

hydrogéologique nationale AQUI-FR

Plateforme de modélisation

Rapport final de 1ère phase - 2014-2016

Florence Habets (Métis, UMR 7619), Nadia Amraoui, Yvan Caballero, Dominique Thiéry, et Jean-Pierre Vergnes (BRGM), Thiérry Morel (Cerfacs) Patrick Le Moigne et Nicolas Roux (CNRM), Jean-Raynald de Dreuzy, Laurent Longuevergne (Géosciences Rennes), Philippe Ackerer, Fadji Maina (Lhygès), François Besson, Pierre Etchevers, Fabienne Regimbeau (Météo-France DCSC), Pascal Viennot (Mines-Paristech)

Mai 2017





• **AUTEURS**

Philippe Ackerer, DR CNRS, (Lhygès), philippe.ackerer@unistra.fr Nadia Amraoui, Chef de projet (BRGM), n.amraoui@brgm.fr François Besson, IT (Météo-France), francois.besson@meteo.fr Yvan Caballero, I (BRGM), y.caballero@brgm.fr Jean-Raynald de Dreuzy, DR CNRS (Géosciences Rennes), jean-raynald.de-dreuzy@univrennes1.fr Pierre Etchevers, IPC (Météo-France), pierre.etchervers@meteo.fr Nicolas Gallois, (Mines-Paristech), nicolas.gallois@mines-paristech.fr Florence Habets, DR CNRS, (UMR 7619 Métis), florence.habets@upmc.fr Fadji Hassane, Doctorante (Lhyges), ? Patrick Le Moigne, IT (CNRM, Météo-France), patrick.lemoigne@meteo.fr Laurent Longuevergnes, CR CNRS (Géosciences Rennes), laurent.longuevergne@univ-rennes1.fr Thierry Morel, I (Cerfacs), thierry.morel@cerfacs.fr Fabienne Regimbeau, I (Météo-France), fabienne.regimbeau@meteo.fr Nicolas Roux, Post-doc (CNRM), nicolas.roux@meteo.fr Dominique Thiéry, I (BRGM), d.thiery@brgm.fr Jean-Pierre Vergnes, I (BRGM), JP.Vergnes@brgm.fr Pascal Viennot, I (Mines-Paristech), pascal.viennot@mines-paristech.fr

• CORRESPONDANTS

Onema : Bénédicte Augeard, chargée de mission de la ressource jusqu'en décembre 2016 (Onema), <u>benedicte.augeard@onema.fr</u> **Claire Magand,** chargée de mission de la ressource depuis décembre 2016 (Onema), <u>claire.magand@onema.fr</u>

• AUTRES CONTRIBUTEURS

Quentin Courtois (Géosciences Rennes) Cecilia Avignon (UMR Métis) Loriane Carluer Candillon (UMR Métis) Ryma Aissat (UMR Métis) Nicolas Gallois (Mines-ParisTech) Luc Arnaud (BRGM)

Droits d'usage : [par ex. accès libre ou accès réservé à XXX] Niveau géographique : national, Couverture géographique : France Niveau de lecture : professionnels



Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR Statut du document Habets et al.,



• PLATEFORME DE MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE NATIONALE AQUI-FR

• **RESUME**

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 climatiques 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 ce sens, le projet Aqui-FR est conçu comme un outil de valorisation des travaux de modélisation hydrogéologiques réalisés en France.

L'objectif de cette première phase du projet était de démontrer la faisabilité et l'intérêt de ce projet. Pour cela, une plateforme numérique a été construite en prenant soin d'assurer la généricité et la souplesse de la structure afin de garantir une facilité de mise à jour des applications et l'insertion de nouvelles applications. Aqui-FR intègre à ce jour trois modèles hydrogéologiques (2 modèles distribués, MARTHE et EauDyssée, et un modèle adapté aux systèmes karstiques, GARDENIA) pour lesquels les codes sources ont été transférés et légèrement adaptés. A ce jour, dix-neuf applications hydrogéologiques (13 applications distribuées et 6 karsts) sont intégrées dans la plateforme. L'ensemble représente une superficie d'environ 149 000 km² et un total de 57 formations aquifères ou aquitards. Afin d'assurer une meilleure homogénéité à l'échelle nationale, les variables atmosphériques issues de la réanalyse SAFRAN et les flux hydrologiques (évapotranspiration, ruissellement, infiltration) simulés par SURFEX sont mis à disposition de chaque application. Ainsi, les simulations sont réalisées au pas de temps iournalier. Cette étape d'homogénéisation a nécessité une phase d'adaptation ou de recalage des applications, Agui-FR tourne actuellement sur le supercalculateur de Météo-France sur leguel il sera utilisé pour le suivi et la prévision, ainsi que sur des serveurs de calcul à l'UMR Métis et au BRGM. Une première évaluation d'Aqui-FR a pu être menée sur six années. La comparaison des simulations sur plus de 600 piézomètres indique que 42% ont un biais inférieur à 1m et 45% ont une erreur quadratique moyenne inférieure à 2.5m. La comparaison avec les débits journaliers sur plus de 300 stations hydrométriques indique que sur 40% des stations les résultats sont très satisfaisants. Aqui-FR ayant pour objectif de fournir un suivi en temps réel et des prévisions, un retour d'expérience sur la crue de 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire est présenté.

En parallèle, le développement d'une modélisation adaptée aux aquifères de socle est en cours. Elle se base sur la simulation des écoulements souterrains sur les sous-bassins en fonction des caractéristiques du bassin et permettra l'estimation des temps de transferts.

La qualité des prévisions de la ressource en eau souterraine dépendra en partie de la qualité de l'état initial des nappes. Or, les simulations peuvent diverger par rapport aux observations, fautes d'une bonne estimation de la recharge et/ou des prélèvements ou des défauts intrinsèques aux applications. Pour pallier cela, une méthode permettant d'assimiler les niveaux piézométriques observés afin de corriger l'état initial du modèle est en cours de développement, et a été testée avec succès sur un cas réel.

Quelques perspectives en termes d'évaluation avec des données issues de la gravimétrie spatiale (GRACE), de réanalyse historique longue durée, de projections climatiques, de prévision saisonnière, de raffinement du réseau hydrographique et d'extension du nombre d'application sont également abordées.

• **MOTS CLES :** Modélisation hydrogéologique, France, Suivi temps réel, prévision, changement climatique, prélèvement, estimation de la recharge, karst, aquifère de socle, aquifère sédimentaire



AQUI-FR : A NATIONAL MULTIMODEL HYDROGEOLOGIC SYSTEM Statut du document Habets et al.,



• AQUI-FR : A NATIONAL MULTIMODEL HYDROGEOLOGIC SYSTEM

• **ABSTRACT**

The Aqui-FR project aims at taking benefits of existing groundwater modeling applications used by stakeholders to develop a single web platform in order to gather useful information for groundwater resources management. Forecasts of groundwater resources at from 15 days ahead up to seasonal scale, as well as climate projection on groundwater resources will be provided. In order to cover the whole metropolitan area, Aqui-FR fosters the development of hydrogeologic models where they do not exist (in particular, on hardrock aquifers).

The objective of this first phase of the project was to demonstrate the feasibility and potential of this project. To do so, a numerical platform was built with a special care to ensure the genericity and flexibility of the structure in order to ease updating the applications and the insertion of new applications. To date, Aqui-FR integrates three hydrogeological models (2 distributed models, MARTHE and EauDyssée, and a model adapted to karsts, GARDENIA) for which the source codes have been transferred and adapted slightly. So far, nineteen hydrogeological applications (13 distributed applications and 6 karsts) are integrated into the platform. The ensemble represents an area of approximately 149,000 km² and a total of 57 aquifer or aquitard formations. In order to ensure an homogeneity at national scale, the SAFRAN atmospheric analysis and the hydrological flows (evapotranspiration, runoff, infiltration) simulated by SURFEX are made available to each application. Simulations can run at a daily time step, which required a phase of adaptation or recalibration of the applications. Aqui-FR was set-up on the Météo-France supercomputer where it will be used for daily monitoring and forecast, as well as on numerical server at Métis and BRGM. A first evaluation of Aqui-FR was carried out over five years in retrospective mode. Comparison of the simulation over more than 600 well gages indicates that 42% have a bias less than 1 m and 45% have an RMSE less than 2.5 m. The comparison of the simulated discharges with the observed daily river flows on more than 300 hydrometric gages indicates satisfying results for 40% of the stations. As Aqui-FR aims to provide realtime monitoring and forecasting, a first feedback on the flood of 2016 on the Seine and Loire basins is also presented.

Simultaneously, a model adapted to hardrock aquifers is being developed. It is based on the simulation of underground flows at the sub-basins scale according to the geological and topographical characteristics and will allow the estimation of the transfer times.

The quality of the forecast of the groundwater resources will partly depend on the quality of the groundwater's initial state. But this initial state is badly known and cannot be set directly from simulation as the simulated piezometric maps may differ from the observations due to errors in the recharge estimation, of the groundwater abstraction, or of the model's parameterisation. To compensate for this, a method for assimilating the observed piezometric levels in order to correct the initial state of the model is under development and has been tested successfully on a real case.

Some perspectives in terms of evaluation using data from spatial gravimetry (GRACE), long-term historical reanalysis, climate projections, seasonal forecasting, refinement of the hydrographic network and extension of application are also discussed.

• KEY WORDS : HYDROGEOLOGICAL MODELING, FRANCE, REAL TIME MONITORING, FORECAST, CLIMATE CHANGE, GROUNDWATER RECHARGE, GROUNDWATER ABSTRACTION, KARST, HARD-ROCK AQUIFER, SEDIMENTARY AQUIFER



Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR Statut du document Habets et al.,



• SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE

Objectifs

Aqui-FR vise à mettre en place un suivi et une prévision de la ressource en eau souterraine en France ainsi qu'à faciliter les études d'impact du changement climatique. Pour cela, Aqui-FR capitalise les efforts de modélisations hydrogéologiques régionales déjà réalisées sur les bassins versants français, généralement en association avec des gestionnaires de l'eau, en les rassemblant au sein d'une structure pérenne et assez souple pour permettre l'évolution de ces applications ainsi que l'extension de leurs nombres.

Méthodes

A ce jours, trois modèles hydrogéologiques sont inclus dans Aqui-FR : MARTHE du BRGM (Thiéry 2015a), et MODCOU/EauDyssée de MINES-ParisTech (Ledoux et al., 1980) pour les aquifères sédimentaires, et GARDENIA du BRGM (Thiéry 2015c) qui a été spécialement adapté pour traiter les aquifères karstiques. Un total de 19 applications (dont 6 karstiques) est inclus dans la plateforme (Fig. 1)



Fig. 1 Principe de la structure Aqui-FR et extension des aquifères représentés

L'analyse météorologique SAFRAN (Quintana Séqui et al., 2008) et les flux hydrogéologiques simulés par le schéma de surface SURFEX (Masson et al., 2013) de Météo-France sont fournis afin d'estimer les précipitations efficaces. La recharge des nappes peut ainsi être calculée soit par les modèles hydrogéologiques à partir de SAFRAN soit directement à partir des flux issus de SURFEX. Cela assure une homogénéité des sources sur l'ensemble de la France métropolitaine et sur de longues périodes, et donc, facilitera les comparaisons. Le coupleur OpenPALM du Cerfacs (Duchaine et al., 2015) a été

choisi pour bâtir la structure (Fig. 1). Celle-ci intègre du pré-traitement pour préparer la simulation sur la période choisie, notamment en mettant en cohérence les conditions initiales et conditions aux limites (débits imposés, prélèvements) ainsi que du post-traitement pour faciliter l'analyse des résultats en termes de charge piézométriques et de débits issus des différents modèles et applications intégrés.

Quelques adaptations des codes sources des modèles hydrogéologiques ont dû être réalisées, notamment GARDENIA pour traiter les aquifères karstiques. Des adaptations ont également été nécessaires pour les applications régionales, notamment pour les adapter aux nouveaux forçages météorologiques, mais aussi pour réduire les pas de temps et le temps calcul. Ces adaptations sont résumées dans ce rapport, et certaines sont décrites en détails dans Amraoui et al., 2017.

Aqui-FR tourne maintenant sur le supercalculateur de Météo-France où il sera utilisé pour le suivi et la prévision en temps réel, ainsi que sur les serveurs de calcul de Métis et du BRGM.

Premiers résultats

Une première simulation a été réalisée et évaluée sur la période Août-1999 à Juillet 2005 pour laquelle on dispose de l'ensemble des informations concernant les prélèvements et débits imposés pour toutes les applications. Cette première simulation a pu être évaluée sur plus de 600 piézomètres et près de 300 stations hydrométriques et bien que les résultats soient provisoires, notamment du fait d'une sélection sous-optimales des points de comparaison (à la fois incomplète mais également parfois inadaptée), les résultats sont conformes à ceux obtenus individuellement par chaque application (Fig. 2)





Fig. 2 Comparaison sur la période aout 1999 à Juillet 2005 des niveaux piézométriques simulées et observées sur plus de 600 stations (gauche) et des débits journaliers simulés et observés sur près de 300 stations (droite)

Cette première simulation permet également d'envisager les types de résultats qui pourront être fournis en opérationnel, comme par exemple, les cartes de situation par rapport à un état de référence (Fig. 3). Cette figure fait apparaître la situation de hautes eaux qui s'est étendue de 2000 à 2002. S'il est difficile d'aller plus loin avec une période de référence de 6 ans, la prochaine réalisation d'une réanalyse depuis 1958 permettra de mieux juger de l'état des nappes à un moment donné par rapport à l'historique.

Développements associés

En parallèle au développement de la plateforme Aqui-FR et à son déploiement, deux axes de recherche et développement sont en cours : la réalisation d'une modélisation adaptée aux aquifères de socle, et la mise en place d'une méthode d'assimilation (ou inversion) des données piézométriques ayant pour but de corriger l'état initial des modèles. De plus, on s'est intéressé à quantifier l'impact de la méconnaissance des prélèvements sur de futurs prévisions hydrogéologiques.

Les aquifères de socle sont caractérisés par une forte variabilité spatiale liée au fait que l'eau circule uniquement dans les zones altérées et fissurées. Une modélisation des aquifères de socle est en cours sur les aquifères bretons (de Dreuzy et al., 2016). L'idée est d'intégrer une représentation simplifiée des bassins versants, avec des hypothèses sur la distribution spatiale des zones altérées, et

la possibilité d'inverser les paramètres hydrogéologiques à partir des données de débits et de temps de transfert en nappe via des traceurs environnementaux.

La qualité des prévisions qui seront réalisées avec Aqui-FR dépendra en partie de la qualité des conditions initiales. En effet, si le niveau de la nappe est initialement sous-estimé de 1 m, il sera le plus souvent impossible même avec une excellente prévision météorologiques de prévoir le bon état de la nappe au bout de 10 jours ou d'un mois, en particulier si la recharge prévue est faible sur cette période. Or, il y a de multiples facteurs qui peuvent faire dévier la charge piézométrique simulée par rapport aux observations : erreurs sur l'estimation de la recharge, des prélèvements, ou paramétrisation sub-optimale du modèle. Ainsi, un effort particulier est mené pour corriger la charge simulée par le modèle en utilisant les données observées via une méthode d'inversion. Maina et al., (2017) ont développé une méthode basée sur une approche multi-échelle qui permet d'adapter l'influence spatiale des charges observées en fonction de la réponse du modèle en lien avec les caractéristiques hydrodynamiques du domaine simulé. Cette méthode a été testée avec succès sur un cas réel actuellement non inclus dans Aqui-FR. Des études complémentaires seront nécessaires afin de tester cette méthode sur les applications incluses dans Aqui-FR qui sont souvent plus étendues et pour lesquelles la densité d'observations piézométriques peut être plus faible.



Fig. 3 Ecarts (ou anomalies) de charge sur l'ensemble des couches affleurentes, pour chaque période siumulée par rapport à la moyenne de la charge sur l'ensemble des périodes.

Avec un état initial réaliste, la prévision de la ressource en eau souterraine devrait pouvoir apporter une information utile aux gestionnaires de l'eau, en particulier lors des périodes d'étiage. Cependant, c'est également à cette période que la sensibilité aux prélèvements en nappe peut être la plus forte. notamment du fait de la saisonnalité des prélèvements agricoles. Pour étudier cela, on s'est focalisé sur le bassin de la Seine, où les prélèvements en nappe peuvent atteindre 1 Milliard de m³ par an. avec cependant une incertitude conséquente (30%) selon les sources, et un délais d'au moins 2 ans entre la collecte des informations et leur mise à disposition via la BNPE par exemple. Le travail a consisté à étudier les incertitudes associées à la prise en compte de prélèvements constants sur plusieurs années au lieu de prélèvements variables d'une année sur l'autre afin d'intégrer ce délai. Les impacts sont plus marqués sur les niveaux piézométriques les plus faibles, et avec une forte variabilité spatiale, ce qui était assez attendu du fait que les prélèvements sont assez variables dans l'espace mais aussi dans l'année. On s'est ensuite placé dans un contexte de prévision saisonnière, avec un état initial donné, et la prise en compte de deux chroniques de prélèvements contrastées. Il s'avère que les incertitudes associées à la méconnaissance des prélèvements peuvent être localement importantes, mais sont assez réduites sur les indicateurs piézométriques utilisés pour la gestion des nappes. Cependant, ce résultat doit être tempéré par le fait que les chroniques de prélèvement

utilisées sont sans doute beaucoup plus lissées que les chroniques réelles qui restent le plus souvent inaccessibles.

Perspectives à court terme

Le projet Aqui-FR va se poursuivre dans un second volet. Plusieurs actions vont être menées à court terme : réanalyse longue durée, projections climatiques, prévision saisonnière.

<u>Réanalyse longue durée :</u> il est maintenant possible de réaliser une réanalyse longue durée, c'est à dire, depuis 1958, avec Aqui-FR à condition de fixer les hypothèses pour les prélèvements et débits imposés sur les périodes où les données ne sont pas disponibles. Cette réanalyse servira de référence à la fois pour les prévisions car elle fixera les normales en tout point, mais aussi pour les projections climatiques. Il est donc important d'évaluer cette réanalyse par rapport à des observations. En plus des mesures in-situ de piézométries et de débits, on pourra utiliser les données de la mission satellitaire GRACE qui permet d'estimer les variations des stocks d'eau continentaux sur des échelles de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Pour cela, il a été nécessaire d'enrichir les sorties d'Aqui-FR avec la variation des stocks dans la zone non saturée profonde. Les premières comparaisons devraient être réalisées fin 2017.

<u>Projections climatiques</u>: Les études d'impact du changement climatique sur les débits des cours d'eau sont réalisées avec des modèles qui n'intègrent souvent pas explicitement les eaux souterraines. Une première étude d'impact du changement climatique avec Aqui-FR est en cours dans le cadre d'un stage M2. L'objectif est double : identifier l'impact de la prise en compte explicite des aquifères sur l'évolution des débits sous changement climatique, et évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau souterraine. Pour cela, les simulations réalisées par Dayon (2015) avec le modèle SIM2.0 seront comparées à celles obtenues avec Aqui-FR. Les deux études utilisent exactement les mêmes flux d'eau de surface, ce qui facilitera la comparaison. A ce stade, seul le scénario d'émission RCP 8.5 est étudié, ce qui limitera l'analyse sur l'évolution des aquifères.

<u>Prévisions saisonnières :</u> une première étude visant à quantifier l'apport d'une modélisation explicite des aquifères pour la prévision saisonnière des étiages (débits et piézométries) devrait débuter en 2017. Le principe est de quantifier les apports des nappes en termes de gain de fiabilité et d'échéance de prévision. Pour cela, on s'appuiera sur les prévisions réalisées dans le cadre du projet FP7 EUPORIAS.

Références

- Amraoui N., Thiery D., Vergnes J-P., Arnaud L., Rousseau M. et Caballero Y. (2017) Aqui-FR un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale : travaux 2015-2016. Rapport final BRGM/RP-66683-FR, 192 p., 118 ill., 4 ann.
- Dayon, G. (2015). Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- de Dreuzy (2016) Structure des circulations souterraines dans les aquifères de socle en Bretagne, rapport ONEMA, 37p
- Duchaine F., S. Jaure, D. Poitou, E. Quemerais, G. Staffelbach, T. Morel and L. Gicquel. Analysis of High Performance Conjugate Heat Transfer with the OpenPALM Coupler. Journal of Computational Science and Discovery. 8:015003, 2015.
- Ledoux, E., Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique, thèse, Ecole Nat. Sup. des Mines de Paris, France, 1980.
- Maina, F. H, Delay, P. Ackerer (2017) Estimating initial conditions for groundwater flow modeling using an adaptive inverse method, Soumis à Journal of Hydrology (minor revision).
- Masson, V. et al. (2013), The SURFEX v7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, Geoscientific Model Development, 6(4), 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013
- Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel, 2008 : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France. J. Appl. Meteor. Climatol., 47, 92-107.
- Thiéry D. (2015a) Code de calcul MARTHE Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes Notice d'utilisation de la version 7.5. BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.
- Thiéry, D. (2015c) Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE version 7.5. BRGM/RP-64495-FR. 87 p., 32 fig

• SOMMAIRE

Contenu

Pla	teforme de m	odélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR	1
1. 2	Position du	nroiot Aqui-FR dans la communauté internationale	13
3.	Etat d'avanc	ement de la plateforme Aqui-FR	
	3.1. Les I	ogiciels de modélisation inclus	16
	3.1.1.	Le coupleur OpenPALM	16
	3.1.2.	Les modèles hydrogéologiques	16
	3.1.3.	Le schéma de surface SURFEX	17
	3.1.4.	L'analyse météorologique SAFRAN	
	3.2. Les a	applications hydrogéologiques incluses à ce jour	18
	3.3. L'inte	égration des codes de calcul dans le coupleur OpenPALM	20
	3.4. Struc	cturation de la plateforme Aqui-FR	21
	3.5. Le po	ost-traitement	21 22
	3.0. FUIII		23
	3.0.1.	Prises en compte du multi-annuel et des prelevements	
	3.6.2.	Gestionnaire de version	
	3.0.3.	Scripts a installation et de lancement	
	3.0.4.	Kessource informatiques necessaires	
4.	Adaptation d	les modèles et applications à la plateforme Aqui-FR	25
	4.1. Adap	otation des logiciels hydrogéologiques	26
	4.1.1.	Adaptation du logiciel MARTHE	
	4.1.2.	Adaptation du logiciel GARDÉNIA aux systèmes karstiques	27
	<i>4.1.3</i> .	Adaptation du logiciel EauDyssée	
	4.2. Adap	otation des applications spatialisées : quelques généralités	28
	4.2.1.	Différences liées à l'utilisation de SAFRAN	
	4.2.2.	Différences liées à l'utilisation de SURFEX	
	4.2.3.	Critères statistiques pour évaluer les simulations :	
	4.3. Adap	otation des applications spatialisées sous MARTHE	29
	<i>4.3.1</i> .	Plaine d'Alsace Sud	
	4.3.2.	Nord-Pas-de-Calais	31
	<i>4.3.3</i> .	Nappes du Jurassique du Poitou-Charentes	34
	4.3.4.	Nappes de la plaine de Caen et du bassin de la Dives	
	4.3.5.	Nappe de la Somme	
	4.4. Les r	nodèles spatialisés sous Eau-Dyssée	40
	<i>4.4.1</i> .	Basse-Normandie	41
	4.4.2.	Seine	
	<i>4.4.3</i> .	Seine-Eure	43
	4.4.4.	Seine-Oise	44
	4.4.5.	Marne-Loing	
	<i>4.4.6</i> .	Marne-Oise	
	4.4.7.	Somme	49

	4.4.8.	<i>Loire</i>
	4.5.	Bassins karstiques simulés par GARDENIA51
	4.5.1.	La Fontaine de Vaucluse51
	4.5.2.	La Souloise aux sources des Gillardes52
	4.5.3.	La source du Doubs54
	4.5.4.	La Loue à Mouthier55
	4.5.5.	La source du Lison à Nans sous Sainte-Anne
	4.5.6.	Système des Cent Fonts58
	4.5.7.	Source des Fontanilles59
5.	Les pre	emières évaluations d'Aqui-FR60
	5.1.	Evaluation pluriannuelle60
	5.1.1. piézoi	Analyse des performances statistiques sur la reproduction des charges métriques 61
	5.1.2.	Analyse des performances statistiques sur la reproduction des débits62
	5.1.3.	Conclusion sur l'évaluation pluriannuelle
	5.2.	Retour d'expérience : cas de la crue sur les bassins Seine et Loire en 201665
6.	Dévelo	ppements associés67
	6.1.	Développement de modélisations sur les aquifères de socle
	6.1.1.	Contexte et questions68
	6.1.2.	<i>Méthode</i>
	6.1.3.	Résultats70
	<i>6.1.4</i> .	Implications sur l'approche de modélisation70
	6.1.5.	Méthode de calibration71
	6.1.6. socle	<i>Conclusion sur le développement de la modélisation des aquifères de</i> 71
	6.2. 6 3	Développement des conditions initiales par inversion
	621	Logislation des points de prélèvements
	<i>6.3.2</i> .	Impact de la méconnaissance des prélèvements sur la piézométrie77
7.	Perspe	ctives à court terme (financement acquis)78
	7.1.	Comparaison Aqui-FR / GRACE
	7.2.	Intégration réseau hydro RHT80
	7.3. 7.4.	Impact CC sur ressource en eau incluant les nappes (stage M2)
8.	Dévelo	ppements/études à réaliser84
	8.1. 8.2.	Intégration de nouvelles applications + nouveaux modèles (tous)
	ues s 8.3	Prévision saisonnière
	8.4.	Avis des utilisateurs et implications dans le suivi
	8.5.	Amélioration de SURFEX
9	Conclu	sion
10.	Glossair	e
11.	Sigles &	Abréviations Erreur ! Signet non défini.

12.	Bibliographie	92
13.	Table des illustrations	97
14.	Annexe 1 : Titre de l'annexe	102
15.	Remerciements	102

PLATEFORME DE MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE NATIONALE AQUI-FR

1. Introduction

Le projet Agui-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 concu comme un outil de valorisation des travaux de modélisation hydrogéologiques réalisés en France. L'exploitation des modélisations hydrogéologiques en mode prévisions allant de la moyenne échéance (~10-15 jours) à l'échéance saisonnière (à minima 3 mois et pouvant aller jusqu'à 6 mois) offrira des nouvelles informations qui permettront d'anticiper l'évolution des ressources en eau. Ces prévisions pourront être analysées en les comparant à des situations délà rencontrées grâce à des simulations rétrospectives de longue durée (ré-analyses historiques). Les conditions initiales seront issues d'un suivi en temps réel, corrigées si possible par des méthodes d'assimilations de données qui sont développées et testées dans le cadre de ce projet. De plus, Aqui-FR pourra être assez facilement mobilisé pour des projections climatiques à l'échelle nationale, permettant ainsi une estimation des évolutions attendues du fait du changement climatique, sans prise en compte de l'adaptation¹, en lien avec les activités de service climatique. 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, et permettront de couvrir un grand nombre d'évènements passés, et d'estimer les normales et les distributions statistiques. Le suivi en temps réel permettra 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, en lien avec les activités de service climatique.

Pour cela, la plateforme Aqui-FR sera déployée sur les machines opérationnelles de Météo-France² et bénéficiera de l'appui de Météo-France (équipe DCSC/AVH, DSI) pour son suivi quotidien. La première phase du projet a eu pour objectifs de montrer la faisabilité d'un tel outil via la construction de la structure informatique Aqui-FR et les premières évaluations, ainsi que de s'assurer des

¹ Les études sur l'adaptation au changement climatique seront de préférences menées avec les gestionnaires et les modélisateurs locaux qui sont plus aptes à construire des scénarios d'adaptation adéquats et à intégrer les méthodes d'adaptations dans les applications hydrogéologiques régionales.

² http://www.meteofrance.fr/documents/10192/4219094/DP_supercalculateur/0766fada-87f6-4703-a710-53c73cee49b3

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 Aqui-FR a nécessité plusieurs étapes: i) rassembler les modèles hydrogéologiques³ 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, iv) recaler les applications pour les rendre plus compatibles avec ce nouveau forçage.

Ce travail s'est accompagné d'un effort de traitement des données d'entrée et de sorties. En entrée, un aspect important est l'intégration des prélèvements en nappe sur les périodes simulées, données difficiles à acquérir sur de longues périodes et pour les périodes récentes (délais de 2 ans). La gestion des variables en sortie nécessite un travail spécifique, en tenant compte d'une part des variables d'intérêts pour les gestionnaires (variable, profondeur ou couche géologique, période d'estimation, domaine d'estimation....) et des contraintes numériques (volumes disques, temps de calcul).

En parallèle, deux efforts de développement ont été menés, afin i) d'inclure une représentation des aquifères de socle, avec des expérimentations numériques réalisées sur les aquifères bretons et ii) de permettre une correction des états initiaux des nappes en intégrant les données piézométriques disponibles.

Afin de décrire ces différents points, nous avons souhaité recadrer le projet Aqui-FR dans un contexte international en analysant des projets similaires.

2. Position du projet Aqui-FR dans la communauté internationale

Il semble exister encore peu d'approches de modélisation nationale des aquifères utilisées pour du suivi ou de la prévision de la ressource en eau⁴. Ainsi, nous avons trouvé seulement quelques approches similaires à l'international, dont la plupart sont limitées à une étude rétrospective, parfois associée à un suivi en temps réel ou différé, ou à des projections climatiques.

L'étude de Maxwell et al. (2015) se distingue, car elle s'étend sur un très grand domaine correspondant à la majeur partie des Etats-Unis (6.3 millions de km²) avec un modèle hydrogéologique 3D (Parflow) à haute résolution spatiale (maille de 1 km²), mais en régime permanent. Le modèle intègre 5 couches verticales à des profondeurs fixées (4 couches sur le 1er mètre, puis la 5^{ième} de 1 à 100m de profondeur), ce qui peut ne pas être très compatible avec une gestion des aquifères. Cette étude en régime permanent a surtout un rôle démonstratif sur la possibilité de réaliser de telles simulations. Ainsi, il est précisé que l'application a tourné sur un supercalculateur (plus de 16 000 cœurs) avec un temps calcul d'une semaine (3.5 millions d'heure CPU...).

Pachocka et al. 2015 présentent une modélisation des systèmes aquifères du Royaume Uni. L'étude est réalisée avec un modèle multicouche, utilisant un code de calcul en différences finies, discrétisé en maille de 5km de côté. Elle est menée par le service géologique anglais qui présente des résultats en termes de débits sur une dizaine d'années (de 1975 à 1985), et semble être la première étape d'un système qui vise à être utilisé pour la gestion de la ressource en eau et les études d'impact du changement climatique.

Deux autres pays européens sont plus avancés sur le développement de modélisations hydrogéologiques nationales, le Danemark (Henriksen et al. 2003) et les Pays-Bas (De Lange et al. 2014). Dans les deux cas, la volonté de posséder des outils de diagnostics communs entre les

³ 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.

⁴Cependant, 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.

différents acteurs de l'eau a conduit au développement d'un nouveau modèle, avec donc une structure informatique homogène à l'échelle nationale, 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 (Højberg et al. 2013).

Le modèle danois DK-model (<u>http://vandmodel.dk/vm/uk/index.html</u>) est basé sur le modèle 3D MIKE-SHE, et est constitué de 7 sous-modèles correspondant aux différentes îles, avec une couverture totale de 43 000km² représentée à 500 m de résolution et 9 à 11 niveaux en profondeur. Le modèle hydrologique national hollandais (NHI, <u>www.nhi.nu</u>) 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, i.e. la surface, la zone non saturée, les rivières, ou les nappes (simulées par Modflow).

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 des applications attendue de ce modèle est la réalisation d'un suivi en temps réel (He et al., 2016). A cette fin, un prototype a été réalisé incluant des résultats en termes de contenu en eau du sol, de débit et de profondeur des nappes. Les gestionnaires de l'eau ont été consultés sur l'utilité d'un tel outil. Plus de la moitié des personnes interrogées ont répondu que cette modélisation en temps réel serait utile, mais, une minorité (30%) pense pouvoir l'utiliser efficacement rapidement

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 accessibles via un site internet (<u>https://www.twdb.texas.gov/groundwater/</u>) ainsi que les retours des gestionnaires. La plupart de ces modélisations reposent 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 quelques 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 distribués ne semble être utilisé pour de la prévision. Mackay et al. (2015) présentent une des rares études dédiées à la prévision saisonnière du niveau des nappes. Il se base sur un modèle conceptuel 1D qui utilise les prévisions saisonnières des pluies fournies par le centre météorologique anglais. Cette étude conclue qu'il y a une prévisibilité à 3 mois d'échéances, avec notamment des scores meilleurs que ceux obtenus avec la persistance.

Ces études, ainsi que les travaux menés à Météo-France avec l'outil SIM (qui inclut déjà des modélisations d'aquifères même si les analyses hydrologiques se focalisent uniquement sur les eaux de surface, c.f. sections 3.1.3 et 3.1.4) en prévision à moyenne échéance (Coustau et al., 2015) et saisonnière (Singla et al., 2012) confirment l'intérêt et la faisabilité du projet Aqui-FR.

3. Etat d'avancement de la plateforme Aqui-FR

3.1. Les logiciels de modélisation inclus

L'application Aqui-FR contient 3 principaux éléments : le coupleur OpenPALM, les modèles hydrogéologiques, et le schéma de surface SURFEX. Les données météorologiques SAFRAN sont utilisées dans Aqui-FR et sont donc présentées brièvement.

3.1.1. <u>Le coupleur OpenPALM</u>

Le coupleur **OpenPALM** développé au CERFACS (Morel et al., 2013, Duchaine et al., 2015) permet de gérer des couplages dynamiques entre modèles. Dans le cadre de notre application, il est particulièrement intéressant car il permet de gérer à la fois les échanges entre modèles et la parallélisation des applications. OpenPALM contient plusieurs composantes :

- la librairie PALM qui permet de coupler différentes unités de calcul (modèles, fonctions ou unités algorithmiques, écrites en différent langage informatique – dans Aqui-FR, à ce stade principalement fortran, python et shell), en échangeant les différentes informations entre ces unités via la mémoire et non via des fichiers.
- l'interface graphique PréPALM permet de mettre en place les unités, de connecter les échanges entre les différentes unités et de les visualiser. Comme on le verra plus loin (section 3.6.3), Aqui-FR peut être utilisé sous différentes configurations, avec un nombre d'applications variables. Cela correspond alors à des configurations différentes de PréPalm

3.1.2. <u>Les modèles hydrogéologiques</u>

A ce jour, trois modèles hydrogéologiques sont intégrés dans Aqui-FR : Le modèle hydroclimatique conceptuel 1D GARDENIA (Thiéry 2014), les modèles hydrogéologiques distribués à différences finies MARTHE (Thiéry 2015a) et Modcou (Ledoux et al., 1989) dans sa version EauDyssée. Ces trois modèles sont brièvement décrits ci-dessous :

GARDENIA

GARDENIA (<u>http://gardenia.brgm.fr</u>) est un modèle hydrologique global de bassins versants. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois conceptuelles. Ces lois correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs représentant différents compartiments hydrologiques (sol, zone non saturée et nappe) se vidant les uns dans les autres. Il se base en effet sur l'analogie entre l'allure exponentielle de la vidange d'un réservoir et celle du tarissement d'une rivière, d'une source, ou la baisse du niveau piézométrique d'une nappe souterraine à l'aide de fonctions de transfert non linéaires (Thiéry, 2014, 2015c).

Dans Aqui-FR, GARDENIA est utilisé pour traiter les aquifères karstiques. Cela a nécessité un développement spécifique qui est détaillé section 4.1.2.

Par ailleurs, GARDENIA est inclus dans MARTHE pour lequel il estime le bilan hydrique à partir des données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle.

MARTHE

Le modèle hydrogéologique MARTHE (Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements) est un logiciel développé par le BRGM (<u>http://marthe.brgm.fr/</u>, Thiéry 2015abc) est développé au BRGM depuis les années 1990. Il permet de modéliser les hydrosystèmes en intégrant de manière couplée les écoulements souterrains, le bilan hydroclimatique (via GARDENIA) et les écoulements en rivières. MARTHE permet la modélisation de systèmes régionaux multicouches de plusieurs milliers de kilomètres carrés d'extension. Il dispose de nombreuses fonctionnalités⁵. Le code est écrit en fortran90 et a dû faire l'objet de modifications mineures afin d'être compilé sur des plateformes linux/unix. Pour Aqui-FR, une version simplifiée de MARTHE a été intégrée (cf section 4.1.1) De plus, il a été nécessaire d'intégrer dans le code quelques éléments afin de gérer les échanges avec OpenPALM (cf section 3.3) et d'adapter le code pour l'utilisation des sorties du schéma de surface SURFEX (section 4.1.1). **EauDyssée**

Le modèle hydrogéologique Modcou (Ledoux et al., 1989) est développé à Mines-ParisTech également depuis la fin des années 1980. Il a été recodé en fortran90 afin d'améliorer sa modularité.

⁵ Voir aussi <u>http://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/marthe-logiciel-modelisation-</u> ecoulements).

Cette version renommée EauDyssée inclus des modules externe comme par exemple le modèle de routage en rivière RAPID (David et al., 2015). Il permet de représenter des hydrosystèmes multicouches via la méthode des différences finies, de représenter dynamiquement les échanges nappes-rivières et dans la zone non saturée (Saleh et al., 2011, Philippe et al., 2011). Le code EauDyssée a inclus dès sa conception des instructions OpenPALM (Habets et al., 2010), ce qui a facilité son intégration dans Aqui-FR.

3.1.3. Le schéma de surface SURFEX

SURFEX⁶ (Masson et al., 2013) est un schéma de surface dont l'objectif est la simulation des flux d'eau et d'énergie à l'interface surface/atmosphère. SURFEX est conçu pour être couplé à des modèles météorologiques de prévision et de climat et couvrant ainsi une large gamme d'échelles spatio-temporelles (pas d'espace de 100m à plus de 100km ; pas de temps de quelques secondes à 30 minutes). SURFEX rassemble plusieurs schémas physiques permettant de simuler le fonctionnement des surfaces urbanisées ainsi que celui des composantes principales du cycle de l'eau : les mers et océans, les lacs, le sol et la végétation.



Figure 2 : Représentation du schéma de surface ISBA simulant les couverts naturels dans SURFEX : trois compartiments sont représentés : le sol, la végétation, et le manteau neigeux. Le sol est divisé en plusieurs couches d'épaisseurs z_i pour lesquelles les températures, l'humidité du sol et le potentiel matriciel sont simulés (Ti, Wi, Ψ i), ainsi que les flux d'eau entre les couches F_i . F_N est le flux infiltré à la base du sol, contribuant donc à la recharge des nappes. Le ruissellement en surface (Qs) est simulé lorsque les précipitations ne peuvent plus s'infiltrer dans les sols. La végétation est représentée en prenant en compte son développement dans l'année (indice foliaire et fraction de végétation). Le manteau neigeux est simulé via une approche multicouche en intégrant sa compaction et sa fonte (Sm). Le bilan d'énergie est estimé à partir des flux d'énergie incidents, et répartis en flux de chaleurs sensible, latente et de conduction (H, LE, G). Le flux de chaleur latente est la somme de l'évaporation du sol nu, de la transpiration de la végétation, de l'évaporation des pluies interceptées par la végétation, et de la sublimation de la neige et de la glace du sol (Esoil, Etransp, Ecanop, Ssnow).

⁶ http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/

Dans le cadre du projet Aqui-FR, seuls les processus liés au sol et à la végétation sont pris en compte au travers du schéma physique ISBA (Interaction Sol Biosphère Atmosphère), qui peut également traiter les flux de carbone, poussières, et espèce chimique (Figure 2). ISBA a été développé dans les années 1980 par Noilhan et Planton (1989) et a évolué de façon permanente : les transferts d'eau et de chaleur (incluant le gel de l'eau du sol) sont simulés via une approche multicouche et la résolution de l'équation de Richards (Boone et al., 2000; Decharme et al., 2011). Le cycle annuel de la végétation peut être soit prescrit, soit estimé en lien avec le bilan de carbone. L'évapotranspiration est la somme de plusieurs composantes : transpiration de la végétation, évaporation du sol nu. sublimation de la neige et de la glace du sol, évaporation de l'eau interceptée par la végétation. Un bilan d'énergie spécifique est calculé sur la neige, et la représentation du manteau neigeux prend en compte les effets de gel et dégel de l'eau liquide. ISBA résout explicitement l'équation de Richards régissant l'évolution du contenu en eau du sol en zone non-saturée sur plusieurs couches et simule de nombreuses variables pronostiques ou diagnostiques, en particulier humidités et températures du sol à différents niveaux, flux de chaleur sensible et latente, flux de conduction, épaisseur et équivalent en eau du manteau neigeux (Figure 2). Ces variables peuvent être alors être comparées à des observations in situ voire de télédétection (cf http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article146 pour des exemples).

C'est cette version, utilisant le forçage météorologique SAFRAN (section 3.1.4) qui fournit la pluie efficace transmise aux modèles hydrogéologiques inclus dans la plate-forme Aqui-FR.

On notera que SAFRAN, ISBA et MODCOU sont actuellement utilisés au sein de la chaîne opérationnelle SIM de Météo-France pour le suivi hydroclimatique (Habets et al. 2008, Soubeyroux et al., 2008)

Il est prévu d'inclure une rétroaction des nappes vers la surface, via les remontées capillaires, en se basant sur le travail réalisé pour le modèle de climat par Vergnes et al., 2012. Cependant, cette rétroaction n'est pas encore activée, et actuellement dans Aqui-FR, l'estimation des flux de surface par SURFEX est indépendante de la présence des nappes. Ainsi, pour simplifier, l'application actuelle lit ces flux dans des fichiers pré-calculés. SURFEX n'est donc pas à ce stade inclus dans la plateforme Aqui-FR.

3.1.4. L'analyse météorologique SAFRAN

Le module d'analyse objective SAFRAN (Durand et al, 1993), initialement développé au CNRM/CEN pour des besoins d'estimation opérationnelle des risques d'avalanche en zone montagneuse, est une application particulièrement bien adaptée pour alimenter les modèles de surface à base physique nécessitant des données météorologiques complètes. Il est aussi utilisé opérationnellement à Météo-France. SAFRAN utilise l'ensemble des stations pluviométriques disponibles, et reproduit pour chaque zone SAFRAN considérées comme météorologiquement homogène une estimation des précipitations par tranche d'altitude de 300m, profil qui est ensuite interpolé sur une grille régulière de 8km de côté. Il y a toujours au moins 2 postes pluviométriques par zone SAFRAN, et au maximum 10 postes. Au vu de la forte variabilité spatiale et temporelle des précipitations, il y a des différences entre les précipitations observées en un point et les analyses SAFRAN sur la maille correspondante. Cependant, la fiabilité de l'analyse SAFRAN a été évaluée plusieurs fois (Quintana-Seguí et al. 2008; Vidal et al. 2009) et la qualité de reconstruction des précipitations est bonne. SAFRAN analyse ensuite les températures de l'air, l'humidité de l'air, le vent et la nébulosité, et en déduit les rayonnements solaire et infra-rouge incidents.

3.2. Les applications hydrogéologiques incluses à ce jour

La plateforme Aqui-FR inclut à ce jour 13 applications distribuées et 6 applications karstiques couvrant un peu plus de 149 000 km², le tout simulé par un ensemble de 3 modèles hydrogéologiques. Certains domaines sont représentés par plusieurs applications. L'ensemble inclut un total de 57 couches aquifères, pour un total de plus de 950000 mailles. La Figure 3 présente l'extension du domaine couvert actuellement dans Aqui-FR, et le Tableau 1 donne les informations sur les applications hydrogéologiques intégrées.



Figure 3 : Extension des couches aquifères représentées dans Aqui-FR

Tableau 1 : Information sur les applications hydrogéologiques distribuées inclus dans Aqui-FR : nombre de couches souterraine
(aquifères et/ou aquitards), nombre de mailles souterraines sur lesquelles sont simulées les charges piézométriques, nombre de
mailles rivières sur lesquelles sont simulées les débits, nom du modèle hydrogéologique et références

Nom	Cou	Mailles	Mailles	Modèle	Références
	ches	souterraines	rivières		
Basse Normandie	4	37 667	12 371	EauDyssée	Thierion 2007
Basse Normandie	10	93 800	1 523	MARTHE	Croiset et al., 2013
Loire	3	37 620	16 141	EauDyssée	Monteil, 2011
Marne Loing	4	66 235	9 821	EauDyssée	Viennot, Abasq 2013
Marne-Oise	2	45 904	8 762	EauDyssée	Viennot, Abasq 2013
Nord Pas de Calais	10	226 077	3 317	MARTHE	Bessière et al., 2015
Poitou Charente	8	90 084	2 481	MARTHE	Douez et al., 2011
Plaine Sud d'Alsace	3	40 947	1 018	MARTHE	Noyer et Elsass 2006
Seine	6	41 609	6 481	EauDyssée	Viennot 2009
Seine –Eure	1	57 306	6 980	EauDyssée	Viennot, Abasq 2013
Seine-Oise	4	87 178	13 021	EauDyssée	Viennot, Abasq 2013
Somme	1	66924	10 871	MARTHE	Amraoui et al., 2014
Somme	1	63 226	10 871	EauDyssée	Korkmaz, 2007

La plateforme inclut également les karsts de Fontaine du Vaucluse, la Loue, le Lison, les Gillardes, les sources du Doubs, les Cents Fonts et les Fontanilles.

3.3. L'intégration des codes de calcul dans le coupleur OpenPALM

La structure OpenPALM d'Aqui-FR est aujourd'hui composée de 5 branches⁷ et possède deux niveaux de calculs en parallèle. Ainsi, chaque branche tourne en parallèle, et parmi celles-ci, trois incluent des unités qui tournent également en parallèle.



Figure 4 : Schéma de la structure OpenPALM d'Aqui-FR telle que visualisée dans PrePALM. Chacune des branches est représentée par une couleur différente. Les communications entre les branches sont représentées par des traits pointillés dont la couleur donne une information sur le type de variable (scalaire, vecteur...) et l'épaisseur sur la nature parallèle ou non de la communication.

- La branche SURFEX, en haut, inclut les unités read_namelist et bilan_hydrique_Surfex, et consiste aujourd'hui essentiellement en la lecture du bilan hydrique de surface produit par SURFEX et de données atmosphériques produites par SAFRAN. Ces données sont ensuite transmises aux applications hydrogéologiques. Ainsi, toutes les applications hydrogéologiques sont alimentées par des flux estimés de façon homogène sur la France. De plus, cette branche gère et transmet la durée des simulations ainsi que les informations sur la période simulée qui permet de gérer les données de prélèvements en fonction de la date. Ces informations peuvent changer en fonction de l'usage en mode rétrospectif, prévision ou projection climatique, et sont renseignées lors du lancement de l'application par un script de lancement (section 3.6.3). Cette branche inclura à termes le code SURFEX afin de simuler le bilan hydrique en surface en tenant compte des rétroactions avec les nappes.
- Les branches ODIC, MART et GARD intègrent les logiciels hydrogéologiques EauDyssée, MARTHE et GARDENIA. Ces branches sont parallélisées sur le nombre d'applications à simuler, ce qui est représenté par la superposition de deux cadres décalés sur la Figure 4, le

⁷Une branche est représentée dans OpenPALM par une couleur dédiée. Elle commence par une boîte incluant la mention « start on » et termine par une boite portant la mention « end ». Chaque branche tourne en parallèle. Une branche peut contenir des unités de calcul, mais aussi, des instructions shell ou des lignes de code.

deuxième portant mention d'une variable indiquant le nombre d'applications intégrées en parallèle (nb_appli_xxx avec xxx pour odic, mart ou gard).

 Enfin la branche Synchro, permet avant tout de synchroniser les applications de calcul entres elles, puis de mettre en forme les sorties. Cette mise en forme est réalisée par l'unité pre_postproc, écrite en langage python, qui a été développée afin de répondre aux besoins du projet tout en optimisant le temps calcul et l'espace mémoire. Ce dernier point est développé plus en détail dans la section 3.5.

3.4. Structuration de la plateforme Aqui-FR

La structuration de la plateforme est importante, car elle doit permettre une grande souplesse à la fois sur la gestion des logiciels, des applications et des post-traitements. La structuration retenue est présentée Figure 5.

~/aqui-fr |--- Forcage |--- EauDyssee |--- Marthe |--- Gardenia |--- Synchro |--- Applications |--- Data |--- Palm |--- MY_RUN |--- Results |--- External |--- LIB

Figure 5 : Structure du répertoire Aqui-FR.

Le répertoire aqui-fr contient l'ensemble des éléments nécessaires au fonctionnement de la plateforme Agui-FR. Les logiciels correspondants aux 5 branches décrites précédemment sont inclus dans les 5 premiers sous-répertoires. Dans le répertoire « Palm » se trouvent les fichiers nécessaires à la compilation de la plateforme Aqui-FR par OpenPALM. Le répertoire « Applications » contient l'ensemble des données et paramètres utilisés pour chacune des 19 applications actuellement incluses, dans autant de sous répertoires différents. De plus, toutes les applications MARTHE sont dupliquées pour permettre leur fonctionnement soit avec le forçage atmosphérique SAFRAN soit avec les flux SURFEX, ce qui implique des données supplémentaires et des jeux de paramètres différents suite à la calibration (cf. section 4.1.1). Le répertoire « Data » contient les données utiles pour l'évaluation des simulations et le post-traitement : maillage, position des stations de mesures et observations⁸. Le répertoire « MY_RUN » inclut l'ensemble des scripts permettant de lancer une application en tenant compte de la période simulée en adaptant les conditions initiales et les conditions aux limites, et en adoptant le nombre d'applications en fonction des instructions de l'utilisateur. Ces scripts vont générer un répertoire dédié pour chaque nouvelle simulation avec l'ensemble des résultats. Le répertoire « Results » contient l'ensemble des codes pythons permettant le post-traitement et l'analyse des résultats. Enfin, le répertoire « External » contient des fichiers archives des différents programmes nécessaires au fonctionnement d'Aqui-FR. Ces programmes sont installés dans le répertoire « LIB », qui contient également des modules python propres à Aqui-FR.

Cette structuration permet de mettre à jour facilement chacune des applications, ainsi que chacun des logiciels. Le rajout de nouvelles applications est également simplifié, même s'il nécessite la mise en cohérence des bases de données pour le post-traitement.

3.5. Le post-traitement

Le post-traitement a pour objectif de produire les résultats et indicateurs jugés pertinents pour Aqui-

⁸ On note cependant que les observations ne sont pas stockées sur le gestionnaire de version (section 3.6.2) afin de réduire la taille mémoire du dépôt, en revanche des scripts sont fournis pour leur téléchargement.

FR. Cette étape est importante, et a nécessité un investissement conséquent. Ainsi, la chaine de posttraitement développée se substitue totalement à celles utilisées par chacun des logiciels hydrogéologiques afin d'optimiser la place mémoire et d'assurer une homogénéité des sorties. Pour cela, le post-traitement se déroule en deux parties.

Une première partie a lieu au sein de l'application Aqui-FR, dans l'unité python 'pre_postproc.py' de la branche « Synchro ». Le rôle de cette unité, en plus de synchroniser à chaque pas de temps (et donc chaque jour) toutes les applications de calcul entre elles, est d'effectuer une mise en forme des sorties en fonction des besoins précis de la simulation et de les mettre à disposition dans le sous-répertoire « Output » contenu au sein du répertoire de l'expérience. En particulier, dans le but de limiter le volume des sorties en mode ré-analyse ou encore en mode projection climatique, il est possible de choisir la fréquence et le domaine des sorties souhaitées. Ce choix se déroule au niveau d'un fichier texte 'output_selections.txt', présent dans le répertoire « MY_RUN », qui est lu par la branche Synchro, et qui doit être modifié manuellement avant de lancer une simulation. A ce stade, toutes les combinaisons possibles entre les deux choix extrêmes suivants (en excluant celui de ne rien garder) sont offertes :

- Conserver le maximum d'information, ce qui nécessite d'écrire tous les champs (charge piézométrique, débit et échange nappe-rivière) à chaque pas de temps et sur toutes les mailles du domaine, et donc un espace disque très important (voir section 3.6.4).
- Ne conserver que les moyennes mensuelles des champs spatialisés et les charges piézométriques uniquement sur les mailles affleurantes, ainsi que les chroniques simulées aux stations de mesures, ou en tout autre point d'intérêt. Les moyennes mensuelles sont alors calculées au fur et à mesure par le code python, réduisant mécaniquement d'un facteur 30 le volume des sorties. Les chroniques de débits et de charges piézométriques simulées sont extraites à chaque point spécifié préalablement dans un fichier contenant les indices de maille pour chaque application dans le répertoire « Data ». Des scripts python sont disponibles pour obtenir les indices de maille pour chaque application à partir des coordonnées géographiques. Ces points correspondent généralement aux points de mesures disponibles dans les BD Hydro et Ades, mais, cela peut poser des problèmes lorsque les points de mesures ne sont correspondent pas par exemple au bon aquifère, ou lorsque que la qualité de la mesure est douteuse (piézomètres bouchés par exemple). A termes, on utilisera uniquement les points de comparaison jugés pertinents.

Le développement de cette première partie du post-traitement s'est relevé assez complexe, car il a fallu intégrer la possibilité d'avoir une configuration variable des simulations, particulièrement en termes du nombre d'applications. Par ailleurs, les logiciels tournant en parallèle sur chaque application, il n'est pas possible de déterminer dans quel ordre les informations seront disponibles. Pour pallier cela, OpenPALM utilise un distributeur qui permet de regrouper en un seul grand vecteur les variables de chaque application tournant en parallèle. Une des difficultés est que la taille des domaines et leur nombre doivent être renseignés « en dur » au sein de PréPALM, ce qui limite de fait la souplesse d'utilisation. Le problème a été résolu en incluant dans le script de lancement des sousscripts python permettant de modifier les constantes PALM (nombres d'applications, de mailles souterraines et de mailles rivières) avant sa compilation. Cette gymnastique assez complexe (mélangeant des scripts shell et pythons associés à une base de données SQLite⁹, des scripts Tcl¹⁰ et du fortran) a pu être testée avec succès sur différentes configurations (PC linux, serveurs et supercalculateur) grâce au soutien technique des spécialistes et s'est révélée très robuste en termes de portage d'une machine à une autre.

La deuxième partie du post-traitement est plus classique, puisqu'elle consiste à exploiter les sorties d'Aqui-FR présentées ci-dessus, et à réaliser des diagnostics et des comparaisons avec les observations (s'il y a lieu) ou avec d'autres simulations. En pratique, cette partie ne s'effectuera pas sur les serveurs de calcul ou supercalculateur, mais sur les PC linux sur lequel on dispose d'un accès graphique. La difficulté résulte alors de l'architecture variable des simulations, à la fois sur le nombre d'applications incluses et sur le type de simulation (ré-analyse, prévision, projection climatique). A ce stade, le post-traitement gère principalement la ré-analyse. Il est réalisé par des codes pythons disponibles dans le répertoire « Results » et qui traite à la fois les informations et observations

⁹ https://www.sqlite.org/

¹⁰ https://fr.wikipedia.org/wiki/Tool_Command_Language

contenues dans « Data », et les simulations contenues dans le répertoire Output de l'expérience traitée.



Figure 6 : Ecarts (ou anomalies) de charge sur l'ensemble des couches affleurantes, pour chaque période simulée par rapport à la moyenne de la charge sur l'ensemble des périodes.

Cette partie du post-traitement a été développée afin de remplir deux objectifs : la représentation des scores de performances (voir section 5.1), et la représentation graphique de chroniques, de cartes, ou de scores. Ainsi, il est possible de tracer des cartes instantanées ou moyennées de charges piézométriques et de débits, ainsi que des chroniques temporelles de ces variables. Dans le but d'une analyse multi-annuelles de l'évolution de la ressource en eau dans les aquifères simulés, il est possible de sortir des cartes d'écart de la charge par rapport à la moyenne sur une période de référence. On voit en particulier sur la *Figure 6* l'anomalie de charge sur les couches affleurantes par rapport à la valeur moyenne sur la totalité de la simulation. Cela nous permet entre autres, de visualiser les hétérogénéités spatiales de l'état moyen d'une nappe pour différentes périodes.

La cartographie avec Aqui-FR peut être complexe à interpréter du fait de la superposition des couches aquifères, et de la superposition de certaines applications hydrogéologiques (par exemple : le bassin de la Somme est simulé par MARTHE et EauDyssée, la nappe de Beauce est simulée à la fois par les applications EauDyssée Seine et Loire...). Il est ainsi possible de ne représsenter que les couches affleurantes tout comme n'importe quelle autre couche pour chaque application. Il est également possible de choisir quelles applications seront mises en avant en cas de superposition. Enfin, des scripts permettant de sortir des animations vidéo ont également été écrits dans le but de faciliter la visualisation des évolutions spatiales dans le temps, notamment utile en cas de projection climatique (un exemple est donné sur le site web : https://www.metis.upmc.fr/~aqui-fr/)

D'un point de vue technique, les codes python permettant les tracés cartographiques s'appuient sur des librairies spécifiques à Aqui-FR et utilisant en autres la librairie matplolib. La répartition spatiale des couches par shapefile a été abandonnée car elle était assez volumineuse en mémoire, et peu efficace en temps de calcul. Cependant des codes python ont été développés pour générer des shapefiles à partir des fichiers ascii en fonction du besoin de l'utilisateur afin de pouvoir également visualiser les sorties dans un SIG classique.

3.6. Points techniques

3.6.1. Prises en compte du multi-annuel et des prélèvements

Aqui-FR doit pouvoir fonctionner sur des périodes multi-annuelles de durées diverses : environ 60 ans pour des réanalyses, mais, 150 ans pour des projections climatiques, ou 50 fois 10 jours pour des

prévisions à moyenne échéance. Le temps calcul des simulations pouvant être important, afin de limiter les risques de coupure, et afin de raccourcir le temps d'attente sur les supercalculateurs, les simulations sont scindées par période. Ainsi, il est nécessaire de générer pour chaque période les fichiers décrivant les conditions de la période, notamment, en termes de prélèvements ou de débits imposés. Ce travail avait été accompli lors du passage de la version Modcou à EauDyssée, mais, restait à effectuer pour MARTHE. Ainsi, MARTHE possède un fichier spécifique, nommé « fichier pas de temps » qui indique l'ensemble des modifications pouvant arriver à chaque pas de temps. Ces modifications peuvent être une évolution du volume prélevé en nappe, une évolution des débits imposés, ou toute autre sorte d'information. En général, ce fichier est constitué une fois pour toute pour une application donnée. Cependant, l'incorporation des applications MARTHE au sein de la structure d'Aqui-FR a nécessité de générer un nouveau fichier « pas de temps » en fonction des contraintes de la simulation Aqui-FR. A chaque lancement d'une simulation Aqui-FR, un premier utilitaire a été développé pour générer automatiquement des fichiers « pas de temps » pour chaque application selon le nombre d'années demandé par l'utilisateur. Un deuxième utilitaire a été développé pour ensuite intervenir dans la génération des fichiers de prélèvements en rivière et en nappe pour chaque modèle selon la période demandée par l'utilisateur au début de la simulation. Ces fichiers de prélèvements standardisés sont générés à partir d'une base de données construite au préalable à partir des données de prélèvements bruts disponibles pour chaque modèle. L'avantage de cette approche est qu'il suffit de mettre à jour cette base de données de prélèvement pour intégrer les potentielles mises à jour spécifiques à chaque application. Cette approche flexible sera particulièrement adaptée pour la mise à jour des prélèvements dans le cadre d'une utilisation opérationnelle.

3.6.2. Gestionnaire de version

Afin d'être accessible à tous les partenaires, la plateforme Aqui-FR est partagée sur un serveur de version qui permet le partage et le développement. Le choix avait été fait initialement d'héberger la plateforme sur la forge du BRGM, sous Subversion, mais les lenteurs d'accès nous ont poussé à transférer la plateforme sur la forge de l'enseignement supérieur et de la recherche SourceSup (<u>https://sourcesup.renater.fr</u>). Le dépôt est à présent géré par le gestionnaire de version Git, et l'historique des modifications de subversion ne sera sans doute pas conservé. Pour accéder aux sources, il faut se créer un compte sur le site de SourceSup et demander à rejoindre le projet. Toutes les informations utiles concernant cette démarche sont à retrouver sur le site de SourceSup.

3.6.3. Scripts d'installation et de lancement

Dans le but de simplifier l'installation et la mise à jour d'Aqui-FR, un script d'installation a été développé. Ce script permet notamment de gérer les différentes interdépendances entre les librairies. Le script prend notamment en charge l'installation des modules python 'mpi4py' et 'cython', nécessaires au fonctionnement de l'unité en python inclu dans la branche Synchro (Figure 4). Afin d'assurer leur compatibilité, OpenPALM et PrePALM sont également installés ensemble dans le répertoire « LIB ». Le script ne prend cependant pas en charge l'installation d'une implémentation MPI (Message Passing Interface) permettant le calcul en parallèle. Cette dernière doit être effectuée de manière indépendante avant l'installation d'Aqui-FR et selon la version de MPI installée, il peut être nécessaire de modifier les liens dans le fichier Make.include. Le script d'installation insère également les variables d'environnement dans le fichier de configuration « .bashrc ». Cela peut être considéré comme relativement intrusif, mais permet une installation aisée du code. Un script de désinstallation est également disponible, celui-ci permettant notamment d'enlever les instructions propres à Aqui-FR dans le fichier de configuration « .bashrc ».

D'autre part, afin de faciliter les simulations Aqui-FR, un script de lancement 'run_aquifr.ksh' (présent dans le répertoire MY_RUN) a été créé. Il permet notamment de piloter la compilation des fichiers OpenPALM avec les bonnes variables PALM dépendant des applications régionales à simuler comme expliqué section 3.5.

3.6.4. <u>Ressource informatiques nécessaires</u>

Dans sa toute dernière version (13 applications souterraines pour près d'un million de mailles, 19 applications en tout), Aqui-FR tourne en moins d'une heure par année de calcul sur le

supercalculateur à Météo-France ainsi que sur le serveur de calcul de Métis. Sur le supercalculateur, cette durée restera valable jusqu'à un total de 45 applications régionales, en supposant qu'aucune ne possède plus de maille que la plus grosse application actuelle (Nord-Pas-de-Calais). Il reste pour l'instant raisonnable de lancer Aqui-FR dans sa totalité (environ 2,5h de calcul par an) sur un ordinateur de bureau, dont on supposera qu'il a 4 cœurs. Cela ne devrait en revanche pas tenir avec l'ajout de nouvelles applications. Il n'est par contre pas vraiment tenable de lancer Aqui-FR dans sa totalité sur un ordinateur portable ne possédant 2 cœurs de calcul, le temps de calcul s'élevant à plus de 5h de calcul pour une année. Des améliorations sont et vont être implémentées pour réduire le temps calcul.

Concernant l'espace disque nécessaire, plusieurs cas de figure peuvent être envisagés selon les options de sortie choisies. Mais pour se faire une idée des limites, la configuration la plus demandeuse en ressource disque (c'est-à-dire, 3 variables sorties sur chaque maille du domaine à chaque pas de temps) demande plus de 5 Go d'espace disque par année de calcul. Seulement un peu plus de 400 Mo par an seront nécessaires en sortant le champ de charge des mailles affleurantes en moyenne mensuelle.

4. Adaptation des modèles et applications à la plateforme Aqui-FR

Toutes les applications incluses dans la plateforme ont été développées indépendamment (section 3.2) avec un forçage météorologique propre, pouvant provenir soit de SAFRAN, soit du traitement des mesures de stations météorologiques locales, en général, avec un calcul du bilan hydrique basé sur un modèle à réservoir (GARDENIA pour les applications MARTHE, Fonction de production pour les applications Modcou/Eaudyssée) utilisant les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle. L'utilisation de ces applications avec un forçage météorologique provenant de SAFRAN, voire avec les flux estimés par SAFRAN-SURFEX a donc entrainé des modifications qui ont nécessité une adaptation des applications. De plus, il est requis dans Aqui-FR que chaque application tourne a minima au pas de temps journalier, afin d'être exploitable pour des prévisions à courte échéance. Or certaines applications avaient été développées au pas de temps mensuel ou hebdomadaire, et le passage au pas de temps journalier a nécessité des adaptations. Enfin, le temps calcul d'Aqui-FR est contraint par l'application la plus lente (section 3.6.4). Afin de gagner en temps calcul, des modifications ont été faites dans le code de calcul afin de limiter l'écriture de fichiers de sortie, ainsi que dans deux applications MARTHE. Le Tableau 2 ci-dessous résume le travail réalisé sur chaque application.

Tableau 2 Adaptation réalisée pour chaque applications hydrogéologiques. La notion évaluation indique que seule l'étape d'évaluation des simulations a été réalisée, la phase de calage, si elle est nécessaire, reste à faire. Pour les pas de temps : BH réfère au pas de temps du bilan hydroclimatique, et H au pas de temps hydrodynamique

		Re-calage SAFRAN	Re-calage SURFEX	Adaptation pas de temps ou amélioration du temps calcul
Basse Normandie	MARTHE	évaluation	évaluation	Pas de temps : BH=1j, H=10j
Basse Normandie	EauDyssée	Non	Oui	
Loire	EauDyssée	Non	Non	
Marne Loing	EauDyssée	Non	Oui	
Marne-Oise	EauDyssée	Non	Oui	
Nord Pas de Calais	MARTHE	Oui	Oui	Pas de temps (BH=1j, H=7j) et temps calcul, via modification du maillage
Poitou Charente	MARTHE	Oui	évaluation	Pas de temps (BH=1j, H=7j) et temps calcul (optimisation des paramètres)
Plaine Sud d'Alsace	MARTHE	Non	Non	Pas de temps (BH=1j, H=7j)
Seine	EauDyssée		évaluation	

Seine –Eure	EauDyssée		En cours			
Seine-Oise	EauDyssée		Oui			
Somme	MARTHE	oui	Oui	Pas de temps (BH=1j, H=7j ou 1j)		
Somme	EauDyssée		évaluation			
La Fontaine du Vaucluse	GARDENIA	Oui	Oui			
La Souloise aux sources des Gillardes	GARDENIA	Oui	Oui			
La source du Doubs	GARDENIA	Oui	Oui			
La Loue à Mouthier	GARDENIA	Oui	Oui			
La source du Lison à Nans-sous-Sainte- Anne	GARDENIA	Oui	Oui			
Système des Cent- Fonts	GARDENIA	Oui	Oui			
Source des Fontanilles	GARDENIA	Oui	Oui			

4.1. Adaptation des logiciels hydrogéologiques

4.1.1. Adaptation du logiciel MARTHE

En vue de leur intégration dans la structure OpenPALM d'Aqui-FR, des adaptations ont été opérées sur les codes de calcul MARTHE et GARDENIA du BRGM. On rappelle que MARTHE utilise généralement GARDENIA pour estimer le bilan hydrique. Des versions limitées ont été créées de façon à avoir des codes plus restreints et adaptés aux problèmes posés.

La version limitée de GARDENIA est une version :

- Sans calibration automatique,
- Sans analyse de sensibilité,
- Sans calculs de coefficients d'influence,
- avec peu de création de fichiers de résultats.

La version limitée de MARTHE concerne uniquement les calculs d'hydrodynamique, de bilans hydroclimatiques et de rivières. C'est une version :

- Sans fonctionnalités de transport,
- o Sans prise en compte de la densité du fluide en fonction de la salinité et de la température,
- Sans calculs de transferts thermiques,
- o Sans prise en compte explicite de la Zone Non Saturée,
- o Sans fonctionnalités de calibration automatique,
- Sans calculs géochimiques.

Dans ces deux versions limitées, les actions suivantes ont été réalisées :

- Adaptation du code de calcul sous environnement Linux.
- Suppression de 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 météo SAFRAN (Pluie, ETP, Température de l'air) ou bien de données SURFEX (Ruissellement et Drainage).
- Introduction de directives OpenPALM dans ces routines de récupération de données externes, en remplacement des lectures sur fichiers.

Pour l'utilisation des données SURFEX, des routines de routage du « Ruissellement » jusqu'à l'exutoire et de prise en compte du temps de percolation du « Drainage » jusqu'à la nappe ont été créées. Des routines d'exportation des champs de niveaux piézométriques et de débits de cours d'eau par routines OpenPALM ont été créées.

4.1.2. Adaptation du logiciel GARDÉNIA aux systèmes karstiques

Il est apparu que les débits d'un certain nombre de systèmes karstiques pouvaient difficilement être simulés avec les schémas classiques du code de calcul GARDENIA du BRGM (Thiéry 2014, Thiéry 2015f) et du code de calcul EROS (<u>E</u>nsemble de <u>R</u>ivières <u>O</u>rganisées en <u>S</u>ous-bassins) du BRGM (Thiéry et Moutzopoulos, 1995). En particulier les schémas classiques faisaient souvent apparaître des pointes de débits nettement plus fortes que celles observées en réaction aux fortes pluies.

Nous avons introduit la possibilité d'avoir dans le réservoir hypodermique des codes GARDÉNIA et EROS un effet de seuil permettant au débit dépassant ce seuil de déborder et :

- Soit de rejoindre le débit souterrain,
- Soit de s'infiltrer dans le réservoir souterrain,
- Soit de quitter le système par débordement (et ruissellement de surface par exemple).

La Figure 7 relative à la source de la Loue à Moutier illustre la simulation classique du débit, qui présente des pointes de débit simulé anormalement fortes. La partie inférieure de l'illustration montre que l'introduction d'un effet de seuil améliore très sensiblement la simulation des forts débits.

La Figure 8 relative à la Fontaine de Vaucluse illustre la simulation standard du débit, qui présente elle aussi des pointes de débit simulées anormalement fortes. La partie inférieure de la figure montre que l'introduction d'un effet de seuil améliore très sensiblement la simulation des forts débits. Par exemple la crue de janvier 1994 de débit 85 m³/s est bien simulée avec la nouvelle fonctionnalité, alors que la valeur calculée avec le schéma classique dépassait 140 m³/s (surestimation de 65 %).

Cette fonctionnalité fait intervenir 2 nouveaux paramètres :

- La valeur du seuil au-dessus duquel se produit le débordement de ruissellement,
- La constante de temps de transfert de ce débordement (généralement très faible).



Figure 7: Débit journalier de la source de la Loue à Mouthier simulé par GARDÉNIA avec les données SAFRAN. En haut avec le schéma classique de GARDÉNIA ; En bas avec le schéma intégrant un seuil. L'effet de seuil permet de réduire très notablement les pointes de débits simulées.



Figure 8: Débit journalier de la source de la Fontaine de Vaucluse simulé par GARDÉNIA avec les données SAFRAN. En haut avec le schéma standard de GARDÉNIA ; En bas avec le schéma intégrant un seuil. L'effet de seuil permet de réduire très notablement les pointes de débits simulées.

4.1.3. Adaptation du logiciel EauDyssée

Des modifications ont été réalisées afin de réduire aux seuls fichiers de reprise et de bilan l'écriture de fichiers par EauDyssée via l'insertion d'une nouvelle option. Les fichiers de reprise donnent l'état en fin de période de chaque variable pronostique du modèle, et facilite l'enchaînement des simulations sur de longues périodes.

4.2. Adaptation des applications spatialisées : quelques généralités

D'une manière générale, le travail a consisté à adapter chaque application au forçage atmosphérique fournie par SAFRAN, et au bilan hydrique fourni par SURFEX. Cela s'accompagne généralement d'un raffinement du pas de temps de calcul. La méthode choisie est d'abord de comparer l'estimation des bilans hydriques, puis d'estimer les impacts sur la simulation des débits et de la piézométrie, et enfin de proposer des adaptations pour améliorer les performances des simulations avec un forçage atmosphérique SAFRAN et avec les flux SURFEX.

4.2.1. Différences liées à l'utilisation de SAFRAN

Les applications hydrogéologiques sont généralement développées en se basant sur l'usage de quelques stations pluviométriques locales, et des estimations locales de l'ETP. Dans Aqui-FR, l'ETP utilisée est déduite des données SAFRAN (section 3.1.4). Or, l'ETP SAFRAN diffère généralement des estimations de l'ETP aux stations (Benatya, 2004). Cependant, l'ETP étant par définition une estimation et non une observation, on conserve l'ETP SAFRAN, qui est ici en générale inférieure à l'ETP estimée aux stations météorologiques. En effet, l'avantage de SAFRAN est d'une part, sa disponibilité sur toute la France métropolitaine, et d'autre part, sa disponibilité en continu de 1958 à nos jours.

4.2.2. Différences liées à l'utilisation de SURFEX

Les flux SURFEX sont souvent différents de ceux estimés par les modules de bilan hydrique des modèles hydrogéologiques. On retrouve en général des estimations différentes de la pluie efficace (précipitation moins évapotranspiration), auxquelles se rajoutent des différences entre les partitions des flux écoulés par ruissellement ou par infiltration. Cela s'explique en partie par le fait que ces flux ne représentent pas tout à fait la même chose dans un schéma de surface et dans un modèle

hydrogéologique. Ainsi, dans un schéma de surface, l'infiltration est le flux vertical à la base du sol, qui peut donc se comparer à un lysimètre, et le ruissellement ne se produit que lorsqu'il pleut. Pour les modèles hydrogéologiques, l'infiltration correspond au volume qui va effectivement recharger la nappe. Le ruissellement provient d'une partie de la vidange du réservoir « hypodermique », représentant en quelque sorte les flux sub-horizontaux, et peut donc se produire quelques jours après les précipitations. On peut donc retrouver à la fois des différences en volume, mais également en dynamique, car les modèles à réservoirs utilisés pour estimer le bilan hydrique dans les logiciels hydrogéologiques incluent généralement un effet retard représentant les temps de transfert verticaux ou sub-horizontaux. Ces différences ont déjà été relevées lors d'intercomparaison (Habets et al. 1999; Habets et al. 2010). Ainsi, l'utilisation des flux SURFEX nécessite une adaptation des applications.

4.2.3. Critères statistiques pour évaluer les simulations :

Par la suite, des critères statistiques sont utilisés pour évaluer les simulations, et aider à les améliorer. Trois principaux critères sont utilisés :

Le biais : il permet d'évaluer l'écart relatif moyen entre les données observées et celles simulées par le modèle. La dimension du biais est égale à celle des variables comparées.

$$BIAIS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} (X_{obs}(t) - X_{sim}(t))$$

avec n le nombre de mesures observées, Xobs(t) et Xsim(t) respectivement la valeur observée et calculée à la date t.

Le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) est une mesure de la variance entre les valeurs observées et calculées, généralement utilisé pour juger la qualité de reproduction des débits. La valeur de ce critère est de 1 quand le modèle restitue parfaitement les observations. Il est plus difficile d'obtenir des critères de Nash élevé pour un modèle distribué que pour un modèle conceptuel qui utilise les observations de débits pour le calage. Ainsi, une simulation est considérée comme acceptable quand le critère de Nash est supérieur à 0.5 pour un modèle distribué, et 0.7 pour un modèle conceptuel, et très satisfaisant au-dessus de 0.7 ou 0.85 pour les modèles distribués et conceptuels, respectivement. Un critère de Nash nul signifie que la moyenne des données observées est un meilleur prédicteur que le modèle.

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n} (X_{obs}(t) - X_{sim}(t))^{2}}{\sum_{t=1}^{n} (X_{obs}(t) - \overline{X_{obs}})^{2}}$$

avec X_{obs} la moyenne arithmétique des mesures sur la période considérée.

L'erreur quadratique moyenne (RSME) : permet d'estimer l'écart moyen entre les données calculées et observées. Elle est utilisée essentiellement pour comparer les niveaux piézométriques.

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n} (X_{sim}(t) - X_{obs}(t))^2}{n}}$$

avec n le nombre de mesures observées, Xobs(t) la valeur observée à la date t, et calculée à la date t. et $X_{sim}(t)$ la valeur calculée à la date t. La valeur optimale est de 0.

4.3. Adaptation des applications spatialisées sous MARTHE

Les détails de l'adaptation des applications spatialisées développées sous MARTHE dans Aqui-FR sont donnés dans le rapport BRGM/RP-66683-FR, seuls les éléments les plus déterminants sont rappelés ici.

4.3.1. Plaine d'Alsace Sud

Le modèle de la plaine alluviale d'Alsace a été développé avec le concours de la région Alsace, de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, de la DREAL et des Mines de Potasse d'Alsace (Noyer et al., 2006). L'objectif du modèle est d'éclairer des décisions de gestion quant à l'évolution de la salure superficielle et profonde. La zone modélisée couvre le secteur de Mulhouse en amont à Colmar en aval, et des

coteaux vosgiens à l'ouest jusqu'au Rhin à l'est (Figure 9), elle est discrétisée selon un maillage carré de 500 m de côté resserré dans le bassin potassique à 125 m de côté avec un total de 40947 mailles de calcul.

Le modèle est multicouche (3 couches) représentant du haut en bas les alluvions récentes, les alluvions anciennes et les alluvions basales.

Le modèle prend en compte les interactions entre la nappe et le réseau hydrographique présent dans le secteur modélisé. Ce réseau hydrographique, complexe, comprend le Rhin, doublé par le grand canal d'Alsace, pratiquement déconnecté de la nappe, la Fecht, l'III et ses affluents la Lauch, la Thur, la Vieille-Thur et la Doller, les canaux (Vauban, Widensolen, Hardt, Rhône au Rhin, Huningue) ainsi qu'un réseau de drains assez superficiels.

Les apports à la nappe sont constitués par la recharge, par des infiltrations à partir du réseau hydrographique et par des flux venant des coteaux situés aux limites sud et ouest du modèle. Les flux de recharge et le ruissellement étaient calculés à l'origine par le modèle à partir des données de 5 stations météorologiques. Le modèle hydrodynamique est calibré sur la période 1992-2004 (13 ans) avec un pas de temps mensuel pour le calcul hydroclimatique et hydrodynamique, environ 20 piézomètres et 5 stations de jaugeage ont servi de points de contrôle. Le lecteur est invité à consulté le rapport BRGM/RP-54389-FR pour plus de détails sur le modèle et les résultats du calage dans les points de contrôle.



Figure 9 : Carte morphologique de la plaine rhénane (source BRGM/RP-54389-FR)

Adaptation du modèle

Les adaptations réalisées concernent le passage à un pas de temps journalier pour le calcul du bilan hydrique et hebdomadaire pour le calcul hydrodynamique; par ailleurs, l'intégration des grilles SAFRAN (Pluie/Etp) et du bilan de flux estimé par SURFEX (ruissellement/infiltration) a permis de générer une version du modèle utilisant les données SAFRAN avec le schéma GARDENIA et une version utilisant les flux SURFEX.

Résultats du modèle forcé par les flux SURFEX

Les résultats du modèle forcé par les flux SURFEX montrent sur la Figure 10 que selon les secteurs, les débits d'étiage sont moins bien simulés (III à Ensisheim) ou comparables aux observations (Doller à Reiningue) néanmoins les hautes eaux sont systématiquement sous-estimées. De la même manière, la Figure 11 montre que certains niveaux piézométriques sont bien simulés, par exemple le

piézomètre de Hettenschag alors que d'autres le sont moins, comme celui de Wittenheim pour lequel la hauteur de nappe est surestimée par rapport aux observations. Il est nécessaire d'améliorer la restitution des observations par le modèle. Ceci peut être fait en calant le partage ruissellement/infiltration sur la base de la pluie efficace calculée par SURFEX en utilisant le schéma GARDENIA avec recours dans une moindre mesure au calage des champs de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement.



Figure 10 : exemple de chronique de débit observée et simulée avec les flux SURFEX



Figure 11 : exemple d'évolution du niveau piézométrique observé et simulé avec les flux SURFEX

4.3.2. Nord-Pas-de-Calais

Le modèle hydrodynamique régional de la nappe de la craie du Nord-Pas-de-Calais (nommé ci après NPC) a été développé avec le concours de la Métropole Européenne de Lille, de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et de la DREAL (Buscarlet et al., 2011). L'objectif était de mettre à disposition des différents organismes en charge de l'alimentation en eau potable un outil d'aide à la décision dans l'élaboration d'une stratégie de gestion de la ressource en eau des six masses d'eau sollicitées. Ce modèle a été affiné au niveau des champs captants alimentant en eau potable la métropole lilloise (Bessière et al., 2015). C'est cette dernière version qui a été adaptée et déployée dans Aqui-FR. La construction du modèle et les opérations de calage sont décrites de manière détaillée dans le rapport BRGM/RP-63689-FR.

Le modèle hydrodynamique du NPC s'étend sur 12 500 km², et est constitué de 10 couches dont 5 sont aquifères. Le domaine est discrétisé selon une grille de calcul de 500 m x 500 m sauf dans la

zone des champs captants où la grille de calcul est de 100 m x100 m. <<Les conditions aux limites sont du type flux nul pour les 9 premières couches, hormis le long de la Manche et de la mer du nord où un potentiel nul a été imposé. Pour les calcaires du Carbonifère, une condition du type potentiel imposé est appliquée sur la frontière orientale de la couche. Le modèle NPC a été calé en régime transitoire sur la période 1982-2012 (31 années) essentiellement sur les niveaux piézométriques.

Maillage et temps de calcul

Tout d'abord, dans le but de réduire les temps de calcul associés à NPC, il a été décidé de supprimer le maillage gigogne (100m x 100m) couvrant les champs captants de la métropole Lilloise. Il faut en effet rappeler que le temps de calcul de la plateforme est contraint par le modèle au temps de calcul le plus important. Avec un total de 917 126 mailles et un temps de calcul de 14 heures (période 1995-2009), le modèle NPC apparaissait donc trop pénalisant.

D'un point de vue technique, la principale difficulté a résidé dans le traitement du réseau hydrographique (décrit pour chaque maille concernée par les paramètres suivants : n° affluent, n° tronçon, longueur et largeur du tronçon, altitude de l'eau et du fond de rivière, épaisseur et perméabilité de colmatage). L'import de chacun de ces paramètres après suppression du gigogne a nécessité de nombreuses corrections. Il a ensuite fallu adapter les différents fichiers de données structurés par liste de mailles afin d'assurer la correspondance avec le nouveau maillage : prélèvements, identification des mailles à historiques, etc.

En définitive, la nouvelle version du modèle compte un total de 196 449 mailles, soit une réduction du nombre de mailles d'un facteur 4.67. Le temps de calcul (sur la période 31/07/1995 – 31/07/2009) a été très largement réduit d'un facteur de 6 (de 14 heures à 2h20)

Le forçage avec les flux SURFEX a entrainé une dégradation de la convergence du modèle NPC (taux maximal de non convergence interne de 22 %), convergence qui était d'ores et déjà perfectible initialement. La suppression du maillage gigogne a tout d'abord permis une légère amélioration de la convergence. Les mailles concernées par des problèmes de convergence correspondent pour la très grande majorité à des mailles isolées au sein des formations superficielles. Ces mailles ont été affectées d'une perméabilité nulle. L'épaisseur de la maille concernée (souvent faible) est reportée sur la maille de la couche sous-jacente : la géométrie globale du système modélisé n'est ainsi pas modifiée. Cette opération n'a entrainé aucune dégradation du calage et a permis de retrouver une convergence satisfaisante : taux maximal de non convergence de 8.8 % et seulement 9 pas de temps présentant un taux de non convergence supérieur à 5%. La meilleure convergence contribue également à la réduction du temps de calcul d'un facteur de 6 (passé de 14h à 2h20 sur la période 1995-2009).

Comparaison des bilans hydriques

L'application de référence utilise les données de précipitations sur 16 zones homogènes associées à un poste pluviométrique, et 4 stations de référence associées à des zones homogènes. Le calcul du bilan hydrique est réalisé par GARDENIA. Les simulations sont réalisées à un pas de temps mensuel ou décadaire.

La comparaison du bilan hydrique est réalisée entre la version d'origine (GARDENIA au pas de temps décadaire), la version GARDENIA sans recalage forcé par SAFRAN et avec les flux SURFEX, ces deux dernières étant disponibles au pas de temps journalier. En moyenne sur le bassin, il y a assez peu d'écart entre le cumul des précipitations SAFRAN et celles utilisées dans la version originale (+2%). Cependant, l'ETP SAFRAN est plus faible de 11%. Cela induit une augmentation des précipitations efficaces assez importante (+41%).

Cela se traduit dans GARDENIA non recalé essentiellement par une augmentation de l'infiltration. Les précipitations efficaces estimées par SURFEX sont plus importantes de 8% à celles de la version de référence. Par contre, l'infiltration estimée par SURFEX est assez proche de celle de la version d'origine (+3%), et l'écart principal réside alors dans le ruissellement. La Figure 12 présente une comparaison des lames d'eau infiltrée et ruisselée calculées par les trois simulations.



Figure 12 : Moyennes mensuelles du ruissellement et de l'infiltration pour les modèles NPC, NPC_safran et NPC_surfex (période 1995-2008)

Sans recalage de l'application, ces modifications impliquent des modifications des restitutions des débits et piézométries qui sont détaillées dans le rapport BRGM/RP-66683-FR, et qui sont résumées ci-dessous :

- <u>NPC_safran</u>: la reproduction des niveaux piézométriques et des débits observés est dégradée. Deux exceptions sont cependant à relever : les débits simulés de la Marque et de l'Aa, mal calés initialement, sont mieux retranscrits par le modèle NPC_safran;
- <u>NPC_surfex</u>: Les résultats sont contrastés, en piézométrie comme en débit, avec un calage parfois dégradé ou au contraire amélioré de façon significative.

Reprise du calage

Compte tenu du temps important consacré à l'adaptation du modèle, il n'a pas été possible en 2016 de reprendre le calage du modèle NPC_surfex de façon approfondie. A ce stade, la reprise du calage a principalement concerné l'ajustement des perméabilités et des coefficients d'emmagasinement. Comme le traduisent les coefficients de performance calculés (Nash pour la simulation des débits / RMSE et BIAIS pour la simulation des niveaux), le calage a pu être amélioré par rapport au modèle initial pour l'ensemble des points d'observation, à l'exception du piézomètre 00271X0002 (Figure 13 et Figure 14).



Nash	La Scarpe à Montagne-du- Nord E371105	L'Escault à Maulde E2400411	La Marque à Bouvines E3346010	L'Aa à Wizernes E4035710	L'Yser à Bambecque E4905710	La Canche à Brimeux E5400310
NPC	0.27	-0.38	0.25	0.32	-1.11	-0.25
NPC_surfex	-0.40	-0.59	-0.45	-0.76	-2.24	-2.11
NPC_surfex_cal	0.23	0.47	0.65	0.46	-0.53	-0.14

Figure 13 : Coefficients de Nash obtenus pour la simulation des débits (modèles NPC, NPC_surfex et NPC_surfex_cal)



		00263X0006 Ablain St Nazaire	00263X0129 Maroeuil	00271X0002 Орру	00276X0030 Bellonne	00281X0004 Abscon	00491X0013 Joncourt
NPC	RMSE	1.58	0.83	1.60	0.20	3.35	2.34
	BIAIS	-0.89	0.54	-0.67	0.10	3.13	2.27
NPC surfex	RMSE	1.24	1.31	1.39	0.35	2.40	0.69
	BIAIS	-0.26	1.16	0.52	0.27	2.04	0.33
NPC_surfex	RMSE	1.00	0.75	1.81	0.39	2.27	0.70
_cal	BIAIS	-0.12	0.23	1.16	0.09	1.91	0.33

Figure 14 : RMSE et Biais obtenus pour la simulation des niveaux piézométriques (simulations NPC, NPC_surfex et NPC_surfex_cal)

Perspectives d'amélioration

Une première reprise du calage du modèle NPC_surfex a montré qu'il était possible de retrouver un niveau de performance équivalent au modèle initial, voire de l'améliorer ponctuellement. Il serait cependant nécessaire de poursuivre la reprise du calage notamment en étendant l'analyse aux autres points d'observation et en portant un effort particulier sur la zone de l'ancien maillage gigogne. En effet, la suppression du gigogne a inévitablement entrainé une dégradation significative du calage par endroit.

4.3.3. Nappes du Jurassique du Poitou-Charentes

Le modèle a été développé pour le compte de la Région Poitou-Charentes afin d'aider à la gestion des aquifères du Dogger et de l'Infra-Toarcien dans la partie centrale de la région très exploités pour l'AEP et l'irrigation (Putot et Bichot 2007). La version incluse dans Aqui-FR est la version 2 « 8 couches » (Douez et al., 2011) en partenariat financier avec le Conseil Régional, la DREAL et les Agences de l'Eau Adour-Garonne et Loire la Bretagne. Il est décrit en détail dans le rapport BRGM/RP-59288-FR. Le modèle (dénomé POC ci-dessous) et l'extension spatiale est reportée sur la Figure 15. Le modèle est discrétisé en 90 084 mailles carrées de 1 km de côté, soit 19 200 km². Des conditions aux limites du type potentiel imposé sont appliquées au nord-est, sud-ouest et ouest du modèle et correspondent soit à de grandes failles profondes soit à l'océan. Le modèle prend en compte les écoulements dans les nappes souterraines et dans les cours d'eau associés ainsi que les interactions entre ces deux systèmes. Le réseau hydrographique pris en compte représente 3050 km de linéaire de cours d'eau. Les chroniques des lâchers des grandes réserves sont injectées dans le modèle : barrage de Maillet en Vendée (données VEOLIA) ; barrage du Mervent, Graon, Rochereau, Vouraie, Ange-Guignard en Vendée (Données de la SAUR); barrage de la Touche-Poupard (79) (chronique de débit à la station de Saivre située à l'aval du barrage) ; barrages de Lavaud et Mas Chaban (Charente amont), injection à l'entrée dans le modèle des données de débit de la station de Pont-de-Suris. Des débits sont également imposés sur la Vienne avec l'utilisation de la station d'Etagnac, de même en amont de la Tardoise et du Bandiat avec les stations respectives de Montbron et de Feuillade.



Figure 15 : Extension du modèle multicouche du Poitou-Charentes (source BRGM/RP-59288-FR).

Le modèle de référence a été calibré en régime transitoire sur la période 1999-2007 avec un pas de temps de calcul mensuel. La calibration a été réalisée à la fois sur les niveaux des nappes souterraines et les débits des cours d'eau. Au total 87 chroniques piézométriques représentant le fonctionnement des nappes modélisées ont servi pour contrôler le calage : crétacé (2); Jurassique supérieur (18); Dogger (41) et l'Infra-Toarcien (26) et plus d'une vingtaine de chroniques de débit des cours d'eau mesurées dans les stations hydrométriques ont servi pour évaluer le calage du modèle. La pluie efficace était calculée en utilisant les données climatiques de 11 stations météorologiques disposant de données sur la période 1994-2004 (données journalières pour les pluies et décadaire pour l'ETP). Le partage ruissellement/infiltration a été déterminé à partir de l'indice IDPR¹¹. L'utilisation du forçage SAFRAN et/ou des flux SURFEX permet une estimation des débits journaliers, mais rend la comparaison difficile en termes de débits avec l'application de référence. Ainsi, cette partie n'inclue pas de comparaison avec la version de référence de POC.

Adaptation spécifique au modèle POC et amélioration de sa performance

Etant donné que le modèle de référence ne permettait pas le calcul automatique du bilan hydrique à partir des données de précipitations et d'ETP SAFRAN, il a été nécessaire d'y intégrer un calcul de bilan utilisant le schéma GARDENIA intégrée dans MARTHE. Une version du modèle prenant en compte les précipitations et l'ETP de la grille SAFRAN et le schéma de bilan GARDENIA a été générée qu'on appellera par la suite POC-SAFRAN. Dans cette version, deux zones de sol représentant respectivement les sols du bassin de la Charente et du bassin du Clain ont été définies et les valeurs moyennes de paramètres de la fonction de production de GARDENIA ont été introduites dans MARTHE pour chacune de ces zones. Les détails sur les adaptations spécifiques et les simulations préalables réalisées sont décrits dans le rapport (Delfino, 2015).

Rappelons qu'aucun calage n'a été fait sur la fonction de production GARDENIA dans le modèle POC avec les données de précipitations et d'ETP de la grille SAFRAN.

Les adaptations des modèles aux objectifs d'Aqui-FR (changement des pas de temps, des forçages atmosphériques, etc.) ont entrainé une dégradation de la convergence du modèle POC pour quelques

¹¹IDPR : Indice de développement et de persistance des réseaux. Il permet de rendre compte directement de la capacité intrinsèque du sol à laisser s'infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Cette capacité d'infiltration dépend en particulier de la perméabilité de la zone non saturée mais aussi d'autres paramètres comme la végétation ou la déclivité. Le concept de l'IDPR est basé sur la comparaison entre le réseau hydrographique existant et un réseau hydrographique fictif qui considère la présence d'une rivière dans chaque fond de vallée (réseau de talwegs). Cela permet de faire ressortir les zones à faible réseau hydrographique (zones d'infiltration forte) et celles où le ruissellement est important (réseau hydrographique dense).

pas de temps. Ces problèmes concernent quelques mailles du modèle et sont à l'origine d'un ralentissement du temps de calcul. Ceci peut être pénalisant lors de la mise en opérationnel d'Aqui-FR puisque le temps de calcul de la plateforme est contraint par l'application la plus lente. Pour le modèle POC, pour une simulation de 7 ans au pas de calcul hydrodynamique hebdomadaire, le temps de calcul est de 5 heures sur un PC standard. En optimisant les paramètres de résolution du modèle, le temps de calcul a été réduit d'un facteur 2.5 (soit 1h50 au lieu de 5h).Le taux maximum de non convergence est désormais en moyenne de 0.1% et ne dépasse pas 3.2%, ce qui correspond à l'erreur sur le bilan de débit du système par rapport au terme maximal du bilan des débits du système.

Adaptation du modèle au forçage SAFRAN et impact sur les simulations

La pluie efficace calculée par le modèle POC_GARDENIA_SAFRAN est 19% plus importante que celle calculée par modèle de référence. Pour l'infiltration, l'écart entre les deux approches reste faible (6%) alors qu'il est de 40% pour le ruissellement avec vraisemblablement un impact important sur le débit des cours d'eau. L'écart est lié à la fonction de production de GARDENIA non calibré à ce stade avec les données SAFRAN. L'amélioration des simulations nécessite de calibrer la fonction de production de GARDENIA au regard des données spatialisées de la grille SAFRAN et en intégrant la carte des sols ce qui jusque-là n'a pas été fait.

Résultats de POC forcé par les flux SURFEX

Comparé à la simulation de référence avec l'IDPR, SURFEX estime une pluie efficace plus faible de 7%, ce qui est principalement lié à un ruissellement plus faible de 30% et une infiltration supérieure de 8%. En termes de débits, cela se traduit par une tendance à la sous-estimation par rapport aux observations (exemple sur le Clain à Poitiers Figure 16)



Figure 16: Débits observés et simulés par le modèle POC-SURFEX (débit moyen hebdomadaire) dans quatre principaux cours d'eau (Charente à Jarnac, la Boutonne à Saint séverin, Clain à Poitiers, la Sèvre Niortaise à Niort)

La distribution spatiale des RMSE calculés pour chaque piézomètre sur la période 2000-2007 est représentée Figure 17. Globalement le modèle restitue de manière satisfaisante les niveaux des nappes du crétacé, du Jurassique supérieur et du Dogger avec plus de la moitié des piézomètres présentant une erreur quadratique moyenne inférieure à 2 m. Cependant et comme pour le modèle POC-SAFRAN les plus grosse erreurs en termes de RMSE sont obtenues au centre de la zone modélisée dans la nappe de l'Infra-Toarcien avec environ 3 piézomètres sur 4 présentant un écart quadratique moyen supérieur à 2 m.


Figure 17 : Distribution spatiale des écarts quadratiques moyens (RMSE) calculés pour chaque piézomètre pour la simulation POC-SURFEX.

Par la suite, le calage portera sur une nouvelle répartition de l'infiltration et du ruissellement estimé par SURFEX en repassant par des réservoirs GARDENIA comme cela a été fait sur le bassin de la Somme, pour améliorer la performance du modèle notamment l'aquifère de l'infraToarcien

4.3.4. Nappes de la plaine de Caen et du bassin de la Dives

Le modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives (ci-dessous dénommé BNO) a été développé pour le compte de la DREAL de Basse-Normandie et de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Il avait initialement pour vocation de réviser la délimitation de la Zone de Répartition des Eaux (ZRE) de l'aquifère du Bajo-Bathonien (plaine de Caen-Argentan, bassin de la Dives et Bessin) et d'évaluer la ressource en eau souterraine exploitable tout en respectant un rabattement piézométrique et un débit d'étiage acceptables. La majorité des éléments descriptifs présentés dans ce paragraphe est extraite du rapport BRGM/RP-62648-FR (Croiset et al., 2013). Le modèle s'étend sur une superficie de l'ordre de 7600 km² (Figure 18) et couvre quatre aquifères principaux : les calcaires du Bajocien et des formations sous-jacentes (Aalénien et Toarcien), les calcaires du Bathonien moven et supérieur, les calcaires et sables de l'Oxfordien moven et supérieur et la craie du Cénomanien. Le modèle comporte dix couches, des alluvions aux formations de socle dont les limites correspondent aux limites des bassins versants hydrographiques supposées correspondre aux bassins versants hydrogéologiques : aucun flux d'échange avec l'extérieur sauf le long de la bordure maritime (charge hydraulique imposée à 0 m NGF). Le modèle est discrétisé en 93800 mailles carrées de 1 km de côté sur la majeure partie de l'extension du modèle et de 200 m de côté dans des secteurs où une plus grande précision était recherchée (plaine de Caen). De la même façon que pour le modèle Poitou-Charente, l'échelle de temps est découplée entre le calcul hydroclimatique, pour lequel le pas de temps est décadaire, et le calcul hydrodynamique qui fonctionne au pas de temps mensuel. Le modèle a été calé en régime transitoire sur la période 1994-2010 (17 années).



Figure 18 Extension du domaine et emplacement des stations hydrologiques (à gauche) et piézométriques (à droite). Figure extrait du rapport BRGM/RP-62648-FR.

Adaptation spécifique au modèle BNO

Des adaptations similaires à celles effectuées pour NPC ont été réalisées ici, pour BNO-SAFRAN et BNO-SURFEX à savoir : un calcul de bilan hydrique journalier, et un calcul hydrodynamique décadaire (pas de temps au 05, 15 et 25 de chaque mois).

Comparaison du bilan hydrique obtenu avec le forçage SAFRAN

L'application MARTHE de référence utilise les données spatialisées de pluie selon 13 zones homogènes de pluie, déterminées sur la base de la grille AURELHY de Météo-France et deux zones d'évapotranspiration potentielle (ETP) basées sur les estimations des stations de Caen Carpiquet et d'Alençon. Par rapport aux données d'origine, l'analyse SAFRAN fournie globalement une précipitation proche (+1%), et une ETP inférieure de 16%. Ainsi, la pluie efficace estimée par GARDENIA forcé par SAFRAN est supérieur de 48% à celle estimée avec le forçage atmosphérique traditionnel, ce qui se traduit par un doublement de l'infiltration estimée.

Comparaison du bilan hydrique obtenu avec SURFEX

Les cumuls d'infiltration et de ruissellement calculés par SURFEX sont en moyenne supérieurs de 21% à ceux calculés par l'application MARTHE de référence de 12%, avec une nette augmentation de l'infiltration (+68%) et une réduction des ruissellements (-30%) par rapport à la version MARTHE de référence.

Résultats et besoin de recalage

Dans les conditions actuelles du calage, il est difficile de comparer les performances de BNO_safran et de BNO_surfex au regard de résultats contrastés. BNO_surfex semble fournir de meilleurs résultats en piézométrie mais de moins bons pour les débits de rivières. En tout état de cause, les résultats du bilan hydrique étant significativement différents du modèle original, le calage serait à reprendre pour BNO_safran et BNO_surfex. Seul ce travail permettra de valider les perspectives d'amélioration éventuellement offertes par ces deux schémas.

4.3.5. Nappe de la Somme

Le modèle hydrodynamique de la Somme a été construit en 2002 (Amraoui et al., 2002) à la demande du ministère en charge de l'écologie et pour le compte de la DREAL Picardie suite aux inondations exceptionnelles de 2001. Depuis il a été régulièrement actualisé, affiné et enrichi en données. C'est la version la plus récente du modèle (Amraoui et al., 2014) qui a été déployée dans la plateforme Aqui-FR.

Une description succincte du modèle est proposée dans cette partie. Pour plus de détail sur la construction, le calage et l'exploitation du modèle de la Somme, le lecteur est invité à consulter les rapports BRGM/RP-51827-FR et BRGM/RP-63408-FR. Le modèle hydrodynamique du bassin de la Somme s'étend sur une superficie de 7400 km². L'aquifère de la craie du bassin de la Somme est modélisé en monocouche avec une grille de calcul de 500 m x 500 m sauf dans la vallée humide de la Somme où la grille de calcul est de 100 m x 100 m. Au total, le modèle comporte plus de 66 000 mailles de calcul et plus de 4500 tronçons de rivières, chaque tronçon étant connecté à une maille et échangeant des flux avec celle-ci. Le modèle prend en compte les prélèvements dans la nappe et

dans les cours d'eau, tous usages confondus. Il a été calibré sur la période 1989 - 2012 (soit 23 ans) pour inclure dans le processus de calage les principaux états extrêmes connus du système. Le modèle permet de simuler les évolutions du niveau de la nappe au pas de temps hebdomadaire et du débit de la rivière au pas de temps journalier en chaque point du réseau hydrographique.

Recalage du modèle vis-à-vis du forçage SAFRAN

L'application MARTHE de référence utilise les données spatialisées de pluie dont les zones homogènes de pluie sont définies à l'aide de la carte des isohvètes AURELHY de Météo-France et auxquelles sont associées les précipitations mesurées dans 6 stations météorologiques. L'ETP est supposée homogène sur le bassin et égale à celle calculée à la station d'Abbeville. L'analyse SAFRAN fournit globalement une précipitation supérieure de 4%, et une ETP inférieure de près de 6%. Ainsi, les flux écoulés estimés par GARDENIA forcé par SAFRAN sont supérieurs à ceux obtenues avec le forçage atmosphérique traditionnel. Pour s'adapter au nouveau forçage, les paramètres de GARDENIA ont été recalibrés, ce qui permet d'améliorer les simulations, qui restent cependant différentes de celles d'origines (Figure 19).



Figure 19 : Chroniques temporelles des débits observés (en bleu) et simulés à l'exutoire de la Somme, la simulation de référence (en orange), la simulation avec SAFRAN sans recalage (en vert) et après recalage (en rouge) Les cycles annuels saisonniers moyens sont également représentés.

Recalage du modèle vis-à-vis des flux SURFEX

Les cumuls d'infiltration et de ruissellement calculés par SURFEX sont en moyenne inférieurs à ceux calculés par l'application MARTHE de référence de 12% ce qui conduit à une dégradation des débits, notamment à l'exutoire de la Somme. Il apparaît en outre un excès de pluie efficace au nord du fleuve Somme et un déficit au sud, ce qui engendre du même coup une dégradation des débits simulés dans les bassins versants concernés. A noter que les résultats obtenus en termes de piézométrie ne montrent que peu d'impact vis-à-vis des flux SURFEX, ce qui s'explique par le fait que la sousestimation de la pluie efficace est surtout liée à une sous-estimation du ruissellement calculé. Pour pallier ces problèmes, il a été décidé de reprendre la pluie efficace calculée par SURFEX et de recalculer la partition ruissellement/infiltration via le module GARDENIA inclus à MARTHE. Un recalage des perméabilités a ensuite été effectué afin d'améliorer la piézométrie.

Le recalage s'est effectué en deux étapes. Dans un premier temps, un calage des coefficients du réservoir intermédiaire inclus dans GARDENIA représentant la zone non saturée a été effectué. Ce réservoir s'occupe de répartir la pluie efficace entre ruissellement et infiltration. La Figure 20 schématise le fonctionnement de ce réservoir. La hauteur d'eau qu'il contient est noté H. Il est alimenté par la pluie efficace et est vidangé par deux composantes :

- Percolation vers la nappe suivant une loi linéaire de constante de temps THG : $ALIMG = H.dt/_{THG}$ avec dt la durée du pas de temps
- Ruissellement QG, selon une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER. Ce paramètre correspond à la hauteur d'eau dans le réservoir pour laquelle la percolation ALIMG



39/104

Dans le cas qui nous intéresse, seul le coefficient RUIPER a été retouché afin de combler au mieux les déséquilibres constatés dans la répartition spatiale du bilan hydrique de SURFEX. La deuxième étape du calage a consisté à recaler les perméabilités de manière à améliorer la piézométrie simulée vis-à-vis des observations. Ces modifications ont été effectuées en régime transitoire sur la période 1990-2012. Le recalage a permis d'améliorer les débits à l'exutoire de la Selle, de l'Hallue, et de la Nièvre. Les résultats sont équivalents à l'exutoire de l'Avre, tandis qu'on note une légère dégradation à l'exutoire de l'Ancre. Enfin le recalage n'affecte pas les scores calculés à l'exutoire de la Somme. La Figure 21 représente les biais moyens annuels entre niveaux piézométriques observés et simulés pour les deux simulations. Ces biais sont calculés sur la période 1990-2012. La simulation non-calée (Figure 21a) montre des biais positifs au sud du domaine et des biais négatifs au nord et à l'est. Le calage des perméabilités sur la période 1989-2012 par rapport au nouveau bilan hydrique calculé via la pluie efficace de SURFEX et le partage ruissellement/infiltration de GARDENIA permet d'atténuer ces biais, comme l'atteste les résultats de la Figure 21b.



Figure 21 : Distributions spatiales des biais entre niveaux piézométriques moyens annuels simulés et observés pour (a) avant recalage et (b) après recalage

La Figure 22 représente la distribution spatiale des scores d'erreurs quadratiques moyennes entre niveau piézométriques simulés et observés calculés pour chaque piézomètre sur la période 1990-2012. Le calage permet une amélioration de ces scores. Cela confirme l'amélioration déjà constatée au niveau des biais piézométriques.





4.2

28



4.2

2.8

(b) Somme SURFEX CAL

Figure 22 : Distributions spatiales des scores d'erreurs moyennes quadratiques calculés pour chaque piézomètre pour les simulations (b) Somme_SURFEX et (c) Somme_SURFEX_CAL.

4.4. Les modèles spatialisés sous Eau-Dyssée

Les applications portées sous Eau-Dyssée ont toutes été générées sur l'ancienne version du logiciel (MODCOU) à l'exception de l'application Loire. Elles ont donc été transposées sur EauDyssée à diverses occasions. En général, les applications d'origine utilisaient déjà le forçage atmosphérique SAFRAN. L'objet du recalage des applications est donc uniquement lié à l'utilisation des applications avec les flux SURFEX. On notera que les applications d'origine incluent un transfert dans la zone non saturée explicite et indépendant de l'estimation des bilans hydriques. De ce fait, la dynamique des flux SURFEX reste tamponnée par le transfert dans la zone non saturée, et les écarts de dynamique entre le bilan hydrique d'origine et les flux SURFEX peuvent être moins importants que pour les applications sous MARTHE.

4.4.1. Basse-Normandie

L'aquifère du Bajocien - Bathonien en Basse Normandie constitue la principale ressource pour l'Alimentation en Eau Potable dans la région. Il connaît des problèmes quantitatifs locaux et des problèmes de qualité généralisés, en particulier vis-à-vis des nitrates et des phytosanitaires. C'est pour répondre au besoin de la Direction des Bocages Normands de l'Agence de l'Eau Seine –Normandie, qui souhaitait un outil de gestion sur cette masse d'eau que l'application a été développée (Thierion 2007). Les limites du domaine de surface choisies pour le modèle hydrodynamique sont le littoral au Nord et à l'Ouest, les limites de bassins versants au sud (limites à flux nul) et la rivière Touques à l'Est (limité à cote imposée par le niveau de la rivière). La surface totale modélisée est de 13 322.25 km². Le réseau hydrographique modélisé représente un peu plus de 3 092 kilomètres linéaires. Quatre formations aquifères sont représentées dans le modèle (de la plus récente à la plus ancienne) : Le Cénomanien/Oxfordien, le Bathonien, le Bajocien et une couche Dogger (au sens large) indépendante dans la partie sud de la zone d'étude. La superposition des quatre couches modélisées est précisée sur la Figure 23 et représente 93 800 mailles de 250 à 1 km de côté. 26 stations hydrométriques et 26 piézomètres sont utilisables en raison de leurs positions et de la longueur de leurs chroniques.



Figure 23 : Superposition des quatre maillages des formations aquifères prises en compte **Recalage du modèle vis-à-vis des flux SURFEX**

Ce recalage s'est basé sur les comparaisons de piézométrie, et a principalement constitué à adapter les transmissivités et coefficient d'emmagasinement pour s'adapter aux flux SURFEX. Les résultats obtenus avec les flux SURFEX après calage sont assez satisfaisants (Figure 24).





Figure 24 : Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée

Les cartes ci-dessous (*Figure 25*) présentent les scores obtenus en termes de biais et de RMSE sur chaque piézomètre. En moyenne sur l'ensemble des piézomètres, le biais est de 0.69m, et le RMSE de 1.72m.



Figure 25 : Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014

4.4.2. <u>Seine</u>

L'application Seine à 6 couches (Figure 26) du modèle hydrogéologique Modcou/EauDyssée a été développée par Viennot 2009 pour l'agence de l'eau Seine Normandie. Elle a été utilisée depuis notamment pour l'étude d'impact du changement climatique ReXHySS et Oracle (Habets et al., 2013, De Noblet et al., 2017).



Figure 22 : Extension du modèle hydrogéologique avec l'extension des 6 couches aquifères superposée et le réseau de rivière (Viennot 2009)

L'évaluation de l'application forcée par les flux ISBA a été réalisée dans le cadre du projet Oracle (Rinaldo et al, 2012).



Figure 26 : comparaison des estimations de l'infiltration (recharge de la nappe) estimée par MODCOU (à gauche) et ISBA (à droite) sur la période 1994-2007.

Les flux d'infiltration sont relativement similaires dans les deux modèles, on note cependant que la résolution spatiale est plus fine avec le module initial de bilan hydrique (Figure 26). Les résultats en termes de piézométrie sont relativement comparables entre la version d'origine et la version forcée par les flux SURFEX (Figure 27).



Figure 27 Comparaison des biais sur les piézomètres obtenus avec la version originale de l'application Seine (à gauche) et avec la version forcée par SURFEX (à droite)

Au vu de ces résultats, et du fait qu'une application plus détaillée sera bientôt intégrée (cf. section 8.1.1), cette application n'a pas été recalée.

4.4.3. Seine-Eure

Le modèle Seine-Eure couvre une surface globale de 9 328 km² (Figure 28) et complète les trois autres modèles « Craie » du bassin Seine-Normandie présentés précédemment (Marne-Loing, Marne-Oise, Seine-Oise). Les limites de ce modèle sont essentiellement liées à l'hydraulique naturelle puisque le modèle s'appuie sur la Seine au nord, l'Eure à l'est et la Touques à l'Ouest. Au sud les limites sont constituées par la limite d'affleurement du Crétacé inférieur (au sud). La résolution varie de 250 à 1 000 mètres de côté.



Figure 28 : Extension du modèle Seine-Eure à gauche et piézomètres disponibles à droite.

Le réseau hydrographique est représenté par un linéaire de 2 190 kilomètres, les principaux cours d'eau (en plus des limites hydrauliques naturelles précitées) étant la Risle, l'Iton, l'Avre et la Charentonne. Seule la formation de la Craie est représentée dans le modèle et son extension est identique à celle de la couche de surface (9 328 km²).

Le modèle Seine-Eure est toujours en phase de développement au centre de Géosciences de MINES ParisTech. Les premiers résultats obtenus ont montré un certain nombre de difficultés à reproduire les piézométries observées. La présence de nombreux réseaux karstiques n'est sans doute étrangère à ces difficultés. Une étude est en cours sur le sujet avec l'AESN et la DRIEE, plus particulièrement ciblée sur le département d'Eure et Loir.

La comparaison mesures/calcul n'est donc pas présentée ici et l'intégration des paramètres actualisés sur ce modèle sera effectué lors de la phase 2 du programme Aqui-FR.

4.4.4. <u>Seine-Oise</u>

L'application Seine-Oise fait partie des sous-modèles craie développés pour améliorer la représentation de la pollution azotée sur le bassin de la Seine dans le cadre des études menées pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et la DRIEE Île de France (Viennot & Abasq 2013).

Le modèle Seine-Oise couvre une surface globale de 16 003 km² (Figure 29) et est le plus étendu des modèles « Craie » du bassin Seine-Normandie.

Ses limites hydrauliques naturelles contraignent le modèle sur une très grande partie de son périmètre : Seine au sud et l'Oise et affluents à l'est du modèle et Somme au nord. Une limite à flux nul est imposée en lisière de la boutonnière du Pays de Bray. Le Pays de Bray correspond à un anticlinal érodé du Bassin parisien. Plus précisément, un « bombement » des couches calcaires s'est formé suite à la surrection des Alpes à l'ère tertiaire, puis l'érosion de ces assises calcaires surélevées a remis à jours les couches géologiques plus anciennes : marnes, grès, argiles du jurassique, des grès ferrugineux... qui constituent des roches sédimentaires rares en Haute-Normandie. Ces dernières formations ne sont pas prises en compte dans la modélisation. La formation de la Craie (Crétacé Supérieur) couvre l'ensemble du domaine (à l'exception du pays de Bray) et est affleurante, excepté à l'est où elle se trouve sous couverture des formations tertiaires du centre du bassin de Paris, respectivement, de la plus âgée à la plus récente : les calcaires du Thanétien, les sables cuisiens, les formations calcaires du Lutétien. L'ensemble des 4 couches est représenté avec 87 178 mailles de 250 m à 1km de côté. Un total de 32 piézomètres est disponible sur le domaine.



Figure 29 : Limites hydrogéologiques du modèle « Seine-Oise »

Le réseau hydrographique est représenté par un linéaire de 3 255 kilomètres, les principaux cours d'eau (en plus des limites hydrauliques naturelles) étant l'Epte et l'Andelle qui trouvent leur source dans la boutonnière de Bray, et 14 stations hydrométriques sont disponibles sur le secteur étudié. *Recalage du modèle vis-à-vis des flux SURFEX*

Ce recalage s'est basé sur les comparaisons de piézométrie, et a principalement constitué à adapter les transmissivités et coefficient d'emmagasinement pour s'adapter aux flux SURFEX.

La Figure 30 présente des comparaisons des chroniques observées et simulées en 4 points.



Figure 30 Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée

La Figure 31 présente les cartes de biais et de RMSE pour chaque station piézométrique. On constate que les scores les moins bons sont obtenus dans le quart sud-est. En moyenne, le biais est de 1.07m, et le RMSE de 1.6m.



Figure 31 : Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014

4.4.5. <u>Marne-Loing</u>

L'application Marne Loing fait partie des sous-modèles craie développés pour améliorer la représentation de la pollution azotée sur le bassin de la Seine dans le cadre des études menées pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et la DRIEE Île de France (Viennot & Abasq 2013). Le modèle couvre une surface totale de 18 866 km². Ces principales limites sont représentées par celles hydrauliques naturelles de la Marne au nord et du Loing au sud-ouest. Les autres limites sont des limites à flux nul (limite sous couverture des affleurements des formations tertiaires) et limite d'extension des formations du Crétacé à l'est (Figure 32). Le réseau hydrographique représente dans le modèle un linéaire de plus de 2 465 kilomètres. Cependant, seules les rivières ayant la totalité de leur bassin couvert dans l'application peuvent être réellement simulées, ce qui correspond à 6 stations hydrométriques. L'application intègre 4 couches aquifères : la craie, une couche tertiaire, et le turonien séparé en 2 couches). Ces couches sont représentées par un total de 66 235 mailles de 250 m à 1 km de côté.



Figure 32 Limites hydrogéologiques du modèle « Marne-Loing »

Le secteur modélisé est pourvu d'un suivi piézométrique relativement bien distribué sur l'ensemble du domaine. La plupart des ouvrages sont représentatifs de la charge hydraulique de la nappe de la Craie puisque même les ouvrages situés au droit des formations tertiaires captent cette formation. Au total, 25 piézomètres présentent des chroniques utilisables pour le calage des formations aquifères modélisées.

Recalage du modèle vis-à-vis des flux SURFEX

Ce recalage s'est basé sur les comparaisons de piézométrie, et a principalement constitué à adapter les transmissivités et coefficient d'emmagasinement pour s'adapter aux flux SURFEX.



Figure 33 : Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée avec les flux SURFEX après calage

La Figure 34 présente respectivement le biais et le RMSE calculés sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014 et obtenus en régime transitoire après recalage des formations aquifères. Sur l'ensemble des piézomètres retenus, le biais moyen est de 0.10 et le RMSE moyen de 2.16 m.



Figure 34 : Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014

4.4.6. Marne-Oise

L'application Marne Oise fait partie des sous-modèles craie développés pour améliorer la

représentation de la pollution azotée sur le bassin de la Seine dans le cadre des études menées pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie et la DRIEE Île de France (Viennot & Abasq 2013). L'application couvre une surface globale de 7 299 km² (Figure 35). Ses limites hydrauliques naturelles sont constituées par la Marne au sud et l'Oise au nord-ouest du modèle. A l'est, les limites à flux nul sont représentées par les affleurements de la formation du Crétacé Supérieur (Craie) et à l'ouest par les affleurements des formations tertiaires du bassin parisien. Sur l'extension du domaine, la nappe du Crétacé supérieur est la principale formation souterraine prise en compte. Elle est généralement directement affleurante, excepté au nord-est où elle peut être recouverte de marnes du Turonien moyen. Ces marnes ne sont pas explicitement représentées mais leur rôle sur le bilan hydrique des précipitations et sur la partition infiltration/ruissellement est pris en compte dans des fonctions de production propres à ces marnes. Au centre ouest du domaine la formation de la Craie est prolongée sous couverture tertiaire jusqu'aux limites hydrauliques naturelles formées par l'Aisne et la Vesle jusqu'à leur confluence. Le domaine souterrain est donc composé de 2 couches (Craie et Tertiaire), et représenté par 45 904 mailles de 250 m à 1km de résolution. Le secteur modélisé est le plus pauvre du bassin Seine-Normandie au niveau du suivi piézométrique. Seuls 18 piézomètres tous dans la nappe de la Craie peuvent être utilisés pour le calage ou l'évaluation du modèle.



Figure 35 : Limites hydrogéologiques du modèle « Marne-Oise »

Le réseau hydrographique est représenté par un linéaire de 1 735 kilomètres, les principaux cours d'eau (en plus des limites hydrauliques naturelles) étant l'Aisne et la Vesle, et 12 stations hydrométriques ont leur bassin versant totalement inclus dans cette application.

Recalage du modèle vis-à-vis des flux SURFEX

Ce recalage s'est basé sur les comparaisons de piézométrie, et a principalement constitué à adapter les transmissivités et coefficient d'emmagasinement pour s'adapter aux flux SURFEX.

La Figure 36 présente des comparaisons entre les observations et les piézométries obtenues avec SURFEX après recalage. Piézomètre des GRANDES LOGES

Aesures





Le biais moyen calculé sur la période du 01/08/2007 au 31/07/2014 est de 0.36 et le RMSE moyen (sur la même période) est de 2.05 (Figure 37).



Figure 37 Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014

4.4.7. <u>Somme</u>

L'application MODCOU Somme a été développé par Korkmaz, (2007) suite aux inondations qui ont eu lieu en 2001 et dans le cadre d'un projet de recherche visant à l'intercomparaison de modèles hydrogéologiques (Habets et al., 2010). L'application MODCOU a été développée en utilisant en partie des informations recueillis pour la mise en place du modèle MARTHE sur ce bassin (Korkmaz, 2007). Elle a ensuite été transférée sous EauDyssée. Une comparaison multi-modèle avait été effectuée sur ce domaine entre MARTHE, MODCOU et une version de MODCOU forcée par les flux ISBA (inclus dans SURFEX). La Figure 38 présente l'extension du domaine ainsi que l'épaisseur de la zone non saturée prise en compte. Comme pour la version d'origine, le flux infiltré estimé par ISBA transite par la zone non saturée avant de rejoindre la nappe. La Figure 39 présente la comparaison des cartes des scores obtenus sur l'estimation de la piézométrie entre la version d'origine et celle forcée par ISBA. En moyenne sur 45 piézomètres et sur une période de 18 ans, le biais est plus faible avec les flux ISBA (-0.19m au lieu de -0.8m), mais la RMSE est un peu plus fort (4.54m au lieu de 4.23m). La RMSE normalisée par l'amplitude des observations (Figure 39) vaut en moyenne 1.71m au lieu de 1.55m (Habets et al., 2010).



Figure 38 Extension de l'application, et comparaison avec l'extension de l'application MARTHE (souce Habets et al .2010) et épaisseur de la zone non saturée prise en compte, représentée ici comme le nombre de réservoir de 5m d'épaisseur intégré dans le module de transfert non saturée (source Korkmaz, 2007)



Figure 39 Comparaison des RMS normalisés obtenus par la version MODCOU d'origine et celle forcée par les flux SURFEX/ISBA. Figure issue de Habets et al., 2010

Au vue de ces résultats, le modèle n'a pas été recalé avec les flux SURFEX.

4.4.8. Loire

L'application Loire a été développée par Monteil (2011) afin d'estimer la contribution des aquifères aux débits de la Loire, dans le cadre d'un projet en collaboration avec l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, le BRGM et Météo-France. L'ensemble du bassin de la Loire est modélisé, soit 90 000 km², et 3 couches aquifères sont représentées. Les impluviums des formations retenues sont de 12 700 km² pour la Beauce, 17 200 km² pour la craie séno-turonienne et 8 800 km² pour les sables cénomaniens (Figure 40a), soit une surface totale d'impluvium de 38 700 km². L'application a été développée sur la version EauDyssée du modèle, avec le forçage atmosphérique SAFRAN. La Figure 40b présente la carte des scores (biais) obtenus sur la piézométrie sur une période de 10 ans (Monteil et al., 2010).

Cette application a récemment été mise à jour pour une meilleure représentation des échanges nappe-rivière (Baratelli et al., 2016), mais, cette version n'a pas été intégrée dans Aqui-FR.



Figure 40 A gauche : extension de l'application Loire et des 3 couches aquifères représentées (Monteil, 2011) et carte des biais obtenus sur chaque piézomètre sur une période de 10 ans (Monteil et al., 2010)

4.5. Bassins karstiques simulés par GARDENIA

Pour les détails sur les modélisations GARDENIA des systèmes karstiques intégrés dans Aqui-FR, le lecteur peut se référer au rapport BRGM/RP-66683-FR, seuls les éléments les plus déterminants sont rappelés ici.

4.5.1. La Fontaine de Vaucluse

Situé au Sud-Est de la France, l'hydrosystème karstique de la célèbre Fontaine de Vaucluse s'étend sur trois départements, la Drôme au Nord, le Vaucluse à l'Ouest et les Alpes-de-Haute-Provence. Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse s'est développé dans l'épaisse série calcaire du Crétacé inférieur dont la puissance peut atteindre 1500 m (Puig, 1987). Cette formation forme l'ossature des reliefs régionaux ce qui permet la délimitation de son impluvium à partir de la géologie (Figure 41), dont la superficie est de 1317,5 km² d'après la BDLISA.



Figure 41 : Localisation de l'impluvium de Fontaine de Vaucluse, les formations géologiques (BD Charm-50, BRGM) sont projetées sur le modèle numérique de terrain (BD-TOPO, IGN) (Caballero et al., 2015).

La source de la Fontaine de Vaucluse est située à une altitude de 84 m NGF. L'altitude moyenne de son impluvium est de 870 m (Puig, 1987), pouvant atteindre 1909 m au sommet du Mont Ventoux et 1826 m à la Montagne de Lure. Ce relief confère à la zone non saturée de l'hydrosystème une épaisseur moyenne de l'ordre de 800 m. Puig (1987) a estimé ses réserves comme étant de l'ordre de 100 millions de m³, qui soutiennent les débits d'étiage de la Sorgue (Blavoux et al., 1992).

Une modélisation conceptuelle à réservoirs a été réalisée dans le passé (Fleury et al, 2007), mais l'application n'a pu être récupérée pour les besoins de la plateforme. La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 1317 km², deux réservoirs souterrains, le réservoir de la composante superficielle pouvant déborder (via un seuil fixé) dans le réservoir souterrain.

Calage avec le forçage SAFRAN

La moyenne de 36 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 24 ans, de 1990-91 à 2013-14, et deux années d'initialisation sont considérées. Le débit naturel (sans transformation racine carrée ou autre) est utilisé comme critère de

calibration, et la comparaison se fait avec les débits journaliers relevés à la station « Sorguomètre » n°V6155010, extraits de la Banque Hydro sur la même période.

La Figure 42 montre que les débits journaliers sont bien simulés, et ne présentent pas de pointes de débits anormales comme ce qui était obtenu avec une modélisation sans seuil de débordement. Les scores sont bons, avec un coefficient de Nash sur les débits de 0.904 et un biais nul.



Figure 42 : Simulation du débit journalier de la Fontaine de Vaucluse par GARDENIA avec les données météorologiques SAFRAN

Calage avec les flux SURFEX

Le calage a également été réalisé avec les flux SURFEX avec les mêmes hypothèses de modélisation. Les résultats de cette modélisation sont également très bons et même très légèrement meilleurs, avec un coefficient de Nash sur les débits de 0.924 et un biais nul.

4.5.2. La Souloise aux sources des Gillardes

Le massif du Devoluy, situé à la frontière entre le département des Hautes-Alpes et de l'Isère, se trouve à une dizaine de km au Nord-Ouest de Gap. II a la forme d'une cuvette drainée du Sud vers le Nord par le cours d'eau de la Souloise. Un accident, constituant la partie nord du grand chevauchement de Digne, coupe le massif en deux suivant la direction Sud-Nord (Figure 43). Il provoque le chevauchement du compartiment oriental, sur lequel coule la Souloise dans sa partie amont, sur l'occidental, siège des écoulements de la Souloise aval et de son principal affluent la Ribière. D'après Lismonde et al, (2008), le pendage des couches, contrôlé par le synclinal ramènerait les écoulements vers l'intérieur du bassin. Le caractère perméable des calcaires sénoniens favoriserait l'infiltration et l'écoulement de l'eau souterraine en son sein. Ces écoulements verticaux seraient ensuite bloqués par les formations marno-calcaires de l'Hauterivien sous-jacentes. Ces Bans, qui est une galerie karstique plus ou moins verticale, de plus de 200 m de profondeur, noyée dans sa partie profonde.

L'ensemble des écoulements souterrains sont ensuite drainés en direction du Nord pour émerger au niveau des sources des Petites et Grande Gillardes (ainsi dénommées en raison de leur importance, la grande Gillarde concentrant l'essentiel des écoulements souterrains). Ces émergences alimentent de manière importante la rivière la Souloise, qui sort alors du massif pour continuer son cours vers le Nord. Une station hydrométrique installée depuis 1969 par EDF, au lieu-dit de l'Infernet, permet d'en suivre les débits de manière continue. Lismonde et al., (2008) considèrent que 80% des eaux de la Souloise à l'Infernet proviennent des sources des Gillardes. Ces sources apparaissent parmi les 5 sources les plus importantes au niveau national avec un débit moyen de l'ordre de 4,8 m³/s.

La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 200 Km² et deux réservoirs souterrains sans possibilités de débordement.



Figure 43 : Schéma conceptuel des sous-bassins hydrologiques du système des Gillardes (Lismonde et al, 2008).

Calage avec le forçage SAFRAN

La moyenne de 9 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 46 ans, de 1968-69 à 2013-14, et deux années d'initialisation sont considérées: La calibration est réalisée sur la racine carrée du débit (pour minimiser l'importance des forts débits), et un débit extérieur constant de 1.37 m³/s est pris en compte.

Les débits sont bien simulés (Figure 44), avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.919 et un biais de 0.24 m3/s (3.95 %)



Figure 44 : Simulation du débit des sources des Gillardes par GARDENIA avec les données météorologiques SAFRAN. Pour une meilleure visualisation, c'est le débit moyen mensuel qui a été représenté sur cette figure

Calage avec les flux SURFEX

Le débit des sources des Gillardes a également été simulé avec GARDENIA, à partir des données SURFEX avec les mêmes hypothèses. Les résultats de cette modélisation ne sont pas satisfaisants, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.627 (au lieu de 0.919) et un biais de -0.27 m³/s (au lieu de -3.95 %). La Figure 45 montre que le cycle annuel est mal simulé, ceci est dû probablement à la fonte de la neige qui ne serait pas bien simulée par SURFEX pour ce bassin.



Figure 45 : Simulation du débit des sources des Gillardes avec les données SURFEX.

4.5.3. La source du Doubs

La source du Doubs apparait au niveau du synclinal de Mouthe dans les calcaires du Tithonien dans le Jurassique supérieur. Son bassin d'alimentation est localisé au Sud de ce synclinal dans le Massif du Risoux. La source du Doubs draine les eaux souterraines présentes dans les calcaires du Jurassigue supérieur et contraintes en profondeur par l'épaisse couche aquiclude des marnes argoviennes et oxfordiennes. Son bassin d'alimentation est estimé à 44 km² par Jeanblanc and G. (1971), entre 41 et 57 km² par le cabinet Reilé (2006) et à 51 km² par un modèle de bilan pluie-débit (Gouy, 2015). Le massif du Risoux est décrit par Jeanblanc and G. (1971) comme très karstifié avec de nombreux gouffres et cavités sèches qui faciliteraient le passage des eaux de pluies en profondeur. La source du Doubs draine la zone saturée via un conduit karstique très profond. L'exploration d'un spéléoplongeur anglais indiquerait un développement du conduit depuis la source d'au moins 450 m (GIPEK, 2012). En période de hautes eaux, deux sources temporaires du Cul du Bief localisées le long d'une faille constituent le trop-plein de la source du Doubs. Ce phénomène a pu être identifié par traçage artificiel, réalisé par l'Université de Besancon (Jeanblanc and G., 1971) dans la zone amont du bassin et indique une restitution du traceur à la fois à la source du Doubs et à celles du Cul du Bief. Jeanblanc and G. (1971) identifie à partir de l'analyse des débits classés que la mise en charge du Cul du Bief a lieu quand la source du Doubs présente des débits supérieurs à $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figure 46 Coupe adaptée d'après Bitterli (1972)

La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 55.7 km², un réservoir souterrain, avec prise en compte d'un seuil de débordement du réservoir superficiel qui s'infiltre alors dans le réservoir souterrain. Un débit extérieur de 0.433 m³/s est considéré.

Calage avec le forçage SAFRAN

La moyenne de 4 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 35 ans, de 1979-80 à 2013-14, et une seule année d'initialisation est considérée. La Figure 47 montre que les débits sont bien simulés, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.805 et un biais de 0.043 m³/s (4.59 %)



Figure 47 : Simulation du débit journalier de la source du Doubs par GARDENIA avec les données météorologiques SAFRAN 1980-2014.Pour une meilleure visualisation on a représenté sur la figure le débit moyen mensuel.

Calage avec les flux SURFEX

Les débits de la source du Doubs ont également été simulés avec GARDENIA, à partir des données SURFEX avec les mêmes hypothèses. Les résultats de cette modélisation ne sont pas satisfaisants, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.528 et un biais de -0.19 m³/s (-11.53 %). La Figure 48 montre que le cycle annuel est mal simulé, probablement car la fonte de la neige n'est pas bien simulée par SURFEX pour ce bassin.



Figure 48 : Simulation du débit de la source du Doubs avec les données SURFEX.

4.5.4. La Loue à Mouthier

Les deux plus importants systèmes karstiques du Jura sont situés en tête de bassin de la Loue et de son affluent le Lison. Ils sont drainés par les deux sources de la Loue et du Lison au débit considérable (module d'environ 10 m³/s) au cœur des reculées de la Loue et du Lison. Le Plateau de Levier constitue la zone de recharge de ces deux systèmes. C'est un plateau très vaste d'une altitude comprise entre 650 et 850 m NGF marqué par une géologie tabulaire. Ce paysage monotone cache un réseau karstique très développé qui absorbe toutes les eaux de ruissellement des cours d'eau secondaires (Ruisseau de Château Renaud sur l'impluvium du Lison par exemple). En bordure est, le Plateau est bordé par la vallée du Doubs dont une partie des débits se ré-infiltre au profit des sources

de la Loue. Ces sources émergent des calcaires du Kimméridgien à Ouhans. La source principale appelée « Loue vasque » jaillit d'un porche et est de loin l'émergence qui apporte le plus fort débit (Figure 49). Une seconde arrivée d'eau dite « Loue canal » existe en contrebas. L'estimation des débits est très fiable grâce à un seuil bien contrôlé au sein du canal. Deux autres arrivées d'eau mineures sont observables en aval, au Pont : « Loue Pont ». Enfin, des mesures de débit sur la Loue sont réalisées par EDF au niveau de l'usine de Mouthier à partir du turbiné et du déversé, au regard de l'évolution de la cote. Compte tenu du faible volume de la retenue, la valeur calculée de la Loue à Mouthier (station suivie par EDF) est a priori représentative du débit des sources additionné des apports latéraux avec notamment les deux sources du Pontet et du Moulin Miguet.



Figure 49 : Localisation des arrivées d'eau au niveau des sources de la Loue et équipement hydrologique sur les principales arrivées d'eau de Loue vasque et Loue canal, et du point intégrateur de la Loue à l'usine EDF de Mouthier (d'après (Charlier et al, 2014)).

La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 300.7 Km² (après optimisation), un seul réservoir souterrain, le réservoir de la composante superficielle pouvant déborder (via un seuil fixé) dans le réservoir souterrain. Un débit extérieur de 0.637 m³/s est pris en compte.

Calage avec le forçage SAFRAN

La moyenne de 11 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 24 ans, de 1990-91 à 2013-14, et une année d'initialisation est considérée. La calibration se base sur la racine carrée du débit (pour minimiser l'importance des forts débits)

La Figure 50 montre que les débits sont bien simulés, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.91 et un biais de -0.11 m³/s (-1.11%)



Figure 50 : Simulation du débit journalier de la Loue à Mouthier par GARDÉNIA avec les données météorologiques SAFRAN 1994-2014.

Calage avec les flux SURFEX

Les débits de la Loue ont été également simulés avec GARDÉNIA en utilisant les données SURFEX avec les mêmes hypothèses. Les résultats de cette modélisation sont nettement moins bons, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.715 et un biais de -0.35 m³/s (-3.57 %) La Figure 51 montre que le cycle annuel est simulé correctement, mais l'écart-type, donc la variabilité, est sous-estimée par GARDENIA forcé par SURFEX pour ce bassin.



Figure 51 : Simulation du débit de la Loue avec les données SURFEX

4.5.5. La source du Lison à Nans sous Sainte-Anne

La source du Lison jaillit des calcaires du Jurassique moyen au niveau du faisceau salinois à Nanssous-Saint-Anne. La source principale forme une vasque au cœur de la reculée. La station de jaugeage est localisée directement à la vasque (Figure 52) et fournit une chronique historique depuis la fin des années 1970. A 300 m au nord-est, la grotte Sarrazine est une résurgence intermittente qui est un trop-plein du système karstique.



Figure 52 : Résurgence du Lison et instrumentation.

Pour cette modélisation on a pris en compte uniquement les débits de la source du Lison à la vasque de Nans-sous-Sainte-Anne, sans prendre en compte le débit de résurgence de la grotte Sarrazine car les débits de cette résurgence sont connus uniquement sur une courte période. Par ailleurs la somme (estimée) du débit de Nans-sous-Sainte-Anne et du débit de la Sarrazine est très corrélée au débit de Nans le débit de la Sarrazine représentant en moyenne environ 40 % du débit à la vasque. La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 154.3 km² (optimisée), deux réservoirs souterrains, le réservoir de la composante superficielle pouvant déborder (via un seuil fixé). Un débit extérieur de 0.026m³/s est pris en compte

Calage avec le forçage SAFRAN

La moyenne de 6 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 39 ans, de 1975-76 à 2013-14, et une année d'initialisation.

La Figure 53 montre que les débits sont bien simulés, y compris les faibles débits, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.908 et un biais de 0.121 m3/s (2.34 %)



Figure 53 : Simulation du débit journalier de la source du Lison à Nans-sous-Sainte-Anne par GARDENIA avec les données météorologiques SAFRAN 1975-2014.

Calage avec les flux SURFEX

Les résultats de GARDENIA forcé par SURFEX sont significativement moins bons, avec un coefficient de Nash sur la racine carrée des débits de 0.778 et un biais de -0.29 m³/s (-5.74 %). La Figure 54 montre que le cycle annuel est simulé correctement, mais l'écart-type, donc la variabilité, est sous-estimée par GARDENIA forcé par SURFEX.



Figure 54 : Simulation du débit de la source du Lison à Nans avec les données SURFEX

4.5.6. Système des Cent Fonts

Le système karstique des Cent-Fonts est situé au nord de Montpellier, en rive droite du fleuve Hérault qui constitue le niveau de base du système. Elle est alimentée pour moitié par les écoulements souterrains du plateau de La Selle, constitués de formations calcaires et dolomitiques du Jurassique moyen et supérieur sur une superficie de 60 km² et pour l'autre moitié par les pertes de la Buèges, située au nord du système (Figure 55, Aquilina et al., 2005).



Figure 55 Carte géologiques et position des karsts de Cent-Fonts et Fontanilles (Aquilina et al., 2005)

La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 100.6 Km²qui a été optimisée. L'estimation de la superficie du système karstique, qui intègre l'alimentation par les « pertes

de la Buèges », est plus grande que l'estimation classique, mais c'est la seule possibilité pour reproduire aussi bien cette longue période d'observation de 16 ans. La modélisation intègre deux réservoirs souterrains, le réservoir de la composante superficielle pouvant déborder (via un seuil fixé). *Calage avec le forçage SAFRAN*

La moyenne de 4 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 16 ans, de 1998-99 à 2013-14, et deux années d'initialisation sont considérées, avec une calibration sur la racine carrée du débit pour minimiser l'importance des forts débits. La Figure 56 montre que les débits sont très bien simulés, avec un coefficient de Nash sur les débits naturels de 0.854 et un biais de 0.027 m3/s (2.47 %).



Figure 56 : Simulation du débit journalier du système des Cent-Fonts par GARDÉNIA avec les données météorologiques SAFRAN 1975-2014.

Calage avec les flux SURFEX

On a également simulé les débits du système karstique des Cent-Fonts à partir des données SURFEX avec les mêmes hypothèses. Les résultats de cette modélisation sont acceptables, mais moins bons (Figure 57), avec un coefficient de Nash sur les débits naturels de 0.774 et un biais de-0.46 m³/s (-4.19 %)



Figure 57 : Simulation par GARDENIA du débit du système des Cent-Fonts avec les données SAFRAN (à gauche) et avec les données SURFEX (à droite).

4.5.7. Source des Fontanilles

La source des Fontanilles est localisée au nord de Montpellier, en rive gauche du fleuve Hérault, qui constitue le niveau de base du système. Elle draine le plateau karstique de Viols-le-Fort (situé à une altitude variant entre 250-500 m) et constitué de formations calcaires et dolomitiques du Jurassique moyen et supérieur, sur une superficie de 18 km² (Figure 55). Ce bassin a été modélisé notamment par Lanini et Maréchal, 2004. La modélisation est réalisée avec GARDENIA prenant en compte une surface de 20.4 Km² deux réservoirs souterrains, le réservoir de la composante superficielle pouvant déborder (via un seuil fixé) dans le réservoir souterrain.

Calage avec le forçage SAFRAN

La moyenne de 3 mailles SAFRAN est considérée, en prenant en compte les données journalières de précipitations solides et liquides, l'évapotranspiration potentielle et la température moyenne. La période de calibration s'étend sur 6 ans, de 1995-95 à 2000-01, avec une année d'initialisation. La Figure 58 montre que les débits sont bien simulés, y compris les tarissements jusqu'à 10 L/s, avec un coefficient de Nash sur les débits naturels de 0.811 et un biais de 0.021 m3/s (7.7 %)



Figure 58 : Simulation du débit de la source des Fontanilles par GARDENIA avec les données SAFRAN 1995-2001.

Calage avec les flux SURFEX

On a également simulé les débits de la source des Fontanilles avec GARDENIA, à partir des données SURFEX avec les mêmes hypothèses. Les résultats de cette modélisation sont acceptables, mais moins bons (Figure 59), avec un coefficient de Nash sur les débits naturels de 0.698 et un biais de -0.034 m³/s (-12.3 %)



Figure 59 : Simulation du débit de la source des Fontanilles par GARDÉNIA avec les flux SURFEX 1995-2001.

5. Les premières évaluations d'Aqui-FR

5.1. Evaluation pluriannuelle

A l'état actuel du déploiement des applications régionales dans Aqui-FR, la plus longue période commune de modélisation pour laquelle on possède les informations sur les prélèvements s'étend du 1 août 1999 au 31 juillet 2005. C'est donc sur cette période que la première évaluation pluriannuelle d'Aqui-FR est effectuée.

L'ensemble des 13 applications distribuées d'Aqui-FR peut actuellement être évalué sur un total de 554 points d'observation de débits et 629 points d'observation piézométrique (Tableau 3). Cependant, du fait du recouvrement géographique de certaines applications régionales, certaines stations sont redondantes. Sur la période étudiée, certaines stations ne disposent d'aucune observation entre ces deux dates. Ainsi, sur les 554 points de comparaison de débits, seuls 297 ont pu être utilisés, soit environ 54%, avec 299 stations hydrométriques différentes. De la même façon, 629 points d'observation de charge piézométrique ont pu être utilisés sur les 697 disponibles, soit environ 90%.

Tableau 3 Nombre de points d'évaluation possible en termes de débits et de piézométries pour chaque application distribut	ée.
Les chiffres marqués par une étoile indique que l'ensemble des stations où la comparaison est possible a bien été utilisé.	

	Nb stations Hydro	Nb Stations Piézos
Alsace (MARTHE)	3	27
Basse Normandie (Eaudyssee)	14	26
Basse Normandie (MARTHE)	8	34
Loire (Eaudyssée)	239*	115
Marne Loing (Eaudyssée)	6	36
Marne-Oise (Eaudyssée)	8	24
Nord Pas de Calais (MARTHE)	7	12
Poitou-Charente	19	115

Seine	174*	80	
Seine-Eure	6	26	
Seine-Oise	11	93	
Somme (MARTHE)	5	55	
Somme (Eaudyssée)	54*	54	

5.1.1. <u>Analyse des performances statistiques sur la reproduction des charges</u> piézométriques

On rappelle qu'ici la comparaison est faite sur les observations issues de la BD ADES avec une sélection hétérogène des piézomètres. En effet, les piézomètres ne donnent pas forcément une information sur la couche aquifère adéquate, et l'information n'est pas toujours disponible. Pour chaque application, lorsque l'information sur les piézomètres utilisables était disponible, elle a été prise en compte, sinon, seule la position et la couche ont été intégrée. Ces résultats sont donc temporaires.



Figure 60 : Cartes de l'erreur moyenne (biais, en haut) et du RMSE (en bas) sur la simulation de la charge pour la période 1999 à 2005. L'étendue globale du domaine souterrain d'Aqui-FR est représentée par le contour bleu foncé. Les rivières en bleu sont celles du réseau Syrah et sont représentées pour aider à la localisation.

La Figure 60 présente les cartes de l'erreur moyenne (biais) et du RMSE sur la charge simulée, sur tout le domaine Aqui-FR. L'erreur moyenne globale est de -0,61m, avec cependant de fortes 61/104

hétérogénéités locales. Ainsi on observe une tendance à la sous-estimation des charges sur l'aquifère de la Beauce ainsi que dans l'application Poitou-Charente. Le RMSE est inférieur à 2.5m pour la moitié environ des piézomètres.

La *Figure 61* présente quelques exemples de chroniques sur 4 bassins du domaine, de haut en bas et de gauche à droite : Alsace, Poitou Charente, Marne Loing et Loire .



Figure 57 Illustration de chroniques piézométriques issues des applications Alsace, Poitou Charente, Marne-Loing et Loire. L'impact de prélèvements en nappe apparait clairement sur certaines chroniques. Ces prélèvements sont généralement pris en compte de façon plus lissée dans les modèles dont les simulations sont ainsi moins bruitées.

Une des particularités d'Aqui-FR étant d'avoir des domaines couverts par plusieurs applications, à titre d'illustration, la Figure 62 présente quelques comparaisons des piézométries restituées par les applications utilisant les flux SURFEX en entrée. On constate qu'il peut y avoir des variations à la fois de l'état moyen (biais) mais aussi de la dynamique annuelle.



Figure 61 Comparaison de restitution de piézomètres représentés par plusieurs applications: en haut sur la Somme au Translay (à gauche MARTHE, à droite, EauDyssée), au milieu, sur la basse Normandie à Louvieres (à gauche MARTHE, à droite EauDyssée), et en bas sur la Beauce à Batilly en Gatinais (à gauche EauDyssée Loire, à droite EauDyssée Seine)

5.1.2. Analyse des performances statistiques sur la reproduction des débits

La Figure 62 présente la fonction de densité cumulée du critère de Nash ainsi que la fonction de

densité de probabilité du Ratio (rapport de la lame d'eau écoulée simulées par rapport à celle observée pour la totalité de la simulation. Sur les 297 stations de débits évaluées ici, 53% ont un critère de Nash supérieur à 0.6, et 24% supérieur à 0.8. En moyenne, le volume d'eau estimé est légèrement surestimé (Figure 62).



Figure 62 : Fonction de densité cumulée du critère de Nash et fonction de densité de probabilité du rapport de lame d'eau obtenu sur l'ensemble des applications. Ainsi, on peut lire que 40% des stations ont un score de Nash sur les débits annuels supérieur ou égal à 0.7, et que 22% des stations ont une bonne estimations de la lame d'eau et que 23% la surestime de 10%.

La répartition spatiale du critère de Nash et du celle du Ratio, sur tout le domaine de surface d'Aqui-FR, sont visibles sur les *Figure 63* et *Figure 64*. On note que l'étendue de ce domaine diffère en général de celle du domaine souterrain pour les applications EauDyssée, tandis qu'elles sont identiques pour les applications MARTHE. On note que l'ensemble des stations disponibles et modélisables n'a pas encore pu être intégré actuellement, mais le seront rapidement.



Figure 63 : Critères de Nash aux points de mesure pour la période de 1999 à 2005.

On constate qu'il y a très peu de points de contrôle de débits dans le Nord de la France (notamment sur la Seine où il y a peu de stations simulées). Les critères de Nash les plus faibles sont répartis principalement sur les bassins versant de la Seine, de la Somme et de ceux des Hauts-de-France, ainsi que sur la plaine d'Alsace. Cette répartition s'observe également sur les Ratios.



Figure 64 : Rapport entre le débit moyen simulé et observé aux différents points de mesure, pour les périodes de 1999 à 2005.

Il est également intéressant de regarder la distribution du critère de Nash et du Ratio en fonction du débit moyen annuel. On retrouve classiquement sur la

Figure 65 que le critère de Nash et le rapport sur les lames d'eau se dégradent pour les débits les plus 64/104

faibles correspondant aux plus petites surfaces de bassins versants. On retrouve de meilleurs résultats aux exutoires de la Seine et de la Loire (*Figure 66*).



Figure 65 : Critère de Nash et rapport de lame d'eau en fonction du débit moyen pour tous les points de comparaison de débit



Figure 66 : Comparaison des débits simulés et observés près de l'embouchure de la Loire, à Nantes.et à l'exutoire de la Seine à Poses.

5.1.3. Conclusion sur l'évaluation pluriannuelle

Cette première évaluation pluriannuelle avait pour principal objectif de montrer le potentiel d'Aqui-FR sur une courte période rétrospective, et de démontrer que l'ensemble de la chaîne allant jusqu'à la comparaison aux observations est bien fonctionnel. En effet, comme décrit dans les paragraphes précédents, de nombreux développements ont été nécessaires pour arriver à ce stade.

Cependant, cette première évaluation reste partielle, notamment car l'ensemble des points de comparaison n'a pas pu être intégré. C'est l'objectif de la seconde phase d'Aqui-FR de réaliser une réanalyse longue durée (au moins 30 ans) qui sera alors plus finement analysée.

5.2. Retour d'expérience : cas de la crue sur les bassins Seine et Loire en 2016

La crue de 2016 sur les bassins de la Seine et de la Loire a eu lieu sur un domaine bien couvert par les applications Aqui-FR. Nous avons donc voulu regarder la réaction du modèle sur cet épisode extrême. Les précipitations ont dépassé 150 mm sur une partie importante de ces régions, ce qui est très rare à cette période (période de retour >200 ans –Van Oldborough et al., 2016)



Figure 67 : à gauche : carte des précipitations cumulées entre le 28 Mai et le 12 Juin et en noir, les villes déclarées catnat inondation en 2016, à droite : carte des couches aquifères simulées dans Aqui-FR et impactées par la crue. Les stations hydrométriques disponibles sont représentées avec des triangles verts, et les stations piézométriques avec des points noirs.

Les flux écoulés ont été estimés avec SURFEX forcé par SAFRAN-réanalyse et transmis par François Besson (Météo-France, DCSC/AVH). La part infiltrée dépasse 50mm sur les bassins du Loing et de la Loire, et est bien supérieure à celle ruisselée (Figure 68).



Figure 68 Cartes du cumul de drainage (constituant la recharge de la nappe, en mm) et du ruissellement (en mm) simulés par SURFEX du 28 Mai au 4 Juin 2016

Les simulations ont pu être évaluées sur les stations de débits et de piézométrie présentées Figure 69. Certaines stations hydrométriques présentent une augmentation très rapide de la piézométrie, qui est nettement sous-estimée par les simulations (Figure 69). De même le volume écoulé lors de la crue est sous-estimé par SAFRAN-SURFEX. Pour aller plus loin, des comparaisons entre les précipitations SAFRAN et des observations in-situ ont montré que si le cumul journalier des précipitations est bien estimé par SAFRAN, la répartition horaire est trop lissée. Ce biais classique peut avoir des conséquences sur la simulation des flux par SURFEX. Des comparaisons entre les flux SURFEX et des observations in situ ont permis de voir que la dynamique du drainage simulée par SURFEX est trop lente comparée aux observations. Cela impact de facto la dynamique de la simulation hydrogéologique.



Figure 69 A gauche : comparaison entre les débits de la Seine observés et simulés par Aqui-FR avec le réseau hydrographique RHT, à droite comparaison entre l'évolution de la piézométrie observée et simulée à Brie Comte Robert.

Cet événement nous permet d'anticiper les atouts et difficultés d'une prévision avec Aqui-FR. De fait, les prévisions SIM avaient anticipé plusieurs jours à l'avance un risque de crue sur le Loing (*Figure 70*), même si l'intensité de la crue prévue du Loing était sous-estimée. La *Figure 69* montre que la simulation des niveaux piézométriques bénéficierait d'une correction via l'assimilation de donnée (section 6.2), qui elle-même bénéficierait à la simulation des débits.



Figure 70 Tableau d'alerte historique de mai 2016 pour le Loing à Châlettes-sur-Loing, pour le seuil haut, correspondant à une crue décennale. Les abscisses représentent les jours prévus, sachant que la prévision est réalisée sur 10 jours. Les ordonnées représentent le jour de la prévision. Les chiffres dans les cases indiquent le % des membres de la prévision d'ensemble indiquant un dépassement du seuil haut d'alerte. Ainsi, il apparait que dès le 24 Mai, on pouvait s'attendre à un événement conséquent sur le Loing. Source : Météo-France DCSC/AVH, Fabienne Rousset.

6. Développements associés

6.1. Développement de modélisations sur les aquifères de socle

Afin de couvrir l'ensemble des aquifères français, un travail spécifique est mené dans Aqui-FR pour représenter les aquifères bretons dans le contexte de socle cristallin du massif armoricain. Ce travail est décrit en détail dans le rapport ONEMA de Dreuzy et al., 2016.

Dans tous les cas, il s'agit de structures locales et discontinues sans tendance régionale marquée à la différence des aquifères régionaux dans les grands bassins sédimentaires. Cela demande d'adapter les approches de modélisation classiques en hydrogéologie à ce type de contexte de forte variabilité spatiale des circulations. Le défi ne concerne pas tant le choix des modèles adaptés aux écoulements dans des réseaux de fractures complexes que de définir une démarche globale et très cohérente intégrant à la fois les modes de circulation prépondérants et les données nécessaires pour les calibrer.

6.1.1. Contexte et questions



Figure 71: Structures géologiques pour la ressource en eau dans les milieux cristallins

Contrairement à une idée reçue, la Bretagne ne manque pas d'eau souterraine, c'est plutôt que les aquifères suivent une logique très différente des aquifères sédimentaires et karstiques qui peuvent fournir des ressources importantes et pérennes. La présence d'eau souterraine en Bretagne est bien attestée par nombre d'observations indirectes comme le faible taux de ruissellement, la pérennité des cours d'eau en été et les débits d'étiage importants soutenus par la contribution des nappes phréatiques et les temps de transferts pluriannuels des nitrates dans le milieu naturel. Par contre, la productivité des puits est particulièrement variable y compris dans le même bassin versant. La productivité est également limitée, variable dans le temps avec des puits qui peuvent temporairement s'assécher. Il ne s'agit pas d'un manque de ressource, mais plutôt d'un manque de fiabilité dans l'exploitation de la ressource qui donne une connotation incertaine au statut des aquifères en contexte cristallin.

La variabilité de disponibilité de la ressource découle directement de l'hétérogénéité géologique et de la localisation des écoulements au voisinage de fractures plus ou moins isolées et dans des zones altérées plus ou moins perméables (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La fracturation comme l'altération sont des processus fortement variables. La fracturation est un processus instable qui, en plus, dérive d'une chronologie complexe de contraintes tectoniques. L'altération est multifactorielle comprenant la nature des minéraux de la roche mère, l'historique des conditions d'humidité, de température et de circulations. L'horizon altéré est classiquement épais de quelques mètres à quelques dizaines de mètres en fonction des conditions d'altération passées. L'horizon sousjacent fissuré a une épaisseur en général inférieure à 50 mètres avec une densité de fractures décroissante avec la profondeur (Dewandel et al., 2006).

Dans le cas de la Bretagne, aucun de ces facteurs n'a été dominant et le profil d'altération apparait variable sans corrélation marquée avec la topographie, la lithologie ou la fracturation. La ressource se trouve majoritairement dans la zone altérée et l'horizon fissuré sous-jacent (**Erreur ! Source du**

renvoi introuvable.*a*) et ponctuellement dans les zones de faille plus profondes. Parce que les structures géologiques ne montrent pas de tendances fortes à l'échelle régionale, l'hétérogénéité est plus marquée à l'échelle locale qu'à l'échelle globale. Les modèles locaux devraient prendre en compte la distribution spatiale de perméabilité alors qu'à une échelle plus globale, l'effet des hétérogénéités pourrait être moyenné. Les informations nécessaires aux modèles dépendront donc largement de l'échelle des modèles. Localement aux versants, les distributions de perméabilité et de porosité pourront apparaitre déterminantes. Globalement au bassin versant, ce seront probablement plus les distributions globales des capacités de transfert et d'emmagasinement.

Les relations entre porosité et perméabilité et plus généralement entre transferts et emmagasinement sont également spécifiques dans les milieux fracturés. En effet les fractures sont des éléments fortement transmissifs mais faiblement capacitifs. Les zones de stockage autour des fractures peuvent donc être dissociées des zones de transfert avec des inter-connexions éventuellement critiques. Ce sont ces échanges qui conditionnent la pérennité de la ressource. Les fractures seules déterminent plus l'existence de la ressource. Ainsi, dans les milieux fracturés, l'existence de la ressource n'en assure pas la pérennité.

6.1.2. <u>Méthode</u>

Pour comprendre l'organisation des circulations dans les bassins versants, nous avons entrepris une démarche de modélisation détaillée 3D des horizons altérés et fissurés. Les circulations n'étant pas accessibles directement à l'observation, nous sommes passés par un modèle calé sur un le site de Pleine-Fougères étudié depuis longtemps dans le cadre de la Zone Atelier Armorique.



Figure 72 : (a) Illustration de la méthode de remaillage automatique de Feflow contrainte par la surface topographique, le toit de la nappe libre et les interfaces lithologiques entre couches [Diersch, 2014]. (b) Maillage du bassin versant étudié dans le cadre de la thèse de Tamara Kolbe autour de Pleine Fougères avec en rouge les limites du bassin versant, en bleu le réseau hydrographique et en noir le maillage raffiné à proximité des rivières.

Les modèles 3D ont été réalisés avec une méthode éléments finis de résolution des écoulements à surface libre à base de remaillage du domaine saturé du logiciel Feflow. C'est une méthode qui permet une très bonne prise en compte des structures topographiques et géologiques. Doté d'une interface utilisateur avancée, il permet de créer facilement des modèles et d'intégrer les caractéristiques structurales et hydrauliques d'un site. Il est en revanche limité et plus difficile d'utilisation pour la simulation du transport de traceurs. Nous avons utilisé ce logiciel pour modéliser les transferts en régime permanent dans un bassin versant de 35 km² autour de Pleine-Fougères (Ille-et-Vilaine, *Figure 72b*).

Le bassin versant se trouve sur une transition lithologique entre des schistes au nord et granites au sud. La transition est marquée par un seuil topographique abrupt avec des pentes atteignant 7.5 %. La recharge a été estimée à une valeur moyenne annuelle de 167 mm/an à partir des résultats de SURFEX sur la zone modélisée. Les distributions de perméabilité et de porosité dérivent directement de la géologie avec une perméabilité plus forte dans les granites que dans les schistes, et plus forte dans la zone altérée que dans la zone fissurée. Les épaisseurs des zones altérée et fissurée (moyennes de 9 m et 48 m) ont été fournies par la base de données SILURES du BRGM. 5 modèles ont été réalisés en fonction du rapport de perméabilité ou d'épaisseur entre granites et schistes (Figure 73)

(a)								
		REF	THICK	THIN	AHC	HOM		
K_W (m d ⁻¹)	G S	0.68 0.34	0.3 0.6	0.68 0.34	2 0.2	0.15 0.15		
$K_F(\mathrm{m}~\mathrm{d}^{-1})$	G S	0.34 0.17	0.15 0.3	0.34 0.17	1 0.1	0.15 0.15		
H _{W,mean} (m)	G S	11.3 6.6	19.5 22	3.7 1.9	22.3 4.3			
H _{F,mean} (m)	G S	49.3 47.4	37.1 34.8	56.3 51.7	42.8 43.4	90		
H _{B,mean} (m)	G S	30.6 34.5	35.4 30.4	31.3 34.9	23.8 41.5			
$\theta_W(-)$	G, S	0.45	0.45	0.55	0.45	0.35		
$\theta_F(-)$	G, S	0.15	0.15	0.25	0.15	0.35		

 $\langle \alpha \rangle$



Figure 73 : (a) Perméabilité (K), épaisseurs moyennes (H) et porosités (θ) pour les 5 modèles REF (Référence), THICK (épaisseur de la zone altérée plus faible), AHC (Perméabilité plus forte dans les granites) et HOM (propriétés homogènes). Les indices W et F codent respectivement pour la zone altérée (Weathered) et fissurées [Kolbe et al., 2016]. (b) Coupe sur les modèles REF, THICK et THIN.

Chacun des modèles a été calibré vis-à-vis du débit à l'exutoire et des temps de transferts sur une dizaine de forages répartis dans le bassin versant. Le débit à l'exutoire permet de contraindre la transmissivité globale du domaine et les temps de transfert caractérisent la porosité et les rapports de transmissivité. En dehors du modèle homogène plus parcimonieux, les 4 autres modèles sont correctement calibrés avec des temps de résidence moyens entre 30 ans et 50 ans. Ces temps

moyens sont relativement forts pour les horizons superficiels mais ils restent cohérents avec les données de traceurs atmosphériques. Ils s'expliquent par la porosité élevée des altérites et l'épaisseur importante de l'horizon fissuré.

6.1.3. <u>Résultats</u>



Figure 74 : Lignes d'écoulement souterrain sur un modèle calé du site de Pleine-Fougères [Kolbe et al., 2016]

Malgré ces temps de transferts relativement importants, les écoulements restent locaux pour les 5 modèles calés de Pleine-Fougères. Les cellules d'écoulement sont strictement limitées aux exutoires existants. Et même pour des épaisseurs d'aquifères de 50 à 70 m, il ne peut exister de cellules d'écoulement superposées. A une position donnée, tous les écoulements (quel que soit leur profondeur) aboutissent au même exutoire. Plus encore, l'échelle caractéristique des circulations entre recharge et décharge reste limitée entre 100 m et 1 km à une longueur inférieure à la taille caractéristique des versants (Figure 74). Même si les circulations souterraines restent moins sensibles que les circulations de surface à la rugosité de la topographie, elles n'en diffèrent pas fondamentalement dans leur organisation à l'échelle du versant. Les circulations apparaissent à l'interface entre hydrologie et hydrogéologie. Elles s'apparentent à l'hydrologie par leur organisation et a l'hydrogéologie par leur volume important et leurs temps de renouvellement moyen de plusieurs dizaines d'années.

Les 5 modèles conduisant à des temps de transfert voisins, les structures géologiques locales au versant ne semblent pas déterminantes à l'échelle du bassin versant et l'organisation globale des écoulements semble plus déterminée par la topographie que par la géologie. Ces résultats locaux au site de Pleine-Fougères ont été confirmés à une échelle plus importante sur un bassin élargi par rapport à Pleine-Fougères et sur les bassins du Jet et de la Douffine de superficies comprises entre 150 et 200 km². Les modèles sur ces trois autres cas doivent cependant être confirmés par un calage plus avancé de leurs propriétés hydrodynamiques.

6.1.4. Implications sur l'approche de modélisation

Les résultats précédents permettent d'envisager des simplifications dans la modélisation des circulations dans les zones altérées et fissurées analogues à celles utilisées dans les écoulements de proche subsurface. La première simplification vient de l'absence de superposition de cellules d'écoulement qui permet d'envisager une intégration des écoulements sur la verticale suivant l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer pour obtenir une équation de Boussinesq 2D.

La deuxième simplification envisageable repose sur l'hypothèse que les écoulements souterrains sont dominés par la structure des versants et leur l'organisation par rapport à la rivière du côté topographique et par les capacités de transfert et de stockage intégrées le long du versant du côté géologique. Dans ce cas, chaque versant pourrait être traité indépendamment en intégrant même éventuellement les écoulements transversalement au versant pour arriver à une équation de Boussinesq 1D. Même si cette approche néglige les transferts latéraux dans le versant et entre versants, elle respecte la structure des versants et l'évolution des capacités de transfert et de stockage le long des versants. Le flux de retour du milieu souterrain vers la surface (return flow) reste induit par la convergence du versant vers la rivière grâce à la fonction décrivant l'évolution de la largeur du versant avec la distance à la rivière w(x) (*Figure 75*). Les corrélations de l'altération avec la topographie pourraient être prises en compte à travers la fonction d(x) intégrant la profondeur de l'aquifère.



Figure 75 : Représentation 1D des écoulements de subsurface obtenu par intégration verticale des équations d'écoulement suivant l'hypothèse de Dupuit-Forchheimer et transversalement à la ligne de plus grande pente le long du profil w(x) [Troch et al., 2003].

Cette méthode décompose le domaine global en un ensemble de sous-domaines indépendants dans lesquels l'état de saturation peut être très variable. Les versants en aval peuvent être en grande partie saturés avec le déclenchement de suintement (seepage) sans que les versants amont partiellement saturés soient impactés. La complexité numérique induite par l'effet de seuil en aval ne se propage pas à l'intégralité du domaine. Localement au versant, cette approche 1,5D de modélisation peut différer des écoulements réels soit à cause de structures topographiques qui induisent des gradients transversaux, comme on l'a vu précédemment, soit à cause de structures géologiques qui réorientent les écoulements. Cela peut être le cas de fractures ou de failles majeures ou de variations locales importantes de l'altération ou de la fissuration [Martin et al., 2006]. Ceci dit, il ne s'agit plus alors seulement d'une question de modélisation mais de caractérisation pour spatialiser les distributions de perméabilité et de porosité. Dans tous les cas, les hétérogénéités géologiques doivent être marquées à l'échelle d'intérêt pour avoir un impact significatif sur la structure d'écoulement. A l'échelle plus grande du bassin versant de Pleine-Fougères, les structures géologiques ne sont pas suffisamment importantes pour avoir un impact au-delà de la phase de calibration. La méthode 1.5D pourrait être testée sur une variété de cas extraits des modèles de Pleine-Fougères 3D précédemment réalisés soit directement soit après la phase de calibration, à l'échelle locale au versant et globale au bassin versant.

L'alternative possible à cette approche 1,5D est une approche 2D à l'échelle du bassin versant en résolvant les équations de Boussinesq en utilisant par exemple le logiciel Modflow du domaine libre (Doherty, 2001; McDonald and Harbaugh, 1988). Modflow utilise une méthode algorithmique pour déterminer la position de la surface libre. Le logiciel peut être appelé en ligne de commande et une nouvelle interface écrite en Python (flopy) permet une utilisation plus haut niveau. Modflow s'appuie sur une grille qui peut être raffinée sur une partie des abscisses et des ordonnées. Il ne s'agit pas en revanche d'un raffinement local et le nombre de mailles peut devenir important.

6.1.5. <u>Méthode de calibration</u>

Le choix du modèle pertinent ne dépend pas seulement du détail de description attendu des processus mais aussi de la capacité à les calibrer avec les données disponibles de temps de réponse et de temps de résidence. Etant donnée la variabilité locale importante des propriétés hydrauliques, les données nécessaires doivent avoir une portée suffisante comme c'est le cas pour le débit en rivière et les concentrations de traceurs atmosphériques comme les CFCs dans les puits (Leray et al., 2012; Marçais et al., 2015). Les données de charge de support limité seraient utilisées de façon complémentaire pour informer l'état de saturation du système souterrain. Leur combinaison pourrait informer la structure des transferts et leurs échanges avec les zones de stockage. Cela demande néanmoins un effort important de calibration multi-modèle intégrant écoulement transitoire et transport de solutés et contraignant donc l'approche 1D ou 2D retenue. Dans tous les cas, cette approche devra être robuste et efficace numériquement tout en maintenant un niveau de description des processus pertinent.

6.1.6. <u>Conclusion sur le développement de la modélisation des aquifères de socle</u>

Dans ce contexte, la suite de ce travail consistera à adapter les modèles aux structures de circulation et à tester les démarches de modélisation envisagées 1D ou 2D en allant de la description géologique des aquifères jusqu'à la calibration de leur structure et de leurs propriétés hydrauliques. La question du calage des modèles et donc de l'interaction entre modèles et données sera aussi importante que la

pertinence de la représentation des circulations. Ces travaux sont menés en particulier dans le cadre de la thèse de Quentin Courtois, qui est co-financé par l'Onema et la région Loire-Bretagne.

6.2. Développement des conditions initiales par inversion

Ce thème est important pour Aqui-FR, et à ce stade du projet, il a pu être abordé dans le cadre du postdoc de Fadji Maina, sous la direction de Philippe Ackerer, et grâce au financement ONEMA En effet, les prévisions saisonnières des ressources en eau souterraine sont de plus en plus utilisées pour une meilleure gestion de celles-ci. Ces prévisions se font généralement sur de courtes périodes (un mois environ). Elles sont ainsi fortement dépendantes de notre connaissance de l'état initial de la ressource. De nombreux auteurs ont démontré l'importance des conditions initiales dans la modélisation du climat (Collins et Allen, 2002) ou encore dans les prévisions saisonnières en hydrologie (DeChant et Moradkhani, 2011). Li et al. (2009) ont montré que la fiabilité de ce type de prévision dépend des incertitudes liées aux conditions initiales. En effet, les conditions initiales d'un aquifère, définies comme étant les charges hydrauliques en tout point du système à l'état initial, représentent les valeurs de référence pour les calculs de variation des charges hydrauliques au cours du temps (Franke et al., 1987). Bien qu'indispensables, ces prévisions saisonnières ne sont pas courantes en hydrogéologie. la modélisation des eaux souterraines se fait habituellement dans des conditions d'équilibre ou sur de longues périodes de temps, Ainsi, l'estimation des conditions initiales n'a été que peu étudiée par rapport aux nombreux travaux dédiés à l'estimation des paramètres hydrodynamiques (Sun, 1994; Carrera et al., 2005).

Les conditions initiales sont généralement définies à partir d'une simulation au régime permanent (Hill et Tiedmann, 2007). Une alternative est l'interpolation des charges hydrauliques mesurées aux points d'observation, soit à partir de cartes piézométriques (Ting et al., 1998) soit par krigeage (Nobi et Gupta, 1997). Cependant, une mauvaise estimation des conditions initiales peut avoir un impact significatif sur les résultats du modèle, pendant des années dans les aquifères confinés ou des décennies dans les aquifères non confinés (Rushton et Wedderburn, 1973) et peut aussi conduire à des estimations inexactes des paramètres (Liu et al., 2009). Afin d'estimer correctement ces conditions initiales, nous avons développé une méthodologie d'inversion qui consiste à déterminer les conditions initiales à partir des variations des hauteurs piézométriques mesurées. Dans ce travail, nous supposons que les champs de paramètres hydrodynamiques sont connus (par calage d'un modèle lors de travaux précédents par exemple), seules les conditions initiales seront ainsi déterminées.

Par souci de simplicité, nous considérons un écoulement bidimensionnel dans un aquifère confiné. Cependant, les développements proposés ci-après sont également valables pour des écoulements tridimensionnels, dans les systèmes confinés ou non confinés. Le modèle mathématique décrivant cet écoulement bidimensionnel est représenté par l'équation ci-après :

$$S\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{T}\nabla h) + f \qquad in \ \Omega, \ t \in [0,T]$$
(1)

avec S le coefficient d'emmagasinement [-], h la charge [L], **T** le tenseur de transmissivité $[L^2 T^{-1}]$, et f le terme puits-source $[LT^{-1}]$.

La résolution de cette équation nécessite les conditions initiales et aux limites données par :

$$\begin{cases} h(x, y, 0) = h^{0}(x, y) & \text{in } \Omega \\ h(x, y, t) = h^{D}(t) & \text{on } \partial\Omega_{D}, \quad t \in [0, T] \\ -\mathbf{T}\nabla h(x, y, t) \cdot \mathbf{n} = q_{N}(t) & \text{on } \partial\Omega_{N}, \quad t \in [0, T] \end{cases}$$
(2)

Avec Ω le domaine modélisé, $\partial \Omega_D$ et $\partial \Omega_N$ les limites du domaine qui correspondent aux conditions de Dirichlet et Neumann, et n le vecteur unitaire. $h^0(x, y)$ représentent les conditions initiales définies sur l'ensemble du domaine.

En raison de la complexité des systèmes naturels (hétérogénéité des aquifères, variabilité à la fois dans le temps et dans l'espace des termes puits-sources), l'équation d'écoulement est résolue numériquement, ce qui conduit à sa forme discrétisée :
$$\mathbf{A}\mathbf{h}^{k} = \mathbf{b}^{k-1} \tag{3}$$

avec k le pas de temps, h le vecteur des charges hydrauliques, **A** la matrice du système, qui dépend de la géométrie et des paramètres du modèle, et **b** le membre de droite, qui dépend des conditions aux limites, des termes puits-sources et des charges hydrauliques au pas de temps précédent k-1.

La méthodologie d'inversion consiste à déterminer les conditions initiales à partir des observations de charges hydrauliques en minimisant une fonction 'objectif' qui est définie comme suit:

$$J(\mathbf{h},\mathbf{h}^{0}) = \sum_{k=1}^{N} \left(\mathbf{h}^{k} - \hat{\mathbf{h}}^{k}\right)^{T} \left[\mathbf{W}^{-1}\right] \left(\mathbf{h}^{k} - \hat{\mathbf{h}}^{k}\right) + \mu \left(\mathbf{h}^{0} - \tilde{\mathbf{h}}^{0}\right)^{T} \left[\mathbf{V}^{-1}\right] \left(\mathbf{h}^{0} - \tilde{\mathbf{h}}^{0}\right)$$
(4)

Avec **h** les charges calculées par le modèle, $\hat{\mathbf{h}}$ les charges mesurées, N est le nombre de pas de temps. $\tilde{\mathbf{h}}^0$ représentent les charges initiales connues et \mathbf{h}^0 les charges initiales calculées par le modèle. L'indice T représente l'opérateur de transposition. W est la covariance des erreurs de mesure associées aux charges hydrauliques, alors que V représente la covariance des erreurs de mesure associées aux conditions initiales.

Selon la méthode numérique (différences finies ou éléments finis) utilisée pour résoudre l'équation du modèle mathématique, les conditions initiales doivent être déterminées pour chaque nœud ou élément du domaine discrétisé. Compte tenu des fortes hétérogénéités des aquifères, la discrétisation des modèles mathématiques des eaux souterraines nécessite plusieurs milliers de nœuds ou d'éléments. Le problème d'optimisation minimisant (4) est alors sur-paramétré, car le nombre de points de mesures est en général très limité et donc nettement inférieur aux nombres d'inconnues (les conditions initiales associées aux nœuds ou éléments du domaine discrétisé). Afin d'éviter cette surparamétrisation, nous avons utilisé la technique de paramétrisation multi-échelle adaptative suggérée par Ackerer et al. (2014) et Maina et Ackerer (2017a). Cette approche, initialement appliquée à l'estimation des paramètres, a été étendue à l'estimation des conditions initiales dans le cadre de ce projet. Cette technique consiste à représenter les conditions initiales sur un maillage grossier qui est indépendant du maillage utilisé pour résoudre le modèle d'écoulement. Les deux maillages sont reliés par des fonctions d'interpolation. Les variations spatiales de charges hydrauliques sont en général très lisses et nous supposons que les conditions initiales peuvent être approchées par une somme de fonctions linéaires par morceaux, chaque fonction étant définie sur un seul triangle. Par conséquent, le maillage des conditions initiales est une triangulation et est choisie pour être très grossier au début de la minimisation. Il est par la suite raffiné suivant la décroissance de la fonction objectif (Ackerer et al. 2014 et Maina and Ackerer 2017a).

La méthodologie décrite est appliquée à un cas test synthétique qui simule l'écoulement bidimensionnel dans un aquifère confiné pour une première évaluation de la robustesse de cette méthode d'estimation. La géométrie, les conditions aux limites et les champs des paramètres hydrodynamiques (emmagasinement et conductivité hydraulique) sont issues d'une étude d'un aquifère réel (Figure 76) situé au sud de la France (Maina 2016).



Figure 76: Les charges hydrauliques à l'état initial en m, la localisation des 4 puits de pompage et les conditions aux limites (en rouge les conditions de Dirichlet et en noir celle de Neumann)

Pour ce cas synthétique, nous avons généré les données d'entrée au modèle d'inversion (les charges hydrauliques qui serviront à déterminer les conditions initiales). Pour ce faire, des conditions initiales ont été obtenues à partir d'une simulation en régime permanent avec une recharge uniforme de 0,35 mm/jour. Une simulation en régime transitoire est ensuite effectuée en utilisant les résultats du calcul en régime permanent comme conditions initiales et en appliquant une recharge uniforme de 0,40 mm/jour et en présence de 4 puits de pompages (Figure 76). La durée de simulation est de 42 jours. Nous avons placé aléatoirement 30 points d'observation dans le domaine. Pour chaque point d'observation, nous avons 10 valeurs de référence (une condition initiale et une valeur par jour au cours des neuf premiers jours). Un bruit gaussien variant entre [-5 cm; 5 cm] a été rajouté aux valeurs de référence pour simuler les erreurs de mesure. Cette expérience numérique se rapproche ainsi des conditions réelles où les données de référence sont limitées et contiennent des erreurs de mesure. La procédure d'inversion présentée dans Ackerer et al. (2014) et Maina and Ackerer (2017a) permet d'explorer en partie du moins, l'ensemble des solutions possible d'un problème d'inversion. Pour le problème de minimisation présenté ici, cinquante solutions ont été générées. Ces 50 calages sont probablement insuffisants pour obtenir une estimation fiable de l'incertitude, mais ce nombre a été estimé suffisant pour évaluer la robustesse de la méthodologie. Pour chaque calage, la procédure de minimisation a été arrêtée dès que la fonction 'objectif' atteint une erreur équivalente à l'erreur de mesure imposée.



Figure 77: Comparaison des distributions spatiales des conditions initiales obtenues par inversion et les valeurs exactes de référence.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que les différences entre les conditions initiales de référence et les conditions initiales estimées par inversion sont acceptables (Figure 77). La majorité des solutions estiment les conditions initiales avec une erreur moyenne inférieure à 1,7 m (Figure 78). Au niveau des points d'observation, les différences entre les charges calculées et mesurées sont du

même ordre que les erreurs de mesure, les plus grandes différences étant ainsi présentes dans les zones dépourvues de points d'observation.



Figure 78: Distribution des erreurs d'estimation des conditions initiales associées aux 50 calages effectués.

Nous avons également effectué une validation croisée en comparant les conditions initiales de référence aux conditions initiales obtenues par inversion pour 2 points qui n'ont pas été utilisés dans l'inversion (Figure 79).



Figure 79 : Validation croisée pour deux points, comparaison entre les valeurs mesurées et 3 solutions de l'inversion.

Conclusion

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé une approche théorique permettant d'estimer les piézométries initiales pour des prévisions à court terme. L'expérience numérique réalisée montre que les conditions initiales peuvent être déterminées par inversion en utilisant les valeurs de charges hydrauliques mesurées au cours du temps. Même si les conditions de l'expérience numériques sont proches de conditions réelles, il reste à valider l'approche dans des conditions de terrain.

6.3. Sensibilité au prélèvement en nappe et conséquence

Une étude sur les incertitudes liées à la méconnaissance des prélèvements en nappe a été menée durant le stage M1 de Loriane Carlier-Candillon en 2016. Cette étude s'est focalisée sur le bassin de la Seine, pour lequel plusieurs bases de données recensant les prélèvements en nappe sur des périodes plus ou moins redondantes étaient disponibles (Tableau 4). Il y a entre 2 et 3 ans de délais pour pouvoir accéder à ces informations.

Tableau 4 : Bases de données de prélèvements à disposition : Bd = Bases de données ; Notation= Notation dans le document ci-après ; Nb = Nombres de points de prélèvements moyens par an ; AESN= Agence Seine Normandie ; BNPE= Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau

Bd	Not	Origine	Nb	Commentaires
1994- 2010	-	AESN	10306	Base de données retravaillée par l'AESN. À partir de 2007, il y a une baisse du nombre de forages recensés, sans doute due aux délais assez longs des récoltes d'informations.
2008 - 2012	bis	AESN	10253	La base contient les mêmes informations que la première mais pour la surface et le souterrain.
2011	ter	AESN	12267	La base contient les mêmes informations que les précédentes.
2012	qua	BNPE	10000	Site nouvellement ouvert, données sur toute la France, cette base de données officielle est amenée à se développer mais pour l'instant seule l'année 2012 est disponible.
2008- 2013	cin	AESN	10412	Base fournie par l'AESN, elle n'a pu être exploitée dans les détails.

6.3.1. Incertitude sur l'estimation des prélèvements annuels

Plus de 10 000 points de prélèvements en nappe sont relevés sur le bassin de la Seine, dont environ 1700 pour les prélèvements industriels, 3700 pour les prélèvements pour l'alimentation en eau potable et 4800 pour l'irrigation.

La Figure 80 présente les volumes annuels prélevés sur une période 19 ans, avec pour les 5 dernières années, les valeurs issues des différentes bases de données ainsi qu'un focus sur les prélèvements dédiés à l'eau potable et à l'irrigation.





Figure 80 Histogrammes représentants les volumes annuels prélevés en nappe totale (en haut) pour l'eau potable en bleu, et

l'agriculture en vert.

On constate une forte hétérogénéité entre les différentes bases de données, avec une incertitude de l'ordre de 30% en moyenne pour les prélèvements totaux. Ainsi, en 2012, l'ensemble des prélèvements sont estimés entre 582 Mm3 et 955 Mm3. Les volumes des prélèvements estimés pour l'année la plus récente (2013) sont particulièrement faibles et semble peu fiables.

La répartition par usage montre également une très forte variabilité entre les sources de données. Pour l'alimentation en eau potable, cela est en partie due au fait que des prélèvements en nappe alluviale peuvent être considéré comme des prélèvements en rivière ou des prélèvements nappe¹². On constate malgré tout que les prélèvements en eau potable montrent une assez forte variabilité interannuelle, qui semble assez proche des prélèvements pour irrigation.

6.3.2. <u>Impact de la méconnaissance des prélèvements sur les simulations</u> pluriannuelles de la piézométrie

Par construction, les informations sur les prélèvements (basées sur la redevance) ne sont disponibles qu'avec un délai de deux ou trois ans. On peut tenter d'estimer ces relations avec des proxys, comme par exemple, les caractéristiques météorologiques de l'année, mais, les relations statistiques testées sont peu fiables.. Ainsi, afin de quantifier les erreurs commises suite à une méconnaissance de la variabilité annuelle des prélèvements, une étude de sensibilité a été réalisée en comparant une simulation où les prélèvements sont constants dans l'année et d'une année à l'autre, versus une simulation où les prélèvements varient d'une année sur l'autre et au sein d'une année via la saisonnalité des prélèvements pour l'irrigation.



Figure 81 Différences de hauteurs piézométriques entre les simulations n°1 et 3 (prélèvements constants – variables) au niveau des nappes libres du bassin hydrogéologique de la Seine avec H10 niveaux de crise et H90 niveaux piézométriques fréquents

Les simulations sont analysées sur la période 1994-2013. Les cumuls des prélèvements sur cette période sont identiques pour les deux simulations. La Figure 81 présente les écarts entre ces deux

¹² La nappe d'accompagnement étant rarement explicitement représentée dans les modèles, ce type de prélèvement doivent souvent être considéré comme des prélèvements en rivière dans nos applications

simulations en terme de hauteur piézométrique moyenne (Hmoy), ainsi que les hautes eaux (quantiles 90, H90) et basses eaux (quantile 10, H10) sur deux décennies. Les différences sont assez variables dans l'espace. La simulation intégrant des prélèvements variables dans le temps présente sur une grande part du domaine un niveau piézométrique moyen inférieur de plus de 0.5 m mais à l'inverse, un niveau piézométrique plus faible de plus de 0.5m sur une grande partie du domaine lors des basses eaux par rapport à la simulation où les prélèvements sont constants dans le temps.

Les différences sur les basses eaux atteignent plus d'un mètre sur environ de 5% du domaine, et des différences de plus de 50cm sur environ 10 à 15% du domaine. Les hautes eaux sont également affectées, avec 30% des mailles ayant une différence de plus de 40 cm.

6.3.3. <u>Impact de la méconnaissance des prélèvements sur la simulation annuelle de la piézométrie</u>

On se place ici dans un contexte plus proche d'une prévision saisonnière : à partir d'un état initial identique, on teste la sensibilité du modèle aux prélèvements sur une période d'un an. Cette période est un peu plus longue que les futures prévisions saisonnières. Les simulations commencent au 1^{er} aout pour se terminer le 31 Juillet. Pour cela, on utilise les prélèvements des deux années les plus contrastées : 1994 avec les prélèvements les plus faibles et 2002 avec les prélèvements les plus forts (Figure 80). Ces deux prélèvements sont utilisés dans deux cas contrastées ; une année sèche (2009-2010) et une année humide (2001-2002). Nous nous sommes concentrés sur les piézomètres correspondant à des indicateurs locaux. Les résultats sont ici présentés pour le piézomètre de Batilly en Gâtinais qui fait partie des cinq piézomètres utilisés pour l'indicateur central de Beauce (Figure 82).



BATILLY-EN-GATINAIS -2.807892



Figure 82 Évolution des piézométries observées (noir) et simulées (n°4 à gauche et 5 à droite) (rouge, vert) à Batilly en Gâtinais à l'échelle de l'année

Il apparait que les prélèvements ont une influence réduite sur l'évolution de la piézométrie en ces points. Les indicateurs de Champagne et de Beauce semblent avoir été choisis pour être plus représentatifs de l'état général de l'aquifère que de la pression des prélèvements puisqu'ils ne réagissent peu aux variations de prélèvements sur leurs secteurs respectifs.

7. Perspectives à court terme (financement acquis)

7.1. Comparaison Aqui-FR / GRACE

La mission satellitaire Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), lancée en 2002, mesure des variations mensuelles du champ de gravité terrestre à des résolutions de l'ordre de 300 km qui peut être converties en variations de masse d'eau (Figure 83). Ces mesures fournissent un moyen sans précédent pour estimer les variations de stocks d'eau continentale, principalement à l'échelle globale (Chen et al., 2005 ; Ramillien et al., 2004). Ces données ont également été utilisées pour évaluer les simulations hydrologiques à grande échelle (Niu et al. 2007 ; Vergnes et Decharme., 2012) qui ont prouvé qu'il était possible d'utiliser ce type de données pour l'évaluation des schémas

d'aquifères développés à grande échelle.



Figure 83 A gauche : illustration de la variation du stock total d'eau de GRACE. La variation de lame d'eau vue par GRACE correspond à la somme de toutes les composantes hydrologiques intégrée verticalement, figure issue de Moussa, 2016.

Vergnes et al. (2012) ont utilisé les données GRACE pour évaluer les simulations obtenues avec un modèle hydrogéologique simplifié sur la France couplé à SURFEX. La comparaison avec les données GRACE a permis de montrer que la prise en compte d'une couche aquifère affleurante sur le domaine d'étude permettait d'améliorer la dynamique des variations de stock d'eau dans le modèle (Figure 84).

Dans le cadre du projet Aqui-FR, on souhaite également utiliser les données GRACE pour évaluer la variation des stocks d'eau modélisés, et ainsi, fournir une évaluation plus intégrée de la dynamique d'évolution de la ressource en eau souterraine que celle rendu possible par la comparaison entre modèle et observation aux puits. De nouveaux traitements des données GRACE permettent maintenant de traiter des échelles spatiales compatibles avec l'échelle régionale (Longuerverne et al. 2010, Moussa 2016, Figure 85).

Ce travail va pouvoir être réalisé prochainement. Pour avoir l'estimation la plus complète des variations de stocks simulés, il a été nécessaire d'enrichir les sorties d'Aqui-FR avec les variations de stock dans la zone non saturée.



Figure 84 Comparaison des stocks d'eau simulés par SURFEX-TRIP en incluant une représentation simplifiée de la nappe (en bleu) et sans (en rouge) avec les observations GRACE (en noir) sur la France. En haut est représenté le domaine hydrogéologique représenté dans le modèle simplifié (seule la couche affleurante est représentée). Figure issue de Vergnes et al., 2012.



Figure 85 Variation des stocks d'eau sur le bassin de la Loire estimés par GRACE avec deux méthodes (CSR mensuelle, et GRGS décadaire) et comparaison avec les estimations d'un schéma de surface américain (GLDAS-NOAH). Source : Laurent Longuevergne

7.2. Intégration réseau hydro RHT

Aqui-FR intègre des applications hydrogéologiques développées de façon indépendante à des résolutions spatiales différentes. Si cela est bien adapté à l'étude de la ressource en eau souterraine, cela peut être problématique pour l'hydrologie de surface, la densité du réseau hydrographique variant fortement d'une application à une autre. Afin d'avoir un réseau hydrographique homogène sur l'ensemble du territoire, et capable de connecter les différentes applications hydrogéologiques entre elles (en particulier pour les 4 applications « Craie » sur la Seine), on souhaite intégrer un réseau hydrographique commun et à forte résolution dans Aqui-FR.

Le réseau hydrographique théorique français ou RHT<u>www.irstea.fr/rht</u> a été développé par IRSTEA pour répondre à des problématiques hydroécologiques (Pella et al., 2012).Plus de 280 000 km de cours d'eau (i.e., six fois plus que dans SIM) sur plus de 114 000 biefs (i.e. 4 fois plus que dans SIM) sont intégrés (Figure 86). Un zoom sur la Beauce montre que ce réseau est plus fin que celui utilisé dans les applications les plus fines (Figure 87), et qu'il permettra donc de connecter effectivement entre elles les applications.



Figure 86 A gauche : la figure représente la distribution spatiale des débits estimés uniquement avec les flux SURFEX et le réseau RHT.A droite : Estimation des temps de transfert en tout point du réseau RHT



Figure 87 Zoom sur le bassin de la Seine : la carte présente le réseau hydrograpique RHT (en noir), ainsi que les réseaux hydrographiques de l'application Marne-Loing (en bleu) et Seine en rose. Le réseau hydrographique Seine est identique à celui utilisé aujourd'hui dans SIM.

Afin de tester la faisabilité, nous avons utilisé ce réseau avec les flux SURFEX afin d'estimer les débits sans nappe donc. La densité du réseau hydrographique nécessite l'utilisation d'un modèle de routage en rivière performant. On utilise pour cela la toute dernière version du modèle RAPID pour lequel la vitesse d'exécution en parallèle a été particulièrement améliorée (David et al., 2015).Cela a nécessité plusieurs étapes :

- Identification des liens entre les mailles SURFEX et les sous-bassins versants. En moyenne, la taille des sous-bassins alimentant un brin de rivière est de 5km².
- Estimation des temps de transfert vers la rivière : au vu de la petite taille des sous-bassins, le temps de transfert à la rivière peut être considéré comme étant partout inférieur à la journée, ce qui simplifie les calculs. Il faudra cependant développer ce point si on veut estimer des débits à un pas de temps plus fins.
- Estimation des temps du coefficient K déterminant le temps d'écoulement par bief. Pour cela, on se base sur les métadonnées associées au réseau RHT, et qui ont pour la plupart été obtenues par des formules empiriques :
 - Vitesse=Débits_moyens*largeur*hauteur
 - K=longueur/Vitesse

En faisant l'hypothèse que les temps de transfert ainsi estimés peuvent se cumuler jusqu'à l'exutoire pour obtenir les temps en chaque point, on a pu comparer les temps de concentration des bassins. Une correction a été apportée sur le bassin de la Garonne pour réduire le temps de transfert à moins de 5 jours. On obtient la carte des temps de transfert présentée Figure 86.

La *Figure 88* présente des exemples de débits simulés, en comparaison avec les observations et avec les débits obtenus par SIM.

L'intégration de cet élément dans Aqui-FR consistera en l'insertion d'une unité dédiée au sein de la branche Syncho. Cette branche sera alimentée d'une part par les flux SURFEX (lorsqu'il n'y a pas d'applications hydrogéologiques), et d'autres part par les échanges nappe-rivière et les débordements simulés par chaque application, voire, par les débits simulés par ces applications sur leur réseau qui pourrait alors être imposé. Cela nécessite un travail spécifique sur des SIG. Les débits pourront alors être simulés par RAPID sur toute la France, et pourront alimenter les applications se trouvant à l'aval de rivière (exemple Poitou Charente, Seine-Oise...). Cela sera particulièrement utile dans le cas où les débits observés actuellement imposés ne sont pas disponibles, par exemple, lors des études rétrospectives longues durées, ou dans les études d'impact du changement climatique. #LA_LOIRE_A_MONTJEAN_SUR_LOIRE 1.084697

#LA_GARONNE_A_TONNEINS



Figure 88 Exemple de débits simulés avec RAPID-SURFEX sur le réseau RHT

7.3. Impact CC sur ressource en eau incluant les nappes (stage M2)

Une première étude d'impact du changement climatique avec Aqui-FR est en cours de réalisation dans le cadre du stage de master II de Ryma Aissat. Il s'agit ici de comparer les impacts du changement climatique estimés sur la ressource en eau avec et sans prise en compte explicite des aquifères. Pour cela, on se base sur l'étude de Dayon (2015), qui a estimé avec la nouvelle version de SIM incluant le schéma de surface SURFEX et une méthode de régionalisation et débiaisage adaptée l'impact sur la ressource en eau en France avec des projections climatiques issues de CMIP5. Pour être réalisable dans le cadre d'un master, seules trois projections climatiques sous le scénario d'émission RCP8.5 (Moss et al.,2010) seront traitées.

A ce stade, les résultats sont très préliminaires.

Les projections climatiques ont été sélectionnés, avec comme critères :

- Le choix de projections sous scénario d'émission RCP8.5 car ce sont les plus contrastés.
- La variation moyenne annuelle sous changement climatique des flux d'eau sur le domaine simulé par Aqui-FR entre la période de référence 1960-1990 et l'horizon 2070-2100 issue des simulations lancées avec SURFEX.
- La vérification que la variation du drainage actuel est cohérente entre les différents modèles afin de s'assurer que les impacts obtenus sous changement climatique sont bien liés à l'évolution du climat et non pas à des états initiaux différents.

Nous avons ainsi calculé les variations de l'écoulement relatif caractérisant la différence de flux entre les simulations futures et les simulations en temps présent et qui sont résumées dans le tableau cidessous:

Tableau 5 : Evolution moyenne de l'infiltration (%) pour la période 2070 -2100 et drainage au temps présent (mm/j) pour la période 1960-1990 par modèle de climat sur l'ensemble de la France et sur le domaine Aqui-FR

Modèle	Infiltration au temps présent (mm/j)		Evolution moyenne de l'infiltration (%)			
	France	Domaine Aqui-FR	France	Domaine Aqui-FR		
ACC1	0.85	0.92	-18.29	-4.33		
BCC1	1.30	1.34	-3.75	7.37		
BNU1	1.24	1.30	-23.71	-12.14		
CAN1	1.03	0.58	-16.07	-15.69		
CAN2	0.95	0.99	-9.74	3.62		
CAN3	0.96	0.51	-6.35	-0.51		
CAN4	0.95	0.99	-7.60	1.08		
CAN5	1.01	1.05	-8.34	1.34		
CSI1	1.08	0.54	-28.20	-27.01		

IPS1	0.89	0.45	-6.98	11.52
MIR1	0.83	0.80	-23.55	-11.39
MIR2	0.83	0.79	-22.57	-10.29
MIR3	0.86	0.84	-32.60	-31.05
NOR1	1.16	1.23	-25.44	-14.17

Ainsi, les quatre modèles climatiques suivants ont été sélectionnés: CAN1, CAN3, CSI1, IPS1 montrant des résultats assez contrastés en termes d'évolution de l'infiltration sur le domaine ciblé. Nous remarquons qu'il n'y a pas un grand écart en termes de drainage sur la période actuelle entre le domaine couvert par Aqui-FR par rapport à la France entière. Par contre, l'écart est plus net sur la période 2070-2100, car il y a un gradient nord-sud d'évolution des précipitations et donc des débits sur la France (Dayon et al., 2015). Cela est également illustré Figure 89 qui fait nettement apparaître le gradient Nord-Sud.



Figure 89 Evolution (en %) de l'infiltration simulée par Surfex forcé par les projections climatiques régionalisées entre les périodes 2070-2100 et 1960-1990.

Le Tableau 6 présente l'évolution des précipitations, de températures ainsi que les impacts sur les flux écoulés (infiltration + ruissellement) sur le domaine Aqui-FR sur l'année ainsi qu'en été et en hiver pour les quatre projections sélectionnées.

Tableau 6 : Evolution des précipitations, températures et drainage par modèle de climat sur le domaine Aqui-Fr sous changement climatique

Modèle	Evolution des précipitations (%)			Evolution des températures (C°)			Evolution moyenne de l'écoulement (%)		
	Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté	Année	Hiver	Eté
Can 1	3.04	18.72	-14.1	5.12	2.90	7.56	-11.83	-4.26	-32.63
Can 3	9.49	29.18	-19.24	4.89	2.84	7.68	1.45	17.61	-41.93
CSI 1	-6.89	19.02	-11.87	4.61	2.80	7.50	-24.39	-5.92	-68.20
IPS 1	14.90	39.57	-15.36	4.26	3.18	6.26	8.12	18.59	-31.69

8. Développements/études à réaliser

8.1. Intégration de nouvelles applications + nouveaux modèles (tous)

8.1.1. Intégration de l'application des formations tertiaires du bassin de Paris

Cette application complète la série de discrétisations en modèle plus raffiné de « l'ancien » modèle 6 couches qui couvrait l'ensemble de bassin de la Seine, discrétisation initiée par la création des 4 modèles « Craie » présentés précédemment et d'ores et déjà implantés dans la plateforme Aqui-FR. Ce nouveau modèle « Tertiaire » couvre l'ensemble des formations tertiaires du bassin de Paris (*Figure 90*). La surface totale modélisée est de 22 112 km², représentée par des mailles de 250 à 2 000 mètres de côté. Le linéaire du réseau hydrographique représenté est de 6 053 kilomètres.



Figure 90 :Délimitation du domaine d'étude et types de limites Lithologie des formations aquifères modélisées Les limites du modèle sont classiquement de deux types :

- les limites hydrographiques naturelles : ce type de limites se retrouve sur les bordures nord et sud du modèle par les bras des rivières Oise, Troëne, Epte et Eure au nord et à l'ouest et Loing et Loire au sud-est.
- Les limites d'affleurements de ces formations tertiaires à l'est (le long de la cuesta d'Île de France).

Neuf formations aquifères sont repésentées dans le modèle et précisées Tableau 7

Série	Etage	Couche aquifère modélisée	Surface modélisée (km ²)	Nombre de mailles	Système aquifère majeur		
Miocène	Burdigalien	ensemble détritique de Sologne	1159	4267	« Nappe de		
inférieur		man	marnes de Blamont				
	Aquitanien	calcaires de Pithiviers	2435	7445	Deduce		
		mola	sses de Gâtinais				
		calcaires d'Etampes	5678	16795	« Nappe de		
Oligocène	Rupélien	sables de Fontainebleau & calcaires de Brie	9659	32152	l'Oligocène »		
		marnes Ver					
Eocène	Duisbanian	calcaires de Champigny ss.	11721	30618			
supérieur	Priabonien	marne					
Eocène moyen	Bartonien	calcaires de Saint-Ouen & sables de l'Auversien	11161	23549	« Nappe de Champiany el »		
		Mari		Champigny st. "			
Eocène inférieur	Lutétien/ Yprésien	calcaires du Lutétien & sables du Cuisien	16347	24608			
		argile	s du Sparnacien				
Paléocène	Thanétien	sables du Thanétien	5960	8618			
Crétacé supérieur	Crétacé	Craie	6590	9147	-		

Tableau 7 Formations souterraines modélisées et caractéristiques

Piézométrie calculée en régime permanent et piézomètres de référence

La Figure 91 précise la piézométrie moyenne calculée sur les affleurements des différentes formations aquifères et donne la position des piézomètres de référence (utilisés lors du calage du modèle en régime transitoire d'écoulement)



Figure 91 Piézométrie calculée en régime permanent d'écoulement moyen et piézomètres de référence

8.1.2. <u>Intégration des applications développées dans les systèmes aquifères</u> <u>alluviaux du bassin Adour-Garonne</u>

Trois modèles hydrodynamiques des systèmes aquifères alluviaux de la Garonne ont été développés pour gérer la ressource en eau souterraine disponibles pour l'irrigation, il s'agit des modèles hydrodynamiques de la Haute Garonne, de l'Ariège et du Tarn et Garonne. Ces modèles sont du type bicouche représentant les alluvions (couche 1) et les formations molassiques tertiaires peu perméable (couche 2). Une grille de calcul de 250 m de côté est utilisée pour les 3 modèles. Les modèles simulent de manière dynamique l'écoulement dans la nappe et dans les cours d'eau associés avec un

pas de temps de calcul hydrodynamique décadaire. L'extension de ces modèles est reportée sur la figure.

Le modèle de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif (Bessière et al 2013) couvre une superficie de 410 km² soit un nombre de maille de calcul de 6525. Il a été calibré sur la période 2000-2007.

Le modèle Haute Garonne (Bardeau et Bourdaa 2010) couvre une superficie de 1350 km² environ soit un nombre de maille de calcul de 21630. Il a été calibré sur la période 2000-2008

Le modèle hydrodynamique de la nappe alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron (Bardeau et Le Cointe 2016) couvre une superficie de 940 km² environ représentée par 36 442 mailles de calcul. Cette plaine alluviale est le siège de la confluence des trois cours d'eau, la Garonne, le Tarn et l'Aveyron, ce qui lui confère une forme particulière de triangle renversé. Le modèle est calé sur une période de 20 ans (1995-2015) aussi bien sur le niveau de la nappe que sur le débit des cours d'eau



Figure 92 : Localisation et extension des modèles Haute Garonne, l'Ariège et Tarn et Garonne.

Deux types de condition aux limites sont utilisés pour ces modèles:

Limites à flux nul : Le modèle est limité latéralement par l'affleurement des formations molassiques, considérées comme imperméables.

Flux imposé : notamment en amont en amont des formations alluviales comme par exemple pour le modèle Tarn et Garonne (Figure 93)



Figure 93 : Exemple de conditions aux limites appliques au modèle Tarn et Garonne.

8.2. Mise en place du suivi opérationnel et Réalisation d'un dispositif de mise à disposition des sorties pour les gestionnaires

Actuellement la chaîne SIM est activée opérationnellement deux fois par jour pour l'analyse des ressources en eau temps réel. Une réanalyse est également activée une fois par mois pour intégrer toutes les données pluviométriques disponibles (notamment celles du réseau climatologique d'Etat).

Une chaîne SAFRAN-SURFEX-AQUI-FR similaire sera mise en place dans l'environnement opérationnel de Météo-France. Elle fournira quotidiennement une image instantannée de l'ensemble des composantes du système hydro-géologique : niveau des nappes, débits des rivières, contenu en eau des sols.

Le suivi du fonctionnement de cette chaîne sera assuré par Météo-France. Les résultats des modèles seront mis à disposition des partenaires du projet, qui construiront des indicateurs à destination des gestionnaires de ressources en eau.

8.3. Prévision saisonnière

La connaissance de la ressource en eau disponible plusieurs mois à l'avance aurait de nombreux impacts sur la gestion de celle-ci. A ce jour, les prévisions saisonnières sont relativement peu fiables en Europe, mais, des améliorations sont espérées avec notamment une meilleure prise en compte des téléconnexions océan-atmosphère. Néanmoins, la ressource en eau souterraine semble plus facilement prévisible à long terme, notamment en période estivale, du fait de la faible contribution de la recharge en cette période, et de ce fait, de l'importance des conditions initiales sur la détermination de la décharge de la nappe. Ainsi, on s'attend à ce que la prévision saisonnière de la ressource en eau souterraine réalisable avec Aqui-FR présente une certaine fiabilité au moins à certaines périodes de l'année.

Dans le cadre de la convention « Service Climatique » financée par le MEEM, nous avons obtenu un financement spécifique pour étudier le potentiel des prévisions saisonnières avec Aqui-FR.

On utilisera les jeux de données constitués dans le cadre du projet FP7 EUPORIAS pour la prévision saisonnière des débits avec le modèle SIM. Ceux-ci sont bâtis à partir du modèle ARPEGE-Climat système 5, pour lequel la période de hindcast couvre la période 1991-2014 et comprend 15 membres. Pour chaque mois de cette période, on dispose des 15 prévisions d'ensemble réalisées avec le modèle pour les 7 mois suivants. Ces résultats ayant une faible résolution (2.5°), ils ont été corrigés

statistiquement pour être ramenés à une échelle spatiale pertinente pour SAFRAN/SURFEX (maille de 8 km sur le territoire français). Dans le cadre du présent projet, ils seront utilisés pour forcer Aqui-FR et produire des prévisions saisonnières hydrogéologiques qui pourront être comparées avec la climatologie d'Aqui-FR (résultats des simulations de longue durée, section 7.4). On pourra appliquer des calculs de score de la prévision saisonnière pour qualifier la qualité des prévisions.

Il sera également important d'associer des gestionnaires à l'utilisation de ces résultats. La conception d'indicateurs pertinents sera recherchée afin de faciliter l'appropriation de ces outils et de montrer l'intérêt de leur utilisation à l'échéance saisonnière. La Figure 94 montre le type de produit mis à disposition du SMEAG (gestionnaire de la Garonne) dans le cadre d'Euporias.



Garonne @ Portet 2016

Figure 94 prévisions saisonnières des débits naturels de la Garonne à Portet pour les mois de juin à octobre 2016. Les boîtes à moustache représentent la distribution des débits naturalisés pour 1994-2014 (en gris, des débits simulés avec des scénarios historiques (en vert) et des débits simulés avec la prévision saisonnière (en jaune). Certaines années particulières sont également représentées (étoiles, triangles et carrés).

8.4. 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.

8.5. Avis des utilisateurs et implications dans le suivi

Le projet Aqui-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 (142). C'est pourquoi dès le début du projet, une enquête sur l'intérêt du projet Aqui-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 : Aqui-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 jour (cf section 3.4)

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.

Au vu des avancés du projet Aqui-FR et de la production de résultats concrets, il est nécessaire de renforcer maintenant les interactions avec les gestionnaires de l'eau.

9. Conclusion

La première phase du projet Aqui-FR a permis de mettre en place et d'exploiter une plateforme de modélisation hydrogéologique nationale rassemblant trois modèles hydrogéologiques, 19 applications, (dont 6 bassins karstiques) couvrant 149 000 km² et représentant 57 couches aquifères ou aquitards.

La première évaluation a été réalisée sur une période de 6 ans, via une comparaison des simulations

avec les observations de charge sur plus de 600 piézomètres et de débits sur près de 300 stations.

Cette analyse pourra être étendue à une période plus longue, depuis 1958, avec le seul obstacle de la méconnaissance des prélèvements en nappe dans le passé. Cette réanalyse servira de référence pour la caractérisation des situations en temps réel et en mode prévision qui seront réalisées dans la seconde phase.

En parallèle, une méthode d'inversion des charges piézométriques observées pour améliorer la caractérisation de l'état initial de la nappe a été développée. Cette méthode semble prometteuse, et devra être testé sur les applications intégrées dans Aqui-FR.

Afin d'étendre la couverture spatiale du domaine couvert par Aqui-FR, trois actions sont en cours : i) le développement d'une modélisation dédiée aux aquifères de socle qui permettra de couvrir tout d'abord les aquifères bretons, et ii) l'intégration d'applications régionales développées avec les logiciels MARTHE et MODCOU/EauDyssée, iii) l'intégration d'autres systèmes karstiques de référence modélisés avec GARDENIA.

Aqui-FR est maintenant une plateforme mature qui bien sûre doit continuer d'évoluer et de progresser, mais qui peut déjà aborder un de ces principaux objectifs, la prévision de la ressource en eau souterraine. Cela sera ainsi mené dans la seconde phase du projet, avec une interaction plus étroite avec les gestionnaires de l'eau.

10.Glossaire

CPU: Cumul du temps passé par le processeur d'un ordinateur sur une tâche particulière **Hindcast** : prévision rejouant des événements passés **Téléconnexion** : corrélation entre des phénomènes climatiques se déroulant simultanément à de grandes distances

11.Bibliographie

- Ackerer P, Trottier N, Delay F. 2014. Flow in double-porosity aquifers: Parameter estimation using an adaptive multiscale method. Adv Water Resour; 73:108–22. doi:10.1016/j.advwatres.2014.07.001.
- Amraoui N., Golaz C., Mardhel V., Negrel P., Petit V., Pinault J.L., Pointet T. (2002) Simulation par modèle des hautes eaux de la Somme. Rapport BRGM/RP-51827-FR, 184 p., 83 fig.,11 tabl., 5 ann.
- Amraoui N., Castillo C. et Seguin J-J. (2014) Évaluation de l'exploitabilité de ressource en eau souterraine de la nappe de la craie du bassin de la Somme. Rapport final BRGM/RP-63408-FR, 199 p., 88 fig., 22 tabl., 4 ann., 1CD.
- Amraoui N., Thiery D., Vergnes J-P., Arnaud L., Rousseau M. et Caballero Y. (2017) Aqui-FR un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale : travaux 2015-2016. Rapport final BRGM/RP-66683-FR, 192 p., 118 ill., 4 ann.
- Aquilina, L., Ladouche, B., & Dörfliger, N. (2005). Recharge processes in karstic systems investigated through the correlation of chemical and isotopic composition of rain and spring-waters. Applied Geochemistry, 20(12), 2189-2206.
- Baratelli, F., Flipo, N., & Moatar, F. (2016). Estimation of stream-aquifer exchanges at regional scale using a distributed model: Sensitivity to in-stream water level fluctuations, riverbed elevation and roughness. Journal of Hydrology, 542, 686-703.
- Bardeau M., Le Cointe P. (2016) Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne – Résultats de la modélisation et outil de gestion des prélèvements dans le Tarn-et-Garonne. Rapport BRGM/RP-65583-FR, 323 p., 128 ill., 28 tabl., 23 ann., CD.
- Bardeau M., Bourdaa. S., (2010) –Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Modélisation de la nappe alluviale de la Garonne en Haute-Garonne – Année BRGM/RP-58063-FR. Rapport final – 161 p., 55 ill.,9 ann.
- Blavoux B., Mudry J., Puig J.M. (1992). The karst system of the Fontaine de Vaucluse (Southeastern France). Environ. Geol. Water Sci. Vol. 19, No. 3, 215-225.
- Benatya, R.: Valorisation des données SAFRAN, Rapport de fin d'étude, ENM, Météo France, Toulouse, France, 74 pp., 2004
- Bessière H., Klinka T., Saplairoles M. (2013) Evaluation de l'impact sur la ressource en eau souterraine de l'exploitation de granulats dans le milieu alluvionnaire de l'Ariège (09). BRGM/RP-61982-FR. Rapport final – 75 p., 63 ill.
- Bessière H., Picot J., Picot G., Parmentier M. (2015) Affinement du modèle hydrogéologique de la Craie du Nord-Pas-de-Calais autour des champs captants de la métropole Lilloise. Rapport final. BRGM/RP-63689-FR, 295 p., 194 fig., 20 tabl., 4 ann.
- Buscarlet E. et Pickaert L. (2011) Modélisation de la nappe de la Craie du Nord-Pas-de-Calais -Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-60217-FR.
- 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.
- Carrera J, Alcolea A, Medina A, Hidalgo J, Slooten LJ, 2005. Inverse problem in hydrogeology. Hydrogeol J; 13:206–22. doi:10.1007/s10040-004-0404-7.
- Carluer Candillo, L:, 2016, Analyse de la variabilité annuelle des prélèvements en nappe en lien avec les conditions météorologiques et estimation des conséquences sur la prévision de l'état des eaux souterraines, Rapport stage M1 UMR Métis
- Charlier J.-B., Desprats J.-F., Ladouche B. 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, Rapport BRGM/RP-63844-FR
- Chen, J. L., Rodell, M., Wilson, C. R., & Famiglietti, J. S. (2005). Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates. Geophysical Research Letters, 32(14).
- Collins, M., and M. R. Allen (2002), Assessing the relative roles of initial and boundary conditions in interannual to decadal climate predictability, J. Clim., 15, 3104–3109, doi:10.1175/1520-

0442(2002)015.

- Coustau, M. et al., (2015). Impact of improved meteorological forcing, profile of soil hydraulic conductivity and data assimilation on an operational Hydrological Ensemble Forecast System over France. *Journal of Hydrology*, 525, pp.781–792
- David, C. H., J. S. Famiglietti, Z.-L. Yang, and V. Eijkhout (2015), Enhanced fixed-size parallel speedup with the Muskingum method using a trans-boundary approach and a largesubbasins approximation, WaterResour. Res., 51, 7547–7571, doi:10.1002/2014WR016650.
- DeChant C. M. and H. Moradkhani. 2011. Improving the characterization of initial condition for ensemble streamflow prediction using data assimilation. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 3399–3410, 2011.doi:10.5194/hess-15-3399-2011.
- Delfino B., (2015) Comparaison du schéma de bilan hydroclimatique SURFEX avec d'autres schémas de bilan couplés avec le code de calcul MARTHE du BRGM Rapport de stage Master 2 AGROSCIENCES-Hydrogéologie, Sol et Environnement, Université d'Avignon.
- Diersch, H. J. G. (2014), FEFLOW, Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media, Springer.
- Dewandel, B., P. Lachassagne, R. Wyns, J. C. Maréchal, and N. S. Krishnamurthy (2006), A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering, Journal of Hydrology, 330(1–2), 260-284, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026.
- Doherty, J. (2001), Improved Calculations for Dewatered Cells in MODFLOW, Ground Water, 39(6), 863-869.
- Douez, O., Bichot, F. et Petit, L. (2011). Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Jurassique de Poitou-Charentes. BRGM/RP-59288-FR, 411 p., 286 ill., 2 ann., 4 planches hors texte.
- de Dreuzy (2016) Structure des circulations souterraines dans les aquifères de socle en Bretagne, rapport ONEMA, 37p.
- Duchaine, F., Jauré, S., Poitou, D., Quémerais, E., Staffelbach, G., Morel, T., & Gicquel, L. (2015). Analysis of high performance conjugate heat transfer with the OpenPALM coupler. Computational Science & Discovery, 8(1), 015003.
- 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
- Franke O, Reilly T, Bennett G, 1987. Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems—an introduction. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B5.
- Habets, F. et al., 2010. Multi-model comparison of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France)., pp.99–117.
- Habets, F. et al., 1999. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area Part II: Simulation of streamflows and annual water budget. *Journal of Hydrology*, 217, pp.97–118.
- Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., ... & Thiéry, D. (2013). Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in Northern France. Climatic change, 121(4), 771-785.
- He, X. et al., 2016. Designing a Hydrological Real-Time System for Surface Water and Groundwater in Denmark with Engagement of Stakeholders., pp.1785–1802.
- Henriksen, H.J. et al., 2003. Methodology for construction , calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. , 280, pp.52–71.
- Hill M. C., Tiedeman C.R., 2007. Effective Groundwater Model Calibration with Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty. Wiley & Sons Publication. ISBN-13: 978-0-471-77636-9, 455 p.
- Højberg, A.L. et al., 2013. Environmental Modelling & Software Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model. *Environmental Modelling and Software*, 40, pp.202–213. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.010.
- Kolbe, T., J. Marçais, Z. Thomas, B. W. Abbott, J.-R. de Dreuzy, P. Rousseau-Gueutin, L. Aquilina, T. Labasque, and G. Pinay (2016), Coupling 3D groundwater modeling with CFC-based age dating to classify local groundwater circulation in an unconfined crystalline aquifer, Journal of Hydrology, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.020.
- Korkmaz, S. (2007) Modeling Of The Flood Regimes In Coupled Stream-Aquifer Systems PhD.

Thesis, Ecole des Mines de Paris and Middle East Technical University, To be defended.

- De Lange, W.J. et al., 2014. Environmental Modelling & Software integrated water management and policy analysis: The Netherlands Hydrological Instrument . *Environmental Modelling and Software*, 59, pp.98–108. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.009.
- Lanini S. et Maréchal JC. (2004) Modélisation du transport réactif dans l'aquifère karstique desFontanilles (34) Modèle MODKA. Rapport BRGM/RP-53396-FR, 69 p., 22 illustrations, 3 annexes.
- Ledoux, E., Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique, thèse, Ecole Nat. Sup. des Mines de Paris, France, 1980.
- Ledoux, E., Girard, G., De Marsily, G., Villeneuve, J. P., & Deschenes, J. (1989). Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling (pp. 435-454). Springer Netherlands.Leray, S., J.-R. de Dreuzy, O. Bour, L. Aquilina, and T. Labasque (2012), Contribution of age data to the characterization of complex aquifers, Journal of Hydrology(464-465), 54-68.
- Li H., Luo L., Wood E.F., Schaake J., 2009. The role of initial conditions and forcing uncertainties in seasonal hydrologic forecasting. Journal of Geophysical Research, 114, D04114, doi:10.1029/2008JD010969, 2009
- Lismonde, B., L. Morel and P. Bertochio (2008), Hydrologie du Dévoluy: La Souloise, les Gillardes et le puits des Bans, Karstologia, 51, 33-44
- Liu H-J, Nien-Sheng Hsu N-S and Tim Hau Lee TH, (2009). Simultaneous identification of parameter, initial condition, and boundary condition in groundwater modelling. Hydrol. Process. 23, 2358–2367.
- Longuevergne, L., Scanlon, B. R., & Wilson, C. R. (2010). GRACE Hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA. Water Resources Research, 46(11).
- McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh (1988), A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow ModelRep.
- Mackay, J.D. et al., (2015). Seasonal forecasting of groundwater levels in principal aquifers of the United Kingdom. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 530, pp.815–828. Available at: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.018.
- Maina F.H , (2016). Modélisation de la dynamique des transferts hydriques vers les aquifères : application à la détermination de la recharge par inversion dans un système hydrogéologique complexe. PhD Thesis, Strasbourg University, France, 359 p.
- Maina F H., Ackerer P., (2017a). Groundwater Flow Parameter Estimation using Refinement and Coarsening Indicators for Adaptive Downscaling Parameterization. Advances in Water Resources, 100, 139-152.
- Maina, F. H, Delay, P. Ackerer. (2017b), Estimating initial conditions for groundwater flow modeling using an adaptive inverse method, Soumis à Journal of Hydrology (minor revision).
- Marçais, J., J. R. de Dreuzy, T. R. Ginn, P. Rousseau-Gueutin, and S. Leray (2015), Inferring transit time distributions from atmospheric tracer data: Assessment of the predictive capacities of Lumped Parameter Models on a 3D crystalline aquifer model, Journal of Hydrology, 525(0), 619-631, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.055.
- Martin, C., J. Molénat, C. Gascuel-Odoux, J. M. Vouillamoz, H. Robain, L. Ruiz, M. Faucheux, and L. Aquilina (2006), Modelling the effect of physical and chemical characteristics of shallow aquifers on water and nitrate transport in small agricultural catchments, Journal of Hydrology, 326(1–4), 25-42, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.040.
- Masson, V. et al. (2013), The SURFEX v7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, Geoscientific Model Development, 6(4), 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013.
- Maxwell, R.M., Condon, L.E. & Kollet, S.J., 2015. A high-resolution simulation of groundwater and surface water over most of the continental US with the integrated hydrologic model ParFlow v3., pp.923–937.
- Monteil, C. (2011). Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- Monteil, C., Flipo, N., Poulin, M., Habets, F., Krimissa, M., & Ledoux, E. (2010, June). Assessing the contribution of the main aquifer units of the Loire Basin to river discharge during low flow. In Proceedings of XVIII International Conference on Water Resources, Barcelona.

- Nash, J. E. et Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10(3), 282-290.doi:10.1016/0022-1694(70)90255-
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Dickinson, R. E., Gulden, L. E., & Su, H. (2007). Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with Gravity Recovery and Climate Experiment data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D7).
- Nobi N., Das Gupta A., (1997). Simulation of regional flow and salinity intrusion in an integrated stream-aquifer system in coastal region: southwest region of Bangladesh. Groundwater, 35 (5), 786-796.
- Pachocka, M. et al., (2015). Challenges of modelling a complex multi-aquifer groundwater system at a national scale: case study from the UL, British geological survey. Available at: http://nora.nerc.ac.uk/511235/.
- Pella H., Lejot J., Lamouroux N., Snelder T, (2012). Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux. Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2012, n°3, p. 317-336.
- Puig J.M. (1987) Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse. Thèse Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. Document du BRGM n°180 (1990).
- Putot E., Bichot F. (2007) CPER 2000-2006 Phase 4 Modèle Infra-Toarcien Dogger: Calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire. Rapport BRGM/RP-55742-FR.
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., ... & Morel, S. (2008). Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. Journal of applied meteorology and climatology, 47(1), 92-107.
- Ramillien, G., Cazenave, A., & Brunau, O. (2004). Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry. Geophysical Journal International, 158(3), 813-826.
- Rushton and Wedderburn, 1973. Starting conditions for aquifer simulations. Groundwater, 11(1), 37-42.
- Singla, S. et al., (2012). Predictability of soil moisture and river flows over France for the spring season. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, pp.201–216.
- Soubeyroux, J. M., Martin, É., Franchisteguy, L., Habets, F., Noilhan, J., Baillon, M., ... & Morel, S. (2008). SAFRAN-Isba-Modcou (SIM): Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études.
- Sun N-Z, 1994. Inverse problems in groundwater modelling. In 'Theory and applications of Transport in Porous Media', Kluwer Academic, ISBN 0-7923-2987-2, 337 p.
- Thierion, C., 2007. *Modélisation hydrogéologique des aquifères du Bajocien Bathonien dans le secteur des Bocages Normands*, Available at: http://www.sisyphe.upmc.fr/%7Em2hh/arch/memoires2007/thierion_memoire07.pdf.
- Thiéry, D. et Moutzopoulos C., 1995 Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM "Régionalisation en hydrologie, application au développement". In Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions, pp. 285 295.
- Thiéry, D. (2014) Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig., 2 ann. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf. (Accès Août 2016).
- Thiéry D. (2015a) Code de calcul MARTHE Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes Notice d'utilisation de la version 7.5. BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.
- Thiéry D. (2015b) Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE version 7.5. BRGM/RP-64765-FR, 324 p., 158 fig.
- Thiéry, D. (2015c) Modélisation 3D des écoulements en Zone Non Saturée avec le code de calcul MARTHE version 7.5. BRGM/RP-64495-FR. 87 p., 32 fig.
- Thiéry, D. (2015f) Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf. (Accès Août 2016).
- Ting C-S, Zhou Y., de Vries JJ, Simmers I., (1998). Development of a preliminary groundwater flow model for water resources management in the Pingtung Plain, Taiwan. Groundwater, 35 (6), 20-36.

Troch, P. A., C. Paniconi, and E. E. van Loon (2003), Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response, Water Resources Research, 39(11), doi:10.1029/2002wr001728.

Vergnes, J. P., & Decharme, B. (2012). A simple groundwater scheme in the TRIP river routing model:

global off-line evaluation against GRACE terrestrial water storage estimates and observed river discharges. Hydrology and Earth System Sciences, 16(10), 3889-3908.

- Vergnes, J. P., Decharme, B., Alkama, R., Martin, E., Habets, F., & Douville, H. (2012). A simple groundwater scheme for hydrological and climate applications: Description and offline evaluation over France. Journal of Hydrometeorology, 13(4), 1149-1171.
- Vidal, J., Martin, E. & Franchist, L., 2009. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the SAFRAN system. *International Journal of Climatology*.
- Viennot, P. & Abasq, L., 2013. Modélisation de la pollution nitrique des grands aquifères du bassin de Seine-Normandie à I ' échelle des masses d ' eau Développement des sous modèles hydrogéologiques « Craie » du bassin de la Seine Rapport final,
- Viennot, P. Modélisation mathématique du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine. 148p. 2009

12.Table des illustrations

Figure 1 : Représentation schématique des cing principaux modes d'exploitation d'Agui-FR : les réanalyses historiques débuteront au moins en 1958, et permettront de couvrir un grand nombre d'évènements passés, et d'estimer les normales et les distributions statistiques. Le suivi en temps réel permettra 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 Figure 2 : Représentation du schéma de surface ISBA simulant les couverts naturels dans SURFEX : trois compartiments sont représentés : le sol, la végétation, et le manteau neigeux. Le sol est divisé en plusieurs couches d'épaisseurs zi pour lesquelles les températures, l'humidité du sol et le potentiel matriciel sont simulés (Ti, Wi, Ψi), ainsi que les flux d'eau entre les couches F_i. F_N est le flux infiltré à la base du sol, contribuant donc à la recharge des nappes. Le ruissellement en surface (Qs) est simulé lorsque les précipitations ne peuvent plus s'infiltrer dans les sols. La végétation est représentée en prenant en compte son développement dans l'année (indice foliaire et fraction de végétation). Le manteau neigeux est simulé via une approche multicouche en intégrant sa compaction et sa fonte (Sm). Le bilan d'énergie est estimé à partir des flux d'énergie incidents, et répartis en flux de chaleurs sensible, latente et de conduction (H, LE, G). Le flux de chaleur latente est la somme de l'évaporation du sol nu, de la transpiration de la végétation, de l'évaporation des pluies interceptées par la végétation, et de la sublimation de la neige et de la glace du sol (Esoil, Etransp, Ecanop, Ssnow).....17 Figure 4 : Schéma de la structure OpenPALM d'Agui-FR telle que visualisée dans PrePALM. Chacune des branches est représentée par une couleur différente. Les communications entre les branches sont représentées par des traits pointillés dont la couleur donne une information sur le type de variable Figure 6 : Ecarts (ou anomalies) de charge sur l'ensemble des couches affleurantes, pour chaque Figure 7: Débit journalier de la source de la Loue à Mouthier simulé par GARDÉNIA avec les données SAFRAN. En haut avec le schéma classique de GARDÉNIA ; En bas avec le schéma intégrant un Figure 8: Débit journalier de la source de la Fontaine de Vaucluse simulé par GARDÉNIA avec les données SAFRAN. En haut avec le schéma classique de GARDÉNIA ; En bas avec le schéma intégrant un seuil. L'effet de seuil permet de réduire très notablement les pointes de débits simulées. Figure 11 : exemple d'évolution du niveau piézométrique observé et simulé avec les flux SURFEX.. 31 Figure 12 : Movennes mensuelles du ruissellement et de l'infiltration pour les modèles NPC. Figure 13 : Coefficients de Nash obtenus pour la simulation des débits (modèles NPC, NPC surfex et Figure 14 : RMSE et Biais obtenus pour la simulation des niveaux piézométriques (simulations NPC, Figure 15 : Extension du modèle multicouche du Poitou-Charentes (source BRGM/RP-59288-FR)...35 Figure 16: Débits observés et simulés par le modèle POC-SURFEX (débit moyen hebdomadaire) dans quatre principaux cours d'eau (Charente à Jarnac, la Boutonne à Saint séverin, Clain à Poitiers, la Figure 17 : Distribution spatiale des écarts guadratiques moyens (RMSE) calculés pour chaque Figure 18 Extension du domaine et emplacement des stations hydrologiques (à gauche) et

Figure 19 : Chroniques temporelles des débits observés (en bleu) et simulés à l'exutoire de la Somme,
la simulation de référence (en orange), la simulation avec SAFRAN sans recalage (en vert) et après
recalage (en rouge) Les cycles annuels saisonniers moyens sont également représentés
Figure 20 : Schéma du réservoir intermédiaire de GARDENIA
Figure 21 : Distributions spatiales des biais entre niveaux piézométriques moyens annuels simulés et
observés pour (a) avant recalage et (b) après recalage40
Figure 22 : Distributions spatiales des scores d'erreurs moyennes quadratiques calculés pour chaque
piézomètre pour les simulations (b) Somme_SURFEX et (c) Somme_SURFEX_CAL
Figure 23 : Superposition des quatre maillages des formations aquifères prises en compte
Figure 24 : Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée
Figure 25 : Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014
Figure 26 : comparaison des estimations de l'infiltration (recharge de la nappe) estimée par MODCOU
(à gauche) et ISBA (à droite) sur la période 1994-2007
Figure 27 Comparaison des biais sur les piézomètres obtenus avec la version originale de l'application
Seine (à gauche) et avec la version forcée par SURFEX (à droite)
Figure 28 : Extension du modèle Seine-Eure à gauche et piézomètres disponibles à droite
Figure 29 : Limites hydrogéologiques du modèle « Seine-Oise »
Figure 30 Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée
Figure 31 : Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014 46
Figure 32 Limites hydrogéologiques du modèle « Marne-Loing »
Figure 33 : Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée avec les flux SURFEX après
calage
Figure 34 : Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/201447
Figure 35 : Limites hydrogéologiques du modèle « Marne-Oise »
Figure 36 : Exemple d'évolution piézométrique mesurée et calculée
Figure 37 Biais et RMSE calculés aux piézomètres sur la période du 1/8/2007 au 31/7/2014
Figure 38 Extension de l'application, et comparaison avec l'extension de l'application MARTHE (souce
Habets et al .2010) et épaisseur de la zone non saturée prise en compte, représentée ici comme le
nombre de réservoir de 5m d'épaisseur intégré dans le module de transfert non saturée (source
Korkmaz, 2007)
Figure 39 Comparaison des RMS normalisés obtenus par la version MODCOU d'origine et celle forcée
par les flux SURFEX/ISBA. Figure issue de Habets et al., 2010
Figure 40 A gauche : extension de l'application Loire et des 3 couches aquifères représentées
(Monteil, 2011) et carte des biais obtenus sur chaque piézomètre sur une période de 10 ans (Monteil
et al., 2010)
Figure 41 : Localisation de l'impluvium de Fontaine de Vaucluse, les formations géologiques (BD
Charm-50, BRGM) sont projetées sur le modèle numérique de terrain (BD-TOPO, IGN) (Caballero
et al., 2015)
Figure 42 : Simulation du débit journalier de la Fontaine de Vaucluse par GARDENIA avec les
données météorologiques SAFRAN
Figure 43 : Schéma conceptuel des sous-bassins hydrologiques du système des Gillardes (Lismonde
et al, 2008)
Figure 44 : Simulation du débit des sources des Gillardes par GARDENIA avec les données
météorologiques SAFRAN. Pour une meilleure visualisation, c'est le débit moyen mensuel qui a été
représenté sur cette figure
Figure 45 : Simulation du débit des sources des Gillardes avec les données SURFEX
Figure 46 Coupe adaptée d'après Bitterli (1972)
Figure 47 : Simulation du débit journalier de la source du Doubs par GARDENIA avec les données
météorologiques SAFRAN 1980-2014. Pour une meilleure visualisation on a représenté sur la figure le
débit moyen mensuel
Figure 48 : Simulation du débit de la source du Doubs avec les données SURFEX
Figure 49 : Localisation des arrivées d'eau au niveau des sources de la Loue et équipement
hydrologique sur les principales arrivées d'eau de Loue vasque et Loue canal, et du point intégrateur
de la Loue à l'usine EDF de Mouthier (d'après (Charlier et al. 2014))
Figure 50 : Simulation du débit journalier de la Loue à Mouthier par GARDÉNIA avec les données
météorologiques SAFRAN 1994-2014
Figure 51 : Simulation du débit de la Loue avec les données SURFEX
Figure 52 : Résurgence du Lison et instrumentation

Figure 53 : Simulation du débit journalier de la source du Lison à Nans-sous-Sainte-Anne par GARDENIA avec les données météorologiques SAFRAN 1975-2014
Figure 56 : Simulation du débit journalier du système des Cent-Fonts par GARDÉNIA avec les données météorologiques SAFRAN 1975-2014.
Figure 57 : Simulation par GARDENIA du débit du système des Cent-Fonts avec les données SAFRAN (à gauche) et avec les données SURFEX (à droite)
Figure 58 : Simulation du debit de la source des Fontanilles par GARDENIA avec les donnees
Figure 59 : Simulation du débit de la source des Fontanilles par GARDÉNIA avec les flux SURFEX
Figure 60 : Cartes de l'erreur movenne (biais, en baut) et du RMSE (en bas) sur la simulation de la
charge pour la période 1999 à 2005. L'étendue globale du domaine souterrain d'Aqui-ER est
représentée par le contour bleu foncé. Les rivières en bleu sont celles du réseau Syrah et sont
représentées pour aider à la localisation
Figure 61 Comparaison de restitution de piézomètres représentés par plusieurs applications: en haut
sur la Somme au Translav (à gauche MARTHE, à droite, EauDyssée), au milieu, sur la basse
Normandie à Louvieres (à gauche MARTHE, à droite EauDyssée), et en bas sur la Beauce à Batilly en
Gatinais (à gauche EauDyssée Loire, à droite EauDyssée Seine)
Figure 62 : Fonction de densité cumulée du critère de Nash et fonction de densité de probabilité du
rapport de lame d'eau obtenu sur l'ensemble des applications. Ainsi, on peut lire que 40% des stations
ont un score de Nash sur les débits annuels supérieur ou égal à 0.7, et que 22% des stations ont une
bonne estimations de la lame d'eau et que 23% la surestime de 10%
Figure 63 : Critères de Nash aux points de mesure pour la période de 1999 à 2005 64
Figure 64 : Rapport entre le débit moyen simulé et observé aux différents points de mesure, pour les
periodes de 1999 a 2005
Figure 65 : Critere de Nash et rapport de lame d'éau en fonction du débit moyen pour tous les points
Comparaison des débits simulés et observés près de l'embouchure de la Loire, à Nantes et
à l'exutoire de la Seine à Poses
Figure 67 : à gauche : carte des précipitations cumulées entre le 28 Mai et le 12 Juin et en noir les
villes déclarées catnat inondation en 2016, à droite : carte des couches aquifères simulées dans Aqui-
FR et impactées par la crue. Les stations hydrométriques disponibles sont représentées avec des
triangles verts, et les stations piézométriques avec des points noirs
Figure 68 Cartes du cumul de drainage (constituant la recharge de la nappe, en mm) et du
ruissellement (en mm) simulés par SURFEX du 28 Mai au 4 Juin 201666
Figure 69 A gauche : comparaison entre les débits de la Seine observés et simulés par Aqui-FR avec
le réseau hydrographique RHT, à droite comparaison entre l'évolution de la piézométrie observée et
simulée à Brie Comte Robert
Figure 70 Tableau d'alerte historique de mai 2016 pour le Loing à Chalettes-sur-Loing, pour le seul
naut, correspondant à une crue decennale. Les abscisses représentent les jours prevus, sachant que
dans les cases indiquent le % des membres de la prévision d'ensemble indiquant un dépassement du
seuil haut d'alerte. Ainsi, il apparait que dès le 24 Mai, on nouvait s'attendre à un événement
conséquent sur le Loing, Source : Météo-France DCSC/AVH, Fabienne Rousset
Figure 71: Structures géologiques pour la ressource en eau dans les milieux cristallins
Figure 72 : (a) Illustration de la méthode de remaillage automatique de Feflow contrainte par la surface
topographique, le toit de la nappe libre et les interfaces lithologiques entre couches [Diersch, 2014]. (b)
Maillage du bassin versant étudié dans le cadre de la thèse de Tamara Kolbe autour de Pleine
Fougères avec en rouge les limites du bassin versant, en bleu le réseau hydrographique et en noir le
maillage raffiné à proximité des rivières69
Figure 73 : (a) Perméabilité (K), épaisseurs moyennes (H) et porosités (θ) pour les 5 modèles REF
(Reterence), THICK (épaisseur de la zone altérée plus forte), THIN (épaisseur de la zone altérée plus
Table), And (Permeabilite plus force dans les granites) et HOM (proprietes homogenes). Les indices
w et r codent respectivement pour la zone alteree (weathered) et fissurees [Kolbe et al., 2016]. (b)
Oupe our leo modeleo IVLI, THION EL THIN

Figure 74 : Lignes d'écoulement souterrain sur un modèle calé du site de Pleine-Fougères [Kolbe et
al., 2016]
Figure 75. Representation TD des écoulements de subsunace obtenu par integration venticale des
equations d'écoulement suivant l'hypothèse de Dupuit-Forchneimer et transversaiement à la ligne de
pius grande pente le long du protil w(x) [l'roch et al., 2003].
Figure 76: Les charges hydrauliques à l'état initial en m, la localisation des 4 puits de pompage et les
conditions aux limites (en rouge les conditions de Diricniet et en hoir celle de Neumann)
Figure 77: Comparaison des distributions spatiales des conditions initiales obtenues par inversion et
les valeurs exactes de reference
Figure 78: Distribution des erreurs d'estimation des conditions initiales associees aux 50 calages
effectues
Figure 79 : Validation croisee pour deux points, comparaison entre les valeurs mesurees et 3 solutions
de l'inversion
Figure 80 Histogrammes représentants les volumes annuels prélevés en nappe totale (en haut) pour
l'eau potable en bleu, et l'agriculture en vert
Figure 81 Différences de hauteurs piézométriques entre les simulations n°1 et 3 (prélèvements
constants – variables) au niveau des nappes libres du bassin hydrogéologique de la Seine avec H10
niveaux de crise et H90 niveaux piézométriques fréquents77
Figure 82 Evolution des piézométries observées (noir) et simulées (n°4 à gauche et 5 à droite) (rouge,
vert) à Batilly en Gâtinais à l'échelle de l'année78
Figure 83 A gauche : illustration de la variation du stock total d'eau de GRACE. La variation de lame
d'eau vue par GRACE correspond à la somme de toutes les composantes hydrologiques intégrée
verticalement, figure issue de Moussa, 201679
Figure 84 Comparaison des stocks d'eau simulés par SURFEX-TRIP en incluant une représentation
simplifiée de la nappe (en bleu) et sans (en rouge) avec les observations GRACE (en noir) sur la
France. En haut est représenté le domaine hydrogéologique représenté dans le modèle simplifié
(seule la couche affleurante est représentée). Figure issue de Vergnes et al., 2012
Figure 85 Variation des stocks d'eau sur le bassin de la Loire estimés par GRACE avec deux
méthodes (CSR mensuelle, et GRGS décadaire) et comparaison avec les estimations d'un schéma de
surface américain (GLDAS-NOAH). Source : Laurent Longuevergne
Figure 86 A gauche : la figure représente la distribution spatiale des débits estimés uniquement avec
les flux SURFEX et le réseau RHT.A droite : Estimation des temps de transfert en tout point du réseau
RHT
Figure 87 Zoom sur le bassin de la Seine : la carte présente le réseau hydrograpique RHT (en noir).
ainsi que les réseaux hydrographiques de l'application Marne-Loing (en bleu) et Seine en rose. Le
réseau hydrographique Seine est identique à celui utilisé aujourd'hui dans SIM
Figure 88 Exemple de débits simulés avec RAPID-SURFEX sur le réseau RHT
Figure 89 Evolution (en %) de l'infiltration simulée par Surfex forcé par les projections climatiques
régionalisées entre les périodes 2070-2100 et 1960-1990
Figure 90 Délimitation du domaine d'étude et types de limites Lithologie des formations aquifères
modélisées
Figure 91 Piézométrie calculée en régime permanent d'écoulement moven et niézomètres de
référence
Figure 92 : Localisation et extension des modèles Haute Garonne, l'Ariège et Tarn et Garonne 86
Figure 92 : Exemple de conditions aux limites appliquées au modèle Tarn et Caronne.
Figure 04 právisions saisonnières des débits naturels de la Caronne à Dortet pour les mais de juin à
actobre 2016. Les hoîtes à moustache représentant le distribution des débits naturalisés nour 1004
2014 (on gris, dos débits simulés avos dos scénarios bistoriques (on vert) et dos débits simulés avos
La prévision saisonnière (an journe). Cortaines appées particulières sont également représentées
(a prevision salsonniere (en jaune). Cenames annees particulieres sont egalement representees
10101103, thany 05 6t valies)

ableau 2 Adaptation réalisée pour chaque applications hydrogéologiques. La notion évaluation idique que seule l'étape d'évaluation des simulations a été réalisée, la phase de calage, si elle est écessaire, reste à faire. Pour les pas de temps : BH réfère au pas de temps du bilan	
ydroclimatique, et H au pas de temps hydrodynamique2	5
ableau 3 Nombre de points d'évaluation possible en termes de débits et de piézométries pour	
haque application distribuée. Les chiffres marqués par une étoile indique que l'ensemble des stations	
ù la comparaison est possible a bien été utilisé60)
ableau 4 : Bases de données de prélèvements à disposition : Bd = Bases de données ; Notation=	
lotation dans le document ci-après ; Nb = Nombres de points de prélèvements moyens par an ;	
ESN= Agence Seine Normandie ; BNPE= Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau 7	5
ableau 5 : Evolution moyenne de l'infiltration (%) pour la période 2070 -2100 et drainage au temps	
résent (mm/j) pour la période 1960-1990 par modèle de climat sur l'ensemble de la France et sur le	
lomaine Aqui-FR)
ableau 6 : Evolution des précipitations, températures et drainage par modèle de climat sur le	
omaine Aqui-Fr sous changement climatique	3
ableau 7 Formations souterraines modélisées et caractéristiques8	5

13.Annexe 1 : Titre de l'annexe

[Première page d'une annexe au document. Si l'annexe comprend plusieurs pages, la première porte la mention « Annexes » puis en sous sous-titre « Annexe X : titre de l'annexe ».]

14.Remerciements

Nous tenons à remercier Eric Martin et Jean-Michel Soubeyroux qui ont soutenu ce projet et participer à son lancement. Un grand merci également à Bénédicte Augeard qui a suivi ce projet sur l'ensemble de cette première phase.

OrganismeXXXXX

adresse

Onema

Hall C – Le Nadar

103/104

01 40 96 61 21

www..fr

5, square Félix Nadar 94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.onema.fr