

Aqui-FR, un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale

Rapport de fin de première année

Juin 2015

Florence Habets¹, Philippe Ackerer², Nadia Amraoui³, François Besson⁴, Yvan Caballero⁵, Jean-Raynald de Dreuzy⁶, Laurent Longuevergne⁶, Eric Martin⁷, Thierry Morel⁸, Fabienne Regimbeau⁴, Marie Rousseau³, Pauline Rousseau-Gueutin⁶, Dominique Thiéry³, Jean-Michel Soubeyroux⁴, Jean-Pierre Vergnes¹, Pascal Viennot⁹

Projet suivi par Bénédicte Augeard, Onema

¹ Metis, UMR 7619 UPMC/CNRS, Paris

² Lhyges, UMR 7517 Uds-CNRS-Enges, Strasbourg

³ BRGM Gestion de la Ressource en Eau, Orléans

⁴ Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse

⁵ BRGM, Montpellier

⁶ Géosciences Rennes - UMR6118, Rennes

⁷ CNRM-GAME, UMR 3689, Toulouse

⁸ CERFACS, Toulouse

⁹ Centre Géosciences Mines-ParisTech, Fontainebleau

Table des matières

1.	Introduction.....	3
2.	Les approches de modélisation nationale des aquifères ailleurs dans le monde.....	4
3.	Présentation de l'application Aqui-FR	5
3.1.	Eléments de l'application AquiFR	7
3.2.	Structure OpenPALM de l'application AquiFR.....	8
3.3.	Fonctionnement de l'application Aqui-FR	9
3.4.	Adaptation des codes pour leur insertion dans Aqui-FR.....	10
3.5.	Implémentation de nouvelles applications hydrogéologiques dans Aqui-FR	11
3.6.	Post-traitement.....	12
3.7.	Gestion du code	14
4.	Développements.....	15
4.1.	Aquifères de socle	15
4.2.	Adaptation du code de calcul Marthe pour intégration dans Aqui-FR.....	19
4.3.	Les aquifères karstiques	21
4.4.	Assimilation.....	24
5.	Perspectives de développement	27
5.1.	Poursuite d'adaptation et développement des modèles BRGM	27
5.2.	Nouvelles applications régionales BRGM	27
5.3.	Nouvelles applications régionales Mines-Paristech	29
5.4.	Amélioration de Surfex	31
6.	Partie Juridique	31
6.1.	Protection des modèles hydrogéologiques (code source).....	31
6.2.	Droits d'utilisation des applications développées par le BRGM	31
6.3.	Périmètres d'utilisation des modèles BRGM	33
6.4.	Accès aux sorties/résultats issus de la plateforme.....	33
6.5.	Droits d'utilisation des applications développées par Mines-ParisTech	34
6.6.	Droits d'utilisation du code SURFEX.....	34
6.7.	Droits d'utilisation du coupleur openPALM	34
7.	Retour sur les avis des potentiels utilisateurs.....	34
8.	Conclusions.....	36
	Références.....	36

1. Introduction

Le projet AQUI-FR vise à mettre en place des prévisions de l'évolution des eaux souterraines en France à des échelles de temps allant de la dizaine de jours à la saison, jusqu'aux projections sur plusieurs décennies, en se basant sur les modélisations hydrogéologiques développées et utilisées par les gestionnaires de l'eau, lorsqu'elles existent, et à favoriser le développement de ces modélisations là où elles n'existent pas (en particulier, sur les aquifères de socle). En ce sens, le projet AQUI-FR est conçu comme un outil de valorisation des travaux de modélisation hydrogéologiques réalisés en France. L'exploitation des modélisations hydrogéologiques en mode prévisions à moyenne échéance (~10-15 jours) et saisonnière (à minima 3 mois et pouvant aller jusqu'à 6 mois) offrira des nouvelles possibilités. Grâce à des simulations prospectives longues durées et à un suivi en temps réel, chaque situation rencontrée pourra être comparée aux situations historiques connues grâce à la réanalyse. De plus, AQUI-FR pourra être assez facilement mobilisé pour des projections climatiques à l'échelle nationale, permettant ainsi un suivi des évolutions attendues du fait du changement climatique, sans prise en compte de l'adaptation. L'ensemble des applications envisagées pour AQUI-FR est présenté Figure 1.

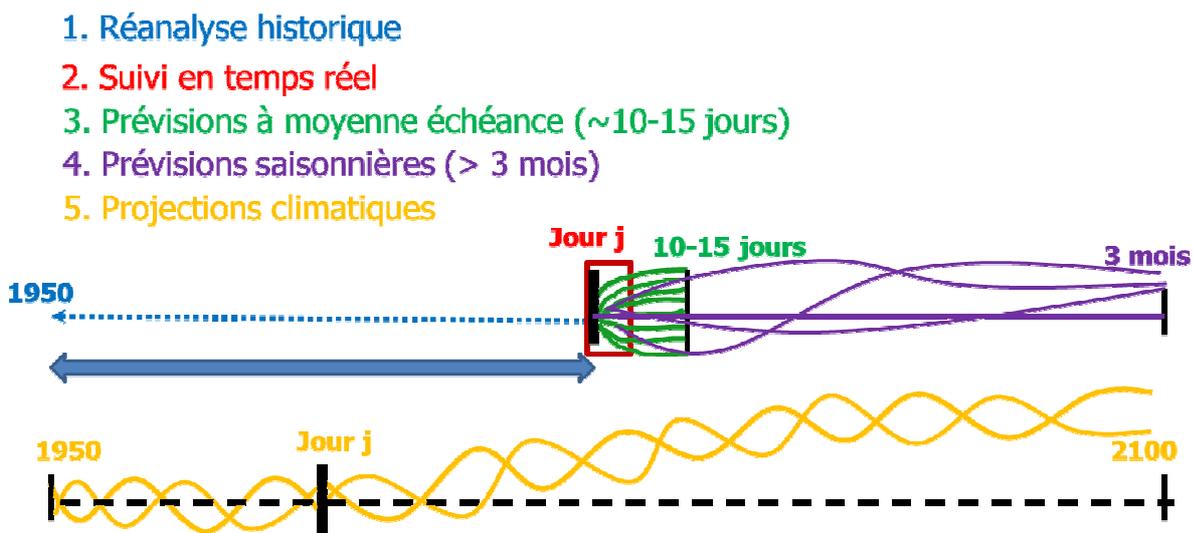


Figure 1 Représentation schématique des cinq principaux modes d'exploitation d'AQUI-FR : les réanalyses historiques débuteront au moins en 1958. Le suivi en temps réel permet de suivre la situation quotidienne et de fournir des états initiaux aux prévisions. Deux types de prévision seront mises en place : les prévisions à 10-15 jours et des prévisions saisonnières. De plus, la structure AQUI-FR pourra être mobilisée ponctuellement lorsque des projections climatiques désagrégées seront disponibles pour étudier l'impact du changement climatique sur la ressource en eau en France.

Pour cela, l'application AQUI-FR sera déployée sur les machines opérationnelles de Météo-France¹ et bénéficiera de l'appui de l'équipe DCSC/AVH pour son suivi quotidien.

La première année du projet a eu pour objectif d'une part de montrer la faisabilité d'un tel outil via

¹ http://www.meteofrance.fr/documents/10192/4219094/DP_supercalculateur/0766fada-87f6-4703-a710-53c73cee49b3

la construction de la structure informatique Aquif-FR, d'autre part, de s'assurer des possibilités légales d'exploitations des applications hydrogéologiques en opérationnel, et enfin, d'identifier les éléments d'intérêts pour les gestionnaires de l'eau.

La construction de la structure Aquif-FR a nécessité plusieurs étapes: i) rassembler les modèles hydrogéologiques² sur une même structure informatique mobilisable en opérationnel, ii) intégrer les différentes applications hydrogéologiques disponibles iii) converger vers un traitement homogène à l'échelle nationale, via a minima l'utilisation d'un forçage atmosphérique commun. Ces différents éléments sont décrits dans la suite du rapport qui vise donc à faire le point sur cette première année du projet. Au préalable, au vue de la volonté d'offrir une vision nationale, la section suivante fait le point sur les initiatives similaires à l'international.

2. Les approches de modélisation nationale des aquifères ailleurs dans le monde

Il semble exister encore peu d'approches de modélisation nationale des aquifères. Cependant, cette vision est peut être limitée par le fait que ces approches ne font pas forcément l'objet de présentations à l'international ou dans des revues scientifiques, et la rédaction de rapport en langues natives réduit les possibilités de détection. Ainsi, nous avons trouvé seulement trois approches similaires à l'international.

La volonté de posséder des outils de diagnostics communs entre les différents acteurs de l'eau a poussé deux pays européens à développer des modélisations hydrogéologiques à l'échelle nationale, le Danemark (Henriksen et al., 2003) et les Pays Bas (De Lange et al., 2014). Dans les deux cas, il s'agit de la genèse d'un nouveau modèle, avec donc une structure informatique homogène, et la volonté d'intégrer l'ensemble des données disponibles, y compris celles acquises avec des techniques d'imagerie récentes. Ces deux modèles hydrogéologiques nationaux 3D couvrent une superficie assez réduite du fait de la taille des pays (43 000 km²) et sont utilisés pour des études de qualité (intrusion d'eaux salines) et pour des études d'impact de changement climatique (Hojeborg et al., 2013).

Le modèle danois DK-model (<http://vandmodel.dk/vm/uk/index.html>) est basé sur le modèle MIKE-SHE, et est constitué de 7 sous-modèles correspondant aux différentes îles. Le modèle hydrologique national hollandais (NHI, www.nhi.nu) est développé depuis 2005 avec un financement aux alentours de 1M€/an et une forte implication des gestionnaires régionaux. Il rassemble au sein de sa structure informatique, différents modèles utilisés de façon couplée pour représenter chaque partie de l'hydrosystème, ie, la surface, la zone non saturée, les rivières, ou les nappes (simulées par Modflow).

² On notera que dans ce rapport, on distingue un modèle hydrogéologique d'une application hydrogéologique. Le modèle hydrogéologique est l'outil numérique résolvant les équations physiques, et donc, le programme informatique ou code informatique. L'application hydrogéologique est la mobilisation du modèle hydrogéologique sur un domaine particulier. L'application hydrogéologique implique l'élaboration des maillages et la détermination de l'ensemble des paramètres du modèle sur le domaine étudié. Un modèle hydrogéologique peut avoir plusieurs applications hydrogéologiques.

Hojberg et al (2013) rapportent comment le modèle national danois a pu évoluer pour répondre aux besoins des gestionnaires régionaux. Ces mises à jour et évolutions se sont réalisées à trois niveaux, avec une forte interaction avec les gestionnaires :

1. Mise à jour basique : il s'agit de la mise à jour des données évoluant dans le temps (données météorologiques, prélèvements, ...)
2. Amélioration des paramètres de l'application via l'intégration de données supplémentaires ou plus précises
3. Amélioration de la conception de l'application via une complète reconstruction.

Une autre approche assez différente a été choisie au Texas, un état comparable en superficie avec la France. L'eau souterraine est très importante dans cet état, car elle représente 60% des usages. Le Texas Water Development Board a ainsi encouragé le développement de modélisations de ces aquifères. Une trentaine de modélisations indépendantes recouvrant différentes parties du Texas sont ainsi rassemblées et accessible via un site internet (<https://www.twdb.texas.gov/groundwater/>) ainsi que les retours des gestionnaires. La plupart de ces modélisations repose sur le modèle Modflow. Ces modélisations sont principalement utilisées pour anticiper l'impact de nouveaux aménagements et pour estimer l'évolution de la ressource sur le long terme.

Ces trois exemples montrent ainsi des points communs et quelques différences avec le projet Aqui-FR. Ainsi, ces modèles sont utilisés pour partager les connaissances sur la ressource en eau souterraine et étudier l'impact d'aménagements et/ ou du changement climatique. Cependant aucun de ces modèles ne semblent être utilisé pour de la prévision. Les travaux menés à Météo-France avec l'outil SIM en prévision à moyenne échéance (Coustau et al., 2015) et saisonnière (Singla et al., 2012) bien qu'actuellement ciblés plus particulièrement sur les eaux de surface, inclus déjà des modélisations d'aquifères et nous permettent d'envisager sereinement cette étape.

3. Présentation de l'application Aqui-FR

A l'élaboration du projet, nous avons choisi de réunir dans une première étape les applications hydrogéologiques régionales développées par le BRGM et Mines-ParisTech et utilisant les codes de calcul (appelé par la suite modèles hydrogéologiques) Marthe et Modcou (dans sa version nommée Eau-dyssée) respectivement. Cela permet de couvrir les zones métropolitaines marquées par la présence d'aquifères sédimentaires régionaux, ainsi que des applications sur des aquifères karstiques (Figure 1). Le coupleur OpenPALM (http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/) a été choisi pour sa simplicité d'utilisation, ses performances, et parce qu'il est déjà implémenté sur les machines opérationnelles de Météo-France. Il est important de noter que si l'intégration d'un code dans OpenPALM est possible sans les fichiers sources et avec le seul exécutable, son implémentation sur les machines opérationnelles de Météo-France sera par contre impossible pour des raisons de sécurité informatique. Il est donc important de disposer des codes sources, et d'avoir la possibilité d'y faire des adaptations si nécessaire. Ces conditions ont été remplies avec les codes de Marthe et Modcou (Eau-dyssée).

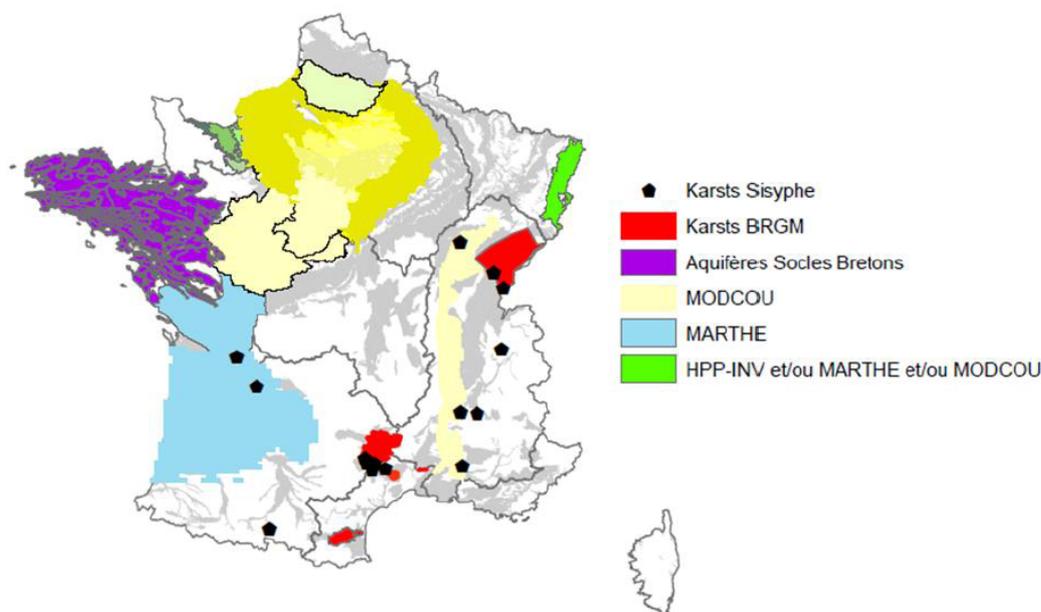


Figure 2: Extension des applications dont l'intégration dans Aqwi-FR est anticipée, le code couleur indiquant le modèle disponible

L'application Aqwi-FR construite sous OpenPALM, dans sa version d'Avril 2015, intègre ces deux premiers modèles hydrogéologiques. L'application permet de les faire tourner de façon synchronisée, en les alimentant par un bilan hydrique estimé de façon homogène sur la France et issu du schéma de surface Surfex forcé par les analyses météorologiques Safran de Météo-France. L'application Aqwi-FR permet de récupérer les sorties de ces modèles afin de les valoriser via du post-traitement. Ces sorties permettront à terme une rétroaction entre les nappes et l'humidité des sols³.

Dans la version d'Avril 2015, on dispose de quatre applications Modcou : la Seine à 6 couches (Viennot 2009), la Basse Normandie avec également 6 couches (Thierion 2007), la Loire avec 4 couches (Monteil 2011), la Somme avec une couche (Korkmaz, 2007) et deux applications Marthe : le Poitou Charentes avec 6 couches (Douez et al., 2010) et la Somme monocouche (Amraoui et al., 2002). Les deux applications Marthe ont été intégrées dans Aqwi-FR, seule l'application Somme est branchée sous OpenPALM car elle permet des simulations au pas de temps journalier. L'application Poitou n'était pas encore branchée et tournait d'une manière indépendante du fait d'un pas de temps calcul mensuel pas compatible avec le reste de la structure. Le branchement de cette application est prévu après adaptation du pas de temps de calcul. La Figure 3 représente l'extension des applications hydrogéologiques incluses à ce jour dans Aqwi-FR.

3 Cette rétroaction permet lorsque la nappe est affleurante d'alimenter l'humidité contenue dans les sols qui peut s'évaporer ou favoriser la genèse de ruissellement plutôt que d'infiltration. Une telle rétroaction a été développée sur la France et a montré un fort impact local (Vergnes et al., 2014)

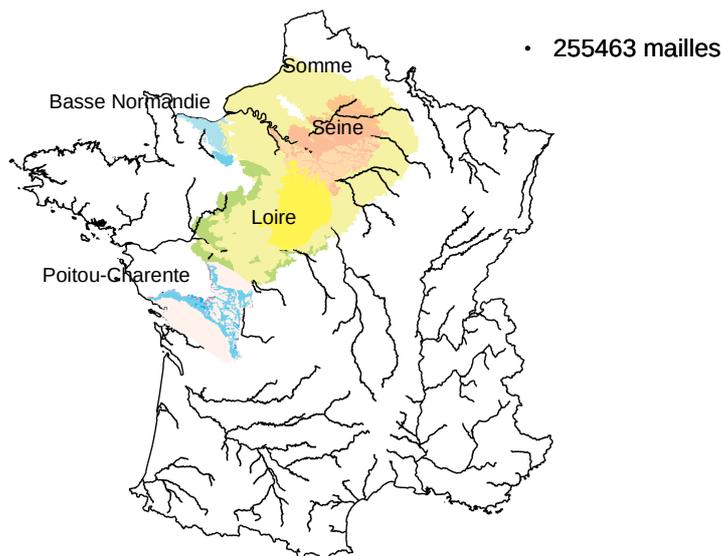


Figure 3 : Extension des couches aquifères simulées sur les 5 applications hydrogéologiques actuellement intégrées dans AQUI-FR.

3.1. Éléments de l'application AQUIFR

L'application AQUIFR contient 3 principaux éléments :

- Le coupleur OpenPALM développé au CERFACS (Morel et al., 2013) permet de gérer des couplages dynamiques entre modèles. Dans le cadre de notre application, il est particulièrement intéressant car il permet de gérer les échanges entre modèles, la parallélisation des applications, et pourrait être de plus utilisé pour l'assimilation de données.
- Le modèle hydrogéologique Marthe (Thiéry 2014) est développé au BRGM depuis les années 1990. Il dispose de nombreuses fonctionnalités⁴. Le code est écrit en fortran90 et a du faire l'objet de modifications mineures afin d'être compilé sur des plateformes linux/unix. De plus, il a été nécessaire d'intégrer dans le code quelques éléments afin de gérer les échanges avec OpenPALM (cf ci-dessous) et d'adapter le code pour la lecture des sorties du schéma de surface Surfex.
- Le modèle hydrogéologique Modcou (Ledoux et al., 1989), dans sa version Eau-dyssée codée en fortran90, développé à Mines-ParisTech également depuis la fin des années 1980. Le code Eau-dyssée a inclus dès sa conception des instructions Palm (Habets et al., 2010), ce qui a facilité son intégration dans AQUI-FR.

C'est le schéma de surface SURFEX⁵ (Masson et al., 2013) qui estime le bilan d'eau et d'énergie (en particulier les flux de ruissellement et d'infiltration, ce dernier permettant d'alimenter les nappes). Etant donné qu'on ne simule pas de rétroaction de la nappe vers la surface dans cette version, SURFEX calcule les flux de manière indépendante. L'application actuelle lit ces flux dans des fichiers

4 voir aussi <http://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/marthe-logiciel-modelisation-ecoulements>).

5 <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/>

3.2. Structure OpenPALM de l'application AquifR

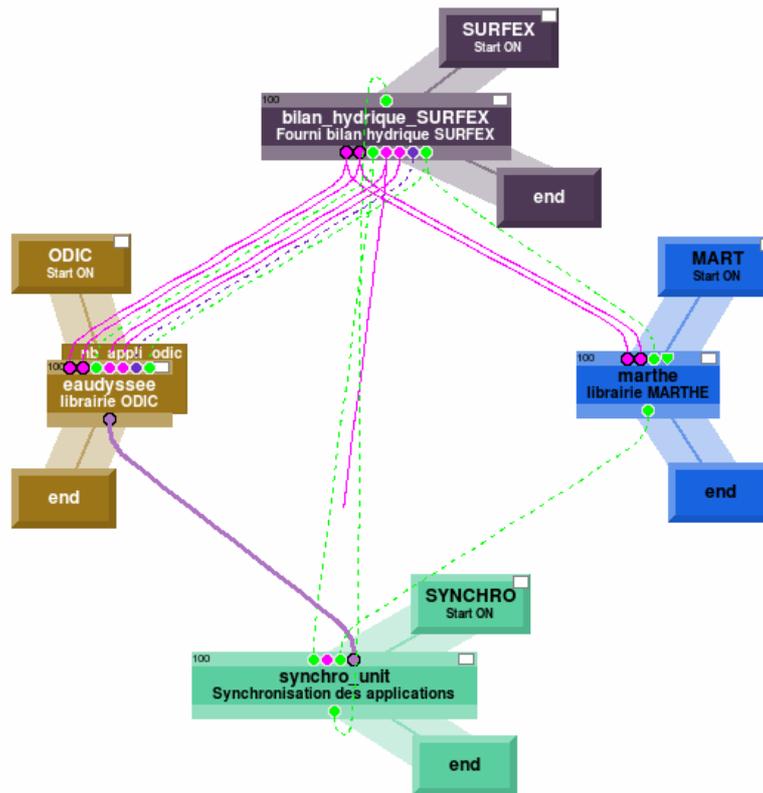


Figure 4 Structure OpenPALM de l'application Aquif-R. Chaque couleur est associée à une branche indépendante (code source indépendant). Les traits colorés indiquent un échange de variable entre les branches.

L'application Aquif-FR contient quatre branches Palm (Figure 4) :

- en haut, la branche nommée SURFEX (en gris) se contente de lire les flux du bilan hydrique antérieurement estimés par Safran-Surfex et les transmet aux applications hydrogéologiques. Ainsi, toutes les applications hydrogéologiques sont alimentées par des flux estimés de façon homogène sur la France. De plus, cette branche devra gérer et transmettre la durée des simulations (qui doit pouvoir changer en fonction de l'usage en mode rétrospectif, prévision ou projection climatique), ainsi que les informations sur la date du jour simulé du fait des possibles modifications des actions anthropiques (prélèvement) en fonction de la date, alors qu'à ce stade, seul le pas de temps en cours est transmis.
- Au milieu, les branches nommées ODIC (pour Eau-dyssée, en marron) et MART (pour Marthe, en bleu) contiennent les exécutables des modèles hydrogéologiques, et sont ici utilisés sur une (Marthe) ou plusieurs applications (Eau-Dyssée). A ce stade, une seule application Marthe a pu être connectée, mais, à termes, les deux branches auront la même structure. En effet, dans la branche ODIC, le code est utilisé en parallèle sur un total de `nb_appli_odic` applications (ici, 4 applications), ce qui est illustré sur la figure par la présence de 2 blocs légèrement décalés. Ces deux branches sont alimentées par deux vecteurs (illustrés par des liens roses connectant le haut des boîtes Figure 2) qui sont le

ruissellement et l'infiltration estimés par Surfex, ainsi que par un entier (illustré par un lien vert arrivant en haut de la boîte) contenant le pas de temps en cours de simulation.

- En bas, la branche nommée Synchro (en vert) reçoit des informations issues des applications hydrologiques et issues de la branche Surfex. A ce stade, on peut voir que les informations envoyées par Marthe (actuellement un entier de synchronisation illustré par un lien vert) diffèrent de celles transmises par Eau-dyssée. En effet, les applications Eau-dyssée transmettent des variables d'intérêts, ie, pour l'instant uniquement le niveau piézométrique et les échanges nappes-rivières, qui sont donc collectées par la branche Synchro. Cet échange n'est pas encore activé dans Marthe, mais les développements nécessaires (implémentation d'instruction Palm au sein du code) seront faits prochainement. Ces variables d'intérêts sont alors extraites via l'écriture dans un fichier binaire (sortie_test.bin). De plus, la branche Synchro renvoie à la branche Surfex des informations (ce qui est illustré par le lien vert partant du bas de la boîte Synchro pour rejoindre le haut de la boîte Surfex). Pour l'instant l'échange se limite à un entier de synchronisation, permettant de s'assurer que toutes les applications tournent en phase. Mais, cela n'a d'intérêt que parce qu'à termes, il est prévu d'avoir des rétroactions entre la profondeur des nappes et les flux de surface. Cela nécessitera quelques travaux préalables dans la suite du projet.

3.3. Fonctionnement de l'application AQUI-FR

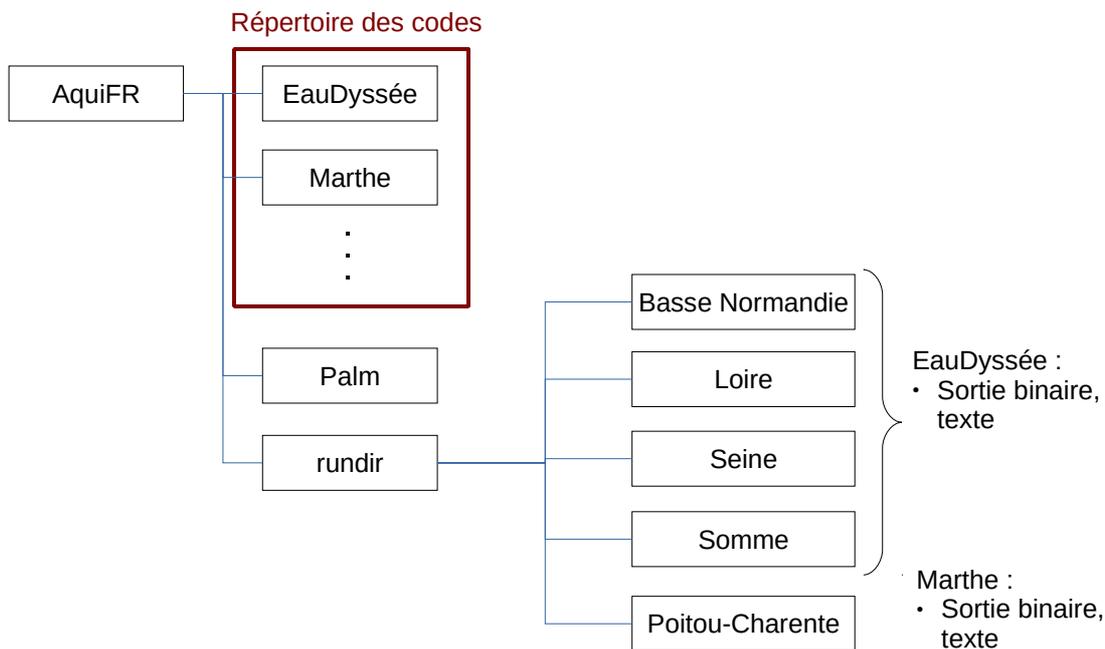


Figure 5 : Structure de l'application AQUI-FR

En pratique, la plateforme AQUI-FR est structurée de la manière suivante (Figure 5) : les codes informatiques de chaque branche sont contenus dans des répertoires indépendants. Ils sont compilés séparément. La structure de ces codes n'est pas modifiée pour l'implémentation dans OpenPALM. Simplement, il faut que ces codes soient transformés en sous-routine plutôt qu'en programme principal. Cette modification se fait aisément. Les codes sont compilés sous forme de librairie, ce qui facilite leur implémentation dans OpenPALM (un seul

fichier à décrire et non pas l'ensemble des sous-routines). Ensuite, un répertoire rundir contient les données et les résultats propres à chaque application hydrogéologique. A ce jour, rundir est composé de 5 sous-répertoires contenant les données pour les applications Poitou-Charente de Marthe, Loire, Seine, Somme et Base Normandie d'Eau-dyssée. Actuellement, les sorties des applications régionales sont également incluses dans ces sous-répertoires, séparément au sein d'un répertoire Output pour les applications Eau-dyssée, ou contenu dans le même sous-répertoire que les données pour Marthe.

En pratique, pour faire tourner les 5 applications hydrogéologiques, représentant plus de 255000 mailles, sur une année, l'application AQUI-FR génère près de 5 gigas de données et prend 20 minutes sur un PC linux. Pour anticiper les problèmes éventuels de portage, un test a été fait sur le supercalculateur de Météo-France par le Cerfacs, le temps calcul a été réduit à 8 minutes ce qui s'explique par la performance de la machine. On peut déjà affirmer que ces temps calculs sont compatibles avec une application opérationnelle temps réel. Ce point est important, puisque les prévisions d'ensemble à 10 jours que l'on souhaite réaliser à termes tous les jours, représentent plus de 500 jours de simulation chaque jour. Notons que sur la machine de calcul de Météo-France, chaque application (bassin versant) tourne en parallèle sur un cœur de calcul, le temps total de la simulation est conditionné uniquement par le bassin le plus gourmand en temps de calcul, l'ajout d'autres bassins versants n'aura donc qu'un impact limité sur le temps de calcul total. Sur le calculateur Beaufix de Météo-France, la ressource minimale mobilisée pour un calcul est 1 nœud, soit 24 cœurs de calcul, eux même "hyperthreadés" ce qui porte à 48 le nombre de processus pouvant tourner en parallèle. Le coupleur OpenPALM, la branche surfex et la branche synchro mobilisant 3 processus, il en reste donc 45 pour faire tourner les applications sur un seul nœud de calcul. Dans la version complète d'AQUI-FR, lorsque les applications de socle seront intégrées, il sera peut-être nécessaire de tourner sur un nœud de calcul supplémentaire.

Cette structure est assez souple et facilitera les mises à jours des applications hydrogéologiques, puisqu'aucun fichier décrivant l'application (fichiers de géométrie, de paramètre, de prélèvement) n'est modifié lors de l'intégration dans AQUI-FR. Par ailleurs, aucun des fichiers contenant les sorties des modèles n'est modifié à ce jour. Cependant, à termes, il est probable que les résultats exploités pour les applications AQUI-FR transiteront tous par la branche Synchro, et que les sorties classiques des modèles hydrogéologiques ne seront pas exploités. Il faudra alors réduire au maximum les sorties des modèles hydrogéologiques afin de limiter les pertes de temps calcul liées à ces écritures inutiles sur disque.

3.4. Adaptation des codes pour leur insertion dans AQUI-FR

L'implémentation d'un modèle hydrogéologique dans la structure Open-PALM AQUI-FR nécessite quelques modifications. Pour l'instant, seul deux codes sont portés dans la structure. Afin de se rendre compte du travail nécessaire à l'implémentation d'un nouveau modèle hydrogéologique, les cinq modifications nécessaires sont répertoriées ci-dessous, en se basant sur les modifications effectuées dans Eau-dyssée (les détails sont données en annexe) :

1. Création d'une clé de pré-compilation « PALM_AQUIFR » permettant d'introduire des modifications propre à la structure AQUI-FR transparente pour les autres formes d'utilisations (pour utiliser cette option, il faut compiler le code avec l'option `-D PALM_AQUIFR` et renommer les fichiers `.f90` en `.F90` pour activer la précompilation).
2. Changement du programme principal en subroutine
3. Insertion au début du code d'un appel à la subroutine `CHANGE_DIRECTORY` qui permet de déplacer l'application du code dans le répertoire correspondant (contenant donc les liens vers l'application hydrogéologique ciblée). Les informations sur les répertoires de simulation sont inclus dans le fichier « `working_directory_eaudyssee` ». Comme Eau-dyssée tourne en parallèle sur plusieurs applications, c'est le rang MPI du processus qui détermine le répertoire de calcul.
4. Insertion des transferts via Palm des flux d'eau ruisselé et infiltré, avec la subroutine `bilhy_from_palm`.
5. Transfert des sorties vers la branche synchro. Cet échange est un peu particulier, car on collecte des vecteurs ayant pour dimension l'ensemble des mailles de toutes les applications en se basant sur les transferts individuels de chaque application hydrogéologique. Pour cela, chaque application hydrogéologique envoie via un `Palm_put` les vecteurs en sorties (opération menée dans la subroutine `end_bilhy_from_palm`). Ces vecteurs sont ensuite collectés par OpenPALM par la fonction de distribution qui est incluse dans l'application via la subroutine `distr_aquifer.f90` située dans le répertoire Palm. Cette subroutine collecte tout d'abord les données sur le nombre d'applications et la dimension de leurs vecteurs contenus dans le fichier `working_directory_eaudyssee` et construit le vecteur complet en identifiant l'application hydrogéologique connectée en fonction du rang du processus.

3.5. Implémentation de nouvelles applications hydrogéologiques dans AQUI-FR

La structure OpenPALM d'AQUI-FR permet d'intégrer très facilement de nouvelles applications hydrogéologiques dès lors que le modèle hydrogéologique est déjà inclus.

De fait, seules trois étapes sont nécessaires pour intégrer une nouvelle application dans la simulation :

- Créer un répertoire contenant les données de cette application hydrogéologique dans le répertoire `rundir` (cf Figure 5)
- Modifier les constantes dans l'application `Prepalm` (`aquifr.ppl`) : le nombre d'applications par modèle (ie, `nb_appli_odic` ou `nb_appli_marthe`), et le nombre total de maille aquifère (`nbsou_global`)
- Compléter le fichier `working_directory` contenant les informations sur les applications (dans le répertoire Palm)

Cependant, l'intégration d'une nouvelle application nécessite également de modifier le post-traitement. Actuellement, le post-traitement est encore limité. Les développements réalisés sont décrits ci-dessous.

3.6. Post-traitement

Un embryon de post-traitement a été développé par Jean-Pierre Vergnes. A ce stade, il s'agit de tracer des cartes de charge piézométriques et d'échange nappe-rivière à un temps donné ou en « anomalie » par rapport à une moyenne de référence. Il est important que le post-traitement soit assez souple pour intégrer facilement de nouvelles applications, ou pour pouvoir inclure des modifications des applications incluses. De plus, il est nécessaire que ce post-traitement puisse-être partagé par les membres du projet, ce qui limite l'utilisation de logiciel payant.

La structure choisie s'appuie sur le langage python et sur une petite base de données sql servant à gérer les couches aquifères simulées.

Bien que le post-traitement soit encore embryonnaire, son développement a permis de soulever des questions importantes sur les objets à représenter. En effet, lorsque l'on travaille sur une application, l'ordre des couches, de la plus profonde à la couche superficielle, suffit à situer les couches. Mais lorsqu'on veut tracer les résultats de plusieurs applications, l'ordre des couches n'est pas le même : ainsi la craie est affleurante sur la Basse Normandie et la Somme, mais est en partie captive sur la Loire et la Seine (située en 2^{ème} et 6^{ème} position respectivement, cf Figure 6)

Période	Époque	Seine	Somme	Loire	Basse Normandie	Poitou Charente Quaternaire
Quaternaire						
Néogène	Pliocène					
	Miocène	Beauce		Beauce		
Paléogène	Oligocène	Brie				
	Eocène	Champigny				
		Lutétien				
		Thanétien				
Paléocène						
Crétacé	Supérieur	Craie	Craie	Craie	Craie	
	Inférieur			Cénomanién		
Jurassique	Supérieur				Bathonien	
	Moyen				Bajocien	Dogger
	Inférieur					
Socle						Toarcién Infra-toarcién Socle

Figure 6 : Couches aquifères simulées pour les cinq applications intégrées dans Aqwi-FR et périodes géologiques correspondantes.

Ainsi, une première solution a été de se baser sur les périodes géologiques. La base de données sql aquifrbd.sql est donc conçue pour rassembler les caractéristiques géologiques, les noms des couches, l'application dont elle est issue, et le chemin vers leur maillage.

Cela permet de sélectionner les couches à tracer pour les graphiques par âge géologique, ou bien, de tracer les zones affleurantes. De plus l'utilisation pour chaque couche de chaque application de maillages complètement indépendants permet de gérer très facilement des modifications des couches existantes ou l'inclusion de nouvelles couches aquifères. Le choix a été fait de se baser sur des fichiers de forme (shapefiles) couramment utilisés par les SIG. Cependant, l'utilisation d'un SIG n'est pas nécessaire, car le langage python est capable de gérer ces shapefiles.

Si les shapefiles ne sont pas disponibles pour l'application, il est possible d'en créer un à partir des coordonnées des mailles. Ainsi, le code python shapefile_marthe.py a été développé pour créer un shapefile à partir des fichiers maillages de Marthe.

Une petite librairie python (aquilib.py) a été créée afin de rassembler des instructions python permettant la lecture de la base de données sql et des résultats des applications Marthe et Modcou selon leurs formats habituels. En effet, à ce stade, le post-traitement ne traite pas directement les vecteurs globaux qui sont récupérés par la branche Synchro (le fichier sortie_test.bin), mais, uniquement les fichiers de sortie classiques des deux modèles hydrogéologiques.

In fine, plusieurs petits programmes python ont été créés afin de tracer les charges piézométriques, les anomalies mensuelles par rapport à la moyenne de référence, les échanges nappes-rivières, ou l'évolution temporelle sur un domaine donné. La Figure 7 présente un extrait des figures issues de ces programmes.

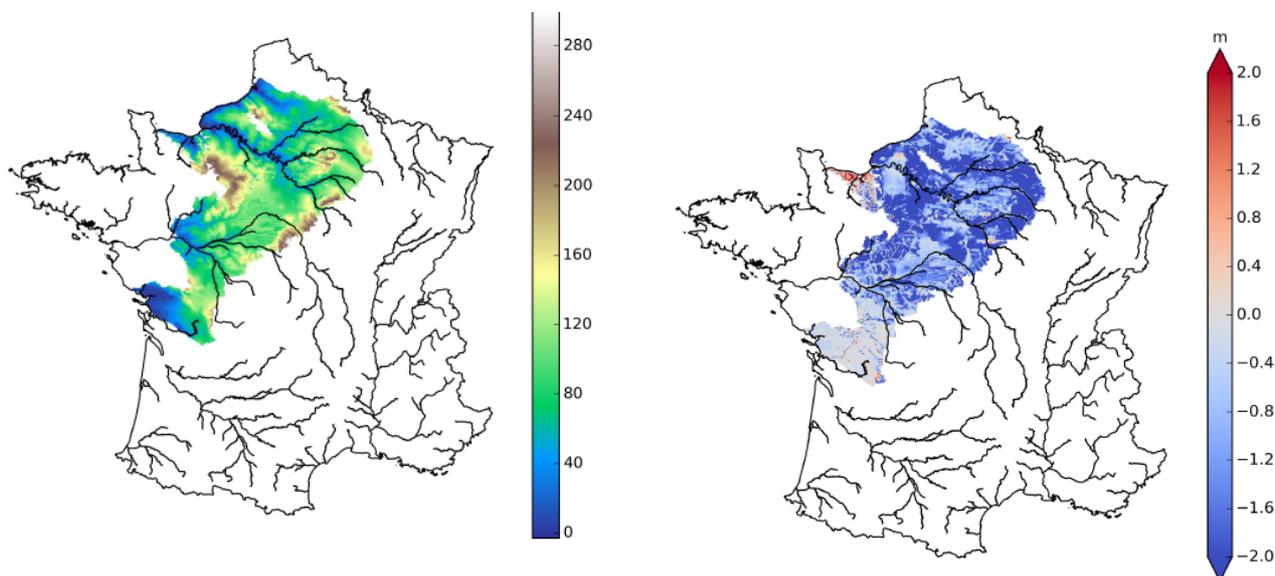


Figure 7 Illustrations de la charge piézométrique moyenne annuelle sur les couches aquifères affleurantes (à gauche) et de l'évolution de la charge par rapport à cette moyenne au moins d'Octobre (à droite).

A ce stade, le post-traitement a été développé pour illustrer les résultats via des cartes. Cependant, afin de progresser sur ce point, il est proposé de travailler sur le référentiel BD LISA pour affiner la segmentation par couche aquifère. A cette fin, une formation est en cours de programmation par le BRGM d'ici Juillet 2015.

De plus, les programmes développés s'appuient pour l'instant sur les fichiers de sortie de chaque modèle hydrogéologique. Il faudra adapter ce post-traitement pour traiter directement les sorties d'Aqui-FR qui rassemblent dans un même fichier (sortie_test.bin) les informations sur l'ensemble des couches aquifères.

Par ailleurs, il faut noter que le post-traitement développé jusqu'ici n'inclue pas de validation, ie, de comparaison avec des niveaux piézométriques observés. Même si chaque application hydrogéologique a été validée indépendamment, il sera nécessaire d'inclure des éléments de validation pour les résultats issus d'Aqui-FR.

3.7. Gestion du code

Les développements sur les modèles hydrogéologiques, la structure OpenPALM Aquis-FR, ou sur les applications hydrogéologiques se déroulant de façon simultanée, il a été jugé nécessaire d'utiliser un gestionnaire de version pour partager le code et gérer les développements. Ainsi, le gestionnaire de version Git a été choisi (<https://git-scm.com/>). Git permet de gérer facilement des

branches locales, facilitant ainsi la gestion de version d'une partie du code dans une équipe. Seuls les développements validés pourront intégrer le serveur et ainsi être partagés par tous.

Cela facilite à la fois les développements en parallèle et la mise à jour. Cependant, la branche principale, contenant la version de référence du code doit être gérée par une personne ressource bien identifiée, et si possible, non précaire afin d'assurer un suivi cohérent sur la durée.

Les modalités d'utilisation de Git sont précisées en annexe, ainsi que les modalités d'installation de l'application Aquif-FR à partir du clone issu de Git.

Le partage de l'application Aquif-FR aux membres du projet implique donc le partage des codes qui pour certains sont des codes propriétaires. L'accès au serveur Git implique donc le respect des droits d'usage. Or, le projet Aquif-FR étant géré par différentes conventions, l'ensemble des partenaires ne sont pas pour l'instant signataire d'une même convention. C'est pourquoi l'aboutissement de l'accord de consortium éclaircira cet aspect d'un point de vue juridique (cf section 6).

4. Développements

4.1. Aquifères de socle

On souhaite intégrer dans la structure Aquif-FR la modélisation des aquifères de socles car ceux-ci couvrent une importante partie du territoire français (Lachassagne et Wyns, 2006), principalement dans les anciens massifs : le Massif Armoricain, le Massif Central, les Vosges et les Ardennes. Ils sont également présents dans les chaînes de montagne récentes (Pyrénées, Alpes et Corse).

Les aquifères de socles se développent sur des roches cristallines. Ils sont décrits comme des aquifères multicouches (Figure 8) composés d'une couche d'altérites qui repose sur une couche de roche fracturée, suivi d'un substratum formé par une roche cristalline intacte. Les deux principales couches de ces aquifères, les altérites et la zone fissurée, ont des comportements hydrodynamiques différents. En effet, la couche d'altérites est décrite comme une zone d'emménagement de la ressource alors que la couche fracturée est décrite comme une zone conductrice. Des ressources en eau plus profondes peuvent également exister dans des zones de failles. La localisation et la productivité de ces zones de faille sont difficiles à connaître a priori, elles sont également plus rares car elles résultent de la conjonction de plusieurs paramètres (réseau de faille, structure subhorizontale, etc.).

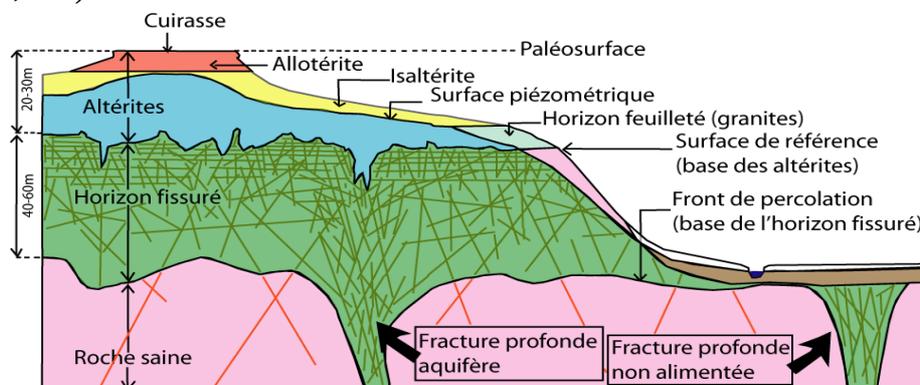


Figure 8 : Modèle conceptuel du fonctionnement des aquifères de socles (Wynns et al., 2005)

Les altérites recouvrent les roches cristallines, leur étendue géographique est donc importante. Malgré une importante vulnérabilité de ces aquifères due à leur faible profondeur, ils sont très utilisés du fait de leur étendue géographique.

La ressource en eau disponible dans les altérites dépend de l'épaisseur de ces derniers. Cette épaisseur est très variable et dépend des conditions d'altération (climatiques), de l'altérabilité de la roche et de l'histoire géologique. Les conditions climatiques, par les précipitations et la température, entraînent une hydrolyse des minéraux, entraînant l'altération de la roche. La nature de la roche ou son altérabilité dépend de sa composition minéralogique associée à la résistance des minéraux à l'hydrolyse, ainsi que des paramètres hydrodynamiques tels que la diffusivité et la perméabilité. Il existe deux approches qui permettent d'estimer l'épaisseur des altérites à partir de ces différentes variables. Dans l'approche top-down, l'altération est contrôlée par les conditions climatiques ainsi que par la composition minéralogique de la roche et de sa perméabilité. Dans cette approche, l'altération commence à la surface de la roche saine, par entrée de l'eau météorique dans les pores de la roche saine et se propage en profondeur. L'épaisseur des altérites est estimée à partir de bilan de masse entre l'altération et l'érosion (Anderson et al., 2002 ; Brantley and White, 2009). La seconde approche (Figure 10), bottom-up, part du principe que l'altération ne peut commencer que lorsque l'eau météorique peut entrer dans les pores de la roche saine laissés libres suite au drainage de l'eau juvénile due à l'incision des rivières. L'épaisseur d'altération est donc principalement contrôlée par l'incision des rivières et la diffusivité de la roche (Rempe et Dietrich, 2014). L'histoire géologique joue également un rôle non négligeable dans l'épaisseur des altérites. En effet, par exemple en Bretagne, des épaisseurs importantes d'altérites (cinquantaines de mètres) se seraient développées pendant le Crétacé et le Miocène. Du fait d'un affaissement du Massif Armoricain et d'une montée du niveau de la mer, ces niveaux d'altération ont été décapés.

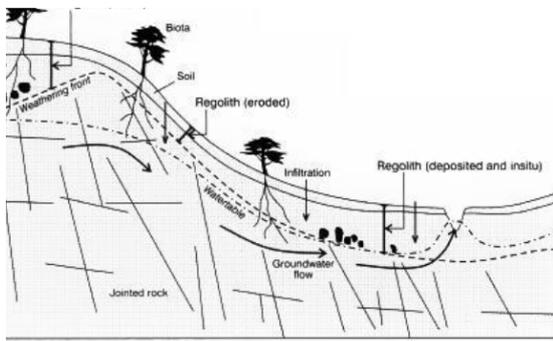


Figure 9 : Approche top-down de l'altération

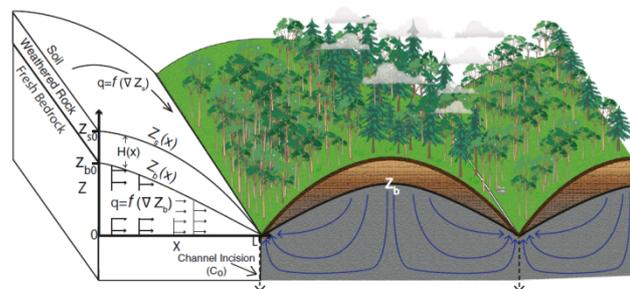


Figure 10: Approche bottom-up de l'altération (d'après Rempe et Dietrich, 2014)

En plus de l'épaisseur des altérites, le type d'altérites est également important dans l'estimation de la ressource. En effet, il existe deux types d'altérites, les allotérites et les isaltérites. Les premières sont issues d'un processus d'altération poussé ne permettant plus de reconnaître la composition initiale de la roche saine et aboutissant à la formation de minéraux argileux. Les isaltérites ont subi une altération moins poussée, entraînant la disparition des minéraux les plus fragiles tout en gardant certaines caractéristiques de la roche mère. Les caractéristiques hydrodynamiques de ces deux types d'altérites sont donc différentes, les allotérites ayant une porosité efficace plus faible (présence de

minéraux argileux) alors que les isaltérites présentent une porosité efficace plus importante que la roche mère (Figure 11). Les allotérites sont souvent décrites comme recouvrant les isaltérites (Figure 8 et Figure 11). La porosité efficace de l'ensemble de la couche altérites est estimée entre 10 et 30%, leur conférant une grande capacité de stockage.

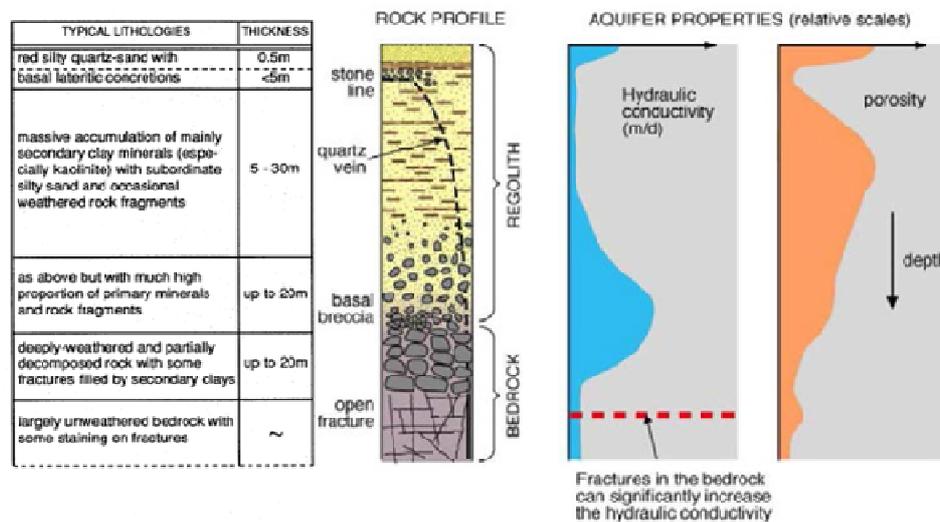


Figure 11 : Propriétés hydrodynamiques d'un profil d'altération en Afrique (d'après Chilton and Foster, 1995)

La faible profondeur de ce milieu poreux que sont les altérites, confère à ces aquifères un comportement hydrodynamique hybride entre un écoulement de surface et un écoulement souterrain. La topographie contrôle très fortement les écoulements dans les altérites, qui miment donc l'organisation des écoulements de surface. De plus, comme mentionné précédemment les altérites sont des milieux poreux avec une forte capacité de stockage et de transfert, les temps de transfert rencontrés dans les altérites seraient de l'ordre du mois ou de l'année, type de nappe souterraine. Ces temps de transfert sont beaucoup plus lents que les temps de transfert des systèmes de surface.

La compréhension de leur comportement hydrodynamique est cruciale d'une part pour leur rôle majeur dans les inondations lié à leur contact direct avec les systèmes de surface, d'autre part, via leur rôle également majeur dans le transport de contaminants du fait de leur grande vulnérabilité issue de leur faible profondeur. De plus, c'est la première nappe rencontrée dans les systèmes cristallins et donc directement en connexion avec les flux atmosphériques.

Contrairement aux grands aquifères sédimentaires, les aquifères d'altérites sont très segmentés, même si présents sur une large proportion du territoire breton. Afin de prendre en compte ces différents aquifères, il faut donc développer un modèle par bassin versant, soit 35 modèles pour la Bretagne. Dans le cadre du projet Aquif-FR, un premier bassin, le bassin de la Laïta, a été modélisé en 3D à Géosciences Rennes (Refloch, 2014). Un deuxième modèle est depuis développé sur la zone atelier de Pleine Fougère (Klobe, com. Pers.). Ces modèles 3D requièrent une discrétisation importante afin de représenter au mieux la topographie et les hétérogénéités des altérites, ils permettent d'atteindre une complexité importante dans la représentation des systèmes aquifères. En revanche, ils demandent un temps de calcul long non compatible avec une intégration de ces modèles dans la plateforme Aquif-FR. Il est donc proposé de développer dans la suite du projet

Aqui-FR des modèles mécanistiques simplifiés du fonctionnement hydrodynamique des aquifères d'altérites. Des modèles 2D ou 1D semblent être pertinents pour représenter ces aquifères. En effet ils permettent de prendre en compte une certaine complexité du système, de prendre en compte les effets transitoires tout en ayant un temps de calcul raisonnable.

Les deux modèles 3D disponibles permettront la validation des hypothèses faites lors des modélisations 2D et 1D. L'utilisation de deux bassins versants pour la validation permet de s'assurer que les hypothèses de travail sont valables pour différents types d'aquifères d'altérites et non pas spécifique au comportement d'un aquifère. Les deux bassins versants modélisés en 3D sont des aquifères très différents. D'un point de vue géologique, le bassin versant de la Laïta est principalement composé de granites et de gneiss. La topographie sur ce bassin versant est assez prononcée avec un maximum à 302 m et un minimum à 3m (Figure 12a). L'autre site, la zone atelier de Pleine Fougères, est composé de deux plateaux séparés par un seuil topographique. Ces deux plateaux se sont développés sur des roches cristallines différentes, granite au nord et schiste au sud (Figure 12b).

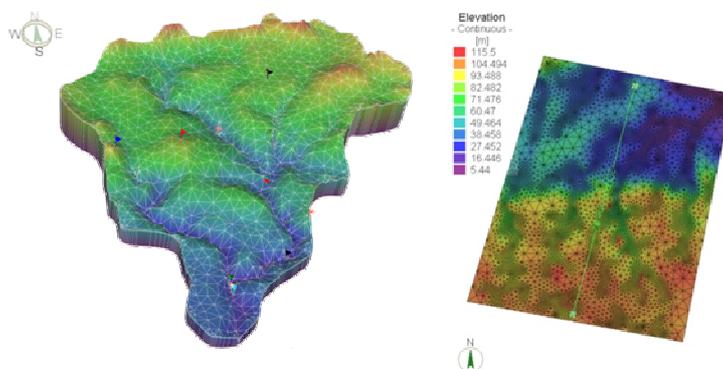


Figure 12: Modèles 3D disponibles pour la modélisation des aquifères de socles a) bassin versant de la Laïta (Refloch, 2014) b) bassin versant de la zone atelier (Klobe, com. Pers.).

L'approche 2D.

L'objectif de ces modèles est de représenter le comportement 3D des aquifères de socles par des modèles en 2D. Cette approche nécessitera d'intégrer les paramètres hydrodynamiques sur l'épaisseur de l'aquifère, ce qui conduit notamment à travailler en transmissivité. Plusieurs aspects seront tout particulièrement analysés, à savoir la variation de la transmissivité dans le temps et dans l'espace ainsi que la rugosité de la roche mère qui pourrait avoir un impact très important sur la connexion hydrodynamique de sous-bassins versant.

L'intégration sur l'épaisseur nécessite de faire des hypothèses sur l'organisation des altérites. Il est donc proposé dans un premier temps de tester des hypothèses d'organisation des altérites et d'évaluer la sensibilité de l'intégration par rapport à ces différents scénarii (Figure 13).

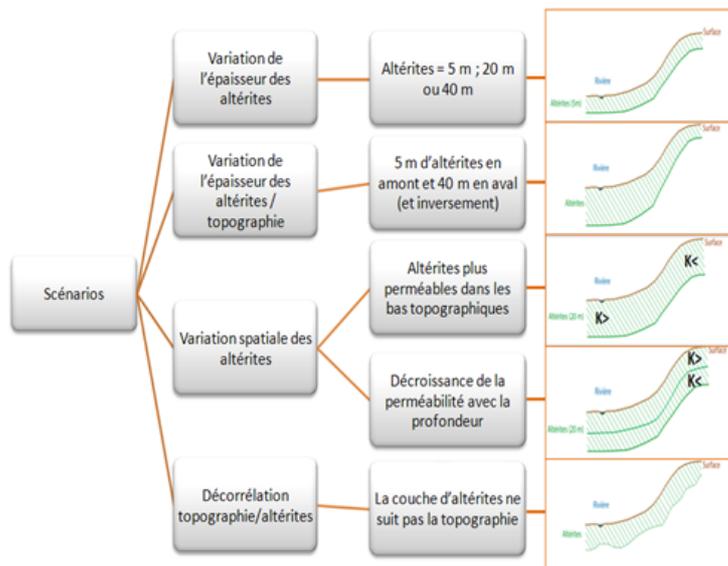


Figure 13: Exemples de scénarii testés dans l'analyse de sensibilité pour le passage 3D au 2D (Refloch, 2014)

Les propriétés 2D nécessaires pour la modélisation sont la géologie, les précipitations, la topographie ainsi que l'épaisseur des altérites. Cette dernière est très variable sur un bassin versant et n'est donc pas connue en tous points. L'approche bottom-up présentée précédemment sera utilisée pour estimer l'épaisseur des altérites. Une fois les modèles développés ils seront calibrés à partir des chroniques de débit, des chroniques piézométriques et du développement du système hydrographique.

Ces modèles nécessiteront un maillage assez fin afin de représenter la topographie le plus finement possible. Le passage en 2D permettra donc d'avoir un bon compromis entre un temps de calcul inférieur à celui des modélisations 3D et un maillage optimal adapté à la topographie.

L'approche 1D.

L'approche 1D repose sur l'idée que l'épaisseur des altérites étant faible, l'organisation des lignes de flux se développe très peu latéralement, l'écoulement s'organiserait principalement en tubes d'écoulement. Dans cette approche il s'agirait d'intégrer les flux transversalement sur une ligne de plus grande pente. Le bassin versant modélisé serait donc représenté par un ensemble de tubes d'écoulement qui se développeraient le long des lignes de plus fortes pentes. Dans cette approche une logique hydrologique serait donc menée en prenant en compte la capacité de stockage et les vitesses de transport des altérites.

4.2. Adaptation du code de calcul Marthe pour intégration dans Aquif-FR

Le code de calcul Marthe a été adapté avant son implémentation dans la structure Open-Palm d'Aquif-FR : Dans un premier temps une version de Marthe avec uniquement les calculs d'hydrodynamique, de bilans hydroclimatiques et de rivières. (sans fonctionnalités de transport, salinité, thermique, zone non saturée) a été produite de façon à avoir un code plus petit adapté au problème posé. Dans cette version de Marthe les actions suivantes ont été réalisées :

- Mise du code de calcul sous environnement Linux.
- Adaptations pour supprimer tout conversationnel avec récupération automatique du nom du fichier projet par un fichier de configuration dans le dossier du projet.
- Mise au point de routines spécialisées pour récupérer des tableaux de données de ruissellement et drainage externes : sur fichiers (pour tests) ou bien de fichiers Safran (Pluie Safran, ETP Safran, Température Safran). Les valeurs récupérées peuvent être en « simple précision » ou bien en « double précision » pour s'adapter à tous les cas possibles.
- Introduction de directives openPALM dans ces routines de récupération de données externes, en remplacement des lectures sur fichiers.
- Réalisation d'un « arbre de couplage » openPALM pour intégrer : un programme principal de quelques lignes, le code de calcul MARTHE, les routines d'échange (en fait de récupération des données hydroclimatiques, l'envoi d'un message de synchronisation à chaque pas de temps

Concernant les applications développées avec Marthe (Somme et Poitou Charentes), l'intégration dans AQUI-FR du modèle de la Somme au pas de temps journalier est totalement achevée depuis Avril 2015, avec des sorties des niveaux de la nappe simulés dans toutes les mailles à tous les pas de temps ou tous les mois. Pour la version 2007 de l'application Poitou Charentes, les adaptations suivantes ont été faites, pour la rendre compatible avec les objectifs d'AQUI-FR, avec i) le passage au pas de temps journalier, ii) l'intégration du maillage Safran dans le modèle, la lecture des données SURFEX de ruissellement et drainage et enfin la vérification des calculs sur la même période que celle de test de SURFEX.

Le modèle du Poitou est prêt pour être branché dans la structure AQUI-FR. Cependant nous attendons de l'UMR METIS la nouvelle version de la plateforme avec l'architecture d'intégration simplifiée, en parallèle, de tous les modèles relatifs à un même code de calcul.

D'un autre côté, après la formation et la prise en main de l'outil OpenPALM et de l'application AQUIFR réalisée pour Eau-dyssée les actions suivantes ont été réalisées par le BRGM:

- Extension de l'application AQUI-FR pour intégrer le code Marthe
- Mise à jour des bibliothèques de Marthe pour obtenir une version Palmée
- Création de l'unité Marthe dans la structure AQUI-FR et de sa « carte d'identité »
- Modifications des routines derrière les branches nommées SURFEX et SYNCHRO pour intégrer les échanges avec Marthe
- Ajout d'un Palm-Put dans la routine read_bilan_hydrique pour que le code puisse récupérer le pas de temps et ainsi pouvoir choisir de ne simuler qu'une partie proprement,
- Vérification des échanges entre les branches et validation de l'application sur le modèle de

4.3. Les aquifères karstiques

Les formations carbonatées plus ou moins karstifiées occupent 35% de la superficie de la France et satisfont plus de 30% des besoins en eau potable et une quantité non négligeable de besoins en eau pour l'agriculture (Bakalowicz, 2006). A ce titre, il est nécessaire de les inclure dans la plateforme de modélisation hydrogéologique construite dans le cadre du projet Aqui-FR sur la France.

La karstification est un processus d'altération et de dissolution des roches carbonatées, résultant de l'écoulement de l'eau chargée, lors de son infiltration, en CO₂ produit par l'activité biologique dans les sols. Ce processus transforme la fracturation des roches carbonatées en un réseau d'écoulement préférentiel (allant jusqu'à former un réseau de galeries visitées par les spéléologues) et qui émerge au niveau de sources pouvant atteindre des débits considérables (exemple de la Fontaine de Vaucluse dont le module dépasse les 20m³/s).

Le processus de karstification confère donc aux aquifères carbonatés une grande hétérogénéité en termes de propriétés hydrauliques (leur perméabilité peut en effet varier entre 10⁻⁷ et 10⁻¹ m/s, suivant que l'on se situe dans la matrice carbonatée ou dans un drain karstique). La complexité des mécanismes en jeu dans le processus de karstification rend la variabilité spatiale de cette hétérogénéité de perméabilité difficile à décrire. Ainsi par exemple, il est classiquement considéré que les fluctuations des niveaux piézométriques que l'on mesure en un ou plusieurs points d'un système karstique, sont rarement représentatives de la dynamique globale des écoulements. Le caractère intégrateur des débits observés au niveau des sources qui les drainent est généralement préféré pour décrire leur dynamique et leur comportement (Bakalowicz, 2006).

Par conséquent, la modélisation du comportement des systèmes karstiques à l'aide de codes de calcul hydrodynamique distribué n'est pas toujours possible (Le Moine et al., 2008). Des approches conceptuelles sont donc privilégiées et mises en œuvre au travers d'outils de modélisation globale.

Un grand nombre des systèmes karstiques ont été étudiés sur le territoire français, mais tous ne sont pas pourvus de modèles permettant de décrire le comportement des sources qui les drainent ou de leurs fluctuations piézométriques. Le Brgm a mené des travaux de modélisation sur de nombreux aquifères karstiques en France, parmi lesquels certains pourraient rejoindre la plateforme Aqui-FR. Il s'agit des systèmes karstiques nord-Montpelliérains (Cent-Fonts et Fontanilles), du Lez à Montpellier, de la fontaine de Nîmes, du Bas-Agly dans les Corbières, du Tarn à Millau, de la Tardoire en Haute-Vienne, des Gillardes en Devoluy, de la Loue et du Lison dans le Jura et de la Fontaine de Vaucluse (Figure 14).

Les approches de modélisation utilisées pour décrire le fonctionnement de ces systèmes karstiques diffèrent selon les systèmes et peuvent mobiliser une ou plusieurs approches (Caballero et al., 2015): modèles conceptuels à réservoir (Fontanilles, Cent-Fonts, Lez, Fontaine de Nîmes, Tarn, Gillardes, Tardoire, Loue et Lison et Fontaine de Vaucluse, codés sous Matlab ou bien avec Gardenia) ou modèles mobilisant des fonctions de transfert (Tempo pour les Cent-Fonts, Lez, Bas-Agly).

Dans le cadre du projet Aquif-FR, les travaux se sont orientés sur deux niveaux : i) l'exploitation des données ISBA/Surfex pour forcer ces modèles karstiques et ii) l'implémentation ces modèles karstiques dans la structure OpenPALM.

Pour cette première étape, les travaux se sont focalisés sur trois aquifères karstiques (Tableau 1)

Ainsi, une des premières étapes a été de forcer les modèles karstiques par les flux estimés tout d'abord par ISBA (flux extrait de l'application SIM), et de tester différentes combinaisons possibles. En effet, pour un aquifère sédimentaire, on considère qu'une partie seulement des précipitations efficaces peut recharger la nappe, la partie infiltrée. Pour les aquifères karstiques, on peut supposer que les écoulements latéraux peuvent rapidement se réinfiltrer, et ainsi contribuer à la recharge de l'aquifère. Par ailleurs, il faut noter que les aquifères karstiques sont souvent de dimensions réduites, alors que les forçages Safran et les flux ISBA sont disponibles sur des mailles de 64 km². Différents tests ont été réalisés au cours de cette première année. Il ressort de ces tests que les meilleurs résultats sont généralement obtenus en imposant la pluie efficace estimée par ISBA aux modèles karstiques. Cependant, les flux restent sous-estimés de 10 à 20% (Tableau 1).

Cette première étude a permis d'identifier des sources d'améliorations : d'une part, la réserve utile d'ISBA est sans doute trop importante sur ces zones karstiques. D'autre part, la vitesse de drainage est sans doute trop faible. Il serait possible d'améliorer la paramétrisation du schéma de surface à condition de savoir délimiter les zones karstiques avec des paramètres pertinents (critères géologiques, IDPR...). Cependant, avant d'aller plus loin, cette étude doit être complétée en utilisant non plus les flux d'ISBA issus de SIM, mais, ceux estimés par la nouvelle version incluse dans Surfex. En effet, les schémas de sol sont relativement différents (concept force-restore à 3 couches pour ISBA, modèle diffusif multi-couche dans Surfex). Ce travail a débuté mais n'est pas encore terminé. Néanmoins, on espère que les travaux menés sur les aquifères karstiques permettent une amélioration des flux de surface sur des échelles dépassant les bassins d'étude.

Tableau 1)

Exploitation des sorties ISBA/Surfex pour contraindre les modèles de karsts

Un des objectifs du projet Aquif-FR est de posséder un référentiel commun sur la France, afin de favoriser les comparaisons notamment dans le cadre des projections climatiques. Pour cela, l'exploitation des flux de surface du schéma de surface Surfex (ex ISBA) est une étape importante. Cette étape est cependant particulièrement ambitieuse pour les aquifères karstiques, marquée par des spécificités géologiques, des biomes, et des échelles spatiales souvent réduites qui n'ont pas permis d'inclure ces spécificités dans la modélisation des transferts d'eau et d'énergie fournie par ISBA. Ainsi, les travaux de Plagnes et al, en 2007 avaient montré une sous-estimation des flux d'eau d'environ 20% sur des zones karstiques.

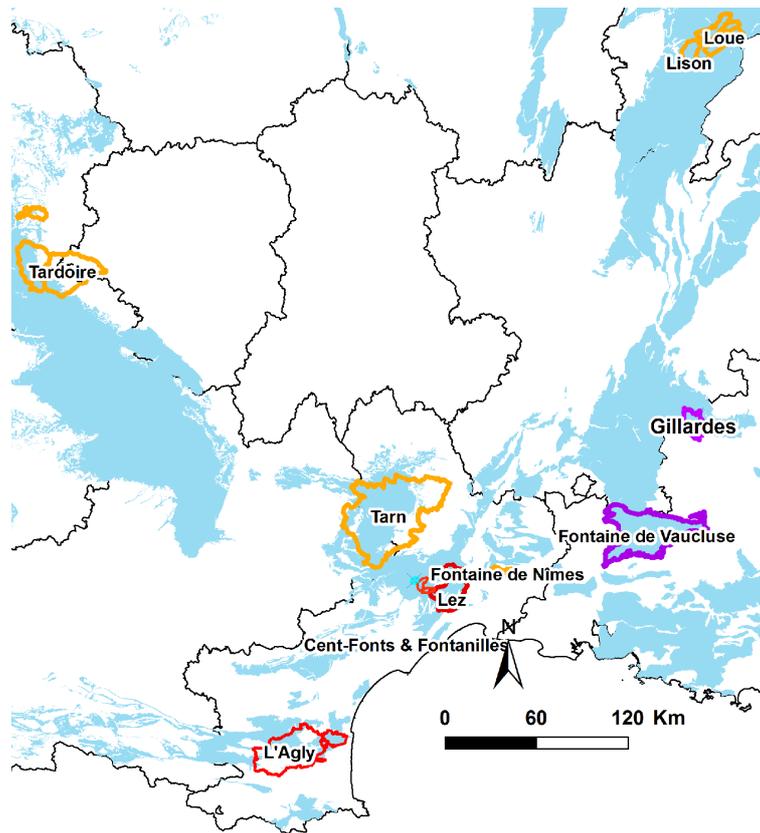


Figure 14 : Localisation des principaux systèmes karstiques pour lesquels des modèles opérationnels sont disponibles au Brgm. Les couleurs des contours indiquent le type de modèle utilisé (orange : modèle conceptuel réservoir, violet : modèle Gardenia et en rouge : modèle Tempo). En bleu clair apparaît la surcouche Karst du référentiel BDLISA Version 1 – en cours de finalisation, A. Brugeron (2015), comm. pers.

Ainsi, une des premières étapes a été de forcer les modèles karstiques par les flux estimés tout d'abord par ISBA (flux extrait de l'application SIM), et de tester différentes combinaisons possibles. En effet, pour un aquifère sédimentaire, on considère qu'une partie seulement des précipitations efficaces peut recharger la nappe, la partie infiltrée. Pour les aquifères karstiques, on peut supposer que les écoulements latéraux peuvent rapidement se réinfiltrer, et ainsi contribuer à la recharge de l'aquifère. Par ailleurs, il faut noter que les aquifères karstiques sont souvent de dimensions réduites, alors que les forçages Safran et les flux ISBA sont disponibles sur des mailles de 64 km². Différents tests ont été réalisés au cours de cette première année. Il ressort de ces tests que les meilleurs résultats sont généralement obtenus en imposant la pluie efficace estimée par ISBA aux modèles karstiques. Cependant, les flux restent sous-estimés de 10 à 20% (Tableau 1). Cette première étude a permis d'identifier des sources d'améliorations : d'une part, la réserve utile d'ISBA est sans doute trop importante sur ces zones karstiques. D'autre part, la vitesse de drainage est sans doute trop faible. Il serait possible d'améliorer la paramétrisation du schéma de surface à condition de savoir délimiter les zones karstiques avec des paramètres pertinents (critères géologiques, IDPR...). Cependant, avant d'aller plus loin, cette étude doit être complétée en utilisant non plus les flux d'ISBA issus de SIM, mais, ceux estimés par la nouvelle version incluse

dans Surfex. En effet, les schémas de sol sont relativement différents (concept force-restore à 3 couches pour ISBA, modèle diffusif multi-couche dans Surfex). Ce travail a débuté mais n'est pas encore terminé. Néanmoins, on espère que les travaux menés sur les aquifères karstiques permettent une amélioration des flux de surface sur des échelles dépassant les bassins d'étude.

Tableau 1 Eléments sur la modélisation karstique RU= Réserve Utile. Peff= Précipitation efficace.

Variables\Bassins	Fontanilles	Lez	Lison
Surface de l'impluvium	18 km ²	105 km ²	138 km ²
Modèle	Karsteau	Tempo	KdM
Références	Lanini et Maréchal, 2004	Maréchal et al., 2014 Pinault, 2001	Charlier et al., 2014 Fleury et al. 2007
RU (mm)	35	48	30
Ratio Peff Isba/Peff Ori	82%	89%	?

Intégration des modèles karstiques dans la structure openPALM d'Aqui-FR

Les aquifères karstiques sont représentés à l'aide de différents modèles plus ou moins complexes. Ces différents modèles (ou codes numériques) sont la plupart du temps adaptés à des plateformes windows, et sont écrits dans des langages différents (par exemple, Matlab). Il est nécessaire de transposer ces codes sur linux. Bien qu'il existe des supports linux relativement similaire à Matlab, il n'a pas été possible de transférer le code de Tempo ni de Karsteau dans OpenPALM. Ainsi, il va être nécessaire de recoder a minima une partie des modèles. Pour que cet effort de reprogrammation soit bénéfique et pérenne, avec une compatibilité Linux/Windows, un travail préalable d'état des lieux et de perspectives numériques doit être réalisé. Ce travail sera mené dans la deuxième année du projet.

4.4. Assimilation

Au vu des temps de réponse des aquifères, la prévision de l'évolution des ressources en eaux souterraines ne sera fiable que si l'état initial des aquifères est bien prescrit. L'état initial des aquifères sera principalement issu des simulations en temps réel. Or, ce suivi temps réel peut être faussé du fait *i*) d'une méconnaissance des conditions météorologiques des derniers jours. En effet, la connaissance de ces conditions (en particulier les précipitations) peut être améliorée en utilisant des données disponibles avec un retard de l'ordre d'un mois; *ii*) d'une méconnaissance des prélèvements en temps réel ; puisqu'aucune information en temps réel n'est disponible sur les prélèvements ; *iii*) des biais des applications hydrogéologiques. Afin de corriger l'état initial des aquifères, il est nécessaire de développer une méthode d'assimilation. Dans le cadre du projet AQUI-FR, cette action est menée au Lhyges, qui a intégré des méthodes d'inversion de paramètres (Majdalani et Ackerer, 2011).

L'objectif est de proposer une méthode permettant d'évaluer des conditions initiales les plus proches possibles des observations. La méthode employée dans le cadre de ce projet consiste à utiliser les mêmes procédures que celles qui ont permis l'estimation des paramètres tels que la

conductivité hydraulique et la porosité ou l'emmagasinement.

Dans un premier temps, le modèle hydrogéologique est calé par approche inverse sur une période d'observation assez longue pour être représentative des principaux régimes hydro-climatiques et des principaux états hydrogéologiques de la nappe. Après cette phase de calage, nous considérons que les paramètres représentant l'aquifère constituent une image possible des propriétés hydrodynamiques et ne seront plus modifiés.

L'estimation des conditions initiales sera donc conduite en supposant l'ensemble des autres paramètres comme connus. A ce stade, nous considérons aussi que les conditions aux limites sont connues à l'instant initial. Compte tenu du nombre important de variables à estimer, l'approche retenue consiste à établir l'équation adjointe et de minimiser les écarts quadratiques entre variables observées et modélisées (fonction objectif).

Le modèle mathématique utilisé est le modèle hydrogéologique classique qui repose sur la loi de Darcy (équation écrite ici pour une nappe captive en deux dimensions):

$$S \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{T} \nabla h = f$$

où h est la charge piézométrique, S le coefficient d'emmagasinement, T la transmissivité et f le terme puits/source (pompage, recharge, ...). Les conditions aux limites sont de type Dirichlet (charge imposée) ou Neuman (flux imposé).

Le modèle mathématique est discrétisé par une méthode numérique. La discrétisation mène à un système d'équation de la forme :

$$\mathbf{A} \mathbf{h}^{n+1} = \mathbf{b} (h^n)$$

La fonction objectif représentant les écarts quadratiques entre la hauteur piézométrique mesurée $\hat{\mathbf{h}}$ et la hauteur piézométrique calculée \mathbf{h} est de la forme :

$$J(\theta) = (\hat{\mathbf{h}}^0 - \mathbf{h}^0)^T \mathbf{W} (\hat{\mathbf{h}}^0 - \mathbf{h}^0) + \sum_k (\hat{\mathbf{h}}^k - \mathbf{h}^k)^T \mathbf{W} (\hat{\mathbf{h}}^k - \mathbf{h}^k)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{V}_h^{-1}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \alpha_n \end{pmatrix}$$

avec k le temps, \mathbf{h}^0 les conditions initiales et α_i l'erreur de mesure.

La méthode de l'état adjoint consiste à écrire une fonction qui dépend des paramètres (ici, les conditions initiales), et d'une variable appelée multiplicateur de Lagrange notée λ . Cette fonction est définie par :

$$L(h_0, \lambda) = J_0 + J_h + \sum_k \lambda^{k,T} \boldsymbol{\varphi}^k$$

Avec $\boldsymbol{\varphi}^{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{h}^{n+1} - \mathbf{b}(h^n)$ représentant la contrainte, c-à-d le lien entre la variable \mathbf{h} et la condition initiale \mathbf{h}^0 à travers le modèle hydrogéologique. On notera que si le modèle hydrogéologique est résolu lors d'une étape précédente, cette fonction est égale à la fonction objectif.

La dérivée de la fonction $L(h_0, \lambda)$ par rapport à une condition initiale est (après quelques manipulations mathématiques) :

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dh_e^0} = & \frac{d\mathbf{h}^n}{dh_e^0} \left[\mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}^n - \frac{\partial \mathbf{b}^{n,T}}{\partial \mathbf{h}^n} \boldsymbol{\lambda}^{n+1} - 2\mathbf{W}^T (\hat{\mathbf{h}}^n - \mathbf{h}^n) \right] \\ & + \sum_k \frac{d\boldsymbol{\varphi}^{k,T}}{dh_e^0} \boldsymbol{\lambda}^k + \sum_k \boldsymbol{\varphi}^{k,T} \frac{d\boldsymbol{\lambda}^k}{dh_e^0} - 2w_e (\hat{h}_e^0 - h_e^0) \end{aligned}$$

Le multiplicateur de Lagrange est alors défini comme étant solution du premier terme de l'équation précédente, soit :

$$\mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}^n = \frac{\partial \mathbf{b}^{n,T}}{\partial \mathbf{h}^n} \boldsymbol{\lambda}^{n+1} + 2\mathbf{W}^T (\hat{\mathbf{h}}^n - \mathbf{h}^n)$$

Après solution du modèle hydrogéologique, le gradient de la fonction $L(h_0, \lambda)$ est égal au gradient de la fonction objectif, soit :

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{dh_e^0} = & \sum_k \frac{d\boldsymbol{\varphi}^{k,T}}{dh_e^0} \boldsymbol{\lambda}^k - 2w_e (\hat{h}_e^0 - h_e^0) \\ = & -\frac{d\mathbf{b}^{0,T}}{dh_e^0} \boldsymbol{\lambda}^0 - 2w_e (\hat{h}_e^0 - h_e^0) \end{aligned}$$

Ce gradient est alors utilisé pour minimiser la fonction par une méthode de Quasi-Newton.

Cette première phase du projet nous a permis de bien établir le cadre théorique de la procédure utilisée. Son implémentation dans le code de calcul est en cours. Elle consiste essentiellement au calcul du gradient de la fonction objectif, le calcul du multiplicateur de Lagrange étant déjà implémenté pour le calage du modèle par approche inverse.

5. Perspectives de développement

5.1. Poursuite d'adaptation et développement des modèles BRGM

Marthe :

Les adaptations sur Marthe vont se poursuivent notamment l'amélioration de l'introduction des données de ruissellement et drainage dans le modèle suite aux premiers essais avec l'introduction :

- d'un temps de percolation vers la nappe
- d'un routage du ruissellement vers le réseau hydrographique avec fonction linéaire ou non linéaire.
- d'une option de globalisation : Ruissellement + Drainage, puis d'un partage par les paramètres de modélisation. Ceci permet d'obtenir de meilleures simulations de la Somme.

Par ailleurs, parmi les travaux à réaliser on notera :

- Transmission des résultats de calculs (niveaux de nappe, débits de rivière etc.) par directive openPALM (« Palm-Put »)
- récupération de la période de calcul
- Analyser comment prendre en compte de manière opérationnelle :
- Les données de prélèvements qui dépendent de la période de simulation
- Les données de débits amont entrant dans le modèle.
- Analyser les possibilités de « prévisions d'ensemble » c'est-à-dire de calculs automatiques de plusieurs scénarios de ruissellement et drainages

Modèle conceptuel de Karst (Tempo, Gardenia, ...)

Les modèles à réservoir de Karst (MODKA) développés sous Matlab Simulink sont incompatibles avec le coupleur Open Palm, leur intégration nécessite leur recodage avec un langage compatible avec Open Palm, ou bien le transfert des applications vers un modèle compatible moyennant des adaptations (par exemple Gardénia). Par ailleurs et pour les modèles de Karst développés avec le logiciel Tempo, l'interfaçage avec Open Palm nécessite un travail d'identification de certaines sous-routines Fortran, mais reste faisable.

5.2. Nouvelles applications régionales BRGM

En plus des applications Somme et Poitou-Charentes déjà comprise dans la structure Aquif-FR, trois autres applications régionales seront intégrées en 2015, il s'agit l'application de la craie du Nord Pas de Calais à 10 couches ((Buscarlet 2011), du modèle Nord Aquitain à 15 couches (Saltel et al., 2012) et du modèle de la plaine de Caen et du bassin de la Dives à 8 couches (Croiset 2013), leurs localisations sont portées sur la figure 14.

Selon leurs pertinences, d'autres applications pourraient rejoindre la structure Aqwi-FR par la suite, il s'agit des modèles développés dans les aquifères alluviales de l'Ariège, du Tarn et Garonne, et de l'Alsace 3 couches (Noyer 2006) et du modèle sud pyrénéen :6 couches aquifères (Seguin 2003). Les applications sur les bassins versant de l'Aisne et de la Serre développés par le BRGM pour la chambre d'agriculture de l'Aisne pourraient rejoindre la plateforme Aqwi-FR si cette dernière, propriétaire de ces applications, donne son accord. La localisation des applications BRGM est portée sur la Figure 15.

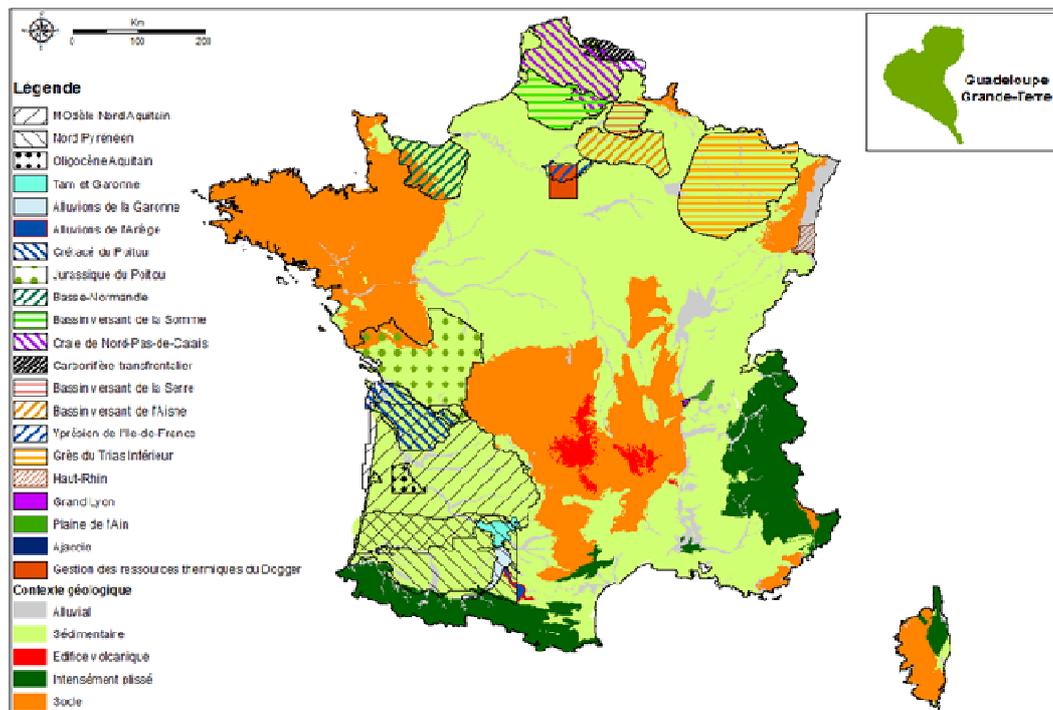


Figure 15 : Localisation et extension des applications régionales BRGM sur les bassins sédimentaires

Adaptations des applications aux objectifs d'Aqwi-FR

L'intégration des nouvelles applications régionales sédimentaires dans la structure Aqwi-FR nécessite leurs adaptations. En effet comme ces applications ont été développées pour des objectifs précis, leurs pas de temps de calcul diffèrent et ne sont pas adaptés aux objectifs d'Aqwi-FR. Ainsi l'application Poitou Charentes, développé pour la gestion de la ressource en eau, a un pas de temps de calcul de 1 mois alors que l'application Somme qui a été développée pour la prévision des crues de nappe a un pas de temps journalier. Par ailleurs ces applications n'utilisent pas les mêmes méthodes de calcul de bilan hydro climatique, certains utilisent le schéma conceptuel GARDENIA, d'autres des bilans basés sur une fonction de répartition ruissellement/infiltration basée sur l'IDPR. L'adaptation de ces nouvelles applications à la structure Aqwi-FR est nécessaire pour répondre aux objectifs du projet Aqwi-FR. Elle concerne principalement le pas de temps de calcul, la structure de certains fichiers d'entrée du modèle et le type de fichiers de sortie.

Par ailleurs, et afin d'améliorer les performances de l'application Aqwi-FR, la sensibilité des applications Marthe au forçage atmosphérique issu de SAFRAN (précipitations et ETP spécialisées)

et celui calculé par le schéma Surfex (infiltration/ruissellement) est en cours d'étude (stage M2) et concerne les applications actuellement intégrées dans la structure Aqui-FR, l'objectif est d'évaluer l'impact sur la qualité du calage de ces modèles, d'évaluer la performance des schémas de calcul de bilan utilisées selon différents contextes hydrogéologiques et de voir les possibilités d'amélioration des processus (cas d'utilisation du schéma Surfex) pour la prise en compte du temps de transfert dans la zone non saturée.

5.3. Nouvelles applications régionales Mines-Paristech

Intégration de nouveaux modèles mis en place sur le bassin de la Seine

Dans Eau-dyssée, la conceptualisation du modèle d'écoulement de surface, qui s'appuie sur la structure maillée de la couche de surface, est conditionnée par la représentation du réseau hydrographique et par le choix des conditions aux limites du système hydrogéologique.

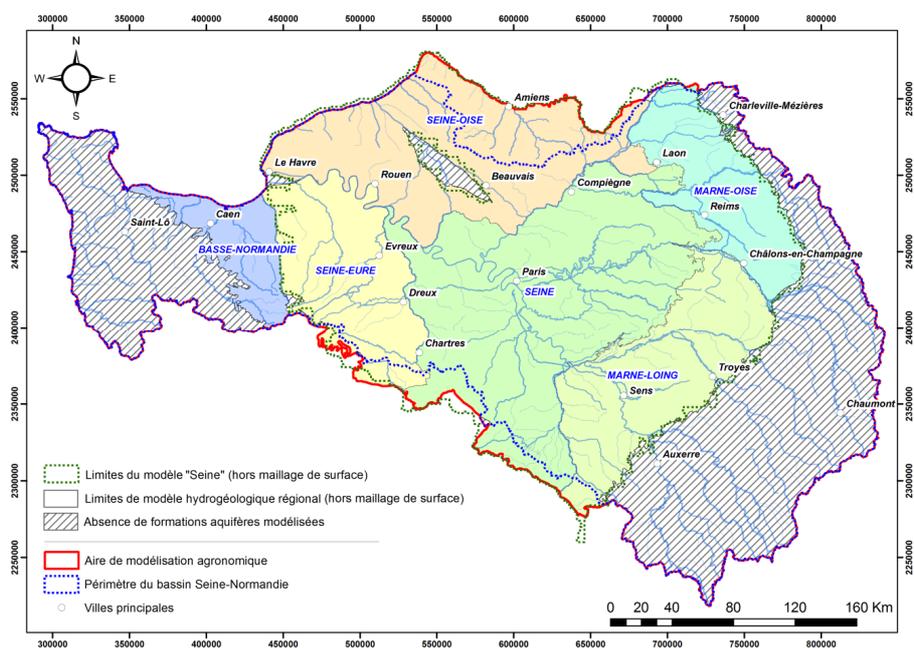


Figure 16 : Répartition géographique des 6 modèles régionaux mis en place sur le bassin Seine-Normandie

Dans le cadre d'études menées pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et pour la DRIEE Île de France (réalisation de l'état des lieux, SDAGE), un besoin de discrétisation assez fine (petites mailles d'une taille de 250 m) a imposé la création de quatre modèles (en plus du modèle « modèle Seine 6 couches » et du modèle « Basse-Normandie » d'ores et déjà implémentés dans Aqui-FR) permettant de simuler le comportement des grandes formations aquifères du bassin (formation de la Craie principalement et de ses formations sus-jacentes). La définition des limites de ces modèles s'appuie principalement sur (Viennot et Abasq, 2013):

- les limites d'extension de la formation du Crétacé supérieur,
- les limites hydrauliques naturelles constituées par les grandes rivières du bassin,
- les affleurements des grandes formations tertiaires : en effet, et particulièrement à l'est des formations tertiaires, les propriétés hydrodynamiques et notamment la perméabilité de la

Craie sous couverture deviennent très mauvaises, limitant ainsi très fortement les flux d'eau sous couverture,

- les lignes de crête piézométrique (ligne de « partage des eaux souterraines ») lorsque les limites hydrauliques naturelles sont trop éloignées.

Au final, l'ensemble du bassin Seine-Normandie se trouve désormais couvert par 6 modèles régionaux (cf. Figure 16) permettant la simulation des grandes formations aquifères. Leur surface va de 730 km² pour le moins étendu à plus de 23 000 km² pour le plus grand. Tous ces modèles ont été calibrés avec leur propre bilan hydrique sur l'ensemble des piézomètres disponibles sur le bassin et des débits mesurés aux stations hydrométriques. Ces applications ont servi à la quantification des échanges nappe-rivière à l'échelle des masses d'eau cours d'eau (Flipo et al., 2013, Pryet et al., 2014). Ils intègrent également l'ensemble des prélèvements anthropiques répertoriés dans les bases de données de l'AESN et qui couvre la période 1994-2012. Pour les périodes de calcul antérieures à 1994, les prélèvements moyens calculés sur la période 1994-2000 sont utilisés dans les modèles. Pour les années postérieures à 2012, ce sont les données de cette année 2012 qui sont reproduites.

La discrétisation plus fine permet d'affiner la représentation du réseau hydrographique comme le montre la Figure 17 qui compare le réseau hydrographique du modèle « Seine 6 couches » à celui d'un des sous modèles de la nappe de la Craie (modèle « Marne-Loing »). Les mailles « rivière » sont représentées en bleu.

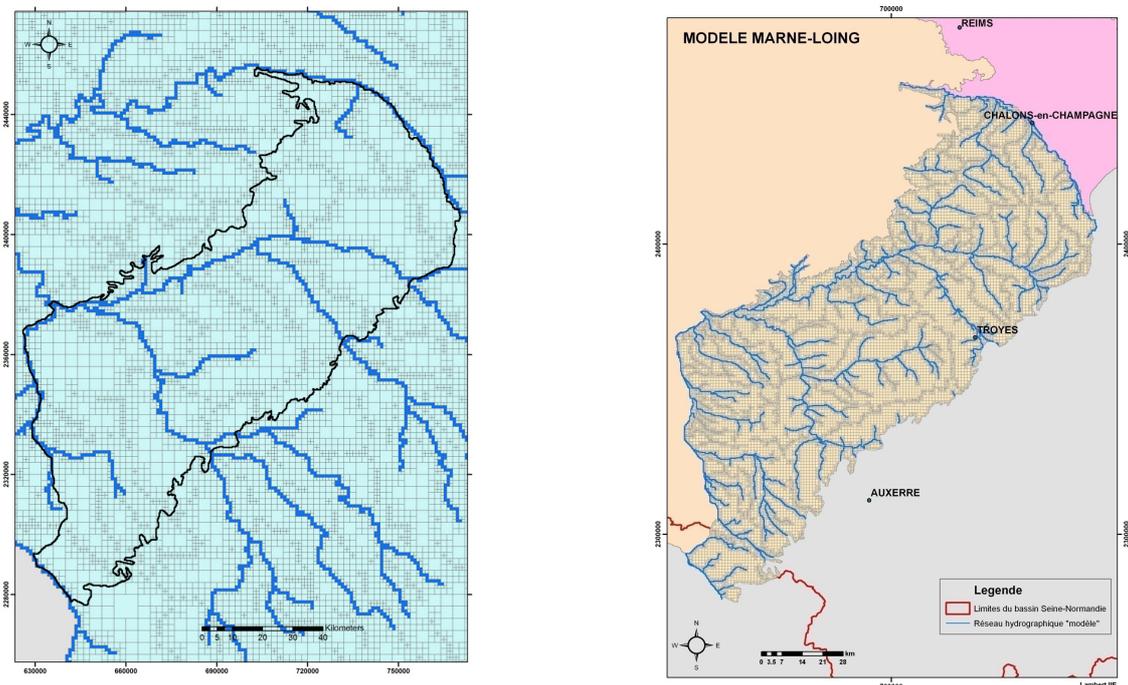


Figure 17: Comparaison des réseaux hydrographiques représentés dans le modèle Seine et un des sous modèles Craie

Moyennant certainement une phase de recalibration liée à la modification du bilan hydrique imposé par Surfex, ces 4 sous modèles Craie peuvent être intégrés dans la plateforme.

Autres applications

En plus des applications déjà implémentées dans AQUI-FR, les applications sur la nappe alluviale du Rhin (Thierion et al., 2012) et sur la nappe alluviale du Rhône (Golaz et al., 2001)

5.4. Amélioration de Surfex

L'utilisation du code de surface SURFEX, à la fois dans les applications AQUI-FR et Safran-Isba-Modcou a constitué un saut significatif, qui a permis d'utiliser les dernières améliorations scientifiques du code (calcul par type fonctionnel de végétation, sol multicouches). L'utilisation dans le cadre d'AQUI-FR devrait permettre d'améliorer la répartition entre ruissellement et drainage (en particulier en prenant mieux en compte les caractéristiques géologiques des sols). D'autre part, il est également prévu de simuler explicitement une rétroaction de la nappe vers la surface (reprise évaporative par la végétation). Un couplage interactif entre SURFEX et les modèles de nappe devra être mis en place dans le cadre de l'application.

6. Partie Juridique

6.1. Protection des modèles hydrogéologiques (code source)

Les différents modèles hydrogéologiques (des codes de calcul MARTHE, Eau-dyssée, Tempo, Gardénia...) sont ou seront intégrés dans l'application AQUI-FR *via* le coupleur OpenPalm qui sera hébergée in fine à Météo-France. Seuls les partenaires du projet AQUI-FR auront accès à l'application AQUI-FR (et donc aux codes sources) selon les conditions stipulées dans l'accord de consortium du projet AQUI-FR.

Les contraintes techniques et de sécurité affectant les codes fonctionnant sur les machines opérationnelles de Météo-France nécessitent la mise à disposition auprès de Météo France des codes sources des modèles hydrogéologiques, qui pourront faire l'objet de modifications mineures. Cette mise à disposition est prévue pour la période du projet. Concernant les modèles du BRGM, cette mise à disposition est encadrée juridiquement par un contrat de licence d'utilisation de code source qui devra être signé entre le BRGM et Météo-France. Une charte de mise à disposition a déjà été signée par l'UMR Métis pour permettre l'avancement du développement de l'application AQUI-FR.

6.2. Droits d'utilisation des applications développées par le BRGM

Une application (ou modèle) hydrogéologique 3D est une représentation en trois dimensions où est figuré l'ensemble des données obtenues par différentes techniques d'exploration du sous-sol. Les étapes d'analyse et d'intégration des dites données dans cette application hydrogéologique 3D cohérent s'avèrent fastidieuses et nécessitent de préférence l'utilisation d'un logiciel d'aide à la construction de modélisation. Les données interprétées (ex. : distribution spatiale des paramètres

hydrodynamiques, de la recharge, modèle géologique, etc.), leur représentation 3D et le logiciel Marthe sont protégés par le droit d’auteur. À ce titre, les modalités de mise à disposition des données et du logiciel sont détaillées dans l’accord de consortium du projet Aqwi-FR (cf. Articles 5 – Propriété intellectuelle, Article 6 – Principes d’utilisation et d’exploitation et Article 7 – Confidentialité-Publications).

Une première compilation des conventions de partenariat associées aux différentes applications régionales pressenties pour intégrer la plateforme numérique a été réalisée.

Toutes ces applications régionales élaborées par le BRGM ont été construites puis développées et actualisées en partenariat avec des Agences de l’Eau et/ou des services de l’Etat et/ou des collectivités territoriales. Pour chacune, le BRGM a apporté une contribution financière au titre de ses activités de Service Public (entre 20 et 34 %, Tableau 2).

Tableau 2 Modèles régionaux BRGM et conventions de partenariats

Application régionale	Documents contractuels consultés	Partenaires financiers	Droits d’utilisation
Carbonifère (Nord Pas de Calais)	Convention de R&D partagés du 16/07/2009	LMCU (80%), BRGM (20%)	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM.
Nappe alluviale de l’Ariège (Midi-Pyrénées)	Cahier des charges	FEDER (30%), AEAG (30%), DIREN MPY (10%), BRGM (30%)	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM.
Nappe alluviale de la Garonne (Midi-Pyrénées)	Cahier des charges	MEEDDAT (26%), AEAG (40%), BRGM (34%)	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM.
Nappe alluviale Tarn et Garonne	Cahier des charges	AEAG, DREAL (67%), BRGM (33%)	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM.
Dogger et Infra-Toarcien (Poitou-Charentes)	Conventions d’aide AELB et DIREN, Notification Conseil Régional (2008, 2009 et 2013) + Cahier des charges	AELB, AEAG, DIREN, Région, BRGM	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM. Un protocole d’utilisation visant à encadrer les demandes de simulation a été signé par la Région, les 2 Agences de l’Eau et le BRGM. Ce dernier reste l’unique opérateur.
Craie du bassin de la Somme	Propositions d’interventions 2001 et 2002, Demande de subvention 2003 + Cahier des charges	MEDD/DIREN (80%), BRGM (20%)	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM.
MONA (Aquitaine)	Conventions d’aide AEAG 2009, 2011, 2012 et 2013	AEAG (50%), FEDER (30%), BRGM (20%) +	Copropriété des livrables. Modèle libre de droit pour le BRGM.

		financements ponctuels (DRIRE, Conseil Général, Bordeaux Métropole)	
Bajo-bathonien (Basse-Normandie)	Conventions d'aide AESN janvier 2012 (partielle) + CdC	AESN (70%), BRGM (30%)	La convention AESN précise : "Les droits d'utilisation du modèle devraient être confiés aux services de l'Etat et de l'Agence ainsi qu'aux responsables futurs de la répartition des volumes (les CLE) afin de permettre sa réutilisation en phase de gestion ".

Seule l'utilisation de l'application Poitou-Charentes est encadrée par un protocole d'utilisation. Ce dernier, valable pour une durée de 3 ans, est signé par le Conseil Régional, les Agences de l'Eau Loire Bretagne et Adour Garonne ainsi que le BRGM. Une demande de mise à disposition de l'application devra donc être faite dans le respect de ce protocole d'utilisation.

Pour le reste, au regard des conventions de partenariat, la copropriété ne porte que sur les livrables, notamment le rapport final qui restitue le travail de modélisation et les résultats obtenus (Cf. Articles liés à la Propriété intellectuelle). L'application régionale du modèle en elle-même n'est pas concernée et peut donc être librement utilisée par le BRGM. Néanmoins, les différents partenaires financiers seront informés et consultés par le BRGM.

Pour les modèles des bassins de l'Aisne et de la Serre, un accord de la chambre d'Agriculture de l'Aisne qui en est propriétaire est indispensable.

6.3. Périmètres d'utilisation des modèles BRGM

Comme stipulé dans le cahier des charges du projet Aquif-FR, le système multi-modèle des aquifères français a pour objectif de fournir des informations sur les ressources en eau à l'échelle nationale, notamment compatibles avec les masses d'eau de la DCE. Il n'a pas pour objectif de remplacer les applications détaillées à l'échelle régionale. Un des principaux intérêts de ce système, outre la pérennisation des acquis, est d'améliorer (voire de permettre) la diffusion opérationnelle d'informations homogènes sur les aquifères et leurs relations avec les eaux de surface. Les résultats pertinents seront : les niveaux piézométriques, les flux échangés entre les couches aquifères ainsi qu'entre les nappes et les rivières. Les applications actuellement envisagés sont :

- Suivi temps réel
- prévisions à court terme et saisonnières relatives à l'état quantitatif des ressources en eaux;
- étude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau ;

6.4. Accès aux sorties/résultats issus de la plateforme

Les sorties du système multi-modèles, définies en concertation avec les différents gestionnaires des ressources en eau ne seront accessibles pour certains que par ces derniers et les partenaires du

projet.

En ce qui concerne la propriété intellectuelle des résultats, l'accord de consortium distingue les *Connaissances Nouvelles appartenant à une seule Partie* et les *Connaissances Nouvelles Conjointes*.

6.5. Droits d'utilisation des applications développées par Mines-ParisTech

Les applications développées par Mines-ParisTech/Armines ont fait l'objet de financement et de convention. Il ressort de l'étude de ces conventions qu'il n'y a pas d'opposition à une exploitation de ces applications pour des usages tels que ceux envisagés dans le projet Aquif-FR.

6.6. Droits d'utilisation du code SURFEX

Le code SURFEX est d'ores et déjà disponible à tous pour des applications en mode recherche. A partir de la prochaine version (V8, attendue pour la fin de l'année), il sera distribué sous forme de logiciel libre avec une licence CeCILL-C (<http://www.cecill.info/>). Les bases de données utilisées (occupation du sol, texture du sol, relief) sont également libres. Les données météorologiques Safran sont disponibles pour la recherche (avec un coût éventuel de mise à disposition), mais l'utilisation pour d'autres usages doit faire l'objet d'un accord avec Météo-France)

6.7. Droits d'utilisation du coupleur openPALM

Depuis Janvier 2011 le coupleur OpenPALM est devenu open source via la licence publique générale GNU LGPL v3.

7. Retour sur les avis des potentiels utilisateurs

Le projet Aquif-FR nécessite l'adhésion des futurs utilisateurs. L'interaction entre les gestionnaires et les scientifiques est soulignée comme un élément très bénéfique dans les autres projets internationaux (cf. section 2).

C'est pourquoi dès le début du projet, une enquête sur l'intérêt du projet Aquif-FR auprès de différents gestionnaires a été réalisée lors du stage de master de Cécilia Avignon. Cette enquête visait également à recueillir les besoins des gestionnaires.

Ainsi, sept gestionnaires ont été interviewés, et un questionnaire a été préparé (Avignon, 2014). On notera qu'afin d'illustrer les résultats attendus du projet, il a fallu s'inspirer de résultats similaires existants soit localement, soit dans d'autres pays, soit sur d'autres variables, ce qui pouvait limiter l'appropriation du produit.

Globalement, le projet a reçu un accueil positif : Aquif-FR comblera un manque en fournissant des prévisions de l'état quantitatif des eaux souterraines. La disponibilité d'un suivi spatialisé est également vue comme un point intéressant et complémentaire des suivis ponctuels offerts par les piézomètres.

Aqui-FR a été perçu comme un projet pouvant avoir un rôle pédagogique pour les utilisateurs en charge de la gestion de l'eau mais aussi pour un public plus large (industrie, structures spécialisées dans l'énergie, les associations de pêcheurs etc.).

Les retours sont assez tranchés sur l'intérêt des prévisions en fonction de leurs échéances : les personnes travaillant sur des aquifères avec des temps de réponse assez longs sont uniquement intéressées par les prévisions saisonnières, les autres par les prévisions à moyenne échéance. Cependant, dans tous les cas, la question de la prise en compte de prélèvements réalistes dans ces prévisions a été soulevée. La solution envisagée actuellement est d'imposer les données les plus récentes en termes de prélèvement, ce qui implique environ deux ans de retard. Ce point étant jugé comme crucial, il devra être traité dans la suite du projet. La possibilité de relier les prélèvements à la situation hydrométéorologique, sur la base d'études statistiques ou sur la base de modèles notamment agronomiques, a été suggérée comme réponse à cette question.

En termes de produits issus d'Aqui-FR, il a été suggéré de fournir en plus des produits déjà proposés, des produits par masse d'eau, notamment concernant les échanges nappe-rivière ainsi que des cartes de zones de dépassement de seuils, beaucoup plus parlantes en période de crise. De plus, il a été recommandé d'intégrer les incertitudes des prévisions (à moyenne échéance et saisonnières) pour aider à l'interprétation des prévisions.

Différentes craintes ont été soulevées, pour lesquelles des réponses partielles ont parfois pu être apportées. Parmi elles :

- la pérennité du projet Aqui-FR a été évoquée. En effet, il est difficile pour des gestionnaires de s'investir dans des projets qui n'aboutiront pas.
- la capacité d'accéder gratuitement aux résultats est demandée par les gestionnaires, plusieurs solutions d'hébergement des produits en local ont même été proposées. Cependant, il est demandé que l'accès soit restreint pour le grand public car il pourrait y avoir de mauvaises interprétations des informations. A l'inverse, les projections climatiques pourraient être diffusées plus largement pour des actions pédagogiques.
- le risque d'imposer les applications du projet comme des modèles de référence a été soulevé. Ce risque n'avait pas été anticipé, car l'idée est d'intégrer dans Aqui-FR des applications hydrogéologiques utilisées par les gestionnaires. Cependant, il s'avère que des applications hydrogéologiques sur des sous-domaines sont parfois utilisées par les gestionnaires. Ces applications qui sont plus restreintes dans l'espace peuvent être mieux calées que les applications sur l'ensemble du bassin. Or, il s'avère que les résultats peuvent être divergents, tout au moins quant à l'estimation de dépassement de niveaux de crise. Le risque est donc que le projet Aqui-FR fournisse des produits sous optimaux par rapport à ces applications subrégionales. C'est une des raisons pour lesquelles il est conseillé de limiter dans un premier temps la diffusion des résultats d'Aqui-FR aux seuls gestionnaires.
- Les difficultés de mise à jour des applications ont également été évoquées. Cette question est assez liée à la question sur la pérennité du projet, car elle dépend en partie du financement du projet. Néanmoins, la structure Aqui-FR est conçue pour faciliter les mises à jours, sous les 3 formes mentionnées section 2.

Des avis positifs sont donc ressortis de ces entretiens mais le projet a cependant le besoin de faire ses preuves aux yeux de ces gestionnaires. Le succès d'un tel projet est donc lié à sa durabilité.

Depuis le stage de Cécilia Avignon, des informations sur le projet Aqui-FR avec d'autres gestionnaires ont été échangées notamment lors de réunions organisées par l'ONEMA.

8. Conclusions

La première année du projet Aqui-FR a permis de démontrer la faisabilité du projet en répondant aux principales questions sur:

- la faisabilité technique : la résolution des principaux problèmes techniques a conduit au développement d'une maquette comportant deux modèles hydrogéologiques et six applications, maquette qui doit encore s'enrichir.
- les questions juridiques concernant la possibilité d'intégration des applications hydrogéologiques : les réponses peuvent varier selon les applications, mais, l'intégration de nombreuses applications dans Aqui-FR est possible.
- l'intérêt des futurs utilisateurs : les produits issus d'Aqui-FR sont jugés utiles, les prévisions à échéance 10 jours ou 3 mois correspondent à des besoins en fonction des caractéristiques hydrodynamiques du bassin. Plusieurs écueils ont cependant été soulevés, notamment concernant la fiabilité de ces prévisions qui restent à démontrer, de possibles incohérences avec des résultats issus d'autres modèles, ainsi que l'incertitude sur la pérennité du projet.
- la possibilité d'intégration d'aquifères karstiques et d'aquifères de socle : si des développements techniques et conceptuels, surtout pour les aquifères de socle, sont encore à mener, l'intégration de ces aquifères sera réalisable. Des applications sur les aquifères karstiques seront intégrées en 2^{ème} année.
- la capacité d'assimilation de données pour améliorer la représentativité de l'application temps réel par rapport aux observations et les prévisions : les avancées sont pour l'instant purement théoriques et les méthodes devront être développées dans la suite du projet.

Références

- Amraoui, N., Golaz, C., Mardhel, V., Negrel, Ph., Petit, V., Pinault, J. L., and Pointet, T. (2002) Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme, BRGM/RP-51827-FR, <http://www.brgm.fr/publication.jsp>, 184 pp., 83 Figs., 11 Tables, 5 Annexes.
- Anderson, Dietrich and Brimhall, 2002, Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss : Linkages between weathering and erosion in a small, steep catchment, *GSA Bulletin*, 114(9), 1143-1158.

- Avignon Cécilia (2014) Projet Pré-Aqui-FR : enquête sur l'intérêt du projet Aquis-FR et définition des besoins auprès de différents gestionnaires. Rapport de stage M1 SUEE, spécialité ECH, UPMC, 46p.
- Bakalowicz, M. (2006), Aquifères karstiques, in *Aquifères & Eaux souterraines en France*, ed. Roux, J.-C., Chapitre 6, ISSN 1773-7893, ISBN 10 : 2-7159-0980-2, ISBN 13 : 978-2-7159-0980-9, pp. 59-73.
- Brantley and White, 2009, Approaches to modeling weathered regolith, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70, 435-484.
- Buscarlet E., Pickaert L., avec la collaboration de Stollsteiner P., Klinka T., Wuilleumier A. et Asfirane F. (2011) – Modélisation de la nappe de la craie – calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire- Rapport d'avancement – BRGM/RP-60217-FR. 46 p., 25 fig, 4tab, 2 annexes
- Caballero, Y., Lanini, S., Seguin, J.-J., Charlier, J.-B., Ollivier, C. (2015) – Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport de fin de 1ère année. BRGM/RP-64779-FR, 159 p., 102 ill., 3 CD
- Charlier J. -, J. -. Desprats and B. Ladouche (2014), Appui au SCHAPI 2014 – Module 1 - Rôle et contribution des eaux souterraines d'origine karstique dans les crues de la Loue à Chenecey-Buillon, n°BRGM/RP-63844-FR, pp. 1-108
- Coustau M., F. Regimbeau, G. Thirel, F. Habets, B. Janet, E. Martin, C. de Saint-Aubin, J.-M. Soubeyroux: Impact of improved meteorological forcing, soil physics and data assimilation on an operational Hydrological Ensemble Forecast System over France, *Journal of Hydrology*, 525, Pages 781-792, ISSN 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.022, 2015
- Croiset N., Wuilleumier A., Bessière H., Gresselin F. (2013) Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR. 130p. 88 ill., 20 tab., 11 annexes
- De Lange, W. J., Prinsen, G. F., Hoogewoud, J. C., Veldhuizen, A. A., Verkaik, J., Essink, G. H. O., & Kroon, T. (2014). An operational, multi-scale, multi-model system for consensus-based, integrated water management and policy analysis: The Netherlands Hydrological Instrument. *Environmental Modelling & Software*, 59, 98-108.
- Douez O. , F. Bichot, D. Dequidt, D. Dugrillon, E. Putot, L. Petit, 2010 : Contributions à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique, rapport BRGM #BRGM/RP-58297-FR, 315 p
- Fleury, P., V. Plagnes and M. Bakalowicz (2007), Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France), *J. of Hydr.*, 345(1–2), 38-49, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.014
- Flipe N., Labarthe B., Saleh F., Pryet A., Goblet P., Viennot P., Abasq L., Relations eaux souterraines-réseau hydrographique sur le bassin Seine-Normandie : quantification des flux hydriques, rapport d'étude MINES ParisTech, centre de Géosciences, R130218NFLI.
- Ghyselinck-Bardeau M. 2004 – Etude des aquifères alluviaux du Tarn et Garonne : modélisation nappe-rivière en régime transitoire (Garonne, Tarn et Aveyron) – Rapport final – année 2 BRGR/RP-53406-FR

- Golaz-Cavazzi, C., P. Etchevers, F. Habets, E. Ledoux, and J. Noilhan (2001), Comparison of two hydrological simulations of the Rhone basin, *Phys. Chem. Earth, Part B*, 26(5– 6), 461– 466.
- Habets et al., (2010) Le développement du modèle intégré des hydrosystèmes Eau-dyssée, rapport du Programme Piren-Seine, 46p, http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=webfm_send/909
- Henriksen HJ, Troldborg L, Nyegaard P, Sonnenborg TO, Refsgaard JC, Madsen B (2003). Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280(1-4), 52-71
- Højberg AL, Troldborg L, Stisen S, Christensen BSB, Henriksen HJ (2013) Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model. *Environmental Modelling & Software* 40, 202-213.
- Lachassagne and Wyns, 2006, Les aquifères de socle, in *Aquifères et Eaux Souterraines de France*, Ed BRGM.
- Lanini S. et Maréchal JC. (2004) Modélisation du transport réactif dans l'aquifère karstique des Fontanilles (34) – Modèle MODKA. Rapport BRGM/RP-53396-FR, 69 p., 22 illustrations, 3 annexes
- Ledoux, E., G. Girard, G. De Marsily, and J. Deschenes (1989), Spatially distributed modeling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water, in *Unsaturated Flow Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, NATO ASI Series C, vol. 275, edited by H. J. Morel-Seytoux, pp. 435–454, Kluwer Acad., Norwell, Mass.
- Le Moine, N., V. Andreassian, and T. Mathevet (2008), Confronting surface and groundwater balances on the La Rochefoucauld-Touvre karstic system (Charente, France), *Water Resour. Res.*, 44, W03403, doi:10.1029/2007WR005984.
- Majdalani, S., Ackerer, P. (2011). Identification of groundwater parameters using an adaptative multiscale method. *Groundwater*, 49(4), 548-559.
- Maréchal J., B. Ladouche, C. Batiot-Guilhe, V. Borrell-Estupina, Y. Caballero, F. Cernesson, N. Dörfliger, P. Fleury, M. Jay-Allemand, H. Jourde, V. Leonardi, P. Malaterre, J. Seidel and Vion PY. (2014), Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez –synthèse des résultats et recommandations., n°Rapport BRGM/RP-61051-FR, pp. 1-129 (<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61051-FR.pdf>).
- Masson et al. 2013: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929-960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013.
- Monteil Céline, 2011 : Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Thèse Mines-Paristech
- Morel Thierry, Florent Duchaine, Anthony Thévenin, Andrea Piacentini, Moritz Kirmse et Eric Quémerai (2013) Coupleur Open-PALM version 4.1.5 Manuel utilisateur et de formations, 206p, http://www.cerfacs.fr/globc/PALM_WEB/EN/DOCUMENTS/MANUAL/manuel_utilisateur.pdf
- Noyer M.L., Elsass P. 2006 – modélisation de la salure profonde au droit et en aval du bassin potassique. Rapport final BRGM/RP 54389.
- Pinault J. L., (2001), Manuel utilisateur de TEMPO. Logiciel de traitement et de modélisation des

- séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie., n°BRGM/RP-51459-FR, pp. 1-236 (www.brgm.fr).
- Plagnes V., Habets F. Fleury P. Quintana-Segui P., Oudin L, Martin E., Ducharne A , 2007 , Impact of karstic aquifer on water balance in Mediterranean region, poster de la conférence Hymex 2007.
- Pryet A., B. Labarthe, F. Saleh, M. Akopian and N. Flipo (2014). Reporting of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model. *Water Resources Management*,
- Refloch Aurore, 2014, Modélisation 3D des écoulements à surface libre dans les aquifères de socles, Mémoire de Master 2, Université de Rennes 1.
- Rempe and Dietrich, 2014, A bottom-up control on fresh-bedrock topography under landscapes, *PNAS*, 111 (18), 6576-6581.
- Saleh F., N Flipo, F Habets, A Ducharne, L Oudin (2011) Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream-aquifer interactions at the regional scale, *J. of Hydrol.*
- Saltel M., Faucher A., Bourguine B. (2012) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 3 – BRGM/RP-61614-FR
- Saplaïroles M., Buscalet E, (2009) Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne-Modélisation de la nappe alluviale de l’Ariège et de l’Hers Vif – Année 3. BRGM/RP 57184-FR Rapport final – 74p., 42 ill et 5 ann.
- Seguin J.J. (2003) - Outil de gestion des systèmes aquifères du Sud du bassin Adour-Garonne. Année 4 – Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. BRGM RP/52041-FR
- Serdar Korkmaz, 2007 : Modeling the flood regimes in coupled stream-aquifer systems. Thèse de Mines Paristech, 200p.
- Singla, S., Céron, J. P., Martin, E., Regimbeau, F., Déqué, M., Habets, F., & Vidal, J. P. (2012). Predictability of soil moisture and river flows over France for the spring season. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 201-216.
- Thierion Charlotte, 2007 Modélisation hydrogéologique des aquifères du Bajocien-Bathonien dans le secteur des bocages normands. Rapport de master 2, UPMC & ENGREF, 50 p
- Thierion, C., Longuevergne, L., Habets, F., Ledoux, E., Ackerer, P., Majdalani, S., Leblois, E., Lecluse, S., Martin, E., Queguiner, S., Viennot, P.. (2012). Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem. *Journal of Hydrology* 424-425, 68{83.
- Thiéry D. (2014) Didacticiel du code de calcul MARTHEv7.4. Exploration des principales fonctionnalités de modélisation des hydrosystèmes. Rapport BRGM/RP-62798-FR. 223p., 131fig
- Vergnes J.-P., B. Decharme and F. Habets : Impact of groundwater capillary rises as lower boundary conditions for soil moisture in the ISBA land surface model, *JGRA*, Volume 119, Issue 19, pages 11,065–11,086 DOI: 10.1002/2014JD021573
- Viennot P. (2009) Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la

Seine : Représentation différenciée des aquifères du Tertiaire et Intégration des prélèvements anthropiques. Rapport d'étude MINES ParisTech centre de Géosciences.

Viennot P., Abasq L. (2013), Modélisation de la pollution nitrique des grands aquifères du bassin Seine-Normandie à l'échelle des masses d'eau, rapport d'étude MINES ParisTech, centre de Géosciences, R130423PVIE.