne permet pas de produire le même rabattement au puits de pompage sur plusieurs points du maillage. Par les observations et hypothèses faites dans l'analyse de la campagne C2005, cela est nécessaire afin de reproduire les comportements du site SEH à l'état actuel. Afin de distribuer spatialement les paramètres hydrodynamiques, une structure capable de relier très fortement plusieurs points d'observation entre eux doit être utilisée dans le modèle.

6.2 Le modèle conceptuel : Boite à Sucre Triple Milieu (BSTM)

Le modèle conceptuel "Boite à Sucre" (en anglais : "sugar box") reprend le même partage entre les milieux (matrice-fracture) et la même géométrie de maillage du modèle analytique Double Porosité (cf. Paragraphe 2 de l'annexe 2). En deux dimensions, la géométrie du modèle boite à sucre correspond à la configuration des blocs allumettes (cf. Annexe 2, figure 52, page 44). Le fort contraste des propriétés hydrodynamiques entre les milieux de ce modèle amène des gradients élevés sur les zones de contact des milieux. Les forts gradients de charge sont dus au contraste entre deux milieux présentant une forte différence dans les temps de réponse. Afin de tenir compte de ces gradients et d'éliminer ces forts écarts de cinétique à l'échelle d'une maille, une discrétisation spatiale très fine doit être adoptée pour le maillage du milieu à faible diffusivité. En revanche, une discrétisation fine est très couteuse en terme de temps de résolution du calcul numérique ; mais grâce à la géométrie simple et régulière des éléments du modèle boite à sucre (cf. Figure 35), il est possible de restreindre la discrétisation des mailles plus fines uniquement aux interfaces entre les deux milieux (cf. Figure 36), les gradients sont moindres au centre du bloc.



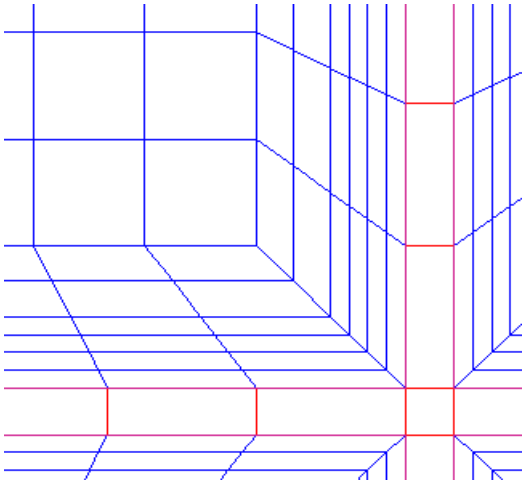


Figure 35 à gauche : Un élément du domaine boite à sucre, en bleu les éléments du bloc matriciel, en rouge les mailles du domaine fracture et en violet les segments communs aux deux maillages.
Figure 36 à droite : Le détail d'un angle d'un bloc matriciel. On remarque le maillage fin des six premières mailles du bloc matriciel au voisinage du milieu fracture.

Cette discrétisation supplémentaire sert donc à mieux rendre compte des forts gradients qui apparaissent à l'interface en créant un passage graduel des zones à cinétique rapide aux zones à cinétiques lentes.

6.2.1 Caractéristiques du modèle conceptuel BSTM et les résultats obtenus

Le domaine en deux dimensions qui a été utilisé pour la simulation mesure 400 m². L'épaisseur des fractures mesure 0,2 m et les blocs de matrice mesurent 25 m². L'orientation des plans des fractures du modèle conceptuel BSTM, Nord – Sud et Est – Ouest, donne une géométrie orthogonale des plans de fracture. Cela est cohérent avec la prise en compte les résultats des études de facturation menées sur le site et dans ses environs. Les directions prépondérantes de fracturation de la formations de l'aquifère étudié dans la région sont N0 et N120, la direction prépondérante issue de la géophysique en puits (l'imagerie de paroi) est la direction N90 (cf. Paragraphe 4). Une simplification de la discrétisation numérique, avec le respect de la géométrie du milieu naturel, est ainsi obtenue dans le modèle conceptuel.

Afin d'obtenir la même chronique de rabattement sur plusieurs points du domaine, un troisième milieu, le milieu "drain", a été inséré dans le domaine Boite à Sucre. Dans le cadre darcéen traité dans ce rapport, un drain, ou conduit karstique, est caractérisé par une diffusivité (T/S) très élevée. Un milieu drain continu soumis à un pompage doit, à tous les moments du pompage, présenter le même rabattement de la maille du puits de pompage en tous ses points. L'intégration de ce milieu dans le domaine boite à sucre a été fait en partageant le milieu fracture en deux "sous-milieux" : le drain et la fracture. Le milieu drain a été distribué à la place du milieu fracture selon trois objectifs :

1. Joindre tous les puits qui dans l'analyse de la campagne 2005 répondent de la même façon.

2. Tenir compte des connections entre les puits mises en évidence par les interprétations de la campagne de chocs hydrauliques.

3. Occuper le pourcentage de domaine fracture le plus faible possible afin de réduire au minimum l'influence de ce milieu sur la réponse moyenne simulée.

Nous avons choisi une des configurations possibles de ce domaine (cf. Figure 38), toute une série de géométries capables de distribuer spatialement les réponses du rabattement comme les observations de la C2005 pourraient être considérées. La géométrie utilisée est simple et elle peut être facilement changée (cela sera repris ensuite dans les perspectives). Dans le modèle conceptuel BSTM en 2D le drain est donc représenté comme des "segments" (une série de mailles singulières) liés pour donner un réseau continu. L'approximation prise afin de connecter plusieurs points du domaine par le milieu drain en 2D est que les mêmes propriétés hydrodynamiques du drain sont donc intégrées sur toute l'épaisseur de l'aquifère.

Les points d'observation simulés ont été placés afin de reproduire la même configuration spatiale du système five spot du site SEH. Les puits qui présentent la réponse de type drain dans l'analyse de la C2005 ont été placés dans le milieu drain. Trois puits ont été placés dans le milieu fracture et trois puits dans le milieu matrice. Le puits placés dans la matrice ont été écartés plus ou moins fortement du milieu fracture à l'intérieure du bloc matrice (le point pt1, pt2 et pt4 sont respectivement à 3,75, à 2 et à 5 mètres du réseau drain - fracture). Le point 6 correspond au puits P1 qui d'après les tests hydrauliques apparait déconnecté du réseau drain et influencé par la réinjection. Ce point a été positionné dans le milieu fracture et éloigné du milieu drain afin d'obtenir une information sur le comportement du modèle conceptuel à cet endroit (cf. Figure 38). La taille des blocs (25 m²) est la moitié de la distance minimale entre les puits en orientation nord sud.

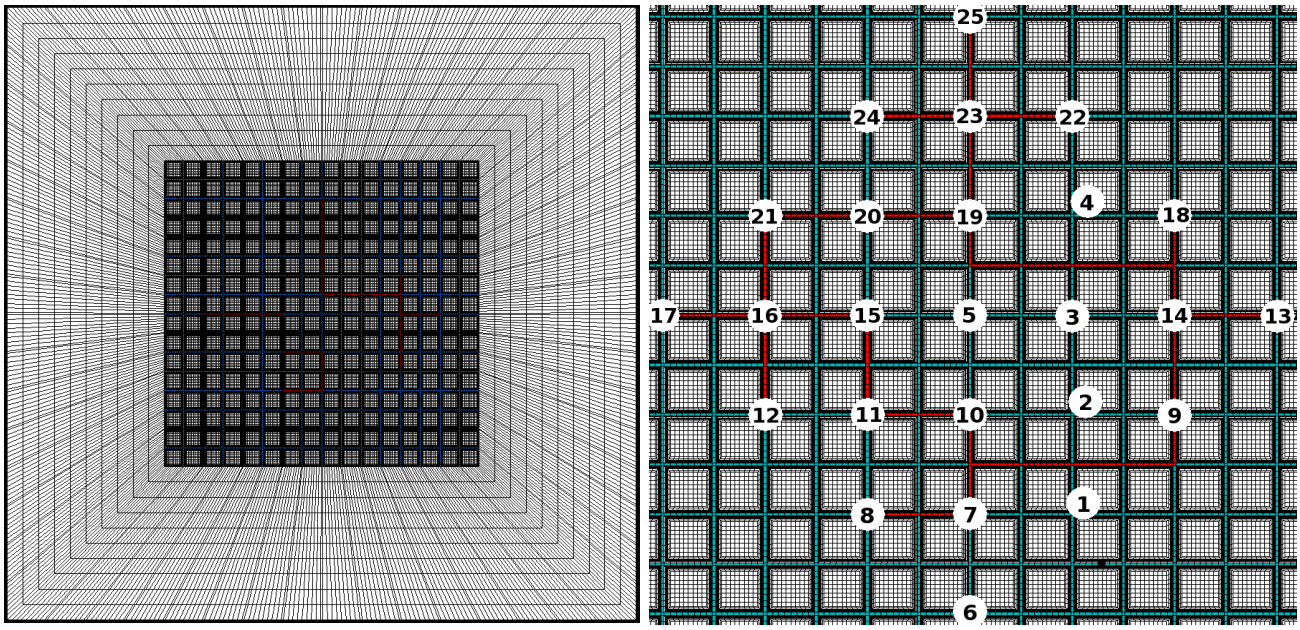


Figure 37 à gauche : Domaine du modèle boite à sucre total avec la couronne extérieure;
Figure 38 à droite : Détail du domaine à 3 milieux avec les points d'observation simulées : drains en rouge, fractures en bleu et blocs matriciels en blanc ; les points 1, 2, et 4 sont placés dans le milieu matrice ; les points 3, 5 et 6 dans le milieu fracture et le point 7 est placé sur la maille du puits de pompage et les points du 8 au 25 sont dans le milieu drain.

C'est la plus grande des tailles qui permette de choisir de croiser un puits avec le milieu drain ou passer entre deux puits, sans compliquer la géométrie boite à sucre. Elle a été choisie pour deux raisons:

1. Elle est légèrement plus grande que l'écart maximal entre les fractures observé dans les formations affleurantes (20 m en orientation 120N (*Audouin 2007)*) ; l'hypothèse faite est qu'elle représente l'écart moyen entre les fractures intégré sur toute l'épaisseur de l'aquifère.

2. Elle est la mois coûteuse en terme de temps de calcul.

Enfin une couronne extérieure au domaine Boite à Sucre a été employée pour éloigner l'influence des conditions aux limites à des temps très longs (cf. Figure 37). Les propriétés hydrodynamiques de la couronne sont différentes des autres milieux.

Avec ce modèle conceptuel (BSTM) les trois types de courbes ont pu être simulés (drain, fracture et matrice). Le calage a été fait entre la chronique expérimentale moyenne de type drain et la chronique simulée dans le milieu drain. La moyenne expérimentale de type drain a pu être reproduite de façon satisfaisante dans tout le milieu drain. La chronique expérimentale a donc été simulée en même temps sur les points d'observation qu'interceptent le milieu drain (cf. Figure 39 : la courbe verte). Les autres puits d'observation simulés, placés dans les milieux fracture et matrice, donnent des réponses décalées dans le temps, comme attendu (cf. Figure 39 : les courbe rouges).

Quatre types de milieu sont employés dans ce modèle conceptuel : le drain, la fracture, la matrice et la couronne. Le calage du modèle a nécessité l'utilisation des huit paramètres hydrodynamiques (deux pour chaque milieu). Les valeurs retrouvées ne correspondent pas aux valeurs des interprétations des études précédentes, mais les ordres de grandeur trouvés rentrent dans des gammes de valeurs réalistes (cf. Tableau 4). Les valeurs en rouge ont été choisies *a priori*, le S_{drain} a été pris très petit afin d'éliminer son influence sur la réponse du milieu au pompage simulée et $S_{couronne}$ a été pris très élevé pour rejeter les effets l'influence des conditions aux limite de type charge imposée aux temps très longs. Ces résultats sont satisfaisants, ce modèle, calé et distribué sur les données résultantes de la campagne de pompage C2005, sera donc retenu par la suite comme représentatif du milieu naturel à l'état actuel.

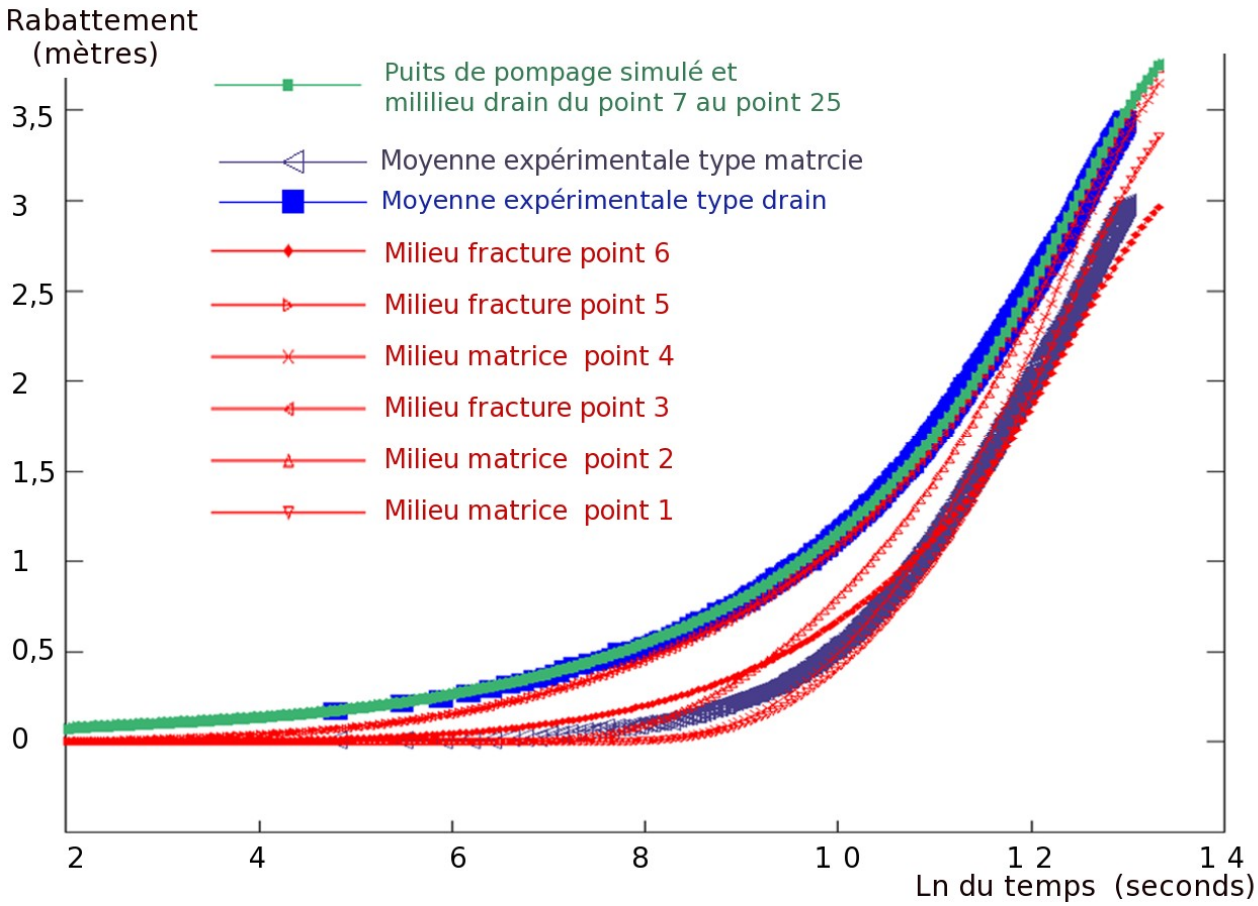


Figure 39 :Comparaison entre les chroniques expérimentales du rabattement et les chroniques simulées avec le modèle BSTM.

Caractéristiques Hydrodynamiques	T_{drain}	S_{drain}	$T_{facture}$	$S_{fracture}$	$T_{matrice}$	$S_{matrice}$	$T_{couronne}$	Scouronne
Unités de mesure	m^2s^{-1}	-	m^2s^{-1}	-	m^2s^{-1}	-	m^2s^{-1}	-
Ordre de grandeur	$5\ 10^{2}$	10^{-4}	$1,5\ 10^{-1}$	$8\ 10^{-3}$	$2,5\ 10^{-6}$	$1,1\ 10^{-2}$	$3,7\ 10^{-3}$	0,2

Tableau 4 : Caractéristiques hydrodynamiques issues du calage du modèle conceptuel BSTM

Les courbes des puits simulées fracture et matrice sont plus écartées de la courbe du milieu drain aux temps courts et elles se rapprochent aux temps longs (cf. Figure 39). Les allures des chroniques des points matrice ressemblent à celle de la courbe expérimentale moyenne de type matrice. Le rabattement plus faible au départ et l'augmentation plus rapide du rabattement ensuite aux temps longs est dû à la géométrie utilisée. Une relation entre l'allure des courbes et le positionnement des points d'observation fracture et matrice par rapport au milieu drain est mise en évidence. Par simplicité nous traiterons les deux cas séparément ci-après.

1. **Les points placés dans le milieu fracture (pt3, pt5 et pt6):**

Les deux points placés à l'intérieur de la boucle faite par le réseau du milieu drain (pt3 et pt5) ont une réponse très semblable à celle du milieu drain, ces réponses sont peu écartées aux temps courts et superposées à la courbe verte (milieu drain) aux temps longs. La réponse du point éloigné du milieu drain (pt6), au contraire, est bien écartée de la réponse du milieu drain (cf. Figures 38 et 39). De plus la différence de rabattement entre le point 6 et le milieu drain est moins importante au départ qu'à la fin de la simulation. De ces observations nous supposons que les deux facteurs principaux qui influencent la réponse de type fracture sont : le fait d'être entouré par le milieu drain et la distance au drain.

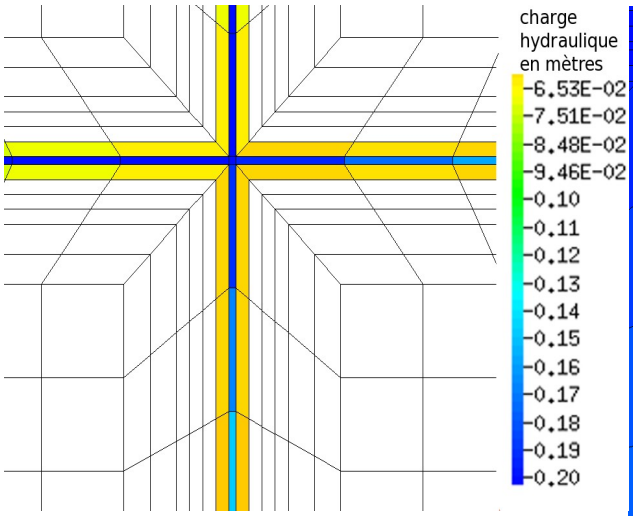
2. **Les points placés dans le milieu matrice (pt1, pt2 et pt4):**

Les trois points matrice répondent de manière différente. Le point 2 est placé à l'intérieur de la boucle faite du milieu drain et il est le plus rapproché du milieu fracture (2,5 m). La réponse de ce point est bien écartée au départ et elle se superposée à la réponse du milieu drain à la fin de la simulation. Le point 1 est à l'extérieur de la boucle du drain et à 3,75 mètres du milieu fracture, sa réponse est très écartée aux temps courts et elle se rapproche faiblement ensuite. La réponse de ce point est celle qui ressemble le plus à la courbe expérimentale moyenne de type matrice. Le point 4 est le plus éloigné du milieu fracture (5 mètres) et il a le même éloignement du milieu drain que le point 1. On s'attendrait donc à ce qu'il présente le rabattement le plus faible le long de la simulation. Au contraire, la courbe du rabattement issue de la simulation se place entre les courbes issues des deux autres points matrice décrits précédemment (cf. Figures 39). Cela peut être dû au fait que le milieu drain entoure partiellement ce point qui serait donc soumis à un plus fort drainage (cf. Figures 38). De ces observations nous supposons que les deux facteurs principaux influençant la réponse de type matrice sont, comme pour la fracture, le fait d'être entouré par le milieu drain et la distance au drain, puis à la fracture.

Afin de comprendre la propagation de l'écoulement dans les domaines (drain, fracture et matrice) du modèle numérique BSTM après calage, une analyse de l'évolution de la piézométrie du domaine maillé durant le pompage a été faite.

6.2.2 Analyse du modèle conceptuel BSTM durant la simulation

Du fait des différentes propriétés hydrodynamiques, une différence de pression (ou de charge *h*) entre les milieux se met en place durant le pompage. Le rabattement dû au pompage se fait d'abord dans le milieu à très forte transmissivité, le drain, puis il affecte les deux autres, d'abord dans la fracture et après la matrice. Le milieu fracture est donc drainé uniquement par le milieu drain, un bloc matriciel est drainé au même temps sur les quatre côtés par les milieux drain et fracture. Si on se place en un point (une maille) à l'intérieur du bloc matriciel, le nombre de côtés du bloc qui draine ce point est variable durant le pompage, il varie en effet en fonction de l'avancement du front. Aux temps courts les quatre fronts de drainage, qui avancent des côtés vers le centre du bloc, n'ont pas encore rejoint le centre du bloc ; donc uniquement un des côtés du bloc draine la partie du bloc soumis à l'écoulement (cf. Figure 40). L'écoulement dans le bloc se fait donc de façon linéaire et le rabattement augmente lentement. Aux temps longs les fronts se rejoignent dans le bloc, à partir de ce moment, tous les points du bloc sont soumis au drainage sur les quatre côtés (cf. Figure 41), le rabattement se fait alors plus rapidement.



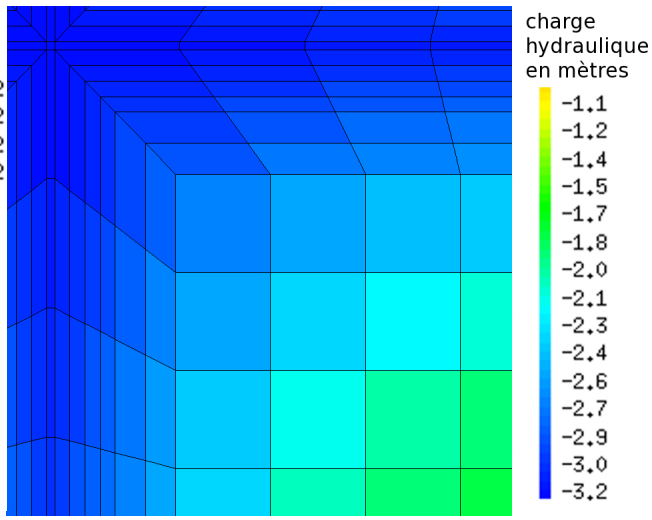


Figure 40 à gauche : Valeurs de charge hydraulique (H), détail d'élément du modèle BSTM aux temps courts.
Figure 41 à droite : Valeurs de charge hydraulique (H), détail d'élément du modèle BSTM aux temps longs.

Par rapport aux observations faites dans le paragraphe ci-dessus, nous supposons qu'une boucle du milieu drain provoque, à une échelle plus grande et d'une façon plus complexe, un phénomène similaire à celui mis en évidence ici pour le bloc drainé sur ses quatre côtes par les milieux à forte diffusivité (T/S).

À une échelle plus grande (cf. Figures 42 et 43), l'évolution de la piézométrie indique un changement du type d'écoulement entre les temps courts et les temps longs. Comme dans le modèle FV (cf. Paragraphe 6.1.1), aux temps courts on remarque un gradient à l'intérieur des fractures et aux extrémités des blocs matriciels. Par similitude, l'écoulement est donc de type "bilinéaire", car l'écoulement total résulte de l'écoulement linéaire dans le bloc matriciel plus celui des fractures (cf. Figure 42). Aux temps longs les blocs matriciels sont drainés sur le quatre côtes et la couronne est aussi concernée par l'écoulement. Nous supposons, en regardant la piézométrie du domaine maillé BSTM, que l'écoulement devient donc pseudoradial aux temps longs (cf. Figure 43). D'une façon plus complexe, la même évolution des écoulements du modèle à une fracture verticale du paragraphe précédent est donc retrouvée.

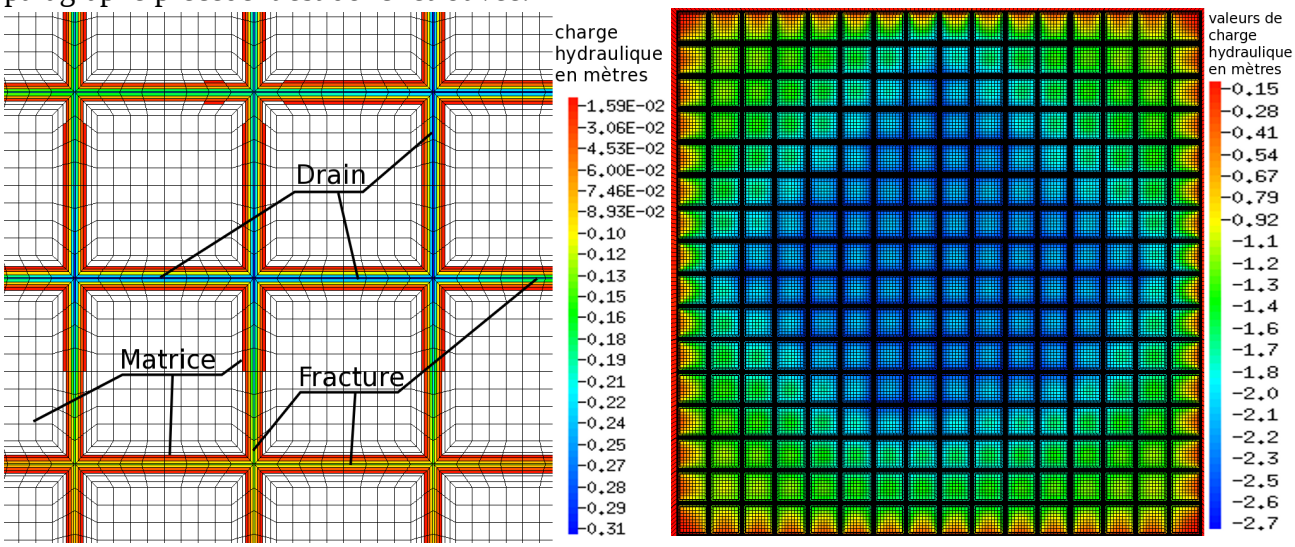
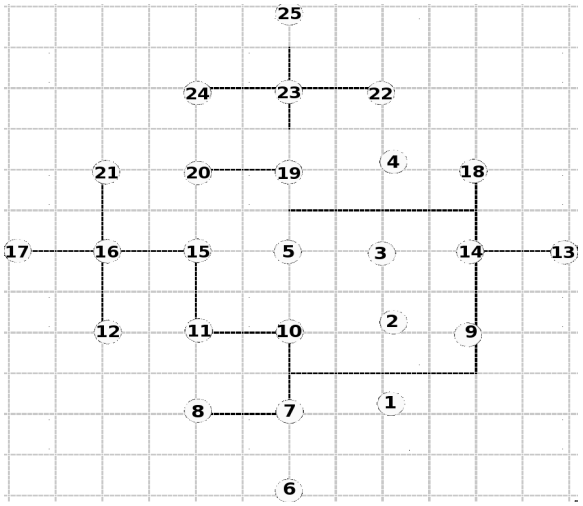


Figure 42 à gauche : Charges hydrauliques des maille des milieux drain, fracture et matrice aux temps courts.
Figure 43 à droite : Charges hydrauliques du domaine maillé BSTM aux temps longs.

6.2.3 Simulation de la campagne C2004 avec le modèle conceptuel BSTM calé sur la campagne C2005

Le changement des réponses aux tests de pompage de longue durée du site SEH intervenu entre les campagnes de pompage C2004 et C2005 correspondrait, selon les hypothèses faites, à une liaison de plusieurs petits réseaux de conduites karstiques suite aux travaux de la dernière campagne de forage (2004) (cf Figure 5 page 5). Dans le modèle conceptuel BSTM, qui a été mis en place et calé par rapport à la courbe moyenne de type drain issue de l'analyse de la campagne C2005 (cf. Paragraphes 5.4), les réponses de la campagne C2004 devraient être obtenues par exemple en isolant certaines portions de drain. Afin de vérifier cette hypothèse, une simulation de situation enregistrée pendant la campagne C2004 a été mise en oeuvre. Le milieu drain a été partagée en plusieurs segments discontinus pour simuler plusieurs petits réseaux de conduites karstiques discontinues. Le pompage pris comme référence a été fait dans le puits M6 en 2004, les puits d'observation pris en considération sont les puits : M11, M3, MP5, MP6, et M5 (cf. Figure 14 à page 11). Le milieu drain a été distribué pour obtenir les même écarts entre les réponses du pompage choisi (cf. Figure 44). Toutes les autres caractéristiques du modèle ont été maintenues comme celles du modèle BSTM calé sur la courbe moyenne type drain de la campagne 2005. Les résultats sont encourageants. Qualitativement, la même tendance à l'écartement entre les courbes du rabattement versus le temps des mesures expérimentales est obtenue dans la simulation.



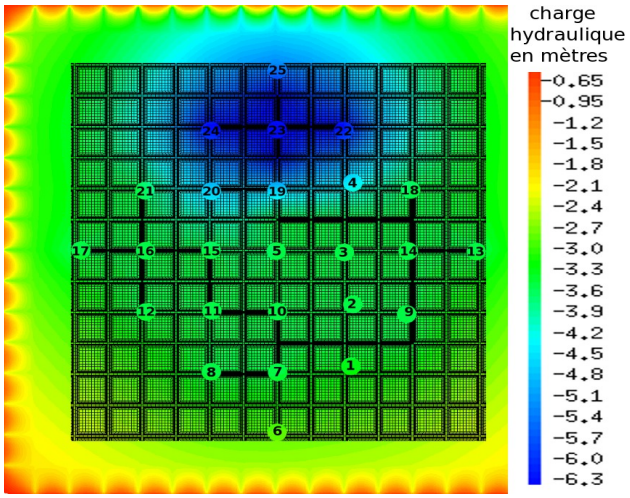


Figure 44 à gauche : Le réseau de du milieu drain discontinu en noir, les emplacements des puits M11, M3, MP5, MP6, et M5 correspondent respectivement aux points 22, 25, 20, 15 et 17.
Figure 45 à droite : Piézomètrie résultante de la simulation avec le domaine drain partagé.

Les points rapprochés et connectés par le petit réseau de drains continus ont des rabattements plus importants (avec des valeurs maximales autour de 6 mètres). Tous les autres puits d'observation plus distants ont des réponses plus faibles très similaires entre eux (cf. Figures 45 et 46). En revanche, la "baïonnette" reste à des temps très courts (cf. Figure 46 : entre 0 et 4 unité de Ln (temps)), elle n'apparaît pas au bon moment (entre 8 et 10 unité de Ln (temps)). Cela pourrait indiquer que d'autres facteurs exercent une influence pour le changement de réponse entre les deux campagnes. D'autres combinaisons de paramètres hydrodynamiques pourraient être cherchées afin de simuler ce phénomène. Par exemple, on pourra introduire un coefficient d'emmagasinement du milieu drain égal à 1, au lieu du valeur très faible choisie a priori (10^{-4}).

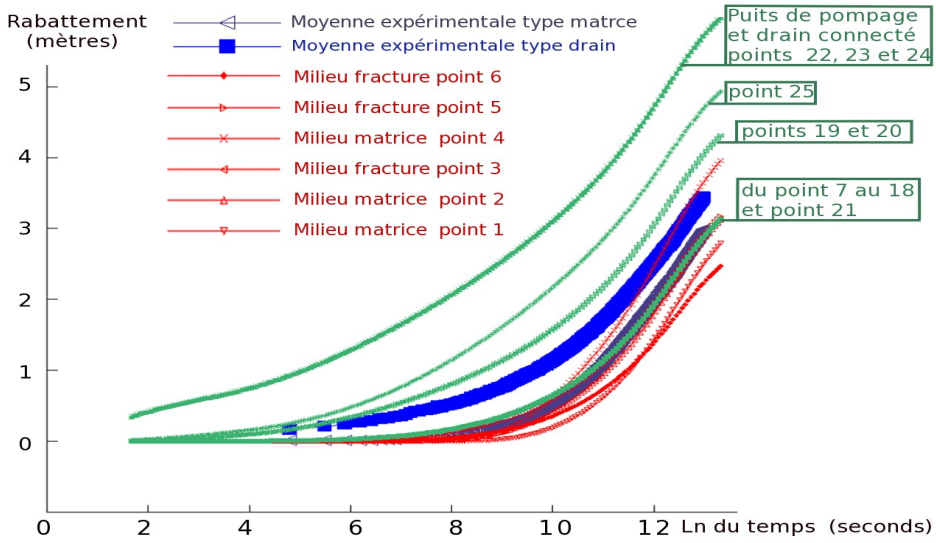


Figure 46 : Les chroniques simulées avec le milieu drain du modèle BSTM fractionné.

6.3 Conclusions sur les modèles conceptuels FV et BSTM

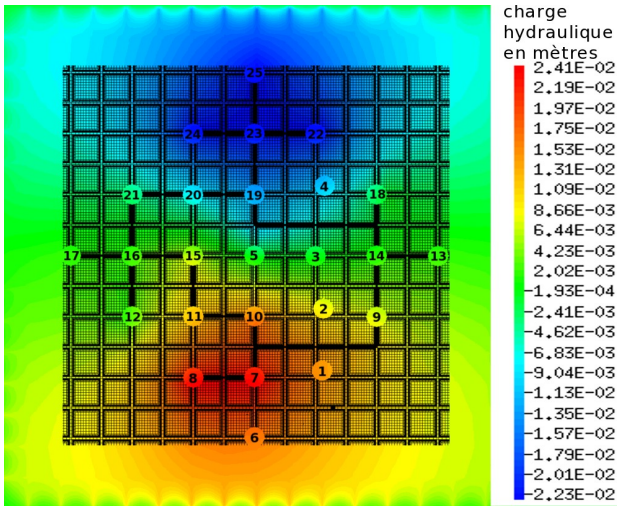
Les modèles conceptuels en deux dimensions mis en place permettent de reproduire les courbes moyennes expérimentales issues de la campagne de pompage C2005. Une évolution de l'écoulement durant le pompage, de bilinéaire à pseudo radial, a été mise en évidence dans les deux cas après le calage. La distribution spatiale des réponses du système five spot du site SEH peut être obtenue uniquement avec le modèle conceptuel boite à sucre triple milieu. Nous retenons donc le modèle conceptuel BSTM comme le plus apte à la prédiction du comportement du système five spot du site SEH soumis aux tests en dipôle.

7 Simulation prédictive des tests en dipôle

L'objectif de ce stage est de faire une prédiction du comportement du site SEH soumis à des tests en dipôle. Un test en dipôle est composé d'un puits de pompage et d'un puits de réinjection placés à une distance plus ou moins importante l'un de l'autre et dans le même système aquifère. Ces tests seront menés sur le système de puits Five Spot (cf. Paragraphe 2.2) du site SEH dans les mois à venir. Les deux configurations dont les simulations ont été demandées sont :

1. Le pompage (flux sortant) sur le puits M6 et la réinjection (flux entrant) dans le puits M22
2. Le pompage (flux sortant) sur le puits M12 et la réinjection (flux entrant) dans le puits M15

Cette simulation "prédictive" nécessite l'utilisation d'un modèle qui reproduise une répartition spatiale des réponses aux tests d'interférence de longue durée similaire à celle observée sur le site SEH en 2005. Le modèle employé est donc le modèle conceptuel Boite à Sucre Triple Milieu calé et distribué sur les données expérimentales de la campagne des pompages C2005. Les résultats obtenus des deux conformations sont très similaires, la différence de charge hydraulique entre les deux puits intéressés par le dipôle est très faible, l'ordre de grandeur est en centimètres (cf. Figure 47, 48 et 49).



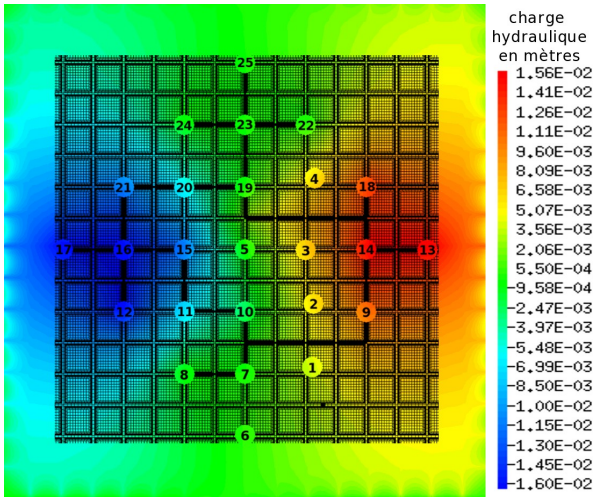


Figure 47 à gauche : Piézométrie simulée du système five spot soumis au test en dipôle M6 (pt7) et M22 (pt 23).
Figure 48 à droite : Piézométrie simulée du système five spot soumis au test en dipôle M12 (pt16) et M15 (pt 14).

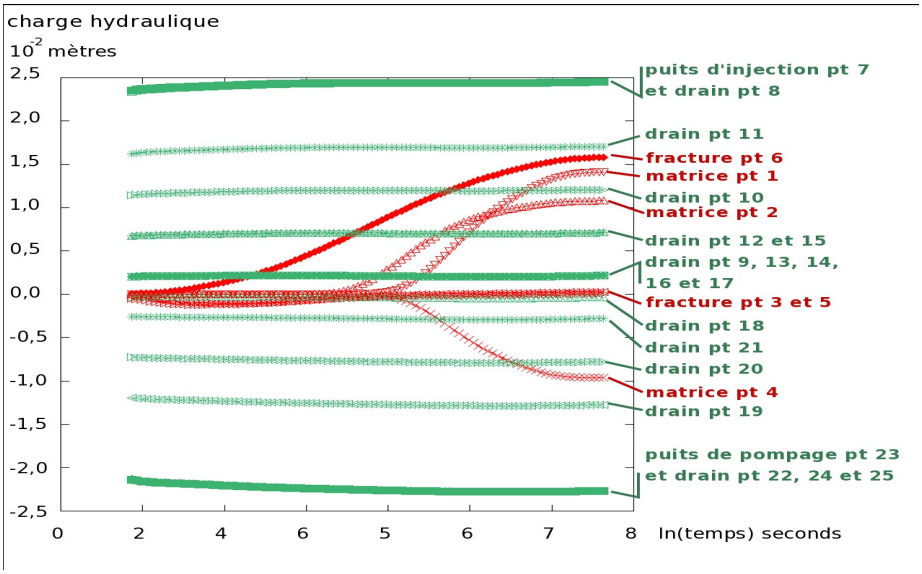


Figure 49 : Chronique de la variation de charge hydraulique en fonction du logarithme naturel du temps en secondes du système five spot soumis au test en dipôle M6 (pt7) et M22 (pt 23).

Ce résultat est satisfaisant par rapport aux hypothèses faites dans la conceptualisation du modèle. L'hypothèse principale du modèle BSTM est que tous les puits joints par le milieu drain ont la même réponse à tous les instants du test du pompage. Le milieu de type drain est affecté donc par des propriétés hydrodynamiques qui impliquent une connexion entre les puits très élevée. Ainsi un dipôle, pompage – injection, placé à l'intérieur du milieu drain continu produit une différence de charge hydraulique très faible. Cela est cohérent avec les hypothèses faites dans l'analyse de la C2005, car le résultat d'un dipôle entre deux puits joints par une structure comme un drain karstique (un tuyau) sera une différence de pression très faible, sinon nulle. Nous considérons donc que le résultat des tests en dipôle sera difficilement observable par les instrumentations.

8 Conclusions

Ce stage a traité de la modélisation des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère calcaire, fracturé et karstique du Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers. L'objectif final est la prédiction du comportement du site soumis à des tests en dipôle (pompage – injection), ces tests seront menés sur le site dans les mois à venir. L'analyse faite pendant le stage, des études faites jusqu'à présent et de la dernière campagne de pompages (C2005), nous a porté à faire l'hypothèse suivante. Dans le système aquifère calcaire à l'aplomb du site SEH, à l'état actuel, trois différents milieux coexistent d'un point de vue hydrodynamique : le milieu drain, le milieu fracture et le milieu matrice. Les deux caractéristiques des réponses enregistrées dans les puits du site SEH qui nous ont amené vers cette hypothèse sont :

1. Les formes des courbes du rabattement en fonction du logarithme du temps des pompages des campagnes C2004 et C2005. Ces formes indiquent la présence d'un milieu hétérogène de type fracturé composé de deux milieux (matrice et fracture). Les approches utilisées pour l'interprétation des courbes jusqu'à présent sont l'approche fractale à milieu unique, l'approche homogène à double milieu et fractale à double milieu (cf. Paragraphe 4.2).
2. La répartition spatiale des réponses après 2005. La majorité des puits d'observation du système "five spot emboité" (cf. Paragraphe 2) présente la même chronique du rabattement en fonction du temps, même si ils sont positionnés à des distances différentes du puits de pompage. La présence d'un drain capable de relier hydrauliquement les puits entre eux a été supposée (cf. Figure 14 page 11 et paragraphes 4.1.3, 5.1.2 et 5.3).

Deux modèles numériques conceptuels ont été mis en place au cours du stage, le modèle conceptuel à une Fracture Verticale (FV) et le modèle Boite à Sucre Triple Milieu (BSTM). La résolution numérique a été faite dans le cadre darcéen et en régime transitoire, grâce au code de calcul Cast3M, avec un schéma aux éléments finis mixtes hybrides (EFMH). Ces deux modèles permettent de reproduire les courbes moyennes d'un des pompages de la campagne C2005. Après le calage, une analyse de l'évolution de la charge hydraulique sur les deux domaines maillés durant le pompage simulé a été faite. Cette analyse à mis en évidence, dans les deux cas, un écoulement de type "bilinéaire" (dimension n comprise entre 1 et 2) aux temps courts et un écoulement de type pseudoradial aux temps longs (n = 2). En revanche, uniquement le modèle Boite à Sucre Triple Milieu (BSTM) permet d'obtenir la distribution spatiale des réponses observée sur le site pendant la campagne C2005. C'est donc le modèle BSTM, calibré sur les données de la campagne 2005, qui a été utilisé pour la prédiction du comportement du système five spot soumis à des tests en dipôle. Le résultat de cette simulation "prédictive" donne un écart maximal de charge hydraulique (hauteur d'eau) entre le puits d'injection et le puits de pompage très faible, dont l'ordre de grandeur est du centimètre. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse faite de l'existence d'un milieu (le drain) avec une transmissivité très élevé et capable de relier très fortement les puits entre eux, au point de vue hydraulique. Si cette hypothèse est correcte, le modèle conceptuel BSTM en deux dimensions serait suffisant pour décrire le comportement du site soumis au tests en dipôles. Nous considérons donc que le résultat des tests en dipôle sera difficilement observable par les instrumentations.

9 Perspectives

Au cours du stage, le modèle analytique Double Porosité (DP) en 2D pour le puits de pompage a été utilisé afin d'interpréter la réponse expérimentale moyenne de type drain (cf. Paragraphe 5.5). L'hypothèse sur laquelle se base cette approche est que, après 2005, si les pertes de charge quadratiques ne se manifestent pas au puits de pompage tous les puits d'observation connectés par le drain karstique présenteraient la même réponse du puits de pompage. La méthode la plus adaptée pour l'interprétation des courbes des puits d'observation (toutes égales entre eux) serait alors une méthode au puits de pompage. Le résultat obtenu par le modèle analytique Double Porosité (DP) au puits de pompage *(Warren and Root 1963)* est encourageant, mais il n'est pas très satisfaisant (cf. Paragraphe 5.5). En phase de calage, ce modèle ne permet pas de varier la rapidité de la transition entre les différentes phases de l'écoulement. En un graphe du rabattement contre le logarithme du temps, aucune des variables du modèle n'agit sur l'amplitude (ou le rayon) de la courbe qui relie la droite issue de l'écoulement de transition à la droite de l'écoulement de la matrice et des fractures (cf. Paragraphe 2 de l'annexe 2 et paragraphe 5.5). Ainsi l'allure de la courbe n'a pas pu être reproduite de façon très satisfaisant, de plus les paramètres hydrodynamiques retrouvées sont discordants des études précédentes. Afin d'obtenir un interprétation quantitative des caractéristiques hydrodynamiques moyennes du site SEH à l'état actuel, le développement, ou l'utilisation, d'un modèle analytique au puits de pompage qui prend en compte une hétérogénéité plus élevée du modèle DP simple serait envisageable. Ce modèle analytique devrais être capable de faire varier la rapidité de la transition entre les phases d'écoulement.

Le modèle conceptuel Boite à Sucre Triple Milieu (BSTM) en deux dimensions a une géométrie relativement simple, ainsi des variations des ses paramètres géométriques peuvent être facilement apportées. Pendant ce stage une des conformations possibles de ce modèle a été choisie et utilisée, puis une combinaison des caractéristiques hydrodynamiques à été trouvée avec le choix de certaines valeurs *a priori*. D'autres géométries et combinaisons de paramètres peuvent être considérées. La perspective est de caler toute une série de géométries possibles du modèle BSTM et d'utiliser ensuite une approche statistique pour obtenir une gamme de propriétés hydrodynamiques candidates. Cela apporterait une information statistique des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère étudié. Afin de considérer une série de réalisations possibles une fonction objectif adaptée à l'évaluation des résultats devra être adoptée. Puis, un ou plusieurs critères d'acceptation de la solution devront être pris. Le calage manuel de paramètres hydrodynamiques n'est pas trivial et à cause aussi du fait que l'on cale un régime transitoire il a nécessité un temps important pendant cette étude. Il serait donc souhaitable de développer un calage automatique de propriétés hydrodynamiques.

L'approche en 2D intègre pour chaque milieu les propriétés hydrodynamiques sur toute l'épaisseur de l'aquifère. Dans le modèle BSTM en 2D, le milieu drain, qui est caractérisé par une transmissivité très élevée afin de relier hydrauliquement plusieurs points du domaine, est représentée comme des "segments" (une série de mailles) liés pour donner un réseau. Cette représentation est suffisante pour la prédiction des tests hydrauliques de longue durée, comme nous l'avons montré au long de ce rapport. En revanche, afin de simuler des tests de traçage chimique ou des tests de courte durée (slug tests), un modèle en trois dimension deviendrait probablement indispensable. Un modèle en trois dimensions pourrait tenir compte aussi des différentes géométries des milieux. En trois dimensions à la fois les géométries des milieux et de la façon dont ces géométries se repartissent dans l'espace pourraient mieux être tenues compte. Un modèle en 3D serait une représentation numérique plus proche du milieu naturel de l'aquifère du site SEH à l'état actuel. En revanche, une complexité plus forte résulterait d'une approche en 3D. Cela impliquerait probablement des temps de mise en place et de calage plus longs par rapport à l'approche en 2D. Une approche statistique et le calage automatique deviendraient alors difficilement réalisables.

Bibliographie

Audouin, O. 2007. 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. Université de Poitiers, Poitiers.

Audouin, O., and J. Bodin. 2007. Analysis of slug-tests with high frequency oscillations. Journal of Hydrology, 334:282-289.

Audouin, O., and J. Bodin. 2008. Cross-borehole slug test analysis in a fractured limestone aquifer. Journal of Hydrology, 348, 510-523.

Audouin, O., J. Bodin, G. Porel, and B. Bourbiaux. 2007-08. Flowpath structure in a limestone aquifer : multi-borehole logging investigations at the Hydrogeological Experimental Site of Poitiers, France. Hydrogeology Journal, accepté en aout 2007.

Barenblatt, G. I., I. P. Zheltov, and I. M. Kochina. 1960. Basic concepts on the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. Journal of app. mathematics and mechanics 24 : 1286-1303.

Barker, J. A. 1988. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. Water Resources Research 24 : 1796-1804.

Bernard, S. 2005. Caractérisation hydrodynamique des réservoirs carbonatés fracturés : Application au site expérimental hydrogéologique (SEH) de l'université de Poitiers. Université de Poitiers.

Bernard, S., F. Delay, and G. Porel. 2006. A new method of data inversion for the identification of fractal characteristics and homogenization scale from hydraulic pumping tests in fractured aquifers. Journal of Hydrology 328:647-658.

Bourbiaux, B., J. P. Callot, B. Doligez, M. Fleury, F. Gaumet, M. Guiton, R. Lenormand, J. L. Mari, and H. Pourpak. 2007. Multi-Scale Characterization of an Heterogeneous Aquifer Through the Integration of Geological, Geophysical and Flow Data: A Case Study. Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP 63.

Bourdarot, G. 1996. Essais de puits : méthodes d'interprétation, Technip et l'IFP, Paris.

Bourdet, D. and A.C. Gringarten 1980. Determination of fissure volume and block size in fractured reser- voirs by type-curve analysis. Paper SPE 9293 presented a t the 1980 SPE Annual Fall Techn. Conf. And Exhib., Dallas.

Burbaud-Vergneaud, M. 1987. Fracturation et interactions socle-couverture : le seuil du Poitou. Université de Poitiers.

Butler Jr., J. J., and X. Zhan. 2004. Hydraulic tests in highly permeable aquifers. Water Resources Research 40.

Dabbene F., X. Nouvellon. 1994. Extension de la méthode des éléments finis mixtes hybrides à la résolution des équations de Darcy en régime transitoire. Rapport CEA - DMT/94/566

Delay, F., A. Kaczmaryk, and P. Ackerer. 2007. Inversion of interference hydraulic pumping tests in both homogeneous and fractal dual media. Water Resources 30:314-334.

Delay, F., G. Porel, and S. Bernard. 2004. Analytical 2D model to invert hydraulic pumping tests in fractured rocks with fractal behavior. Geophysical Research Letters 31:L16501.

De Marsily, 1981. G. Hydrogéologie Quantitative, Masson, Paris.

Gaumet, F., M. Guiton, and J. P. Callot. 2004. Hétérogénéité sédimentaire et fracturation dans le jurassique du Site Expérimental Hydrogéologique de Poitiers. Rapport de Mission.

Gaumet F. 2007.Caves end paleocaves in the HES : geological synthesis and new evidences from C3 – C4 core study. Geological report, cores of wells C3 – C7.

Gringarten, A.C. and P.A. Witherspoon 1972. A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. In: Int. Soc. Rock Mechanicsand Int. Ass. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics, Stuttgart, V0l.3-B pp. 1-9.

Gringarten, A.C. and P.A. Witherspoon 1972. A method of analyzing pump test data from fractured aquifers. In: Int. Soc. Rock Mechanicsand Int. Ass. Eng. Geol., Proc. Symp. Rock Mechanics, Stuttgart, V0l.3-B pp. 1-9.

Hoteit, H. 2002 Simulation d'écoulements et de transports de polluants en milieu poreux : Application à la modélisation de la surété des dépôts de déchets radioactifs. Thèse de Doctorat de l'université Rennes1, (France).

Kaczmaryk, A., and F. Delay. 2007a. Improving dual-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.

Kaczmaryk, A., and F. Delay. 2007b. Interference pumping tests in a fractured limestone (Poitiers - France) : Inversion of data by means of dual-medium approaches. Journal of Hydrology 337:133-146.

Kazemi, H.,M.S. Seth, and G.W. Thomas 1969. The interpretation of interference tests in naturally fractures reservoirs with uniform fracture distribution. Soc. Of Petrol. Engrs. J, pp.463-472.

Kruseman, G.P., N.A. De Ridder. 1991. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, second edition, International Institute for Land Reclamation and Improvement.

McElwee, C. D., and M. A. Zenner. 1998. A Nonlinear Model for Analysis of Slug-Test data. Water Resources Research 34:55-66

Miller, F. G. 1962. Theory of unsteady-state inflow of water in linear reservoirs, J. Inst. Pet., 48, 467–477.

Walker,D.D,and R.M.Roberts. 2003. Flow domension corresponding to conditions Water Resour. Res., 93(12) 1349, doi:10.1029/WR001511.

Warren,J.E. and P.L.Root 1963. The behavior of naturally fractured reservoirs. Soc. Of Petrol. Engrs. J., Vol.3 pp. 245-255.

Wu, Y. S. 2002. An Approximate Analytical Solution for Non-Darcy Flow in Fractured Media, LBNL- 8197, Water Resources Research, Vol.38, No. 3, pp.5-1¾5-7.

ANNEXES

1 Annexe : Schéma résolution éléments finis mixtes hybrides (EFMH)

Un schéma à éléments finis (EF) est une technique très puissante et très flexible pour intégrer une équation différentielle partielle sur un espace. Elle comporte trois étapes principales *(de Marsily 1981)*:

1. Le domaine étudié est décomposé en un ensemble "d'éléments", ou de mailles, qui en deux dimensions sont soit des triangles soit des tétraèdres de n'importe quelle forme ; cela permet une représentation spatiale très bonne du domaine étudié et des hétérogénéités contenues.

2. Sur chaque élément la fonction inconnue, la charge *h (x, y)* dans notre cas, est décomposée sur un ensemble des fonctions de base connues b_k *(x, y)* telles que:

$$h(x,y)=\sum_{1}^{m} a_k b_k(x,y)$$

   les inconnues sont alors les coefficients a_k dans chaque éléments.

3. On écrit une équation intégrale quelconque afin de s'assurer que *h (x, y)* vérifie approximativement l'équation différentielle en question ou celle de bilan de masse.

En revanche, la technique des EF présente des limites par rapport au calcul du champ de vitesses sur le domaine étudié. Surtout dans le cas des milieux fracturés qui présentent des variations très brusques des propriétés, le champ des vitesses est peu précis. Le respect de la conservation de masse n'est donc pas assuré. Afin d'améliorer la précision du champ des vitesses des contraintes peuvent être imposées, elle visent à assurer la nature incompressible du fluide d'une part et à garantir la continuité des flux de matière d'autre part. La méthode des éléments finis mixte hybride permet de tenir compte de ces contraintes de façon naturelle et automatique, (*Dabbene 1994)*. Les différences entre les EF et EFMH concernent la discrétisation et la présence d'une nouvelle variable définie comme trace de charge (*Th*). En EF la discrétisation spatiale est faite sur les noeuds entre les éléments du domaine considéré, il est donc nécessaire de prendre en considération plusieurs éléments afin de calculer le gradient de charge. En EFMH un seul élément comporte une quantité de points de discrétisation suffisante à calculer le gradient sur l'élément même (cf. Figure 50).

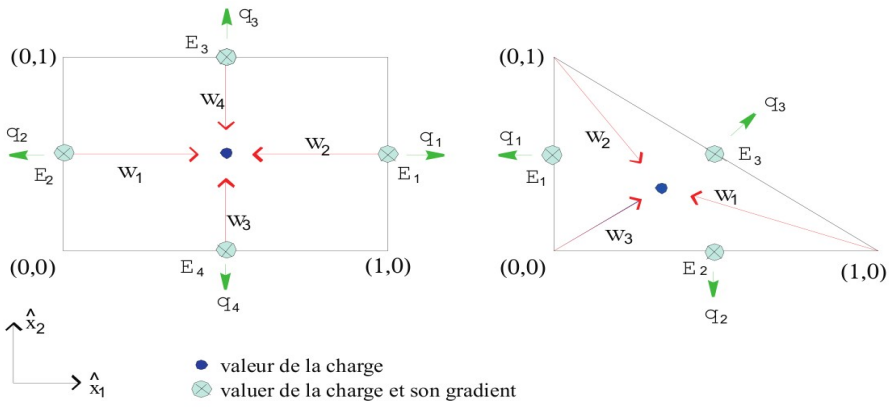


Figure 50 : discrétisation d'une maille en EFMH *(Hoteit 2002).*

L'inconnue recherché en EF est la charge (*h*), une fois calculée la charge on peut calculer les autres inconnues comme les flux et la vitesse à partir du couplage de la loi de Darcy avec la loi de la

conservation de la masse. En EFMH une nouvelle variable est introduite, la trace de charge (*Th)* "variable hybride". Elle est définie au centre des segments que relient les noeuds et qui composent les éléments (cf. Figure 50). La trace de charge est un objet mathématique sans réel sens physique intégrant en même temps la charge et les flux de masse. La résolution du système en trace de charge correspond donc à résoudre simultanément l'équation de Darcy et l'équation de la conservation de la masse. Cela permet d'assurer le respect de la conservation de la masse entre deux éléments dans la solution calculée. Cela même si la composante tangentielle de la vitesse peut être discontinue, ce qui peut être le cas dans les milieux fracturées.

2 Annexe : Modèles classiques pour les milieux fracturées

Les tests hydrauliques dans les puits sont un outil fondamental en hydrogéologie car ils permettent, à la fois : de déterminer les propriétés hydrodynamiques des formations testées, d'évaluer l'extension des formations et d'estimer les éventuelles pertes. Ces tests se font dans la zone saturée en eau (la nappe) de la formation étudiée. La hauteur d'eau dans le réservoir est la charge hydraulique (*h*) [L], elle est mesurée par rapport à une hauteur de référence. Cette hauteur d'eau est définie comme le niveau piézomètrique de la nappe, elle peut être exprimée aussi en terme de pression. Pendant les tests hydrauliques on provoque une variation de la pression de l'eau de la nappe et on observe la propagation de cette perturbation au cours du temps et à différentes distances. La variation de la pression de l'eau en fonction du temps est mesurée en terme de variation de la hauteur de l'eau. Différents types de tests existent, le pompage est un des tests employés. Les pompages peuvent être faits sur de courtes périodes (essai de puits) ou des longues périodes (essais de nappe ou tests d'interférence longue durée), ces deux tests seront décrits dans la suite. Pour ce chapitre nous nous intéressons aux pompages de longue durée qui donnent une information sur les propriétés hydrodynamiques du réservoir testé. Pendant un pompage on mesure la variation du niveau piézomètrique en fonction de deux variables : le temps et la distance du puits testé. Cette variation de niveau est appelée rabattement (*s*) [L]. Le rabattement est donc la différence entre le niveau piézomètrique durant le pompage et le niveau piézomètrique initial (avant le début du pompage). La chronique du rabattement au cours du temps peut être reproduite avec un modèle d'écoulement analytique idéal. Ce modèle analytique fournit une information quantitative des propriétés hydrodynamiques de la formation étudiée. Les modèles les plus utilisés supposent une géométrie simple idéale dans un domaine homogène, isotrope, confiné et infini : ces modèles d'écoulement sont linéaires dans le cas du modèle de *Miller (1962)* ou radiaux pour le modèle de *Theis (1935)*. En revanche un grand nombre des formations ne respectent pas ces caractéristiques de géométrie simple et homogène. Les milieux fracturés font partie de ces formations. Des modèles plus complexes sont nécessaires afin de reproduire les réponses de ces milieux, ces modèles doivent prendre en considération les hétérogénéités du système. Les calcaires de l'aquifère étudié sur site SEH présentent une nature à la fois fracturée et karstique, cet aquifère est donc caractérisé par une forte hétérogénéité. Les approches utilisées et développées pour traiter les données issues des tests hydrauliques menés sur le site SEH font donc partie des modèles analytiques utilisés pour les milieux fracturés. Afin de rendre la compréhension du rapport plus simple, nous rappellerons dans ce chapitre les principaux modèles analytiques identifiés dans la littérature pour prendre compte en les milieux fracturés.

1 Modèle d'écoulement radial généralisé (GRF)

Le modèle d'écoulement radial généralisé (en anglais "generalised radial flow" (GRF)) (*Barker 1988)* est le modèle alternatif utilisé quand les formations testées s'écartent des formations à géométrie idéale (domaine homogène et infini). Les hypothèses de base de ce modèle sont :

1. L'écoulement est radial : un écoulement de *n* dimensions (*n* est un nombre réel) se produit sur une seule source dans un milieu fracturé homogène et isotrope, caractérisé par une conductivité hydraulique K [LT^{-1}] et un coefficient d'emmagasinement spécifique S_s [L^{-1}].
2. La loi de Darcy est appliquée dans tout le domaine.
3. La source est une sphère à *n* dimensions avec un rayon r_w [L] et un coefficient d'emmagasinement S_w [] sans dimension (le changement volumétrique de stock qui accompagne le changement de pression, ou de charge).
4. La source a une épaisseur infinitésimale qui est caractérisée par un facteur de "skin" s_f (ou en français "peau"), la perte de charge autour de la surface de la source est proportionnelle à s_f.
5. Tous les piézomètres présents dans le système fracturé ont un coefficient d'emmagasinement et une dimension négligeables.

L'approche du modèle GRF considère un système où la relation entre la surface perpendiculaire à l'écoulement du volume intéressé par l'écoulement *(A)* [L^2] et la distance entre le point d'observation et la source *(r)* [L] est donnée par la formule suivante :

$$A(r)=\alpha_n r^{n-1} \tag{1}$$

Où α_n est la surface de l'aire d'une sphère unitaire en *n* dimensions, elle est donnée par l'équation:

$$\alpha_n = b_{3-n} 2 \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2})} \tag{2}$$

Où *b* est l'extension de la zone intéressée par l'écoulement [L], *n* est la dimension de l'écoulement [], et Γ est la fonction Gamma []. La dimension de l'écoulement décrit la géométrie du système, elle définie le taux de changement de la surface perpendiculaire à l'écoulement du volume intéressé par l'écoulement par rapport à la distance du puits testé. Dit d'une autre façon : la dimension de l'écoulement est la puissance avec laquelle la surface du volume soumis à l'écoulement varie par rapport à la distance radiale du point source, plus un. Par exemple dans un système homogène et radial l'aire perpendiculaire à l'écoulement est : $A(r) = 2 \pi r b$, donc la dimension de l'écoulement est n = 2, (*Walker and Roberts 2003*) (cf. Figure 51-b). La dimension de l'écoulement n'est pas nécessairement égale à la dimension Euclidienne du système testé. La dimension de l'écoulement indique comment l'aire apparente de l'écoulement change au cours du temps. Elle n'est pas forcément en relation avec la nature de la propagation de l'écoulement dans l'espace. Si on pense à la dimension euclidienne d'un tuyau enroulé en spirale, elle sera soit n = 2 soit n = 3, mais la dimension de l'écoulement d'un pompage fait dans ce milieu sera n = 1 (cf. Figure5 1-a).La dimension de l'écoulement est un nombre réel (*n* n'est pas forcement entier) ainsi on parle d'une dimension fractale.

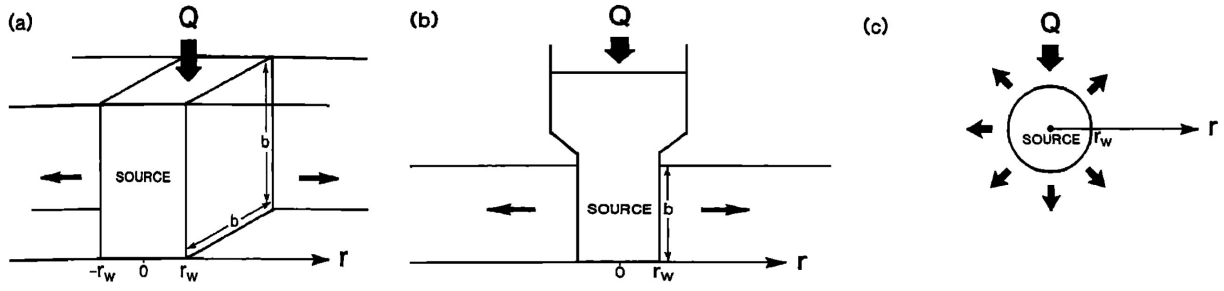


Figure 51 : Géométries d'écoulement pour les dimensions entières :(a) écoulement à une dimension (1D) à partir d'un plan (n = 1, *v* = 0.5); (b) écoulement à deux dimension (2D) à partir d'un cylindre (puits) (n = 2, *v* = 0) ; écoulement à trois dimension (3D) à partir d'une sphère (n = 3, *v* = -0.5) (*Barker 1988)*.

Une dimension d'écoulement entre n = 1 et n = 2 est donnée par un système cylindrique avec un nombre limité de directions le long desquelles l'écoulement peut se propager. Ce système pourrait être représenté, par exemple, par plusieurs tuyaux connectés en un point unique, comme un astérisque, et la source placée en correspondance du point de rencontre.

Barker (1988) développe l'approche pour l'interprétation des tests de pompage des milieux fracturés avec le modèle GRF. L'hypothèse faite est que A (donné par l'équation (1)) conduit le modèle GRF à régir l'équation :

$$S_s h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{r^{n-1}} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^{n-1} \frac{\partial h}{\partial r} \right) \tag{3}$$

Ou $h(r, t)$ est la charge hydraulique [L] ; t le temps [T] ; K est la conductivité hydraulique [LT^{-1}] ; S_s est le coefficient d'emmagasinement spécifique [L^{-1}]. *Barker (1988)* montre que la solution peut être obtenue pour des conditions aux limites spécifiques en utilisant l'intégrale de l'équation (3). Par exemple dans le cas d'une décharge constante Q_0 [L^3T^{-1}] pour un point source dans un domaine infini avec $h(r, 0) = 0$, la solution générale est :

$$h(r,t) = \frac{Q_0 r^{2v}}{4\pi^{1-v} K b^{3-n}} \Gamma(-v, u) \tag{4}$$

Où u est un temps adimensionel, v est une autre façon d'exprimer la dimension, ils sont définis par :

$$u = \frac{r^2 S_s}{4Kt} \quad (5) \qquad \text{et} \qquad v = 1 - n/2 \quad (6)$$

L'équation (4) dépend de la dimension de l'écoulement, elle peut être réduite à une solution spécifique de $h(r, t)$. Les données expérimentales observées peuvent être reproduites par la variation des paramètres hydrodynamiques (K *et* S_s) et la variation de la dimension de l'écoulement. Dans le cas d'un écoulement radial dans un milieu homogène et infini avec une dimension Euclidienne de deux ($n = 2$) l'équation (4) devient l'équation de *Theis (1935), (Walker and Roberts 2003)*.

2 Modèle double porosité (DP)

La théorie de la double porosité a été développée par *Barenblatt (1960)*. Ce concept décrit le milieu fracturé à l'aide de deux milieux. Le domaine d'écoulement est composé du milieu matrice (des blocs) qui sont intégrés dans le deuxième milieu (un réseau de fractures)(cf. Figure 52).

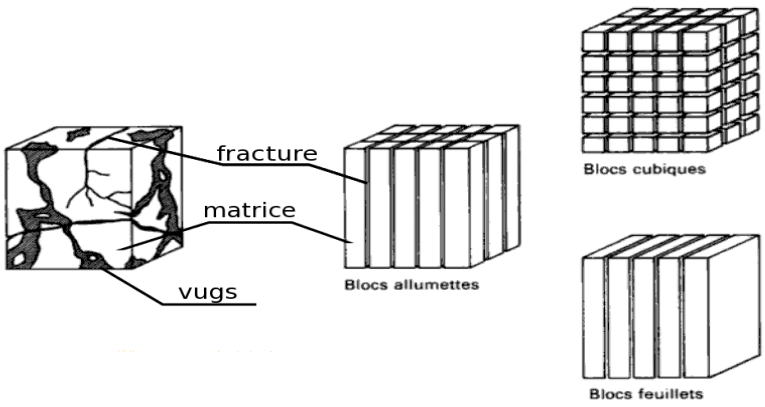


Figure 52 : À gauche le milieu naturel fracturé schématisé ; à droite les blocs cubiques : système 3D à fractures orthogonales idéalisé par *Warren and Root (1963)***, les blocs allumettes (2D) et les blocs feuillets (1D).**

Chaque milieu est caractérisé par des propriétés hydrodynamiques (perméabilité (K) et porosité (ϕ)) différentes. Les blocs de matrice sont affectés par une faible perméabilité et une forte porosité ; les fractures au contraire présentent une forte perméabilité et une faible porosité. Ce concept rend possible la présence de deux écoulements distincts (*Wu 2002*) :

1. L'écoulement dans les fractures : il se fait radialement au tour du puits de pompage et dans un état transitoire. Cet écoulement est décrit par l'équation suivante :

$$-\nabla(\rho v)-\phi_m C_m \rho_i \frac{\partial P_m}{\partial t}=\phi_f C_f \rho_i \frac{\partial P_f}{\partial t} \tag{7}$$

2. L'écoulement à l'intérieur des blocs matriciels : il se fait des blocs vers les fractures comme un rééquilibrage de la différence de pression qui vient à se créer entre les deux milieux. L'écoulement est décrit par l'équation suivante :

$$\phi_m C_m \rho_i \frac{\partial P_m}{\partial t}=\frac{\alpha k_m}{\mu}(P_f-P_m) \tag{8}$$

Ou ρ est la densité du fluide ; v est la vitesse de Darcy du fluide dans le milieu fracture ; C_m et C_f et ϕ_m et ϕ_f sont respectivement les compressibilités et les porosités de la matrice et de la fracture ; P_f et P_m sont les pressions du fluide dans le système de fracture ou de matrice ; ρ_i est la densité initiale de référence du fluide ; t est le temps ; μ est la viscosité du fluide ; k_m est la perméabilité de la matrice ; et α est un facteur de forme pour la géométrie des blocs matriciels [L] définie par *Warren and Root (1963)* pour le contrôle des échanges entre les fractures et la matrice:

$$\alpha=\frac{n(n+2)}{r_m^{\,2}} \tag{9}$$

Où n indique le nombre de directions offertes à l'échange de fluide : n=1 pour les blocs à feuillets (1D), n=2 pour les blocs allumettes (2D) et n=3 pour les blocs cubiques (3D) ; r_m est une longueur caractéristique qui définit la taille du bloc matriciel, plus r_m est petite plus les échanges sont faciles (*Bourdarot 1996)*. Dans un milieu DP le rabattement en réponse à un test de pompage au cours du temps au puits de pompage est décrit par le modèle qui à été mis en place par *Warren and Root (1963)*. Ensuite *Kazemi (1969)* a démontré la possibilité d'utiliser ce modèle pour le puits d'observation et enfin *Bourdet and Gringarten (1980)* ont donné une formulation plus universelle *(Kruseman 1991)*. Les hypothèses et les conditions générales sur lesquelles se basent ces trois modèles sont :

1. L'aquifère est confiné en haut en en bas (aquifère captif), il a une extension latérale infinie.
2. L'épaisseur de l'aquifère est uniforme sur toute la surface influencée par le pompage.
3. Le puits de pompage est complet (il intéresse toute l'épaisseur de l'aquifère).
4. Avant le pompage le niveau piézométrique est uniforme sur toute la surface influencée par le pompage.
5. L'écoulement vers le puits de pompage se fait en régime transitoire.

Si ces hypothèses sont respectées, l'évolution du rabattement d'un nappe dans une formation fracturé en réponse à un test de pompage, dans le puits de pompage comme dans un puits d'observation, peut être exprimée comme :

$$s=\frac{Q}{4\pi T_f}F(u,\lambda,\omega) \tag{10}$$

Où les paramètres : *u* temps adimensionel, *ω* contraste entre les capacités et *λ* coefficient d'échange entre matrice et fissures ont été définis :

$$u=\frac{T_f t}{(S_m+S_f)r^2} \quad (11) \qquad \lambda=\alpha r^2\frac{K_m}{K_f} \quad (12) \qquad \omega=\frac{S_f}{S_m+S_f} \quad (13)$$

Où T_f est la transmissivité des fractures [L^2T^{-1}] ; S_f et S_m sont le coefficients d'emmagasinement et K_f et K_m sont les perméabilités respectivement du milieu des fractures et du milieu des blocs matrice; *r* est soit le rayon du puits du pompage *Warren and Root (1963)*, soit la distance entre le puits d'observation et le puis de pompage *Kazemi (1969)*. Ces deux modèles sont l'approximation de la solution de *Bourdet and Gringarten (1980)*, on peut faire l'analogie avec l'approximation de *Jacob's* de la solution de *Theis, (Kruseman 1991)*. Pour ces modèles la solution est donnée par :

$$F(u,\lambda,\omega)=2.3\log(2.25u)+Ei\left(-\frac{\lambda u}{\omega(1-\omega)}\right)-Ei\left(-\frac{\lambda u}{(1-\omega)}\right) \quad (14)$$

Où *Ei* est la fonction Exponentielle Intégrale connue aussi comme la fonction de *Theis, W(u):*

$$-Ei(-x)=\int_0^x \frac{e^{-u}}{u}du=E_1(u)=W(u) \quad (15)$$

Comme dans l'approximation de *Jacob*, l'équation (14) est valide pour des valeurs de *u* plus grandes de 100. Le modèle DP prévoit trois phases pendant le pompage:

1. **L'écoulement des fissures**

Aux temps courts la réponse est donnée uniquement par le milieu fracture, le réservoir fissuré se comporte comme un réservoir homogène de perméabilité K_f et de capacité S_f (cœfficient d'emmagasinement) du milieu fracture (cf. Figure 53, les valeurs de ln(u) inférieures à 5).

2. **L'écoulement de transition**

Il correspond au début de la contribution du milieu matrice à l'écoulement. Pendant la période de transition, la capacité passe de S_f des fractures à S_{f+m} des fractures et matrice ensemble (cf. Figure53, valeurs du ln(u) entre 5 et 15). Deux approches sont proposées dans la littérature pour décrire cet écoulement. L'approche la plus simple est celle de *Warren and Root (1963)* qui fait l'hypothèse d'un écoulement "pseudo-permanent" entre matrice et fractures. La deuxième approche *(de Swann 1976)* considère le modèle matrice-fissures transitoire. Il y a donc un écoulement de transition avant la mise en place de l'écoulement pseudo-permanent. La capacité du puits peut masquer cette période de transition (*Bourdarot 1996)*. L'écoulement de transition dépend de deux paramètres :

- Influence du coefficient d'échange entre matrice et fissures (λ) :

Dans l'approche *Warren and Root (1963)* seul le paramètre λ (12) importe : il dépend de la géométrie des blocs matriciels et du rapport entre la perméabilité de la matrice et celle des fissures. L'approche *de Swann (1976)* prend en compte des paramètres supplémentaires sur la géométrie des blocs matriciels que nous ne discuterons pas. Une diminution de l'échange matrice fissures implique un retard de la période de transition.

- Influence du contraste entre les capacités (ω) :

La variation de ce paramètre ω (13) a la même influence sur les deux modèles. Le départ de la transition est autant plus tardif que le contraste des capacités se rapproche de 1. L'importance et la durée de la variation varient aussi, elles seront moins prononcées (la période de transition moins longue et variation moins importante) si le contraste des capacités se rapproche de 1.

3. **L'écoulement de l'ensemble matrice fissures :**

Suite à la période de transition le réservoir se comporte à nouveau comme un système homogène de perméabilité K_f (du milieu fracture) et de capacité S_{f+m} du milieu matrice et du milieu fracture ensemble (cf. Figure 53, valeurs de ln(u) supérieures à 15).

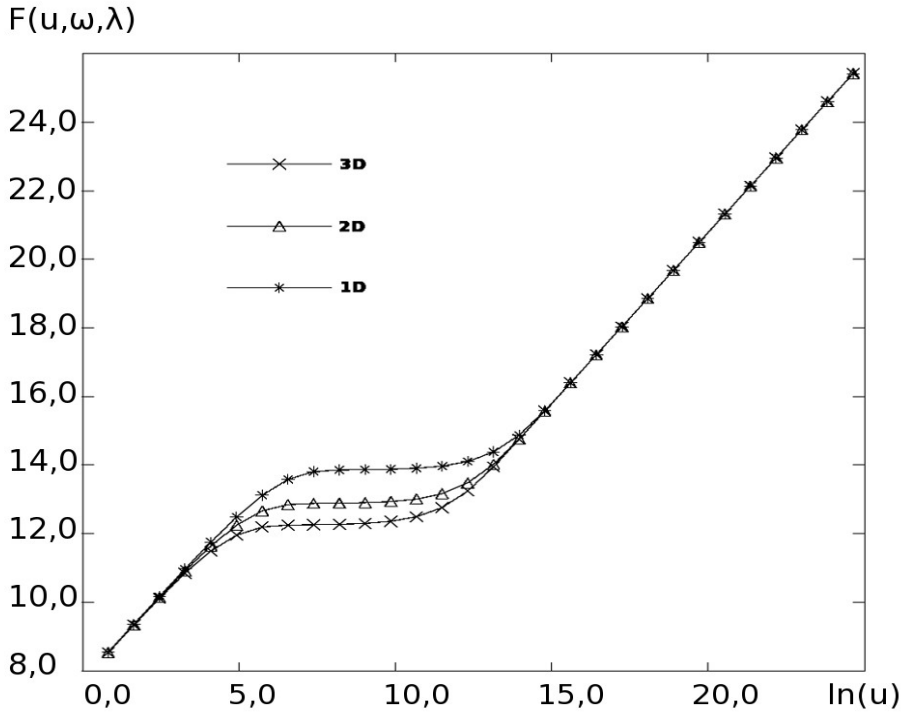


Figure 53 : Exemple de la fonction *F (u, λ, ω)* en fonction de le logarithme naturel du temps adimensionnel (*u)*

3 Modèle à une fracture verticale

Ce modèle prend en considération un puits de pompage qui intersecte une fracture verticale en son centre. L'objectif est de comprendre la structure de l'écoulement au voisinage d'une fracture. C'est également une première étape pour distribuer spatialement les propriétés du milieu. La solution analytique de ce modèle considère les hypothèses suivantes :

1. L'aquifère est homogène et isotrope, il a une extension latérale infinie et il est limité en surface et au fond par des couches imperméables.
2. La fracture a un plan unique, elle est verticale, elle a une faible longueur en sens latéral mais elle s'étend sur toute l'épaisseur de l'aquifère de haut en bas (cf. Figure 54-A).
3. Le puits de pompage intersecte la fracture au centre.
4. La fracture a une perméabilité infinie (ou très grande), cela signifie que le rabattement est uniforme sur toute la longueur de la fracture.
5. Une condition de flux uniforme est imposé tout le long de la fracture, l'eau entre de l'aquifère dans la fracture avec le même taux par unité de longueur.

L'écoulement qui se fait de l'aquifère vers la fracture, est caractérisé par deux types distincts d'écoulement dépendant du temps :

1. Écoulement linéaire aux temps courts : plus précisément il sera horizontal parallèle et perpendiculaire à la fracture (figure 54-B). Donc comme tout écoulement linéaire l'évolution de la pression sera linéaire en fonction de la racine du temps.

2. Écoulement pseudo radial aux temps longs : au cours du pompage, le type d'écoulement change avec l'évolution de la forme des lignes équipotentielles de la pression à l'intérieur de la formation (isopièzes). Ces lignes ne retrouvent une symétrie radiale qu'à partir d'une certaine distance. Quand le volume intéressé par l'écoulement est assez grand la fracture devient un système ponctuel et l'écoulement devient radial. La pression suit alors une évolution logarithmique en fonction du temps (figure 54-C).

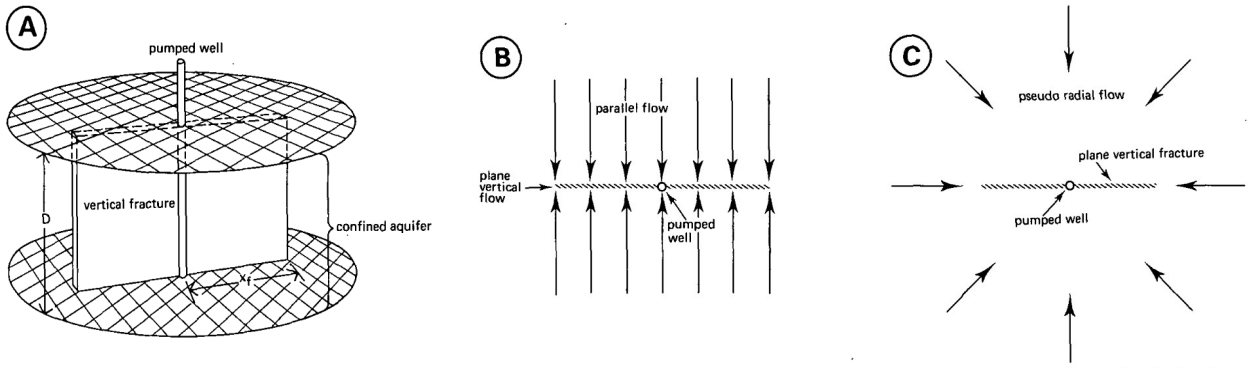


Figure 54 : A) Le système puits-fracture-aquifère (3D) ; B) Le système d'écoulement parallèle des temps courts (2D) ; C) Le système d'écoulement pseudo radial des temps longs (2D).

Si le rabattement n'est pas uniforme sur toute la fracture à partir du début du pompage un écoulement à l'intérieur de la fracture même doit être considéré. Pour des temps très courts deux écoulements supplémentaires peuvent être considérés :

1. L'écoulement linéaire à l'intérieur de la fracture qui existe théoriquement tout au début de l'essai; cet écoulement est toujours masqué par l'effet de capacité de puits.
2. L'écoulement bilinéaire correspondant à l'existence simultanée de deux écoulements linéaires : l'écoulement linéaire incompressible dans la fracture et un écoulement linéaire compressible dans la formation testée. Cet écoulement dure tant que les extrémités de la fracture n'affectent pas l'écoulement.

La solution générale suivante des chroniques du rabattement dans les puits d'observation pour le système décrit ci-dessus a été obtenue par *Gringarten and Witherspoon (1972) :*

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(u_{vf}, r') \quad (16) \qquad \text{où} \qquad u_{vf} = \frac{T t}{x_f^2} \quad (17) \qquad \text{et} \qquad r' = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{x_f} \quad (18)$$

u_{vf} est le temps adimensionel [] ; T la transmissivité de l'aquifère [L^2T^{-1}], S est le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère [] ; x_f est la demi longueur de la fracture [L] et x, y sont les distances [L] entre le puits d'observation et le puits du pompage (centre de la fracture) respectivement le long de l'axe de la fracture (x) et perpendiculaire à l'axe de la fracture (y).
Différentes solutions analytiques de F(u_{vf}, r') ont été trouvées selon les différentes directions d'éloignement du centre de la fracture :

1. le long de l'axe de la fracture, abscisse (x) ;
2. le long de l'axe perpendiculaire à la fracture, ordonnées (y) ;
3. à 45° par rapport à la fracture.

On ne reportera pas ici ces solution ainsi que toutes les figures pour ne pas alourdir le paragraphe, pour plus de détail on consultera *Kruseman (1991).* Dans les trois directions l'écart de la solution analytique à la solution idéale de *Theis* disparait pour une distance du puits de pompage supérieure à cinq fois x_f (cf. Figure 55 , éloignement du centre le long l'axe de la fracture).

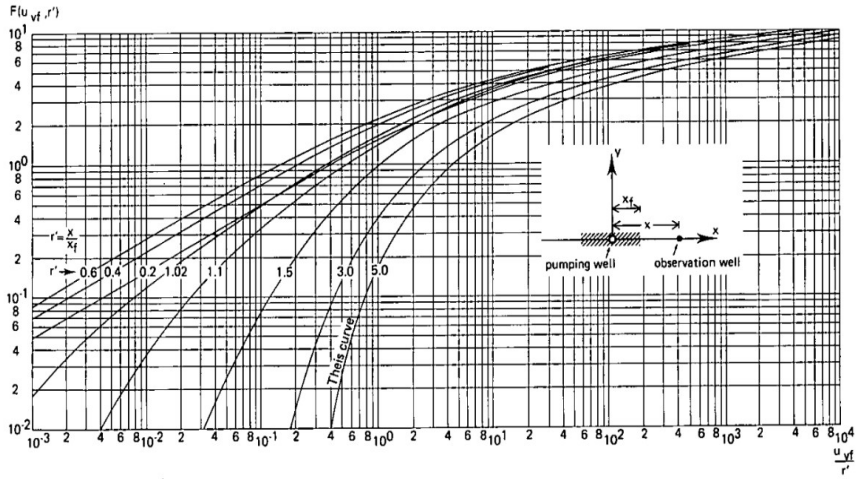


Figure 55 : Courbes type Gringarten-Witherspoon pour une fracture verticale avec les puits d'observation à des distances variables le long de l'axe d'orientation de la fracture (axe x sur la figure).

La solution analytique obtenue sur le puits de pompage est donnée par *Gringarten et al. (1974)*, dans cette solution le terme r' est égal à 0 l'équation F dépend donc uniquement de u_{vf} :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(u_{vf}) \quad (19) \qquad \text{où} \qquad F(u_{vf}) = 2\sqrt{\pi u_{vf}}\, erf\left(\frac{1}{2\sqrt{u_{vf}}}\right) - Ei\left(-\frac{1}{4u_{vf}}\right) \quad (20)$$

Où *erf* est la fonction d'erreur de Gauss et *Ei* est la fonction intégrale exponentielle définie avant. La solution de cette équation présente au départ une période d'écoulement parallèle (temps courts) et un écoulement pseudo radial ensuite (temps longs) qui est donc décrit par la même solution de *Theis* plus une constante donnée par *Gringarten et Ramey (1974), (Kruseman 1994)*.

3 Annexe : Tests de la campagne de pompages 2005

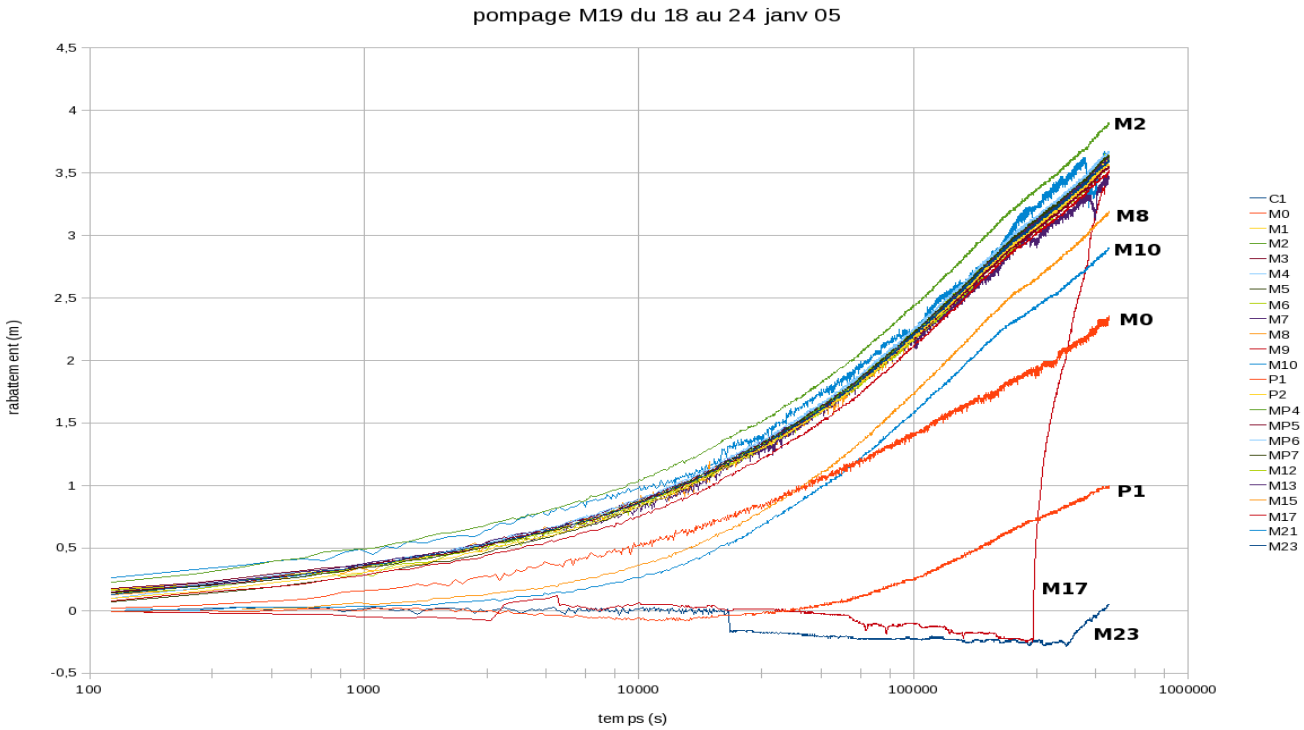


Figure 56 : Le test d'interférence de longue durée effectué sur le puits M19 du 18 / 01 / 05 au 24 / 01 / 05 avec un débit sortant de 0,02 (m^3s^{-1}).

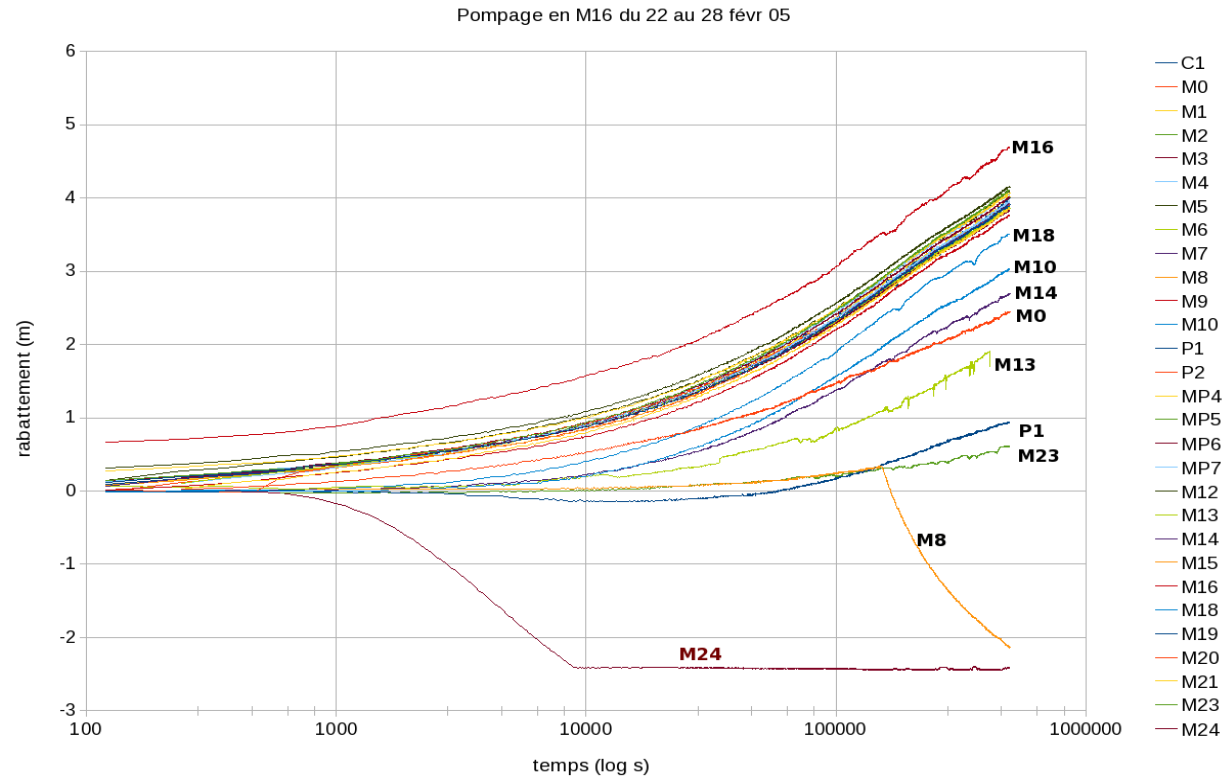


Figure 57 : Le test d'interférence de longue durée effectué sur le puits M16 du 22/ 02 / 05 au 28 / 02 / 05 avec un débit sortant de 0,02 (m^3s^{-1}).

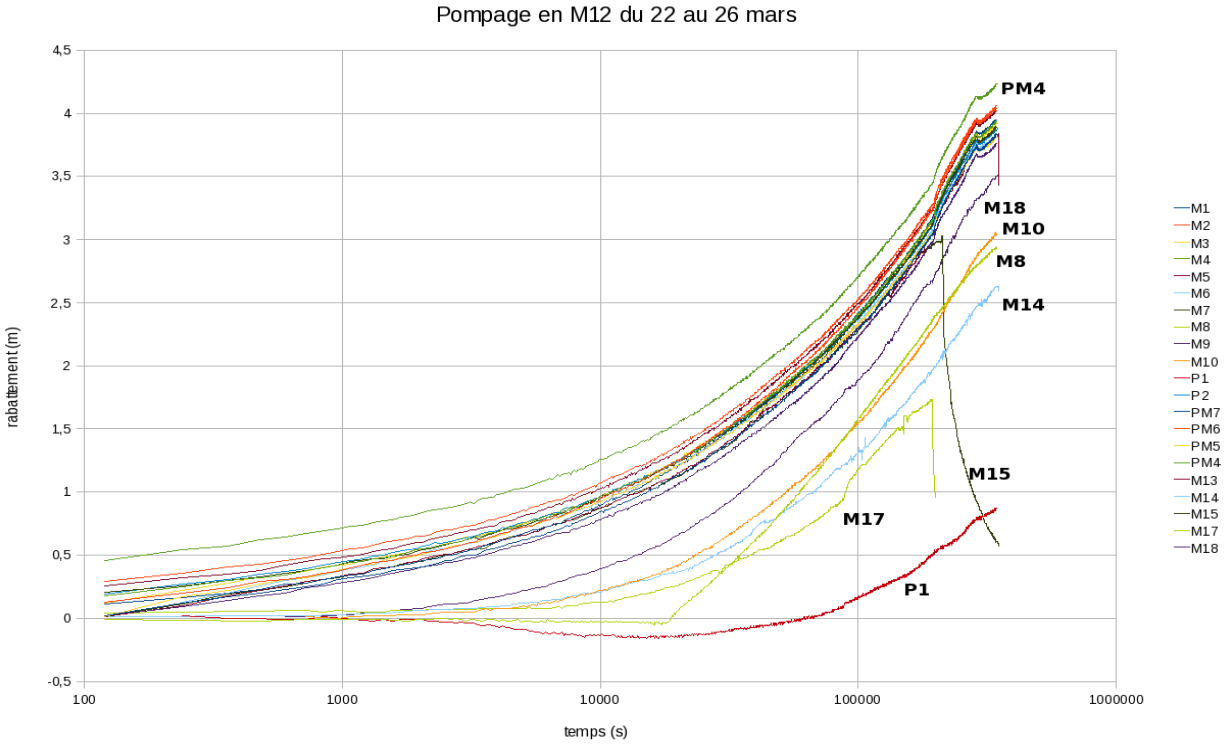


Figure 58 : Le test d'interférence de longue durée effectué sur le puits M12 du 22/ 03 / 05 au 26 / 03 / 05 avec un débit sortant 0,02 (m^3s^{-1}).

Ces pompages ont été extraits des séries des données enregistrées durant la campagne de tests d'interférence de longue durée C2005. Ces sont les tests qui ont durée le plus, environ six jours. Les puits qui présentent des réponses qui s'écartent de la réponse données par la majorité des puits du site SEH ont été marquées dans les graphes. Nous remarquons dans ces trois pompages un change de l'allure des courbes pour des temps importants.