AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

Ressources en eau et transferts de solutés dans les zones altérées superficielles des régions de socle – Application aux aquifères superficiels bretons

Octobre 2016 – Octobre 2017

Rapport intermédiaire

Quentin Courtois Jean-Raynald de Dreuzy Laurent Longuevergne *Géosciences Rennes, UMR 6118*

Décembre 2017

Document élaboré dans le cadre du :

Projet AquiFR



• AUTEURS

Quentin COURTOIS, doctorant, <u>quentin.courtois@univ-rennes1.fr</u> Jean-Raynald DE DREUZY, directeur de recherche, <u>Jean-Raynald.de-Dreuzy@univ-rennes1.fr</u> Laurent LONGUEVERGNE, chargé de recherche, <u>laurent.longuevergne@univ-rennes1.fr</u> (Géosciences Rennes, UMR 6118)

CONTRIBUTEURS

Florence HABETS, Directrice de Recherche (UPMC, CNRS), <u>florence.habets@upmc.fr</u> Charlotte LE TRAON, doctorante (Géosciences Rennes, UMR 6118), <u>charlotte.letraon@univ-rennes1.fr</u> Jean MARÇAIS, doctorant (Géosciences Rennes, UMR 6118), jean.marcais@univ-rennes1.fr

CORRESPONDANTS

Agence française pour la biodiversité : Claire MAGAND, chargée de mission « ressources en eau et changement global », claire.magand@afbiodiversite.fr

Droits d'usage : accès libre Niveau géographique : National Couverture géographique : Région Bretagne, Massif Armoricain Niveau de lecture : Professionnels, Experts • RESSOURCES EN EAU ET TRANSFERTS DE SOLUTES DANS LES ZONES ALTEREES SUPERFICIELS DES REGIONS DE SOCLE – APPLICATION AUX AQUIFERES SUPERFICIELS BRETONS, Q. COURTOIS, J-R. DE DREUZY, L. LONGUEVERGNE

RESUME

La plupart des systèmes aquifères sont représentés comme des domaines tri-dimensionnels avec des logiques superposées d'écoulements locaux, intermédiaires et régionaux. Dans le cas des régions de socle cristallin, les aquifères sont essentiellement concentrés dans la partie altérée superficielle et dans une moindre meusre dans des accidents géologiques majeurs plus profonds.

Dans ce projet, nous proposons une approche de modélisation adaptée à la fois à la nature des circulations essentiellement superficielles, à la nature des données disponibles et à l'extension régionale du domaine à considérer. Cette approche repose sur l'observation que les écoulements restent essentiellement locaux aux versants et peuvent être modélisés en grande partie à partir de cette échelle pour être progressivement agrégés dans le réseau hydrographique jusqu'à l'échelle du bassin versant.

Après cette première année de thèse, les outils numériques de simulation des écoulements dans versants ont été développés. Ils ont été développés en Python, langage *open source*, pour être totalement intégrables dans une plateforme comme OpenPalm qui héberge le projet AquiFR dans son ensemble. La structure informatique de l'agrégation des flux par le réseau hydrographique a également été développée et pourra intégrer des mailles de routage en rivière.

Les projets pour la deuxième année de thèse concernent (1) la calibration des propriétés hydrauliques des aquifères à partir des données disponibles en rivière (2) le déploiement de l'approche sur des bassins versants tests bien équipés en termes de stations de jaugeage.

• MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)

Aquifères cristallins, Ecoulement à surface libre, Dynamique de versants, Modèle régional

SOMMAIRE

•

| Article I. Article II. | Intro Méth | duction ode de modélisation des bassins versants bretons | 5 6 |
|---------------------------|---------------|---|----------|
| Section | II.1 | Approche théorique de la modélisation des bassins versants | 6 |
| | (a) | Modèle unitaire à l'échelle des versants | . 6 |
| | (b) | Agrégation des versants en bassin versant | . 8 |
| | | (i) Calcul des débits en rivière en fonction des alimentations de versant | . 8 |
| | | (ii) Spatialisation des niveaux piézométriques de versant | . 8 |
| Section | II.2 | Outils numériques développés | 8 |
| | (a) | Logiciel pour le modèle unitaire de versants | . 8 |
| | (b) | Outils d'agrégation du bassin versant | . 9 |
| Article III. | Valic | lation du modèle développé vis-à-vis de <i>Modflow</i> | 9 |
| Section | III.1 | Protocole de validation du modèle | 9 |
| | (a) | Version de Modflow utilisée | . 9 |
| | (b) | Conditions de la comparaison | 10 |
| Section | III.2 | Application sur un cas synthétique1 | 10 |
| Section | III.3 | Application sur un bassin versant réel1 | 11 |
| Article IV. | Illust | tration de l'approche1 | 12 |
| Section | IV.1 | Application sur un bassin versant1 | 12 |
| | (a) | Bassin versant de l'Ellé | 12 |
| | (b) | Simulation et spatialisation de l'information | 13 |
| | (C) (d) | Spatialisation des débits de l'Ellé | 13 |
| Section | N/ 2 | Analyse de récessions | 15 |
| Section | ۲۷.Z | Allalyse de l'ecessions | 15 |
| | (a) (b) | Analyse de récession issues du modèle Hs1D | 15 15 |
| Article V. | Pers | pectives de développement1 | 17 |
| Section | V.1 | Outils en développement1 | 17 |
| | (a) (b) | Développement de modèles de transport d'espèces en solution | 17 17 |
| Section | V.2 | Déploiement sur un ensemble de sites tests | 17 |
| | (a) | Développement des outils de calage | 17 |
| | (b) | Déploiement de l'outil sur la plate-forme AquiFR | 18 |
| Article VI Conclusion 40 | | | |
| Article VI | Glas | saire | 10 |
| Article VIII. | Bibli | ographie | 20 |
| Article IX. | Table | e des illustrations | 21 |



Ressources en eau et transferts de solutés dans les zones altérées superficielles des régions de socle – Application aux aquifères superficiels bretons

Q. Courtois

AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

Article I. Introduction

Le projet de modélisation des aquifères cristallins de socle bretons s'inscrit dans l'initiative AquiFR (Système multi-modèle hydrogéologique national). Ce projet a comme objectifs de fournir un analyse de l'évolution du niveau des eaux souterraines depuis les années 1950 et une prévision des ressources en eau souterraine aux échelles saisonnières et pluri-décennale, ainsi que d'intégrer la rétroaction es eaux souterraines sur le climat, à travers les reprises évaporatoires sur nappe. Ce rapport concerne l'avancement du projet de modélisation des aquifères bretons ainsi que l'intégration au sein du projet national (Figure 1). Il intervient après un an de thèse de Quentin Courtois et fait suite au projet d'étude des Structures des circulations dans les aquifères de socle en Bretagne

Les aquifères de socles bretons sont principalement constitués d'horizons superficiels altérés et fissurés, d'épaisseurs faibles à modérées (0-25m). Leur ressource en eau est très variable spatialement et fortement impactée par les structures géologiques locales, celles-ci pouvant contraindre les écoulements (Leray, de Dreuzy et al. 2013). Ces aquifères sont très morcelés, puisque contraints par les limites topographiques des bassins versants (Kolbe, Marçais et al. 2016). De plus, la Bretagne compte seule une quarantaine de bassins versants de plus de 100 km², nécessitant la réalisation d'un nombre équivalent de modèles pour prendre en compte la plus grande partie du territoire.



Figure 1: Couverture du territoire national par des modèles de circulation souterraines avec en violet les aquifères de socle plus particulièrement concernés dans ce rapport (illustration du site web du projet <u>AquiFR</u>)

La modélisation et l'intégration de ces systèmes très particuliers au sein de la plate-forme AquiFR nécessite le développement d'outils numériques basés sur une stratégie adaptée. Ceux-ci vont de l'analyse des propriétés des systèmes modélisés jusqu'à leur calibration à partir de données largement accessibles telles que les mesures de débit ou de concentration en espèces chimiques.

Ce projet soulève certaines questions dont la compréhension des structures de circulation, la nature de l'information contenue dans les données de débit et la capacité numérique à automatiser le calage et le déploiement sur la Bretagne.

Le calage et l'interaction des modèles entre eux est une question fondamentale au même titre que la compréhension de la nature des circulations.

La stratégie de modélisation est développée à partir des compétences de l'unité (Géosciences Rennes) sur la géologie et l'hydrogéologie de la Bretagne. Celle-ci est appliquée sur les ressources superficielles (horizons altérés et fissurés) sous la forme d'une composition de modèles d'écoulements de versants cohérents avec l'épaisseur limite des zones transmissives.

Article II. Méthode de modélisation des bassins versants bretons

Contrairement aux grands ensembles sédimentaires, type Bassin Parisien, les écoulements dans les horizons superficiels des zones de socle sont fortement hétérogènes, principalement conditionnées par le relief. Ainsi, la zone d'étude, la Bretagne, peut être découpée en une quarantaine de bassins versants formant autant d'applications isolées. Les circulations au sein de ces systèmes ne sont que marginalement régionales et principalement locales (Kolbe, Marçais et al. 2016).

Ce morcellement du domaine en petites structures a plusieurs implications. En premier lieu, il résulte d'une faible épaisseur de la zone altérée de socle cristallin et de gradients topographiques modérés. Dans un deuxième temps, il pose la question du contenu informatif des données disponibles, principalement des mesures de débit et de concentration en espèces dissoutes en rivières. L'information contenue dans ces données se limite aux bassins versants pour les structures superficielles considérées. Le type de structure ainsi que les données disponibles conditionnent la stratégie de modélisation et de calibration des paramètres.

Section II.1 Approche théorique de la modélisation des bassins versants

Comme évoqué précédemment, l'hypothèse de la limitation des écoulements aux structures superficielles permet de découper le système des aquifères superficiels bretons en plusieurs domaines de dimensions plus réduites. Ces structures, d'au moins 100 km², les bassins versants, peuvent à leur tour être découpées en versants indépendants (1km²-5km² constituant l'élément de base de modélisation) (Figure 2). La segmentation d'un bassin versant en versants se fait via l'identification de lignes de crêtes et de lignes d'écoulement sur un MNT (Reggiani, Sivapalan et al. 1998).



Figure 2: Echelles de modélisation : depuis la Bretagne (échelle régionale) vers l'échelle du versant (modèle unitaire) en passant par l'échelle du bassin versant (réservoir complet)

(a) Modèle unitaire à l'échelle des versants

A cause du caractère superficiel des structures modélisées, les écoulements au sein des versants sont principalement conditionnés par leur topographie. Le nombre de versants utilisés pour décrire un bassin versant (une centaine dans le cas d'un petit bassin versant d'environ 100 km²) dans son ensemble impose de choisir des modèles parcimonieux, mais résolvant l'équation d'écoulement à surface libre.

Dans cette optique, la stratégie de modélisation est basée sur l'hypothèse de Dupuit-Forcheimer, permettant de résolution numériquement les variations d'une surface libre. Le type de modèle utilisé propose une résolution qualifiée de 1,5D car résolvant l'équation d'écoulement en 1D, par intégration verticale des écoulements, transversalement à la ligne de plus grande pente mais en prenant en compte la géométrie, largeur et pente, du sous-domaine modélisé (Figure 3).



Figure 3 Représentation 1D des écoulements de subsurface obtenu par intégration verticale des équations d'écoulement suivant l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer et transversalement à la ligne de plus grande pente le long du profil w(x) (Troch, Paniconi et al. 2003).

Ce modèle permet de déterminer, pour toute coordonnée x sur l'axe de plus grande pente et tout temps t, le débit Q(x,t), le stock S(x,t) et le suintement $q_S(x,t)$ en fonction du terme source N(t), représentant les précipitations efficaces (fournies par Météo France). Le stock est exprimé comme étant la largeur w(x) multipliée par la hauteur d'eau h(x,t). Le débit est calculé selon la loi de Darcy, prenant en compte la perméabilité k, la porosité f et la pente de l'aquifère θ . Le suintement est défini comme le débit occasionné par le débordement lorsque le bilan prenant en compte le stock S(x,t) et les débits entrants et sortants en x à un instant t entraîne un dépassement de la capacité maximale du réservoir $S_c(x,t)$. Ceci peut être résumé sous la forme du système d'équation suivant (1) (Marçais 2017), en considérant l'utilisation de fonctions de régularisation basées sur la fonction de Heaviside, \mathcal{R} et \mathcal{G}_r .

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t}(x,t) + q_S(x,t) = -\frac{\partial Q}{\partial x}(x,t) + N(t)w(x) \\ q_S(x,t) = \mathcal{G}_r\left(\frac{S(x,t)}{S_c(x,t)}\right) \mathcal{R}\left(-\frac{\partial Q}{\partial x}(x,t) + N(t)w(x)\right) \\ Q(x,t) = -\frac{kS(x,t)}{f}\left(\cos\theta \ \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{S}{fw}\right)(x,t) + \sin\theta\right) \\ 0 \le S(x,t) \le S_c(x) \end{cases}$$
(1)

Pour résoudre le système d'équation (1), il est nécessaire de définir deux conditions aux limites : une au niveau de la rivière et une sur la ligne de crête. La rivière est vue comme une charge imposée, en effet les rivières en Bretagne sont pérennes et donc toujours en eau, indiquant que la partie du versant en contact avec la rivière est saturée toute l'année. Au contraire, une ligne de crête est un endroit qui par définition n'admet aucun flux, définissant ainsi une condition limite dite « no-flow ».

La description locale des écoulements dans cette approche peut différer de la réalité à cause de structures topographiques qui induisent des gradients transversaux ou de structures géologiques qui réorientent les écoulements.

Dans la réalité, il est possible d'observer, notamment en aval de bassin versant des débordements de nappe occasionnés par de fortes entrées d'eau excédant la capacité maximale du réservoir. Pour simuler ces phénomènes, le modèle initial (Troch, Paniconi et al. 2003) a été complété pour intégrer le débordement (Marçais 2017).

L'exutoire de chaque versant est la rivière qu'il alimente via un écoulement souterrain et le débordement potentiel. Ce débit Q_n , est calculé en fonction du débordement des cellules q_s selon l'axe x entre la rivière (x = 0) et la ligne de crête (x = L) (2) :

$$Q_{n=\int_{x=0}^{x=L}q_S\,dx}\tag{2}$$

(b) Agrégation des versants en bassin versant

(i) Calcul des débits en rivière en fonction des alimentations de versant

Chaque modèle unitaire de versant permet d'alimenter une partie de la rivière. En simulant un routage des alimentations de versant dans la rivière, il devient possible de simuler le débit de la rivière en chaque point.

Les bassins versants bretons sont de dimensions relativement restreintes, hormis la Vilaine et le Blavet, plus importants. Ainsi, le temps de transit de l'eau dans les rivières bretonnes et très restreints (inférieur à 10 jours), alors que dans la majorité des aquifères de sub-surface, les temps de transfert sont en général supérieurs à 20 jours. La différence entre ces deux temps rend les temps de transit en rivière négligeables devant l'impact des aquifères. Ainsi, il devient possible de calculer le débit dans la rivière en chaque point comme étant la somme des alimentations des versants en aval de ce point.

Ainsi, le routage à l'ordre zéro est réalisé en sommant l'impact des n versants se déversant dans la rivière au point considéré, pour calculer le débit dans la rivière Q_r . (3) :

$$Q_r = \sum_n Q_n$$
 (3)

(ii) Spatialisation des niveaux piézométriques de versant

La simulation des versants est réalisée en prenant en compte le relief à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le passage en 1D pour la simulation est un changement de coordonnées diminuant le nombre de dimension, appelé aussi réduction dimensionnelle. En respectant les hypothèses de la réduction dimensionnelle, à savoir que les points à une même distance de la rivière se comportent de manière identique et donc partagent le stock disponible à cette distance, il devient possible de spatialiser en deux dimensions les stocks calculés dans chaque versant afin de reconstituer une carte piézométrique du bassin versant. Cette étape ne comporte pas de calcul supplémentaire, seulement un changement de coordonnées.

Section II.2 Outils numériques développés

L'application du modèle a nécessité le développement de nombreux outils informatiques. Une des contraintes du projet AquiFR est d'utiliser uniquement des logiciels libres (dits *open source*). Une autre contrainte est d'optimiser au maximum les simulations en termes de temps de calcul par rapport à la résolution souhaitée. La somme de ces conditions nous a poussés à nous orienter vers le langage Python 3 qui a la particularité d'être libre de droit, en même temps que d'être dit de « haut-niveau », c'est-à-dire facile d'utilisation.

(a) Logiciel pour le modèle unitaire de versants

Une première version du code permettant de simuler les versants selon les modalités décrites dans la section II.1. existe en Matlab. Mais cet outil ne respecte pas les critères *open source* du projet. Ainsi, pour respecter ces conditions il a dans un premier temps été intégralement transposé en Python 3. Grâce aux nombreux outils scientifiques développés, il a été possible de conserver la même méthode de résolution ainsi que la même méthode d'intégration, implicite, multi-pas, à ordre variable choisie pour sa capacité à résoudre des problèmes non-linéaires via son pas d'intégration variable.

Afin d'optimiser le code et de faciliter son utilisation, il est structuré selon l'archétype de programmation dit *orienté-objet*, correspondant à un ensemble de classes possédant chacune leurs propres fonctions et attributs. Ainsi, ces classes ont été définies de manière à caractériser certaines propriétés des domaines modélisés. Ainsi, il existe une classe principale gérant la création d'une Simulation, en tant qu'objet numérique, en faisant appel à trois autres classes gérant respectivement la géométrie, la géologie et les termes sources du domaine. Après création la classe principale permet aussi de gérer la résolution du système d'équation (1) représenté sous la forme d'un système d'équations différentielles algébriques.

Pour chaque versant, un objet est créé via la classe principale de simulation puis intégré via résolution du système d'équation.

(b) Outils d'agrégation du bassin versant

Afin d'agréger les simulations de l'échelle du versant vers le bassin versant, des outils d'analyse et de spatialisation ont dû être développés, ainsi que des outils graphiques permettant la représentation de la spatialisation des informations. Ceux-ci permettent une réanalyse de la géométrie des modèles unitaires opérant ainsi le changement de coordonnées.

Lors de la segmentation du bassin versant en versants indépendants, la totalité de la surface du bassin versant est traitée, puis réduite en 1D. Ainsi, par spatialisation de chaque versant indépendamment des autres, il devient possible de calculer des niveaux piézométriques sur la totalité du domaine. De même, en appliquant l'équation (2), il est possible de calculer en chaque point le débit dans la rivière.

Ces deux opérations sont réalisées via l'utilisation de plusieurs classes (Figure 4). Ainsi, dans un premier temps, la totalité des versants est spatialisée via une classe gérant la spatialisation de l'espace réduit via des informations extraites lors de l'identification des versants (Reggiani, Sivapalan et al. 1998). Dans un deuxième temps, les versants spatialisés sont agrégés, permettant alors, via l'intervention de deux autres classes, de calculer les débits en rivière et les niveaux piézométriques.



Figure 4 Organisation du code permettant de spatialiser les informations des versants (1D vers 2D) puis d'agréger les résultats en calculant le débit de la rivière ainsi qu'une carte piézométrique du bassin versant.

Ces informations sont ensuite représentées via une classe de visualisation gérant l'affichage de chaque objet et résultat modélisé sous la forme de cartes du bassin versant.

Article III. Validation du modèle développé vis-à-vis de Modflow

Le modèle détaillé dans Article II. (Hs1D) est adapté à la simulation des processus d'écoulement dans les versants et au débit de base des rivières à l'échelle de la Bretagne. Cependant, la qualité de description de ce modèle doit être vérifiée avant de progresser plus avant. Pour ce faire, il sera comparé sur des simulations types avec *Modflow* un modèle largement documenté et vérifié, développé par l'USGS (United States Geological Society) (Harbaugh 2005). *Modflow* permet de résoudre l'équation d'écoulement dans un espace discrétisé via l'utilisation de la méthode dite des *différences finies*.

Section III.1 Protocole de validation du modèle

(a) Version de Modflow utilisée

Le modèle développé dans Article II. résout l'équation d'écoulement à surface libre. Ainsi, afin de respecter les hypothèses développées, il doit être comparé à un modèle résolvant lui aussi cette équation. A cette fin, la version de Modflow utilisée est une version plus adaptée (Modflow-NWT) à

la résolution de système adapté à des variations importantes de saturation (Niswonger, Panday et al. 2011), typiquement les hauts topographiques (lignes de crêtes).

Le modèle Modflow est utilisé dans les mêmes conditions avec une interception possible avec la surface et un drainage des flux exfiltrés ou non-infiltrés. Il utilise les mêmes conditions aux limites que le modèle Hs1D (Section II.1.a). Il n'est constitué que d'une seule couche.

(b) Conditions de la comparaison

Afin de vérifier la validité du modèle Hs1D, il est comparé à Modflow à la fois pour des cas idéaux (géométrie parfaitement connue), et pour des cas réels (bassins versants documentés). Dans chaque cas, les modèles ne sont pas calés, mais utilisent tous les deux les mêmes propriétés hydrodynamiques et géomorphologiques. La comparaison est principalement effectuée sur les débits calculés en sortie de versant, en intégrant selon x le débordement dans le cas d'Hs1D, en sommant les débordements dans le cas de *Modflow*.

Section III.2 Application sur un cas synthétique

Dans un premier temps, les deux codes sont appliqués sur un système à géométrie régulière (versant rectiligne, de largeur w(x) et de pente θ constantes). Dans le cas de ce système, deux versions du code *Modflow* peuvent appliquées : une en deux dimensions, comprenant ainsi l'extension latérale du domaine, l'autre en une dimension mimant le comportement de Hs1D. Les simulations sont effectuées avec des termes sources (ou recharges) identiques. La recharge employée est constituée de deux stationnaires successifs, c'est-à-dire de deux paliers de valeurs différentes (Figure 5).



Figure 5 *Terme source appliqué pour les différentes simulations. Le premier palier a une valeur dix fois supérieure au deuxième.*



Figure 6 Comparaison des débits pour une même recharge entre Hs1D (rouge) et Modflow (1D en noir et 2D en bleu). Les différences entre Modlfow 2D et Hs1D sont principalement dues à une désaturation de cellules en haut de versant lié à un problème de discrétisation entre les deux modèles.

Les trois modèles présentent des comportements similaires au cours du temps lors de l'application de la recharge (Figure 6). Les différences proviennent d'effets locaux liés à la discrétisation. Ils restent néanmoins faibles validant l'implémentation de Hs1D en Python.

Pour cette simulation, les temps de calculs nécessaires aux deux codes sont suffisamment proches pour être considérés comme équivalent. Mais le domaine modélisé n'est discrétisé qu'en un faible nombre de mailles (20 pour Hs1D, 2000 pour *Modflow*). Le véritable inconvénient de *Modflow* en termes de temps de calcul réside dans son caractère 2D, obligeant à augmenter très fortement le nombre de mailles pour décrire un système équivalent à Hs1D. Sa complexité augmente avec le carré de celle de Hs1D. Ainsi, dans le cas de très grands domaines, il sera bien plus lent que Hs1D.

Section III.3 Application sur un bassin versant réel

Le cas détaillé précédemment (section III.2) est un cas sans variabilité latérale. Il est nécessaire de vérifier l'impact de cette variabilité, latérale sur la résolution des différents types de situations afin de déterminer la qualité du modèle Hs1D.

Cette vérification est appliquée sur un bassin versant réel très bien documenté : le bassin versant de Kerbernez (Figure 7). Le bassin versant déterminé à partir de l'exutoire nommé E30 mesure environ 1-km² et contient trois versants dont un correspondant à environ 90 % de la surface. En plus du système décomposé en trois versants, il est possible de déterminer un versant équivalent correspondant à l'ensemble du bassin versant.



Figure 7 Bassin versant de Kerbernez modélisé dans cette étude. L'échelle de couleur correspond à l'altitude, le point noir à l'exutoire. Extrait d'un MNT à 5m.



Figure 8 Comparaison des débits simulés pour les trois méthodes de résolution : Hs1D trois versants (rouge), Hs1D versant équivalent (bleu), Modflow (noir)

La recharge utilisée lors de cette modélisation provient de données afin de vérifier l'impact potentiel de sa variabilité sur la résolution. En revanche, nous ne disposons pas de données de débit pour comparer avec les modèles.

Les comportements des différents modèles sont globalement équivalents (Figure 8). En revanche, *Modflow* fournit des débits plus élevés au début de la chronique que les deux applications Hs1D. De même, il simule un débit de pointe plus élevé, alors qu'il sera plus faible pour le modèle de versant Hs1D. *Modflow* et «Hs1D trois versants» (courbe rouge) deviennent équivalent sur la fin de chronique, divergeant de «Hs1D versant équivalent » (courbe bleue).

Les écarts entre les différents modèles est de 15 % au maximum, ce qui, compte-tenu des différences fondamentales entre les modèles reste parfaitement acceptable. Même dans le cas d'un bassin versant réel, les résultats offerts par *Modflow* et Hs1D varient peu, la différence étant maximale au niveau du débit de pointe. Ceci valide l'utilisation de Hs1D pour la description des écoulements de versants.

Article IV. Illustration de l'approche

Section IV.1 Application sur un bassin versant

Afin d'illustrer les résultats obtenus, une application est réalisée sur un bassin versant de moyenne dimension : l'Ellé. L'application est réalisée pour une valeur de précipitation efficace de 310 mm par an homogène sur tout le domaine.

(a) Bassin versant de l'Ellé

L'Ellé est une rivière de Bretagne, affluent de la Laita, un des principaux fleuves de Bretagne (Figure 9). Elle est relativement bien instrumentée. En effet, elle dispose de 4 stations de jaugeage à différents niveaux de son réseau hydrographique. Ceci permet d'identifier les contributions des différents sousbassins de l'Ellé (Figure 10).



Figure 9 Bassin versant de la rivière modélisée : l'Ellé (rouge), affluent de la Laita (noir). La zone entourée en rouge présente une représentation de l'élévation sur le bassin versant de l'Ellé.

Le bassin versant de l'Elle possède une surface d'environ 600 km² pour un total de 650 versants identifiables sur le réseau de rivière. Ainsi, il s'agit d'un bassin versant de moyenne dimension à l'échelle de la Bretagne.



Figure 10 Stations de jaugeage de l'Ellé (rouge) au sein du bassin versant de la Laita (jaune)

Le nombre de versants présents au sein du bassin versant de l'Ellé permet d'explorer un vaste spectre de géométrie et de dimensions, en considérant que les versants possèdent tous les mêmes propriétés hydrogéologiques, et de déterminer l'impact de la géomorphologie des versants sur le débit en rivière.

(b) Simulation et spatialisation de l'information

Comme évoqué dans Section II.1.b, des outils de calcul et de visualisation spécifiques ont été développés. Ainsi, il est possible de visualiser les débits alimentant l'Ellé ainsi que la carte piézométrique à l'échelle de son bassin versant. Le débit en rivière est calculé en supposant un temps de transit négligeable dans la rivière par rapport au temps de résidence dans l'aquifère. La simulation est effectuée en régime permanent, c'est-à-dire avec une valeur constante au cours du temps.

(c) Carte piézométrique de l'Ellé

La spatialisation de l'information pour chaque modèle unitaire (versant), est utilisée pour produire une carte piézométrique à l'échelle du bassin versant.



Figure 11 Carte piézométrique du bassin versant de l'Ellé en régime stationnaire sous l'influence de la recharge moyenne annuelle accompagnée du réseau hydrographique de l'Ellé (blanc). Les niveaux piézométriques varient de -10m (bleu foncé) à 250m (rouge sombre) (le niveau 0 se situe au niveau de l'exutoire de l'Ellé)

La carte piézométrique (Figure 11) informe notamment sur la validité du modèle à travers la continuité des niveaux calculés. Il existe quelques piézomètres dispersés sur le domaine, mais, la piézométrie étant une information extrêmement locale dans le cas d'aquifères de socles superficiels, et encore plus lorsque ceux-ci sont situés en haut de versant, ils ne peuvent être utilisés lors de l'inversion. De plus, il n'existe pas suffisamment de piézomètre pour obtenir une information sur chaque versant (environ 650 versants pour 2 piézomètres).

Il est aussi possible de spatialiser une autre information du volume : des taux de remplissage de l'aquifère, exprimés comme étant le rapport entre les stocks modélisés et le stock maximal théorique pouvant être contenu. La carte de remplissage (Figure 12) renseigne sur la présence potentielle de zones humides qui peuvent être à leur tour identifiées via images satellites ou relevés de terrain.



Figure 12 Structure de l'aquifère du bassin versant de l'Ellé de 0% (bleu) à 100% (rouge) ainsi que son réseau hydrographique (blanc). La zone rouge au nord correspond à la présence d'une zone d'accumulation identifiable par la présence potentielle d'une zone humide. Elle se situe dans une zone relativement plate et encaissée en haut de versant.

(d) Spatialisation des débits de l'Ellé

La rivière est en tout point alimentée par tous les versants situés en amont de ces points. En utilisant l'approximation précédente, les débits au sein de la rivière peuvent être déterminés (Figure 13)



Figure 13 Débits de l'Ellé simulés dans le cas d'une simulation en régime permanent, avec le réseau hydrographique (noir), les versants considérés (gris). Les zones de confluence correspondent à des

zones de discontinuité à cause de l'accumulation des débits des deux bras se rejoignant. Le débit varie de 0.1 m^3/s (petit point bleu foncé) à 9.5 m^3/s (gros points rouge sombre)

La comparaison des débits obtenus en régime permanent avec le module de chaque station de jaugeage permet de déterminer la qualité de la simulation. Sur un modèle non calé, l'écart entre données et résultats est relativement faible (de l'ordre de 10%). Ceci met en évidence le rôle très important de la topographie et de l'organisation des versants dans l'évolution du débit des rivières bretonnes.

Section IV.2 Analyse de récessions

Le modèle utilisé pour simuler le comportement des versants trouve son origine dans le développement analytique d'une solution de l'équation d'écoulement selon plusieurs hypothèses, dont la principale est l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer.

Cette solution a aussi été exploitée dans le développement de solutions analytiques pour l'étude de récession de rivières connectées à des systèmes aquifères superficiels (Troch, De Troch et al. 1993). Les équations présentées dans la suite, de (4) à (6.2) sont issues de (Brutsaert 2005).

(a) Développement des solutions analytiques pour l'étude de récession

En l'absence de précipitations le débit d'une rivière décroit selon un profil en loi de puissance. L'étude de la récession se base principalement sur l'équation suivante (4) exprimant la variation de débit dQ/dt comme étant une loi de puissance de Q.

$$\frac{dQ}{dt} = aQ^b \tag{4}$$

Les paramètres a et b (4) permettent de décrire le comportement du système aquifère soutenant la rivière lors de la récession. Des solutions analytiques existent pour deux régimes différents (Troch, De Troch et al. 1993). Elles sont calculées à partir de l'épaisseur du système aquifère D, sa perméabilité k_0 , sa porosité efficace n_e , sa longueur L et son aire A. Celles-ci sont exprimées pour un temps court (5.1) et un temps long (5.2)

$$\begin{cases} b_1 = 3\\ a_1 = -1.1(k_0 n_e D^3 L^2)^{-1} \end{cases}$$
(5.1)

$$\begin{cases} b_2 = \frac{3}{2} \\ a_2 = -4.8k_0^{\frac{1}{2}}L\left(n_e A^{\frac{3}{2}}\right)^{-1} \end{cases}$$
(5.2)

A partir des expressions précédentes (5.1) et (5.2), il est possible de calculer analytiquement un débit pour des temps courts (6.1) et des temps longs (6.2), en considérant le temps *t*.

$$Q = 0.7 (k_0 n_e D^3 L^2)^{\frac{1}{2}} t^{-\frac{1}{2}}$$
(6.1)

$$Q = \frac{3.5L^2k_0D^2}{A} \left(1 + \frac{4.5L^2k_0D}{n_eA^2}t\right)^{-2}$$
(6.2)

Ces solutions permettent d'identifier une signature hydrologique du système aquifère concerné.

(b) Analyse de récession issues du modèle Hs1D

Les hypothèses du modèle développé précédemment sont proches de celles du modèle Hs1D (Dupuit-Forcheimer, pas de variabilité latérale). Ainsi, l'application de cette méthode sur le modèle doit offrir des solutions proches entre résultats simulés et solution analytique.

Afin de rester dans le cas des solutions analytiques, le versant modélisé a une pente θ nulle (il est horizontal).



Figure 14 Profil de récession pour un cas idéal simulé (noir) et comparé avec les solutions analytiques pour temps court (bleu et vert) et long (rouge et violet). Les deux solutions aux temps courts, et les deux solutions aux temps longs sont très proches l'un de l'autre.



Figure 15 Récession simulée par Hs1D (noir) comparée avec les solutions analytiques aux temps courts (bleu) et aux temps longs (rouges). Les solutions analytiques ne sont calculées que dans leurs domaines respectifs de validité.

La comparaison entre les résultats du modèle Hs1D et les solutions analytiques décrites par (Brutsaert 2005) montre une correspondance parfaite entre les deux solutions utilisées (Figure 14 et 15). Ceci signifie qu'il est possible d'utiliser des analyses de récessions pour identifier des signatures hydrologiques de versant. Il est ainsi possible de caractériser les versants lors du calage des paramètres.

Article V. Perspectives de développement

Ils montrent la capacité du modèle à décrire le comportement des aquifères de socles superficiels. Grâce à ces modèles performants et valides, l'étape de calibration pourra être abordée dans la suite de la thèse (Troch, De Troch et al. 1993).

Section V.1 Outils en développement

(a) Développement de modèles de transport d'espèces en solution

Le développement d'applications sur les aquifères de socle nécessite le calage des différents modèles via l'utilisation de données disponibles régionalement. L'utilisation de données de débit permet de mettre en évidence l'impact de l'organisation spatiale des versants ainsi que leurs diffusivités. Le calage de ces applications nécessite aussi la détermination des temps de transfert au sein de ces aquifères, permettant de caractériser des propriétés plus spécifiques, telles que la porosité efficace. Ceci peut être réalisé via l'utilisation de données de concentration en espèces chimiques précises (typiquement la silice et les CFC en Bretagne), informant sur les propriétés de diffusion de solutés dans le milieu.

Ainsi, des modèles de transport advectifs permettant de calculer des lignes d'écoulements et des temps de transferts au sein d'un système par application de méthode dites de *particle tracking* seront développés. La résolution du modèle de transport advectif se base sur l'équation (7), en considérant Q(x(t),t), le débit, S(x(t),t), le stock, selon la coordonnée x au temps t.

$$S(x(t),t)\frac{dx}{dt} = Q(x(t),t)$$
(7)

La résolution de (7) permet de déterminer le flux dx/dt et le temps de transport au sein du système aquifère. Comme la simulation est résolue en 1D, la géométrie des lignes d'écoulements correspond à la distance à la rivière, c'est-à-dire à la coordonnée x. L'avantage de cette méthode est de pouvoir résoudre rapidement en 1D les équations d'advection.

En plus du modèle de transport advectif, il est aussi possible d'implémenter un modèle de transport dispersif. Celui-ci est appliqué comme une extension au modèle advectif sous la forme d'une convolution entre les solution du transport advectif-dispersif dans un milieu homogène. Ceci permet de calculer une dispersion qui augmente avec la distance parcourue, et donc avec le temps de transport (Gelhar, Welty et al. 1992).

(b) Développement de méthodes de calibration

Classiquement, le calage se fait en utilisant des méthodes simples mais robustes, type régression par moindre carré basée sur le critère de Nash-Sutcliffe (8), permettant d'affiner la capacité d'un modèle à décrire une courbe de débit en modifiant la valeur de ses paramètres hydrodynamiques (transmissivité et volume). En considérant T mesures de débit Q_0 et débits modélisés correspondants Q_m ainsi que la moyenne des débits observés $\langle Q_0 \rangle$:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T} (Q_m(t) - Q_O(t))^2}{\sum_{t=1}^{T} (Q_O(t) - \langle Q_O \rangle)^2}$$
(8)

La nature des données de débit intégratrices d'un large nombre de versants nécessite de faire l'hypothèse d'un comportement équivalent des paramètres dans leur ensemble.

Section V.2 Déploiement sur un ensemble de sites tests

(a) Développement des outils de calage

Le but du modèle de bassin versant est de simuler des variations piézométriques en chaque point de l'aquifère. En revanche, les seules données à disposition correspondent à des données fortement intégrées en rivière. Ainsi, il devient nécessaire de simuler à la fois le comportement de l'aquifère et celui de la rivière afin de pouvoir à terme calibrer les différentes applications.

Du fait du grand nombre de systèmes simulés au sein de chaque application et du caractère intégratif des données disponibles, les méthodes d'inversion de modèles classiques pourraient ne pas être efficaces. Pour pallier ce problème, nous cherchons à développer une méthode d'analyse permettant d'utiliser une méthode analytique de description des comportements des systèmes (Troch, De Troch et al. 1993) basée sur l'étude de récession. Ces méthodes permettraient, au-delà de leur capacité à décrire l'évolution des débits en rivière, d'identifier les signatures hydrologiques des différents sous-systèmes des applications, à savoir des groupes de versants de propriétés similaires et proches spatialement (Troch, Berne et al. 2013).

(b) Déploiement de l'outil sur la plate-forme AquiFR

Les outils de calibration évoqués en section IV.1. permettront de caler les différentes applications sur plusieurs sites tests en Bretagne. Une fois ceci réalisé, il sera alors possible de déployer les applications qui seront couplées aux autres simulations à l'échelle de la France permettant de compléter l'application AquiFR.

Un autre objectif à venir est d'intégrer l'outil Hs1D au sein de la plate-forme de couplage OpenPalm.

Article VI. Conclusion

La modélisation et la compréhension des écoulements au sein des aquifères de socle bretons ne peuvent être appréhendées de manière classique. En effet, les écoulements au sein des systèmes modélisés sont conditionnés par la géométrie des bassins versants. De ces caractéristiques découle la nécessité d'opter pour une approche de modélisation des écoulements non classique. Celle-ci se veut simple, basée sur une segmentation en sous-domaines et une réduction de l'espace modélisé en 1.5 D selon un calcul des distances d'écoulement entre versants et rivière. L'approche développée ici propose de modéliser un système complexe à très large échelle comme une somme de nombreux modèles simples et réduits agrégés via leur connexion par le réseau hydrographique.

L'intérêt de cette approche est de pouvoir offrir un outil de modélisation et de prédiction rapide et efficace à l'échelle de la Bretagne, dans le cadre du projet AquiFR. En revanche, le développement de ce logiciel impose de nombreuses contraintes, dont le caractère libre du logiciel. A cette fin, certains codes préexistant, notamment ceux de modélisation des écoulements à l'échelle du versant ont été implémentés dans un langage libre. De plus, divers outils d'agrégation ont été développés afin de rendre aux simulations 1.5 D de sous-domaines leur caractère régional 2D.

Les seules données abondamment disponibles, débit et concentration d'espèces chimiques, pour le calage des applications développées sont fortement intégrées et nécessitant une certaine hypothèse de comportement équivalent des versants dans leur ensemble . Ainsi, il est nécessaire de développer des méthodes à même d'identifier la signature des différents domaines, via l'étude de récessions. De même, parmi ces données se trouvent une grande quantité de données de concentrations en rivières, nécessitant l'implémentation de modèles de transport, dans un premier temps à l'échelle unitaire, puis à celle du domaine dans son ensemble.

Les développements à venir concerneront principalement les méthodes de calage ainsi que le modèle de transport advectif et dispersif en 1D de façon à réaliser, déployer et intégrer les applications AquiFR sur la Bretagne.

Article VII. Glossaire

Approche 1,5D : Nom que nous avons donné à l'approche que nous proposons pour la modélisation des circulations dans les zones altérée et fissurée. L'approche consiste à intégrer les flux verticalement et latéralement pour obtenir une succession d'équations de Boussinesq 1D pour chacun des versants d'un bassin versant.

CFC : Chlorofluorocarboures. Ce sont des gaz appartenant à la famille des halogénoalcanes, non toxiques, inertes, stable et ininflammables. Ils ont été massivement utilisés dans les aérosols et les réfrigérants. Ils sont utilisés en tant que traceur car uniquement d'origine anthropique et très lentement dégradés, permettant ainsi de dater des eaux précipitées à partir du début de leur utilisation (1950).

Equation d'écoulement à surface libre : équation décrivant le niveau de la surface d'une étendue d'eau non contrainte par un élément extérieur (étendue d'eau libre telle qu'un lac, ou aquifère libre).

Fonction de Heaviside : notée traditionnellement H(x) et également appelée « fonction échelon unité » ou « fonction marche d'escalier », est une fonction valant 0 pour x strictement inférieur à zéro et un pour x supérieur ou égal à zéro.

Hypothèse de Dupuit-Forchheimer : Hypothèse suivant laquelle les écoulements dans les aquifères libres peuvent être modélisés par une approximation 2D suite à une intégration verticale des flux. Cette hypothèse à une équation aux dérivées partielles connues sous le nom d'équation de Boussinesq.

Ligne de crête : ligne fictive passant les maximums topographiques locaux (localisations dont l'altitude est localement la plus élevée). Elle est aussi une ligne de démarcation entre deux versants ou bassins versants voisins. Une goutte d'eau tombant d'un côté de la ligne de crête ne pourra jamais la traverser.

Suintement : (seepage en anglais) est le flux sortant de l'aquifère en dehors du système hydrographique et de la mer. Il s'agit notamment des sources et du flux de retour des aquifères vers la surface (return flow) utilisé pour des écoulements souterrains très porches de la surface.

Temps de réponse : Temps de réaction de l'aquifère à une sollicitation en charge généralement venant d'une modification de la recharge. L'analyse corrélative de la recharge et de la décharge de l'aquifère renseigne la structure hydrodynamique du milieu souterrain.

Temps de résidence : Temps de transfert d'un soluté de la recharge au point d'échantillonnage qui peut être un piézomètre ou un exutoire. Certains moments des temps de résidence peuvent être déterminés par l'analyse des concentrations en traceurs atmosphériques comme les CFCs.

Transport advectif : transport de particules et d'espèces en solution via le mouvement (et donc la vitesse) de l'eau. Sa vitesse dépend de la vitesse d'écoulement du fluide.

Transport dispersif : transport de particules et d'espèces en solution via les hétérogénéités locales du champ de vitesses du fluide.

Transport diffusif : transport d'espèces via le mouvement Brownien des molécules au sein du milieu. Très lent et à petite échelle.

Zone Altérée : Horizon correspondant à la partie altérée de la roche. L'altération est un processus chimique de déstabilisation d'une partie des minéraux de la roche mère. Dans le massif armoricain, l'épaisseur de la zone altérée varie entre 0 et 60 m sans tendance régionale marquée ni corrélation évidente avec la lithologie ou la topographie.

Article VIII. Bibliographie

Brutsaert, W. (2005). Hydrology: an introduction, Cambridge University Press.

Gelhar, L. W., C. Welty and K. R. Rehfeldt (1992). "A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers." <u>Water Resources Research</u> **28**(7): 1955-1974.

Harbaugh, A. W. (2005). <u>MODFLOW-2005</u>, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process, US Department of the Interior, US Geological Survey Reston.

Kolbe, T., J. Marçais, Z. Thomas, B. W. Abbott, J.-R. de Dreuzy, P. Rousseau-Gueutin, L. Aquilina, T. Labasque and G. Pinay (2016). "Coupling 3D groundwater modeling with CFC-based age dating to classify local groundwater circulation in an unconfined crystalline aquifer." Journal of Hydrology **543**(Part A): 31-46.

Leray, S., J. R. de Dreuzy, O. Bour and E. Bresciani (2013). "Numerical modeling of the productivity of vertical to shallowly dipping fractured zones in crystalline rocks." Journal of Hydrology **481**(Supplement C): 64-75.

Marçais, J. D. D., Jean-Raynald; Erhel, Jocelyne (2017). "Dynamic coupling of subsurface and seepage flows solved within a regularized partition formulation." <u>ADWR</u>.

Niswonger, R. G., S. Panday and M. Ibaraki (2011). MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005. <u>Techniques and Methods</u>.

Reggiani, P., M. Sivapalan and S. Majid Hassanizadeh (1998). "A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics." <u>Advances in Water Resources</u> **22**(4): 367-398.

Troch, P. A., A. Berne, P. Bogaart, C. Harman, A. G. J. Hilberts, S. W. Lyon, C. Paniconi, V. R. N. Pauwels, D. E. Rupp, J. S. Selker, A. J. Teuling, R. Uijlenhoet and N. E. C. Verhoest (2013). "The importance of hydraulic groundwater theory in catchment hydrology: The legacy of Wilfried Brutsaert and Jean-Yves Parlange." <u>Water Resources Research</u> **49**(9): 5099-5116.

Troch, P. A., F. P. De Troch and W. Brutsaert (1993). "Effective water table depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions." <u>Water Resources Research</u> **29**(2): 427-434.

Troch, P. A., C. Paniconi and E. E. van Loon (2003). "Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response." <u>Water Resources Research</u> **39**(11).

Article IX. Table des illustrations

Avec le soutien financier de

AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

www.agence-francaise-biodiversite.fr



http://www.bretagne.bzh/