

Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR

Florence Habets, Nadia Amraoui, Dominique Thiéry, Jean-Pierre Vergnes, Thierry Morel, Patrick Le Moigne, Simon Munier, Delphine Leroux, Jean-Raynald de Dreuzy, Laurent Longuevergne, et al.

▶ **To cite this version:**

Florence Habets, Nadia Amraoui, Dominique Thiéry, Jean-Pierre Vergnes, Thierry Morel, et al.. Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR. OFB. 2021. hal-04006877

HAL Id: hal-04006877
https://hal.science/hal-04006877

Submitted on 27 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR

Rapport final de 2ème phase

Florence Habets (METIS puis laboratoire de Géologie de l'ENS),
Nadia Amraoui, Dominique Thiéry et Jean-Pierre Vergnes (BRGM),
Thierry Morel (CERFACS)
Patrick Le Moigne, Simon Munier, Delphine Leroux (CNRM),
Jean-Raynald de Dreuzy, Laurent Longuevergne (Géosciences Rennes),
Philippe Ackerer (ITES),
François Besson, Pierre Etchevers, Fabienne Rousset, Jean-Marie Willemet (Météo-France),
Pascal Viennot, Nicolas Gallois (ARMINES/MINES ParisTech)

Mai 2021

Avec le soutien de l'OFB

[Logo et/ou texte]

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
Jean-Raynald de Dreuzy, DR CNRS (Géosciences Rennes), jean-raynald.de-dreuzy@univ-rennes1.fr
Pierre Etchevers, IPC (Météo-France), pierre.etchervers@meteo.fr
Nicolas Gallois, I (ARMINES/MINES ParisTech), nicolas.gallois@minesparistech.psl.eu
Florence Habets, DR CNRS, (UMR 7619 METIS, puis Laboratoire de Géologie de l'ENS), florence.habets@ens.fr
Patrick Le Moigne, I (CNRM, Météo-France), patrick.lemoigne@meteo.fr
Delphine Leroux, Post-doc (CNRM), delphine.leroux@meteo.fr
Laurent Longuevergne, CR CNRS (Géosciences Rennes), laurent.longuevergne@univ-rennes1.fr
Thierry Morel, I (Cerfacs), thierry.morel@cerfacs.fr
Simon Munier, (CNRM), simon.munier@meteo.fr
Fabienne Rousset, I (Météo-France), fabienne.rousset@meteo.fr
Dominique Thiéry, I (BRGM), d.thiery@brgm.fr
Jean-Pierre Vergnes, I (BRGM), JP.Vergnes@brgm.fr
Pascal Viennot, I (ARMINES/MINES ParisTech), pascal.viennot@mines-paristech.fr
Jean-Marie Willemet, (Météo-France), jean-marie.willemet@meteo.fr

CORRESPONDANTS

OFB :
Claire Magand, chargée de mission de la ressource depuis décembre 2016 (OFB), claire.magand@ofb.fr

AUTRES CONTRIBUTEURS

Quentin Courtois (Géosciences Rennes)
Alexandra Nalivaev (Laboratoire de Géologie)
André Mounier (Laboratoire de Géologie)
Tom Mendiboure (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 MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE NATIONALE AQUI-FR

RESUME

Le projet Aqui-FR vise à construire un outil de suivi, de prévision et de projections de la ressource en eau souterraine en France en s'appuyant sur les modélisations hydrogéologiques régionales existantes et les outils de suivi et prévisions météorologiques existants.

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 (codes numériques) hydrogéologiques, sur 19 applications (dont 6 bassins karstiques) couvrant 149 000 km^2 et représentant 57 couches aquifères ou aquitards.

Cette deuxième phase a permis de faire évoluer la plateforme, notamment par l'extension des applications (Tarn & Garonne), recalage avec les flux de la dernière version deSURFEX, et évolution des pré- et post- traitements.

Une étape importante a été l'évaluation des simulations sur une longue période de la ré-analyse (60 ans) qui a conduit à la publication de Vergnes *et al.*, 2020. Cette évaluation montre que si des biais importants peuvent persister entre observations et simulations de la piézométrie, ils sont fortement réduits lorsque l'indice de piézométrie standardisé (SPLI) est utilisé. Globalement, Aqui-FR représente bien les évolutions observées. Cette analyse permet d'identifier des variabilités pluriannuelles avec des périodes de plusieurs années en hautes ou basses eaux. Un effort particulier a été mené pour évaluer la reconstitution des basses eaux et plus particulièrement des sécheresses depuis 1958 (stages masters Nalivaev, 2020; Mounier, 2021). Cette évaluation est rendue difficile par le fait que peu de piézomètres ont des longues chroniques observées. L'utilisation du SPLI est alors impossible. L'évaluation de l'occurrence de niveaux piézométriques en dessous du 1er décile sec permet de montrer une bonne adéquation entre observations et simulations sur la période de plus de 60 ans, avec cependant une tendance à sous-estimer ces périodes sèches depuis 2015. Les causes ne sont pas explicitées, mais, une mise à jour des données de prélèvements semble être un bon point de départ pour tenter d'améliorer ce biais.

L'étape majeure franchie durant cette phase par Aqui-FR est l'évaluation puis le passage en mode opérationnel de prévisions saisonnières de la ressource en eau souterraine. L'évaluation sur une période prospective de 25 ans a été menée lors du post-doc de Delphine Leroux financée d'abord par la convention service climatique, puis par ce projet. L'évaluation de ces prévisions d'ensemble est réalisée en comparant les prévisions à la ré-analyse. Cette évaluation montre un fort potentiel des prévisions saisonnières, même à 6 mois d'échéance, pour les prévisions débutant en début d'année civil jusqu'à Juillet, et plus particulièrement à partir de Mars, période à laquelle la plus grande partie de la recharge des nappes a déjà eu lieu. Les scores se dégradent sensiblement lorsque les prévisions intègrent les périodes de fortes recharges, *i.e.* les mois de novembre à janvier. La plus-value des prévisions saisonnières météorologiques, alors réalisées par la version 6 du système de prévisions saisonnières de Météo-France est apparente, comparée à des prévisions climatiques basées sur des années historiques (prévision climatique), ainsi que comparée à des prévisions naïves considérant une persistance de l'anomalie par rapport à la normale sur les prochains mois. La capacité d'évaluer l'extension des sécheresses restituées par la ré-analyse a également été évaluée, et les scores sont bons, avec une grande majorité des membres de la prévision se situant en état de sécheresse. Ce travail a fait l'objet d'une publication en préparation, (Leroux *et al.*, *s.d.*) qui n'a pu être finalisé à ce stade suite à des aléas administratifs ayant conduits à une fin prématurée du post-doc. Un effort doit être mené pour finaliser la valorisation de ce travail. Face aux résultats encourageants obtenus lors de la validation, les prévisions ont été portées en opérationnel par Météo-France, en utilisant, cette fois, les prévisions du dernier système de prévisions saisonnières (Météo-France system7). Ces prévisions sont ainsi réalisées chaque mois depuis Janvier 2020. Un site web dédié permettant d'accéder à ces

prévisions a été créé, et les accès ont été transmis à une quarantaine d'acteurs de l'eau, fin 2020. Un retour d'expérience (REX) de cette première année de prévision a été réalisé (Mounier, 2021). Ce REX a réalisé une vérification des prévisions, *via* des comparaisons directes entre observations et prévisions des indices standardisés. Il faut souligner qu'il ne peut pas s'agir d'une validation, car les prévisions d'ensemble ne peuvent s'évaluer sur une seule année. Le REX a montré la difficulté de comparer directement les prévisions Aqui-FR avec les observations, tout d'abord du fait de la disponibilité de ces dernières. En effet, alors que l'indice standardisé d'Aqui-FR est calculé sur la même période de référence de 30 ans, cet indice est calculé sur des périodes variables et généralement plus courtes et plus récentes dans les observations. Cela tend à rendre un signal plus humide dans les observations que les simulations, et donc, les prévisions. Il est donc nécessaire, pour ces comparaisons, de recalculer les SPLI sur la même période. Les scores alors obtenus sont qualitativement cohérents avec ceux obtenus lors de la validation sur la période rétrospective, avec des meilleurs résultats sur les prévisions réalisées de Janvier à Juillet. Cependant, ces scores sont environ deux fois plus faibles. Cela est lié à la comparaison directe aux observations, la comparaison à la ré-analyse permettant de retrouver des scores équivalents lors de la vérification que de la validation rétrospective. Cela conduit à envisager qu'une méthode une adaptation statistique des prévisions basées sur un apprentissage des erreurs entre ré-analyse et observation pourrait être appliquée aux observations et ainsi améliorer sensiblement les comparaisons entre prévisions et observations.

Aqui-FR a également été utilisée pour projeter l'impact du dérèglement climatique sur la ressource en eau souterraine. Un ensemble de projections climatiques issues du 5^{ième} rapport du GIEC, régionalisées par Dayon *et al.*, 2018, sous trois scénarios possibles d'évolution de gaz à effet de serre a été analysé. Les projections indiquent une diminution de la ressource en eau souterraine et une augmentation de l'intensité et de la durée des sécheresses en nappe et en rivière sur le domaine pour les scénarios les plus émetteurs (RCP8.5 et RCP4.5). Ces impacts sont fortement atténués avec le scénario le moins émetteur (RCP2.6).

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

- **SOMMAIRE**

Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR 1
1. Introduction 8
2. Développement de la plateforme 9
2.1. Evolution des éléments inclus dans la plateforme 9
2.1.1. Evolution du coupleur OpenPALM 9
2.1.2. Evolution des codes de calcul hydrogéologiques 9
2.1.3. Evolution du schéma de surface SURFEX et de l'analyse météorologique SAFRAN 11
2.2. Nouvelles applications et recalage associés 11
2.2.1. MARTHE Tarn-et-Garonne 11
2.2.2. MARTHE Poitou Charente 14
2.2.3. EauDyssée : sous-modèles de Craie et Basse-Normandie 15
2.2.4. HS1D 15
2.3. Adaptation de la plateforme à ses différents usages 15
2.4. Evolution des pré- et post-traitement de la plateforme 16
2.4.1. Fichiers de relance « restart » 16
2.4.2. Fichiers de sorties 17
2.5. Gestion de la plateforme Aqui-FR 17
3. Evaluation de la reconstitution sur 60 ans 17
3.1. Evaluation pluriannuelle 17
3.2. Analyses de l'occurrence des sécheresses en nappe depuis 1958 20
3.2.1. Reconstitution historique des sécheresses hydrogéologiques (août 1958-mai 2020) 21
3.2.2. Comparaison aux observations : évaluation de la reconstitution des sécheresses 23
4. Développement des prévisions saisonnières 25
4.1. Principe des prévisions 25
4.1.1. Les outils de prévision 25
4.2. Principe de l'évaluation 25
4.2.1. Une évaluation de prévisions rétrospectives 25
4.2.2. Critères d''évaluation de prévisions d'ensemble 27
4.3. Résultats de l'évaluation des prévisions rétrospectives 28
4.3.1. Une évaluation de prévisions rétrospectives 28
4.3.1. Variabilité spatiale de la qualité des prévisions saisonnières 30
4.3.1. Focus sur les prévisions de sécheresse 30
4.4. Mise en place opérationnelle des prévisions saisonnières Aqui-FR sur le super calculateur de Météo-France 31
4.4.1. Simulation en mode ré-analyse du 1er août 1958 au 31 juillet 2020. 31
4.4.2. Ré-analyse en mode temps réel 32
4.4.3. Simulation en prévision saisonnière et prévision climatologique en milieu de mois 32
4.4.4. Calcul et exploitation des SPLI 33
4.5. Co-construction des prévisions et communication 33
4.5.1. La co-construction 33
4.5.2. Focus sur le site web 34
4.5.3. Focus sur les cartes d'anticipation des sécheresses 35
4.6. Premiers éléments du REX 36
4.6.1. Problématiques associées à la comparaison de SPLI observés et prévues 36
4.6.1. Sélection des piézomètres pour la vérification des prévisions 38
4.6.2. Vérification des prévisions 38
4.6.3. Focus sur la prévision des sécheresses hydrogéologiques 40
5. Etudes associées 42
5.1. Impact du dérèglement climatique sur la ressource en eau souterraine 42
5.2. Premiers travaux sur l'assimilation de données pour améliorer l'estimation des conditions initiales 47
5.3. Evaluation de la recharge lors des pluies intenses 50

6. Conclusions et Perspectives 52
6.1. Conclusions 52
6.2. Perspectives 53
6.2.1. Amélioration de l'exploitation des prévisions saisonnières 53
6.2.2. Evaluation du potentiel de prévisions des débits d'étiages 53
6.2.3. Amélioration et Extension de la modélisation 53
6.2.4. Assimilation de données 54
6.2.5. Amélioration de l'estimation de la recharge 54
7. Glossaire 55
8. Bibliographie 56
9. Tables des illustrations et tableaux 59
10. Remerciements 61

- **PLATEFORME DE MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE NATIONALE AQUI-FR**

1. Introduction

En France, la ressource en eau souterraine représente 65% de l'alimentation en eau potable et plus d'un tiers des prélèvements pour l'industrie et l'irrigation. Anticiper l'évolution de cette ressource sur les prochains mois doit permettre d'adapter les usages à la disponibilité en eau, et ainsi limiter les arrêtés « sécheresse ». L'anticiper sur les prochaines décennies, *via* les projections climatiques, doit permettre d'identifier les principaux risques, de vérifier la durabilité des usages et d'identifier les besoins d'adaptation les plus urgents.

Pour répondre à ces objectifs, le projet de recherche Aqui-FR (www.geosciences.ens.fr/aqui-fr/; Vergnes *et al.*, 2020) vise à produire un suivi, des prévisions et des projections de la ressource en eau souterraine en France, en se basant sur les modèles numériques précédemment élaborés pour simuler les écoulements dans de grands bassins sédimentaires, ou dans des karsts et aquifères de socles, modèles d'ores et déjà utilisées par les gestionnaires de l'eau. Ces modélisations hydrogéologiques couvrent des surfaces importantes (supérieures à 10 000 km^2) avec une résolution allant de 100 mètres à quelques kilomètres. Elles incluent une représentation des différentes formations aquifères superposées (jusqu'à 10 couches pour certaines applications) et intègrent les nombreux points de prélèvements d'eau. Elles permettent de simuler l'évolution dans le temps des niveaux des nappes et des débits des cours d'eau sous l'effet des conditions météorologiques et de la pression anthropique (prélèvements). Aqui-FR est un projet collaboratif soutenu dans cette phase par l'Agence Française de Biodiversité puis, l'Office Français de Biodiversité et réunissant des hydrogéologues modélisateurs du BRGM, de Centre de Géosciences de MINES ParisTech et du CNRS, des spécialistes du couplage numérique du CERFACS, ainsi que des spécialistes de la modélisation atmosphérique du CNRM et de Météo-France. Actuellement, le domaine couvert s'étend principalement sur les zones sédimentaires du nord de la France (Figure 1), une extension est en cours sur les aquifères de socle bretons, et dans le sud sur les alluvions du Tarn et Garonne.

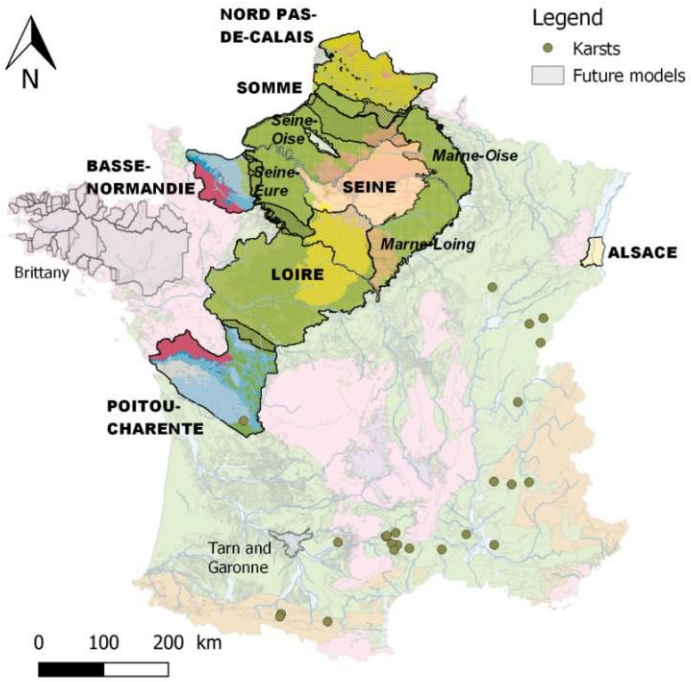


Figure 1. Extension des aquifères simulés dans Aqui-FR. En couleur, les applications sédimentaires distribuées (les différentes formations superposées sont représentées par des couleurs différentes), en gris, les aquifères de socle bretons, les points correspondent aux systèmes karstiques. Figure issue de (Vergnes et al., 2020)

2. Développement de la plateforme

2.1. Evolution des éléments inclus dans la plateforme

L'application Aqui-FR contient 3 principaux éléments : le coupleur OpenPALM, les codes de calcul hydrogéologiques MARTHE, EauDyssée, EROS et HS1D, et le schéma de surface SURFEX (Figure 2). Les analyses météorologiques SAFRAN sont utilisées dans Aqui-FR et sont donc présentées brièvement.

2.1.1. Evolution du coupleur OpenPALM

Le coupleur OpenPALM, développé au CERFACS (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. Les évolutions d'OpenPALM dans cette phase incluent le passage à python 3 et les modifications pour pouvoir tourner efficacement sur le nouveau supercalculateur de Météo-France. Le non remplacement de Thierry Morel en support d'OpenPALM par le CERFACS soulève cependant des inquiétudes quant à la pérennité de la structure. Les échanges avec le CERFACS se poursuivent pour maintenir l'outil.

2.1.2. Evolution des codes de calcul hydrogéologiques

A ce jour, quatre modèles hydrogéologiques sont intégrés dans Aqui-FR : le modèle hydroclimatique conceptuel 1D EROS (Thiéry, 2018), les modèles hydrogéologiques distribués à différences finies MARTHE (Thiéry, 2021), MODCOU (Ledoux, 1980) dans sa version EauDyssée (Saleh *et al.*, 2011), et le modèle de version HS1D (Marçais, de Dreuzy and Erhel, 2017). Les évolutions apportées à ces modèles sont brièvement décrits ci-dessous :

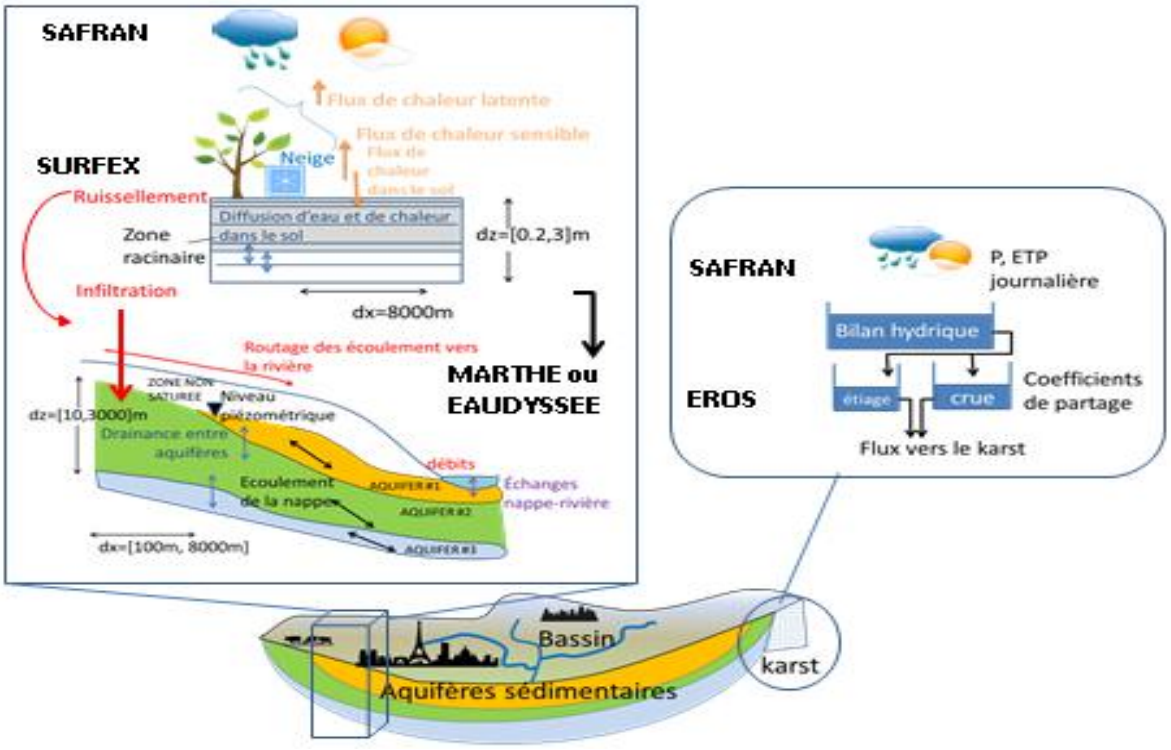


Figure 2. Aqui-FR : des projections reposant sur la connexion de plusieurs modèles climatiques (Vergnes et al., 2020)

EROS

Le modèle EROS (Thiéry, 2018) a remplacé le modèle GARDENIA afin de simuler tous les karsts avec un seul appel et donc sur un seul processeur.

EROS consiste en une grappe de modèles globaux élémentaires GARDENIA, ayant chacun une lame d'eau et quelques paramètres globaux. L'avantage de cette approche est de conserver la légèreté des modèles globaux, et notamment le calage automatique et le faible nombre de paramètres, tout en permettant de modéliser des bassins complexes à l'échelle régionale.

Dans le cadre d'Aqui-FR, le logiciel EROS a été implémenté afin de remplacer les différents modèles karstiques initialement développés sous GARDENIA et de permettre une optimisation du nombre de processeurs utilisés lors d'une simulation avec Aqui-FR. Le principe de cette optimisation est de profiter du fait qu'EROS soit, en réalité, une grappe de modèles GARDENIA imbriqués les uns dans les autres. Les développements apportés ont permis de déconnecter ces grappes les unes des autres, et de considérer l'ensemble des modèles GARDENIA dans EROS comme des modèles karstiques indépendants. Ainsi, un modèle EROS contient autant de modèles karstiques GARDENIA que l'on désire. Dans la version actuelle d'Aqui-FR, 23 modèles karstiques sont présents dans EROS. Dorénavant, ces 23 modèles globaux de karsts sont assignés à un seul processeur au lieu de 23 processeurs avec GARDENIA. Ceci a pour contrainte qu'on ne peut plus choisir un modèle spécifique pour une simulation. Mais les temps de calcul sont tellement rapides en comparaison des autres modèles spatialisés que ceci ne présente pas d'inconvénients.

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 (http://marthe.brgm.fr/ - Thiéry, 2021) 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. L'évolution majeure est l'implémentation d'un module permettant d'estimer les débits en amont du domaine hydrogéologique afin de fournir des conditions aux limites réalistes à la nappe. Cela se base sur une modélisation globale pluie-débit de rivière, avec le schéma GARDENIA pour chaque rivière prenant sa source en amont du domaine aquifère simulé. Chaque modélisation GARDENIA est calibrée sur des débits observés. Une nouvelle fonctionnalité de MARTHE permet alors, à partir des paramètres de modélisation obtenus, de calculer à chaque pas de temps le débit entrant à partir des données de forçage climatique relatives aux mailles associées au bassin versant amont.

Pour ce calcul des débits amont, il est possible de choisir d'utiliser soit les données SAFRAN (pluies, ETP, températures de l'air, précipitations solides), soit les données SURFEX (ruissellement, drainage).

EauDyssée

Le modèle hydrogéologique MODCOU (Ledoux, 1980), développé au Centre de Géosciences MINES ParisTech, également depuis la fin des années 1980, a été recodé en fortran90 afin d'améliorer sa modularité. Cette version renommée EauDyssée inclut des modules externes comme par exemple le modèle de routage en rivière RAPID (David *et al.*, 2011). EauDyssée 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 (Philippe *et al.*, 2011; Saleh *et al.*, 2011). Le code EauDyssée a inclus, dès sa conception, des instructions OpenPALM, ce qui a facilité son intégration dans Aqui-FR. Les évolutions dans cette phase ont consistées à des mises à jour.

HS1D

Le modèle hydrogéologique de versant HS1D (Marçais, de Dreuzy and Erhel, 2017) a été intégré dans Aqui-FR. Il est particulièrement bien adapté aux aquifères de socle breton car il permet de gérer des aquifères peu épais, peu étendus et fortement contraints par la topographie, *via* des hypothèses

notamment sur l'épaisseur de la zone altérée. Le développement et l'implémentation dans Aqui-FR a été mené lors de la thèse de Quentin Courtois. L'extension spatiale se poursuit dans le cadre de la thèse de Nicolas Cornette.

2.1.3. Evolution du schéma de surface SURFEX et de l'analyse météorologique SAFRAN

Les dernières versions de l'analyse météo SAFRAN (Durand *et al.*, 1993) et de SURFEX (Masson *et al.*, 2013) appliquée sur la France sont utilisées dans Aqui-FR et présentées dans l'article de Le Moigne *et al.,* (2020). Les évolutions de SAFRAN incluent l'intégration des zones de montagne et l'amélioration du rayonnement. Les améliorations de SURFEX incluent la physique du sol, les bases de données et l'intégration des variabilités sous mailles. On notera cependant que pour Aqui-FR, le drainage sous maille est désactivé car les transferts latéraux sont explicitement simulés par les modèles hydrogéologiques. Cela modifie légèrement l'estimation de l'évapotranspiration, comme l'illustre l'évolution du ratio de l'évapotranspiration réelle sur les précipitations (Figure 3).

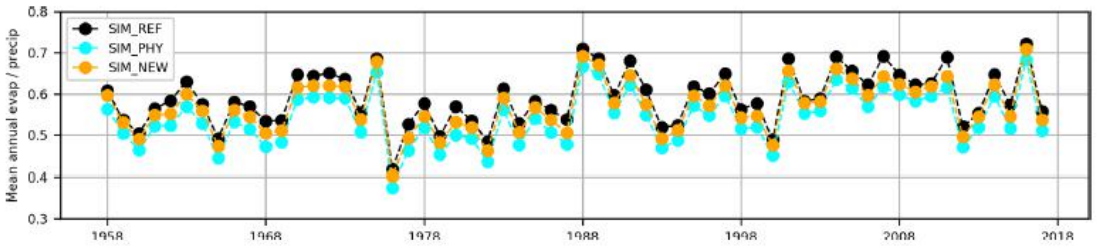


Figure 3. Evolution du rapport annuel de l'évapotranspiration sur les précipitations en France simulé entre 1958 et 2018 avec la version originale de SIM (en noir) et la nouvelle version (en orange). Ce rapport varie de 40% à 70%. Figure issue de Le Moigne *et al. (*2020).

2.2. Nouvelles applications et recalage associés

2.2.1. MARTHE Tarn-et-Garonne

a) Description générale

L'implémentation de cette application est décrite en détail dans le rapport (Amraoui *et al.*, 2019). Le modèle comporte deux couches superposées correspondant respectivement aux alluvions (toutes terrasses confondues) et aux formations molassiques. Le modèle est discrétisé en 36 442 mailles carrées de 250 m de côté, soit une extension au sol d'environ 1 140 km². Des conditions aux limites du type flux imposé constant sont appliquées en amont des vallées de la Garonne et du Tarn ainsi que le long du tracé du canal latéral à la Garonne, non représenté dans le réseau hydrographique mais dont les fuites rechargent la nappe. Ailleurs, au contact avec les formations molassiques, les limites sont à flux nul.

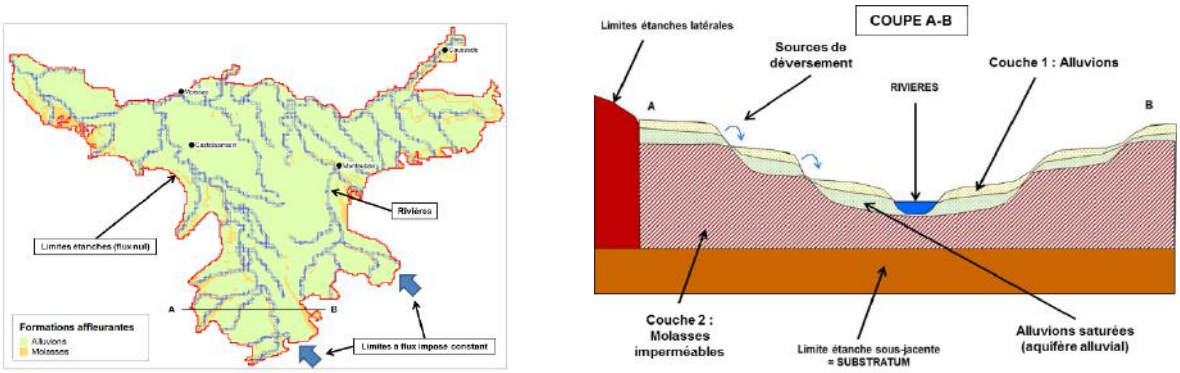


Figure 4. Limites du modèle en plan (gauche) et selon une coupe A-B (droite). Source : BRGM/RP-65583-FR.

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 41 cours d'eau. Une relation hauteur-débit permet de calculer la hauteur d'eau dans la rivière en fonction du débit d'écoulement. De plus, de nombreux seuils impactant les fluctuations du niveau des cours d'eau sont représentés, avec des lois hauteur-débit spécifiques. C'est notamment le cas sur le Tarn (7 seuils) et l'Aveyron (6 seuils), où ces seuils correspondent à 13 micro-centrales hydroélectriques régissant l'écoulement des deux rivières sur la quasi-totalité de leur parcours tarn-et-garonnais. Sur la Garonne, c'est le barrage de Malause et les seuils installés sur le tronçon parallèle au canal de dérivation de Golfech qui imposent le niveau du fleuve dans ce secteur.

33 des 41 cours d'eau ne prennent pas leur source à l'intérieur du modèle. Parmi ceux-ci, 11 bénéficient d'une station de mesure du débit placée à proximité de l'entrée du cours d'eau dans la zone modélisée.

Le modèle prend en compte les prélèvements pour l'alimentation en eau potable, l'industrie et l'irrigation. Les détails sur les volumes prélevés et leur ventilation par type d'usage sont reportés dans le rapport BRGM/RP-65583-FR.

Le modèle est calibré en régime transitoire sur la période d'octobre 2005 à septembre 2015 avec un pas de temps de calcul décadaire. La calibration est réalisée, à la fois, sur les niveaux des nappes souterraines et les débits des cours d'eau. Au total, 36 chroniques piézométriques et 13 stations de suivi des rivières ont servi pour le calage du fonctionnement de la nappe alluviale modélisée (cf. rapport BRGM/RP-65583-FR).

Une fois le modèle calé sur la période 2005-2015, la modélisation a été étendue à la période d'octobre 1995 à septembre 2015.

b) Développement pour l'estimation des débits amont entrant dans le modèle

Pour avoir la possibilité de simuler des périodes en dehors de la période d'observations des débits imposés des développements ont été réalisés :

Une modélisation globale pluie-débit de rivière, avec le schéma GARDÉNIA a été réalisée pour chacun des 33 cours d'eau. Chaque modélisation est calibrée sur la série d'observations la plus appropriée parmi les 11 séries disponibles, en prenant en compte le ratio entre la superficie du bassin sélectionnée et la superficie de bassin en amont du point d'entrée dans le modèle.

Une nouvelle fonctionnalité de MARTHE permet alors, à partir des paramètres de modélisation obtenus, de calculer à chaque pas de temps, le débit entrant à partir des données de forçage climatique relatives aux mailles correspondant au bassin versant amont.

Pour ce calcul des débits amont, il est possible de choisir d'utiliser soit les données SAFRAN (pluies, ETP, températures de l'air), soit les données SURFEX (ruissellement et drainage).

Dans la version actuelle, le type de données choisi est le même que celui sélectionné pour la simulation des nappes. Il pourrait être envisagé cependant un choix différent, par exemple des données SAFRAN pour les débits amonts, même si la simulation des aquifères est réalisée avec le schéma SURFEX.

c) Adaptations du modèle Tarn-et-Garonne pour son intégration dans Aqui-FR

Une version du modèle utilisant les flux de ruissellement et d'infiltration calculés avec le schéma de surface SURFEX a été générée, appelée par la suite MOD82-SURFEX. Les simulations réalisées sont au pas de temps journalier pour le bilan de surface et pour le calcul hydrodynamique. Elles sont réalisées sur la période 1995-2014.

Dans un premier temps, une simulation a été réalisée avec les flux d'infiltration et de ruissellement calculés par SURFEX sur la zone modélisée. Cette simulation n'a pas convergé à cause des faibles valeurs de recharge calculées par SURFEX entraînant une baisse importante des niveaux piézométriques simulés par le modèle. Ceci s'explique par une pluie efficace (recharge + infiltration) calculée par SURFEX plus faible (146,5 mm/an) comparée à celle calculée dans le modèle de référence (218 mm/an). En outre, le flux de ruissellement SURFEX représente 37% de la pluie efficace moyenne sur la période simulée. À noter que dans le modèle de référence, l'ensemble de la

pluie efficace recharge la nappe, le ruissellement est considéré à travers le débit de débordement de la nappe qui rejoint les cours d'eau (soit environ 30% de la pluie efficace).

Pour rester conforme à la logique du modèle de référence, nous avons réalisé une simulation en considérant la pluie efficace calculée par SURFEX. Le schéma GARDENIA est utilisé pour le partage ruissellement / infiltration comme dans le modèle de référence et dans ce cas de figure toute la pluie efficace s'infiltre dans la nappe.

Tableau 1. Termes du bilan hydrologique moyen à l'échelle du domaine modélisé pour le modèle MOD82 de référence, avec le schéma SURFEX (période 1995-2014).

Modèle	Pluie moyenne (mm/an)	ETP moyenne (mm/an)	Pluie efficace (mm/an)	Infiltration (mm/an)	Ruissellement (mm/an)
MOD82-Ref	679.4	969.6	218	217	1
MOD82-SURFEX			146.3	92.2	54.1

Les critères statistiques pour cette simulation (biais et RMSE : racine carré de l'erreur quadratique moyenne) sont calculés sur 10 piézomètres suivis en continu qui sont représentés par des points rouges encerclés sur la Figure 5. L'écart relatif moyen (biais) entre les données observées et celles simulées par le modèle MOD82-SURFEX (Tableau 1) montre que le modèle MOD82-SURFEX sous-estime le niveau de la nappe notamment dans les basses terrasses du Tarn et de la Garonne Aval (Saint Pierre, Pedeloup et Pomiés). L'erreur quadratique moyenne varie entre 0,73 m et 2,16 m.

Le modèle a été calibré en 2020 en utilisant les données de la version VF8 de SURFEX, cette calibration a permis d'améliorer la piézométrie restituée par le modèle, l'écart entre observations et simulations est réduit avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) faible. L'ensemble des scores correspondant aux dix piézomètres de la figure 4 sont résumés dans le Tableau 2. La comparaison de quelques chroniques piézométriques simulées et observées est reportée en Figure 6.

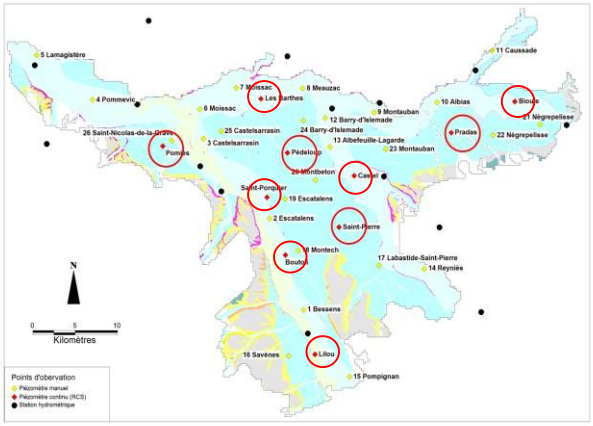
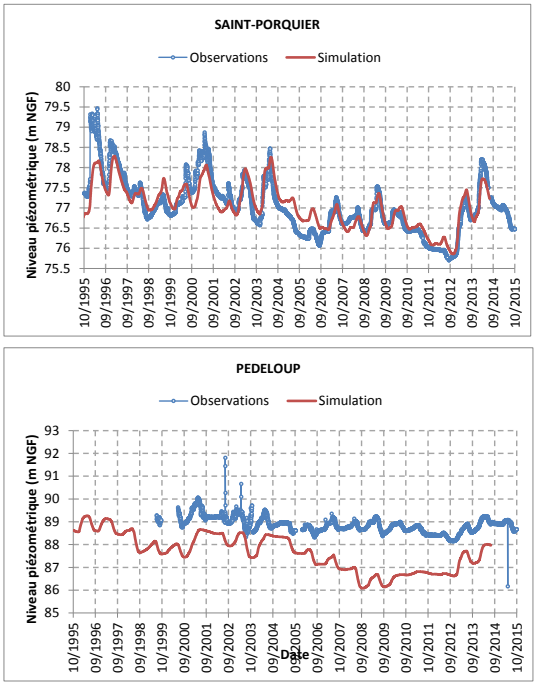


Figure 5. Localisation des points d'observation : piézomètres et stations hydrométriques, les piézomètres utilisés dans l'évaluation des modèles sont entourés d'un cercle rouge.

Tableau 2. Scores correspondant aux dix piézomètres de la Figure 5, pour le MOD82-SURFEX sans et avec calibration du champ de perméabilité.

	MOD82-avant calibration		MD82-après calibration	
Nom piézomètre	Biais (m)	RMSE (m)	Biais (m)	RSME (m)
BIOULE	0.83	1.08	-0.09	0.74
BOUTOLI	-0.52	0.73	-0.53	0.75
CASTEL	0.61	0.76	-0.04	0.49
LES_BARTHES	0.30	0.38	0.01	0.23
LILOU	0.47	0.74	0.47	0.76
PEDELOUP	2.16	2.24	1.43	1.56
POMIES	1.13	1.13	-0.09	0.15
PRADAS	0.47	0.93	0.42	0.93
SAINT-PIERRE	1.90	1.98	-0.48	0.61
SAINT-PORQUIER	0.93	1.04	0.01	0.50



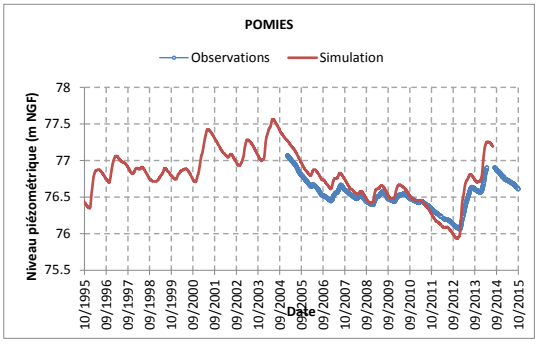


Figure 6. Exemple de chroniques piézométriques simulées (rouge) et observées (noir) dans les alluvions du Tarn-et-Garonne.

2.2.2. *MARTHE Poitou Charente*

Cette section reprend les éléments du rapport (Vergnes, Amraoui et Thiéry, 2020). Dans la version du modèle Poitou Charentes (POC) incluse dans la plateforme Aqui-FR en phase 1, cinq cours d'eau ne prennent pas leurs sources à l'intérieur du domaine modélisé, il s'agit du Bandiat, de la Charente, de la Gartempe, de la Tardoire et de la Vienne. Afin d'utiliser le modèle en prévision ou bien en projection, il est important de simuler automatiquement les débits amont des rivières dans le modèle POC implémenté dans Aqui-FR. Pour cela une modélisation pluie-débit de rivière de ces 5 bassins a été réalisée. Chaque modélisation est calibrée sur les données d'observation.

Les débits des 5 stations de jaugeages proches de l'entrée du modèle ont été modélisés avec le logiciel EROS en utilisant les forçages SURFEX R03 de Météo-France sur toute la durée d'observation. Les paramètres identifiés ont ensuite été intégrés dans la modélisation MARTHE en amont du premier tronçon des affluents concernés, avec la superficie externe du bassin.

Les critères de qualité de la simulation des débits des 5 bassins avec les forçages SURFEX R03 sont donnés Tableau 3.

Tableau 3. Critères de simulation des 5 bassins amont du modèle POC avec les forçages SURFEX R03

Bassin	Coefficient de Nash (Racine carrée du débit)	Coefficient de Nash (Logarithme du débit)	Biais de simulation (% débit moyen)
Bandiat	0.815	0.710	-6.6
Charente	0.722	0.719	-13.2
Gartempe	0.786	0.348	-8.5
Tardoire	0.740	0.654	-14.1
Vienne	0.712	0.529	-11.6
Moyenne	**0.755**	**0.592**	**-10.8**

Par ailleurs, il est important d'analyser et de comprendre pourquoi, dans ces bassins, la pluie efficace (ruissellement + infiltration) semble sous-estimée par SURFEX. En effet, les débits amont simulés en utilisant le ruissellement et l'infiltration calculés par SURFEX sous-estiment les étiages comparés aux observations, avec pour conséquence moins d'eau entrant dans le modèle POC.

2.2.3. *EauDyssée : sous-modèles de Craie et Basse-Normandie*

Les applications de Craie ont été recalées avec les flux de SURFEX V8 par Pascal Viennot (ARMINES/MINES ParisTech). Cela couvre une extension de 44 174 km^2, avec un peu plus de 250 000 mailles souterraines (Figure 7). Un effort particulier a été mené sur l'application Seine-Eure, initialement mal calée avec les flux de la précédente version de SURFEX (R03). Ce recalage, combiné à l'effet de corrections de géométrie au niveau de la représentation du réseau hydraulique, ont significativement amélioré le comportement du modèle(Gallois and Viennot, 2018)). Les résultats en termes sont bien meilleurs, sur les 175 piézomètres de contrôle, 78% ont un biais inférieur à 0.5 m, et en termes de RMSE, il est inférieur à 1 et 2 m pour respectivement 35% et 65% des piézomètres.

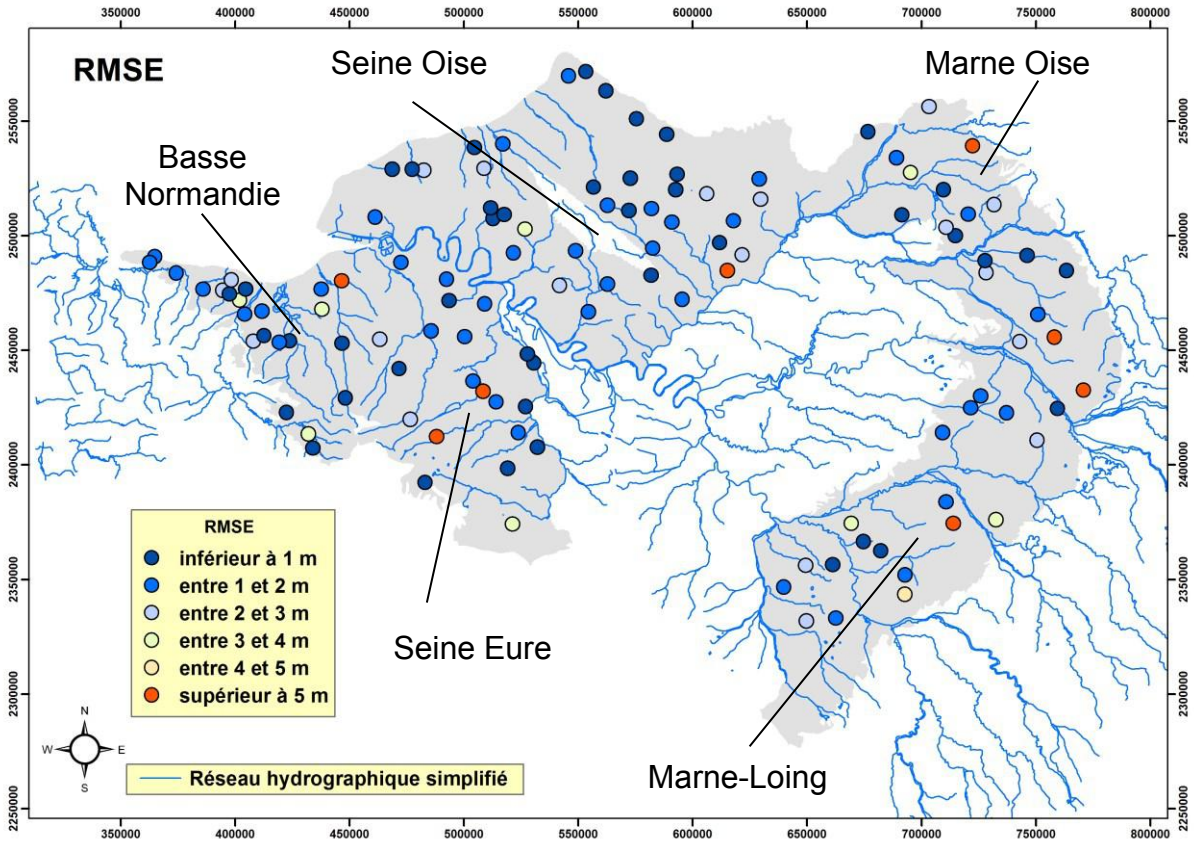


Figure 7. Erreur des moindres carrés (RMSE) obtenue après recalage sur les piézomètres de contrôle sur les sous-modèles craies d'EauDyssée, forcés par la dernière version de SURFEX.

2.2.4. *HS1D*

L'extension du modèle HS1D sur les bassins versants reposant sur des aquifères de socle breton se poursuit dans le cadre de la thèse de Nicolas Cornette, financée sur un autre projet dédié à l'évolution de la ressource en eau sous changement climatique en Bretagne. Des améliorations ont été apportées en intégrant des hétérogénéités du bassin versant via la prise en compte de 2 jeux de paramètres hydrodynamique contrastés. Cela conduit à des améliorations de l'estimation des débits lorsque le bassin se situe sur des zones géologiques inhomogènes (Cornette *et al.*, 2021).

2.3. Adaptation de la plateforme à ses différents usages

Des développements ont été effectués pour faciliter le lancement des simulations des différents types de simulations : ré-analyse pluriannuelle, prévision, ou test, etc. Désormais, un seul fichier de configuration regroupe l'ensemble des options de simulation. Celles-ci incluent :

- le nom de la simulation,
- le type de la simulation, au nombre de cinq,
- la période de simulation (exemple : d'août 1995 à juillet 2014),
- les répertoires des fichiers de forçages et de « restart »,
- le pas de temps des forçages (les simulations Aqui-FR s'effectuent au pas de temps journalier, mais les forçages peuvent être fournis à un pas de temps différent),
- la liste des modèles hydrogéologiques sélectionnés,
- la liste des variables de sortie.

Les types de simulations sont :

- le type « COMP » permet d'effectuer une succession de simulations sur plusieurs années hydrologiques d'août à juillet. La plate-forme réalise une simulation par année, en générant chaque année un restart et en repartant de ce « Restart » l'année suivante,
- le type « LONGTERM » permet d'obtenir les mêmes résultats, mais en réalisant une simulation complète sur plusieurs années, et générant à la fin de la simulation un seul fichier restart,
- le type « PART » permet d'effectuer une simulation sur une période partielle, par exemple d'août 2016 à octobre 2016,
- le type « PSE » permet d'effectuer des prévisions saisonnières d'ensemble.
- Enfin, le type « TPS_REEL » permet de sélectionner une année et d'effectuer une simulation sur cette année complète.

La liste des modèles hydrogéologiques comprend la Somme, le Nord-Pas-de-Calais, le Poitou-Charentes, la Basse-Normandie, l'Alsace et le Tarn-et-Garonne pour MARTHE, la Somme, la Basse-Normandie, la Loire, la Seine et 4 sous-modèles Seine pour EauDyssée, et un ensemble de 23 systèmes karstiques pour EROS. Il est possible de ne choisir que quelques-uns de ces modèles, ou la totalité, pour une simulation.

Des options en ligne de commande permettent dorénavant de forcer ou non la compilation du coupleur Palm, selon si celle-ci s'avère nécessaire par rapport à une compilation précédente (notamment en cas de changement du nombre de modèles à simuler), de forcer l'écrasement du répertoire de simulation (si celui-ci existe déjà), de choisir une année de restart, ou bien de choisir le répertoire de sauvegarde des *restarts* (pour éviter un écrasement en fin de simulation).

2.4. Evolution des pré- et post-traitement de la plateforme

2.4.1. Fichiers de relance « restart »

Des fichiers de « restarts » sont maintenant crées. Ces fichiers sont générés à la fin d'une simulation afin d'être réutilisés pour réaliser une nouvelle simulation. Prenons l'exemple d'une simulation de 2 ans, partant du 1er août 1997 jusqu'au 31 juillet 1999. Si l'option de génération de restart est activée dans Aqui-FR, des fichiers de « restarts » seront générés à la fin de la simulation à la date du 31 juillet 1999. Il sera possible ensuite de repartir de ces fichiers pour réaliser une nouvelle simulation avec les conditions initiales du 31 juillet 1999 pour générer l'état des hydrosystèmes au 1er août 1999 et dans la suite de la simulation. La génération des fichiers de « restarts » a été codée pour EauDyssée, MARTHE et EROS. Elle est surtout utile pour la prévision saisonnière où il est nécessaire de pouvoir partir de n'importe quel mois entre 1958 et aujourd'hui afin de réaliser des prévisions à 6 mois dans le passé, ou des prévisions dans le futur en partant de l'état présent. Elle sert également dans le cadre de simulations sur plusieurs années. Si la machine de calcul s'arrête au cours d'une simulation, les fichiers de « restart » permettent de relancer la simulation à un moment précédent. Cette fonctionnalité peut s'avérer utile, compte tenu des temps de calcul impliqués (plusieurs jours pour une simulation sur 60 ans et tous les modèles activés).

2.4.2. Fichiers de sorties

Chaque modèle fonctionne avec ses propres formats de données, que ce soit pour les fichiers de paramètres, les entrées ou les sorties. Un des intérêts du coupleur Open-PALM est d'uniformiser ces formats (au moins les entrées et sorties). Une phase de pré-traitement est nécessaire pour insérer chaque modèle/application dans la plateforme (définition des points de grille, nombre de couches, etc.). Le coupleur se charge ensuite de distribuer les forçages issus de SAFRAN-ISBA (ruissellement, drainage notamment) vers chaque application, et de récupérer les variables simulées par les différents modèles pour les écrire dans des fichiers.

Lors de la phase 2, un important travail a porté sur la gestion des sorties de modèle dans la plateforme en vue de simplifier le travail de post-traitement :

- conversion netCDF (format binaire plus compact, standard, portable),
- choix des variables de sorties pour limiter le stockage,
- choix des pas de temps de sortie (journalier et/ou mensuel),
- calcul des SPLI en cours de simulation.

En outre, une réflexion a été menée sur l'affichage des résultats (principalement SPLI) sous forme de carte. Il y a deux difficultés à prendre en compte : d'une part, la résolution de certains modèles peut descendre jusqu'à 100 m, difficilement représentable sur une carte couvrant toute la métropole; d'autre part, les mailles des modèles n'ont pas toutes la même taille, ce qui complique également l'affichage. Les premières versions des cartes présentaient un défaut dû au recouvrement de certaines mailles, conduisant parfois à une interprétation biaisée des résultats. Une nouvelle version a été développée pour palier ce défaut.

De plus, certaines régions peuvent être couvertes par plusieurs applications (par exemple, le bassin de la Somme modélisé à la fois par MARTHE et par EauDyssée). Pour ces cas particuliers, un choix doit être fait sur l'application mise en avant. Quelques échanges avec des experts du BRGM sur les différentes régions concernées nous ont permis de sélectionner les applications les plus pertinentes, améliorant ainsi la qualité des cartes de prévision saisonnière de SPLI.

2.5. Gestion de la plateforme Aqui-FR

La gestion de la plateforme Aqui-FR repose sur un dépôt GIT hébergé par RENATER. GIT permet de maintenir un dépôt commun, accessible à toutes les personnes participant au développement ou souhaitant simplement faire tourner des simulations. GIT permet en outre le suivi de version de la plateforme. Comme plusieurs personnes interviennent sur le développement de l'outil (mise à jour des modèles, ajouts d'applications, etc.), une procédure a été mise en place pour faciliter les mises à jour et s'assurer du bon fonctionnement de l'outil.

Par ailleurs, certaines de ces mises à jour ont des impacts significatifs sur les résultats de modélisation, notamment en SPLI. Il peut s'agir de correctifs importants sur les modèles, du changement de forçages météorologiques (nécessairement calés sur les cycles de modélisation des systèmes de Météo-France), ou encore du recalage des applications sur ces nouveaux forçages. Pour assurer une bonne analyse des résultats, il est nécessaire de bien identifier la version des modèles et des forçages. Un système de versionnage de la plateforme a donc été mis en place dans ce sens. Actuellement les résultats produits en mode opérationnel (suivi en temps réel et prévision saisonnière) sont identifiés sous le numéro de version V1.3.

3. Evaluation de la reconstitution sur 60 ans

3.1. Evaluation pluriannuelle

L'évaluation de la plateforme Aqui-FR sur une période de 60 ans (de 1958 à 2018) a fait l'objet de la publication scientifique de (Vergnes *et al.*, 2020). Cette évaluation a pu se poursuivre depuis, et intégrer donc l'application Tarn-et-Garonne. Cette évaluation repose sur une comparaison entre les piézométries observées et les simulations sur les couches aquifères correspondantes. Ces évaluations sont complexifiées par le fait que les observations piézométriques sont disponibles sur

des périodes différentes d'un point à l'autre. La Figure 8, issue de (Mounier, 2021), présente l'évolution temporelle pour chaque application du nombre de points de contrôle. Si on avait bien constaté dans (Vergnes *et al.*, 2020) une nette hausse du nombre de points de contrôle entre 1958 et 2010, l'extension récente relève que le nombre d'observations disponibles diminue nettement depuis les années 2000, en particulier sur les applications Nord-Pas-de-Calais, Somme et Loire. *In fine*, sur les 700 piézomètres présents sur le domaine Aqui-FR, seuls 349 ont des observations sur au moins 30 ans, et 450 ont des observations entre 2019 et 2021.

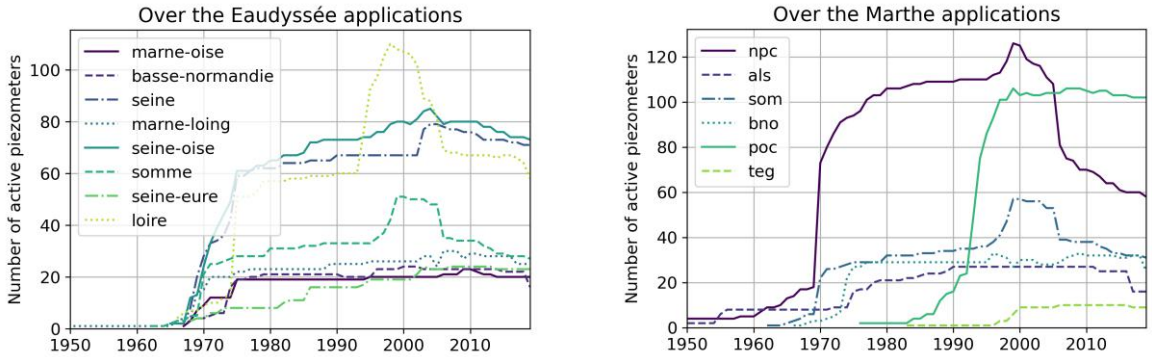


Figure 8. Evolution du nombre d'observations piézométriques disponibles dans la base de données ADES de 1958 à 2020, dans les limites des extensions respectivement couvertes par les applications distribuées EauDyssée (à gauche) et MARTHE (à droite).

La question de l'état initial de la nappe au début de la simulation, alors que très peu d'observations sont disponibles, se pose, car, l'état initial va conditionner les résultats des premières années de la simulation. Classiquement, on utilise la méthode du *spin-up*, c'est-à-dire que l'on utilise en début de simulation l'état de la nappe obtenu en fin de simulation, mais, dans notre cas, cela a conduit à des niveaux initiaux trop bas. Nous avons donc choisi d'initialiser la modélisation en utilisant les conditions simulées fin juillet sur une année la plus proche possible de Juillet 1958. Pour cela, nous avons regardé à la fois l'accord entre les niveaux piézométriques des quelques points de mesures actifs depuis au moins 1958 avec ceux des années plus récentes, et leurs dynamiques pluriannuelles car celle-ci peut être importante pour les nappes à dynamique lente. Au total, 59 piézomètres ne montrant pas d'influence anthropique trop marquée ont été sélectionnés. Même si ceux-ci sont situés sur l'ensemble de la France, la dynamique pluriannuelle est comparable à celle des piézomètres situés sur le domaine d'étude. Deux années sont ressorties comme les plus proches : 2011 et 2013. Les conditions de fin Juillet 2013 simulées par la plateforme ont donc été utilisées comme conditions initiales pour le 1er août 1958.

Pour les débits des rivières, Vergnes *et al.*, (2020) ont montré que sur 228 stations hydrométriques, le critère de Nash est supérieur à 0.7 sur 27% des points de contrôle, et supérieur à 0.5 sur 58 %.

Les débits estimés à l'exutoire des karsts ont également été évalués (Figure 9). Les résultats sont très bons.

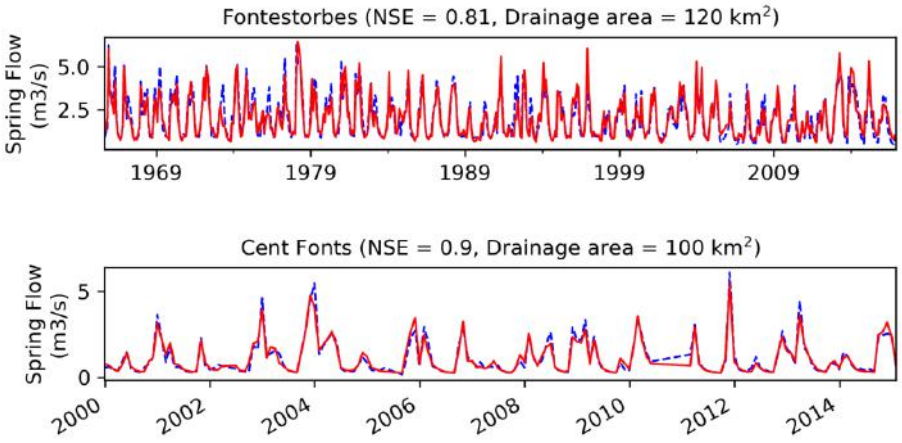


Figure 9. Comparaison des débits observés (bleu) et simulés (rouge) à l'exutoire de deux systèmes karstiques (Vergnes *et al.*, 2020).

Concernant la piézométrie, la Figure 10 présente les résultats en termes de biais et corrélation. En biais, il apparait clairement que la zone tertiaire du bassin de la Seine est assez biaisée. Cette zone n'a pas fait l'objet de recalage, l'objectif étant de remplacer le modèle existant (modèle Seine à 6 couches) par le modèle « Tertiaire/Île-de-France » (Gallois, Viennot and Verjus, 2017). Des biais sont également très présents sur le modèle Loire qui n'a pas été recalé et doit évoluer. Ailleurs, les biais sont raisonnables. La corrélation est assez bonne partout : 20% des piézomètres ont une corrélation inférieure à 0.5, mais, 30% ont une corrélation supérieure à 0.8, avec une concentration importante sur le bassin de la Somme.

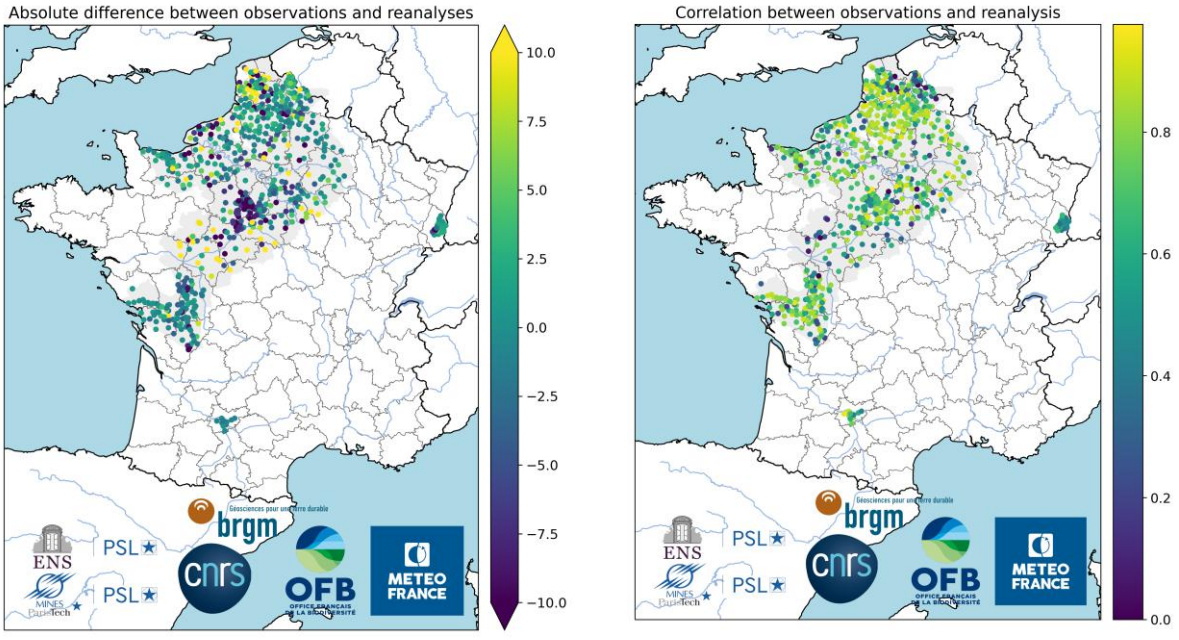


Figure 10. Comparaison entre la ré-analyse Aqui-FR sur la période 1958-2020 et les 700 points d'observation de piézométrie sur l'ensemble de la durée commune entre observations et simulations : à gauche : en termes de biais moyens (score parfait = 0), à droite, en termes de corrélation (score parfait = 1). Figure issue de (Mounier, 2021).

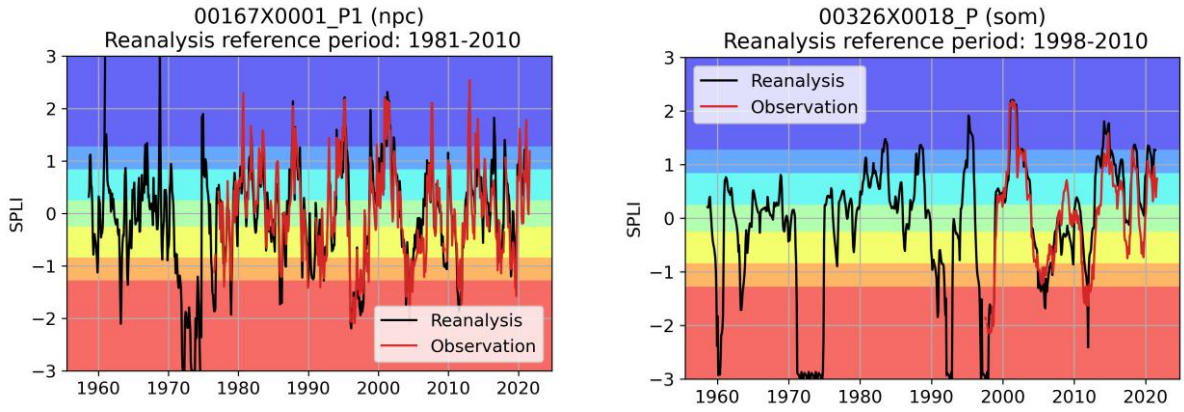


Figure 11. Evolution de l'indice piézométrique standardisé (SPLI) simulé en noir et observé en rouge. La période de référence pour l'estimation du SPLI dépend de la disponibilité des observations. A gauche sur l'application Nord-Pas-de-Calais, à droite sur l'application Somme. Figure issue de (Mounier, 2021).

Dans Aqui-FR comme dans le Bulletin de Situation Hydrologique (BSH), on ne présente pas les charges piézométriques qui varient dans l'espace en fonction de la topographie, mais, l'indice standardisé du niveau piézométrique, qui permet de situer chaque mois par rapport à une période de référence. L'exemple présenté en Figure 11 montre qu'on peut ainsi identifier immédiatement si le mois d'intérêt se situe proche de la normale (en vert), en dessous de la décennale sèche (en rouge) ou au-dessus de la décennale humide (en noir). Une des conséquences indirectes du SPLI est de débiaiser le modèle, puisque seule la dynamique temporelle intervient (Vergnes *et al.*, 2020). L'accord entre le modèle et les observations semblent ainsi meilleur. La Figure 12présente l'évolution de l'indice standardisé en moyenne sur le domaine Aqui-FR depuis 1958. On constate en moyenne des évolutions pluriannuelles sur des périodes de hautes eau (1980-1989, 200-2004) et des périodes de basses eaux (1970-1977 ; 2004-2012). L'évaluation de la fiabilité de la restitution des basses eaux a fait l'objet d'une évaluation particulière.

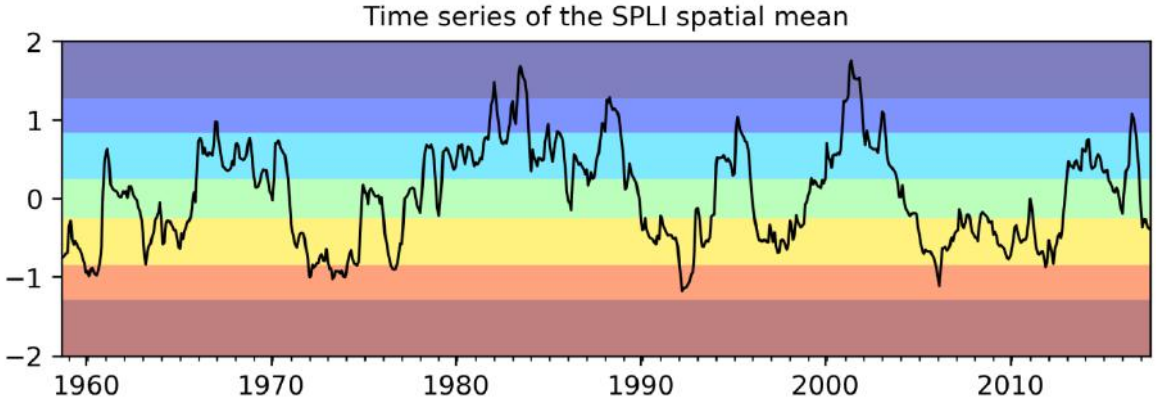


Figure 12. Evolution de l'indice SPLI sur l'ensemble du domaine Aqui-FR.

3.2. Analyses de l'occurrence des sécheresses en nappe depuis 1958

Un des attendus de la plateforme Aqui-FR est d'anticiper les situations de sécheresse *via* les prévisions saisonnières (cf. section 4). Pour vérifier que cela est pertinent, il faut s'assurer que la ré-analyse Aqui-FR est bien capable de reproduire l'évolution des sécheresses passées. Cette évaluation est complexe, car les observations de piézométrie ne sont pas forcément disponibles sur

des périodes longues (cf. section précédente). Ce travail a été mené lors du stage L3 d'Alexandra Nalivaev (Nalivaev, 2020) et du stage M2 d'André Mounier (Mounier, 2021).

3.2.1. Reconstitution historique des sécheresses hydrogéologiques (août 1958-mai 2020)

L'indice SPLI permet de déterminer les périodes de sécheresse, qui correspondent à des périodes où la valeur du SPLI est, soit sous le seuil des 5 ans sec (SPLI< -0.84), soit, sous le seuil des 10 ans secs (SPLI < -1.28). Il est alors possible de comptabiliser les mailles affleurantes qui sont dans cette situation, et d'identifier la fraction des mailles en situation de sécheresse (Figure 13).

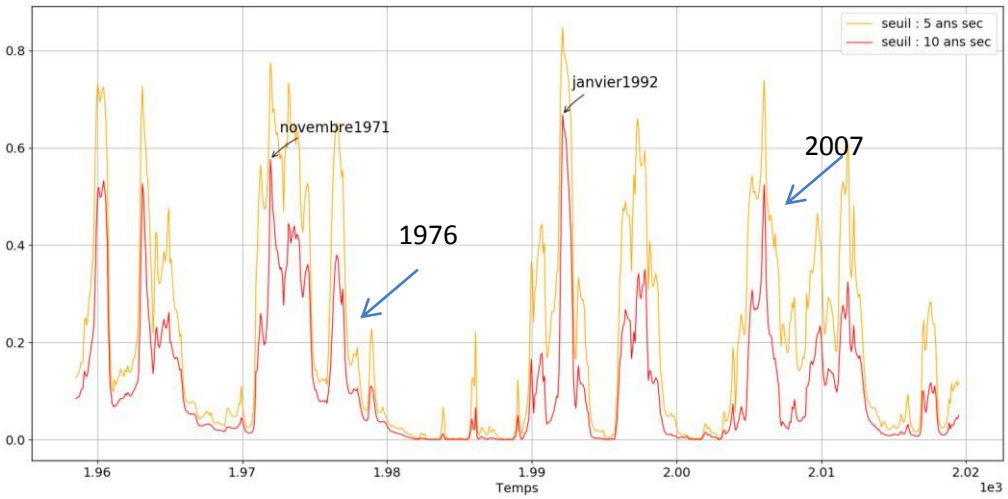


Figure 13. Evolution de l'extension spatiale des sécheresses (exprimée en ratio du nombre total de mailles affleurantes. La valeur 1.0 indiquant que 100% du domaine est en sécheresse hydrogéologique), entre 1958 et 2020 sur l'ensemble du domaine Aqui-FR. Figure issue de (Nalivaev, 2020).

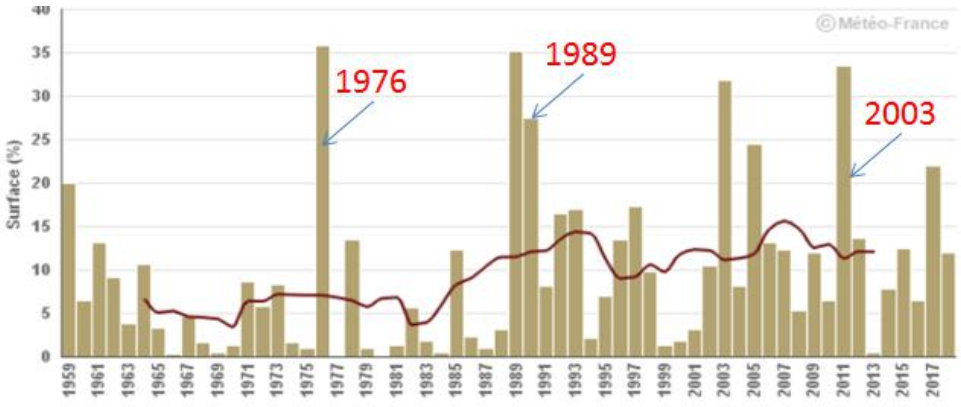


Figure 14. Evolution de l'extension des sécheresses édaphiques sur la France, estimée avec le modèle SIM selon la méthode de Vidal *et al.*, (2010)*. Source : Météo-France.*

On constate que la sécheresse a touché 60% du domaine Aqui-FR en 1992 et un peu moins de 60% en 1971 et 2007. Ces sécheresses ne sont pas en phase avec les principales sécheresses édaphiques (du sol) estimées par SIM2 sur la période. Ainsi, le pic de sécheresse hydrogéologique de 1992 arrive près de 2 ans après la longue sécheresse agronomique associée à des déficits de pluies hivernales 1989-1990, et la sécheresse hydrogéologique de 2007 n'est pas liée à la canicule/sécheresse de 2003. La fameuse sécheresse agronomique de 1976 se produit à la fin d'une sévère sécheresse en nappe qui marque un maximum fin 1971 mais dure en fait plusieurs années. Il apparait ainsi que les sécheresses hydrogéologiques semblent plus liées aux critères de sécheresses

sur les précipitations (SPI) et sur l'humidité des sols (SSWI) estimées sur 12 mois (Figure 15), ce qui semble cohérent avec la dynamique de la nappe.

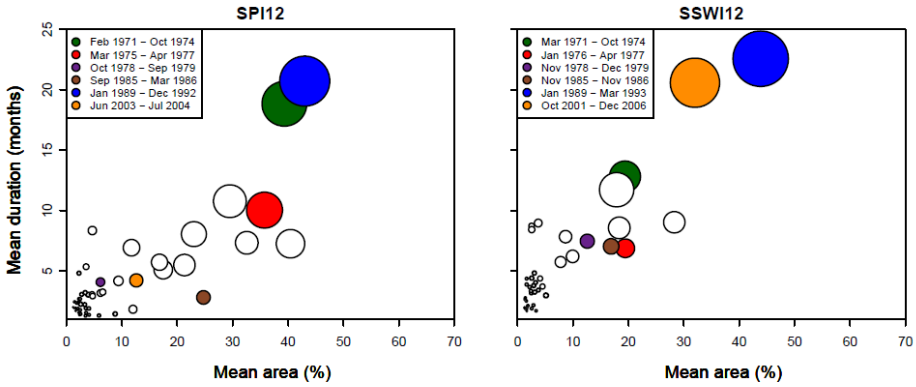


Figure 15. Durée et pourcentage d'extension spatiale des sécheresses pluviométriques (SPI12) et agronomiques (SSWI12) estimé sur une période de 12 mois. Figure issue de (Vidal *et al.*, 2010).

On se rend ainsi compte que la sécheresse agronomique de 1976 aurait pu avoir des conséquences bien plus graves si elle avait eu lieu en phase avec la sécheresse hydrogéologique de 1971. La Figure 16 présente l'évolution de la sécheresse hydrogéologique entre 1971 et 1976. Les zones en rouge sont celles où le déficit hydrogéologique est le plus fort.

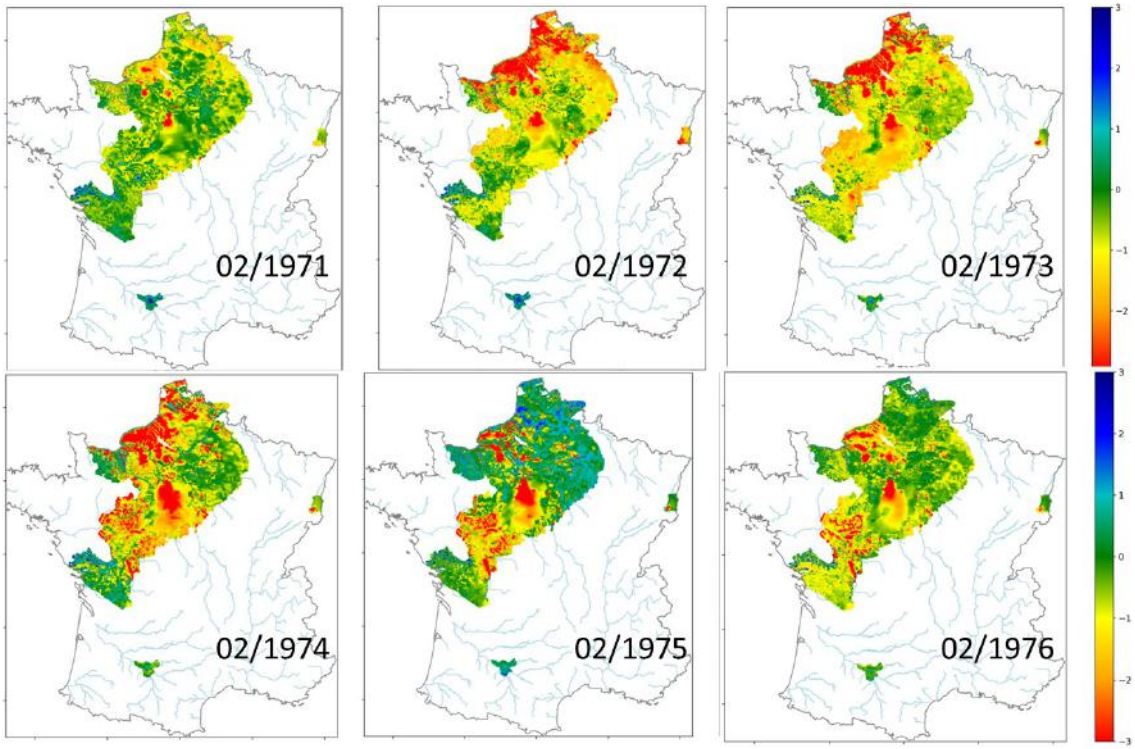


Figure 16. Evolution spatiale de la sécheresse hydrogéologique entre février 1971 et février 1976. Figure issue de Nalivaev (2020).

La sécheresse hydrogéologique de 1992 semble à la fois plus étendue et un peu plus diffuse (Figure 17). Elle affecte également le Tarn-et-Garonne.

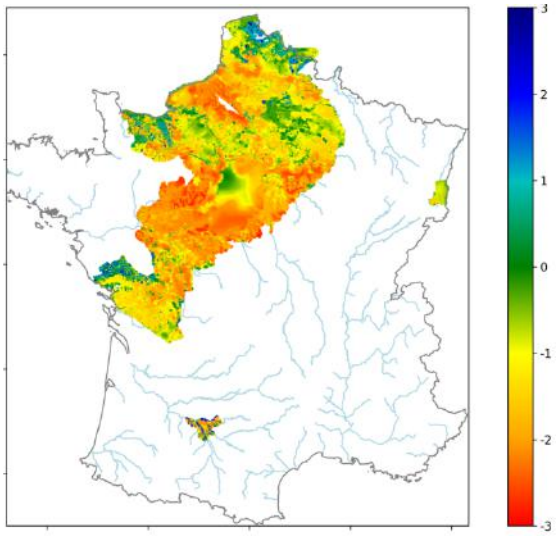


Figure 17. Valeur du SPLI en Juillet 1992 indiquant l'extension des sécheresses (zones oranges/rouges). Figure issue de Nalivaev (2020).

3.2.2. Comparaison aux observations : évaluation de la reconstitution des sécheresses

L'évaluation de la bonne reconstitution historique des sécheresses hydrogéologiques est limitée par le manque de disponibilité de chroniques hydrogéologiques de longues durées. L'analyse se fait donc par application hydrogéologique.

Un premier constat vient de l'analyse de l'évolution médiane des SPLI par application : celle-ci met en évidence des disparités entre bassins. Deux applications présentent une tendance à la baisse marquée : l'aquifère alluvial du Tarn-et-Garonne et dans une moindre mesure, celui du Poitou-Charentes (Figure 18). Ces tendances ne peuvent pas être confirmées par les observations qui ont une durée trop courte. S'il n'a pas été réalisé d'analyse d'attribution de ces tendances, on peut suspecter, sur le bassin du Tarn-et-Garonne, un problème d'équilibre du modèle. Cependant, pour ces deux bassins, une tendance à la réduction des écoulements obtenue par SAFRAN-SURFEX est cohérente avec une tendance à la réduction du SPLI (Le Moigne *et al.*, 2020).

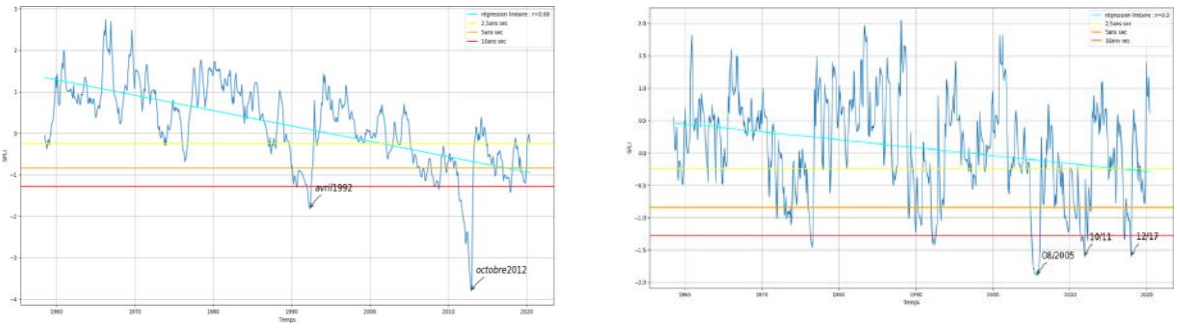


Figure 18. Evolutions des SPLI médians sur les couches affleurantes d'août 1958 à mai 2020 sur : à gauche l'application Tarn-et-Garonne, à droite, l'application Poitou-Charentes.

L'utilisation d'une période de référence (ici, 1980-2010) pour l'estimation d'un SPLI sur un bassin présentant une tendance à la baisse conduit fatalement à obtenir des niveaux récents bas par rapport à la normale. Un biais d'interprétation peut donc intervenir, et cela, d'autant plus si les observations ne sont pas disponibles sur la période de référence, ce qui est le cas pour ces bassins.

Ainsi, la méthode choisie pour l'évaluation des périodes de sécheresses se base non pas sur le SPLI, mais, sur la valeur de charge brute, en comparant l'extension spatiale des sécheresses en moyenne sur chaque application Aqui-FR avec le pourcentage de piézomètres présentant au cours de cette période une charge piézométrique inférieure à leur 1er décile, et ce, quel que soit la période

d'observation disponible sur chaque piézomètre. Cette méthode testée dans le cadre du stage L3 d'Alexandra Nalivaev a été raffinée lors du stage M2 d'André Mounier, en estimant la fraction du nombre de piézomètre dont le niveau piézométrique mensuel est inférieur au 1er décile. Cela permet ainsi de se rapprocher de l'information fournie par le SPLI, et d'effectuer la comparaison sur exactement le même nombre de piézomètres Figure 19.

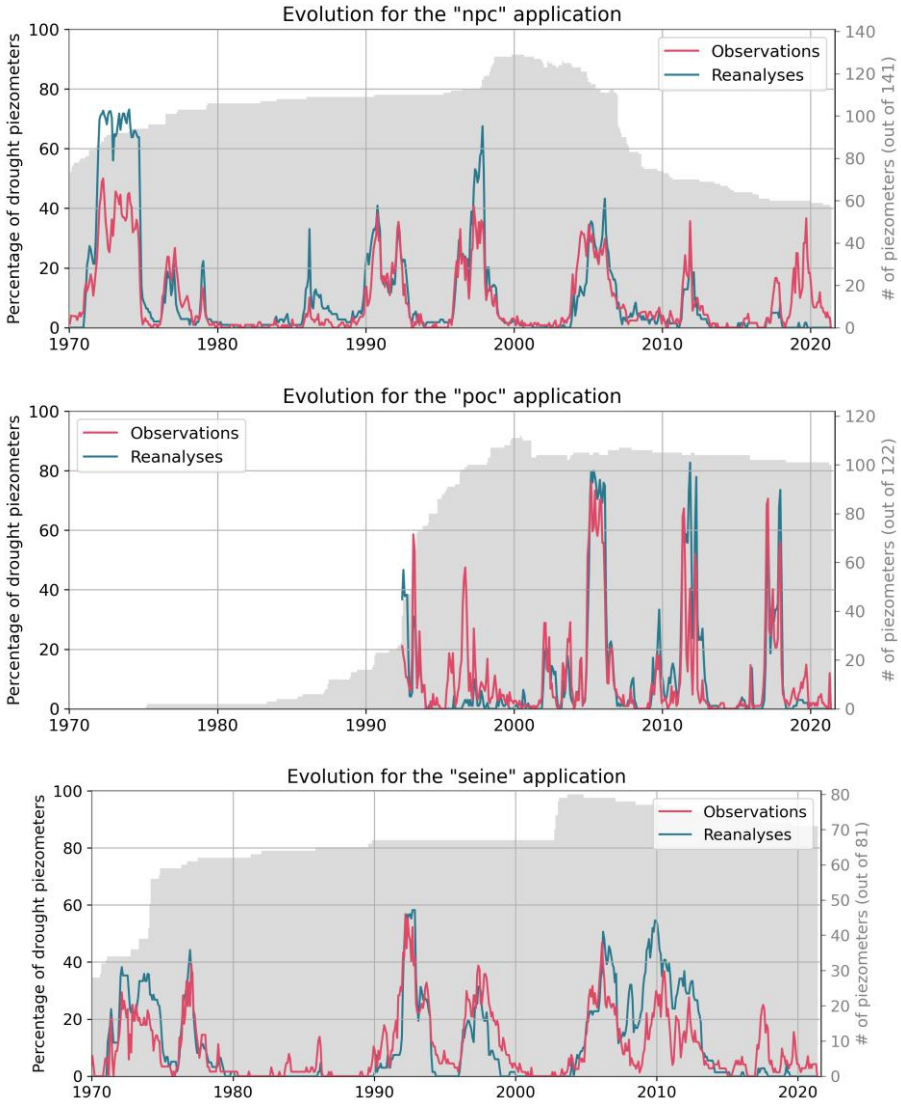


Figure 19. Comparaison de l'évolution temporelle du pourcentage de piézomètres considéré en condition de sécheresse, en rouge pour les observations, en bleu pour la ré-analyse Aqui-FR. La zone grisée correspond à l'évolution du nombre de piézomètres disponibles sur l'application, avec l'échelle correspondante à droite.

Quelques résultats ressortent :

- Il y a un plutôt bon accord général sur les périodes détectées en sécheresse. Tout le long de la période ainsi que sur leur durée,
- La ré-analyse Aqui-FR a tendance à surestimer l'extension des sécheresses anciennes (*i.e.* le nombre de piézomètre en sécheresse) : assez nettement sur l'application Nord-Pas-de-Calais en 1971-1974 ou sur l'application Seine entre 2007 et 2010, ainsi que sur l'application Poitou-Charentes en 2012 même si de façon plus brève.
- Par contre, les sécheresses récentes (depuis 2019) sont nettement sous estimées.

Il est possible qu'une partie de ces évolutions soit liée à l'évolution du réseau de piézomètre du fait de l'apparition et disparition d'un grand nombre de points de contrôle entre le début et la fin de la ré-analyse, ce qui modifie, *de facto*, la période de disponibilité et donc l'estimation du 1er décile. Une autre cause pourrait être liée au fait que les prélèvements dans le modèle ne sont pas connus sur l'ensemble de la période. La plupart des applications supposent des prélèvements constants depuis les années 2010, égaux à des valeurs des années antérieures.

Ces résultats montrent ainsi que l'estimation des extensions de sécheresse par Aqui-FR est réaliste. On notera que les cartes simulées donnent accès à des zones qui ne sont pas couvertes par des observations, et qui tendent à s'étendre vu la diminution du réseau (voir également section 4.6.3).

4. Développement des prévisions saisonnières

4.1. Principe des prévisions

4.1.1. Les outils de prévision

Le système de prévision de Météo-France 6 est basé sur le modèle couplé global CNRM-CM6 (Voldoire *et al.*, 2019). Il est composé du couplage entre des modèles représentant l'atmosphère, les surfaces continentales, l'océan et la glace de mer. La composante atmosphérique ARPEGE-Climat -v6 inclut un nouvel ensemble de paramétrisations physiques, développé pour CMIP6. Il est utilisé en opérationnel pour la prévision météorologique numérique, et est développé conjointement par Météo-France et le CERFACS. Le système de prévision de Météo-France 6 est détaillé dans le document technique de (Dorel *et al.*, 2017).

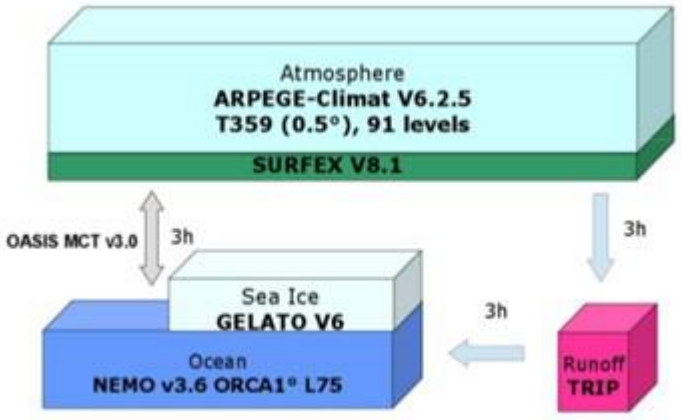


Figure 20. Composants du système de prévisions saisonnières utilisé (Dorel *et al.*, 2017).

4.2. Principe de l'évaluation

La mise en place des prévisions saisonnières et son évaluation ont été réalisées par Delphine Leroux lors de son post-doc sur le projet. Le post-doc a malheureusement été interrompu de façon brutale pour des problèmes administratifs liés à la combinaison de la création de l'OFB et de la crise COVID. Ainsi, la valorisation scientifique de ces éléments a été fortement retardée. Un brouillon d'article très avancé a cependant été rédigé, et les résultats présentés ici s'appuie sur ce document.

4.2.1. Une évaluation de prévisions rétrospectives

ARPEGE System 6 est composé de 51 membres en temps réel (une fois par mois) et de 25 membres pendant la période de prévision rétrospective (*hindcast* en anglais, 1993-2016). Les membres de l'ensemble sont générés à l'aide des techniques de dynamique stochastique décrites dans Batté and Dequé (2016).

Ces membres, ou scénarios de conditions atmosphériques possibles, sont utilisés en entrée du modèle de surface continentale SURFEX, qui génère ainsi autant de possibles évolutions spatialisés du ruissellement et de l'infiltration vers la nappe qui sont ensuite utilisés en entrée des modèles hydrogéologiques inclus dans Aqui-FR. Pour valider les prévisions, il est nécessaire de réaliser une étude rétrospective, c'est-à-dire de réaliser ces prévisions dans le passé, afin de disposer d'un ensemble assez long de prévisions (ici, 25 ans), permettant d'évaluer l'aspect probabiliste des prévisions. Ci-dessous, les prévisions saisonnières des eaux souterraines du système ARPEGE 6 sont appelées PARP6 (Figure 21). L'évaluation des prévisions se base non pas sur une comparaison aux observations (difficile du fait de la disponibilité partielle des observations sur la période de 25 ans de l'évaluation), mais, sur une comparaison entre la ré-analyse et les prévisions saisonnières Aqui-FR. Par ailleurs, pour s'assurer de la capacité des prévisions saisonnières météorologiques à apporter une information pertinente pour l'anticipation de l'évolution des nappes, les prévisions réalisées avec PARP6 sont comparées à un ensemble de prévisions réalisées par un ensemble de 24 conditions climatiques passées tirées au sort parmi les 60 années disponibles dans la ré-analyse SAFRAN (noté PCLIM). *In fine*, ces prévisions d'ensembles sont également comparées à une prévision déterministe naïve supposant que l'état initial du SPLI de chaque point (plus humides ou plus sec que la normale par exemple), va perdurer durant les 6 prochains mois (noté NOPERT, pour absence de perturbation).

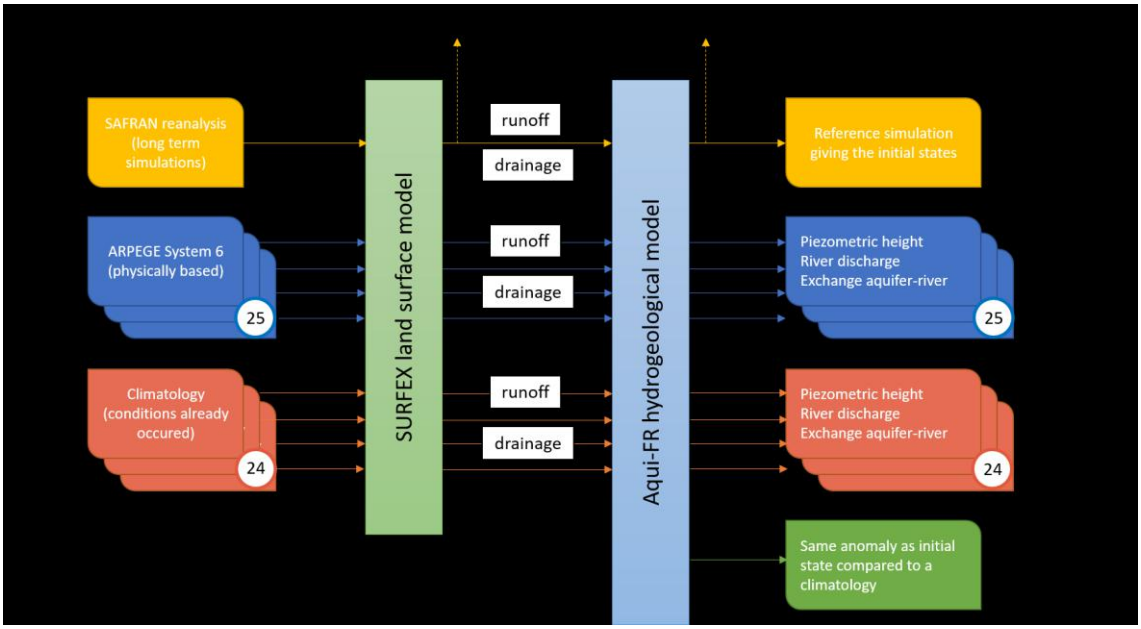


Figure 21. Schéma des différentes simulations exécutées pour les prévisions saisonnières: REA est la simulation à long terme de référence, PARP6 est la prévision saisonnière physique du modèle ARPEGE System 6 (25 membres), PCLIM est la prévision saisonnière de climatologie (24 membres pour lesquels 24 conditions atmosphériques sont issues des années passées), et NOPERT est une prévision naïve qui considère que l'anomalie de l'état initial va se conserver tout au long des 6 mois de prévisions. Figure issue de (Leroux *et al.*, *s.d.*)

La Figure 22 illustre les résultats des prévisions sur un piézomètre. Les conditions initiales des prévisions sont issues de la ré-analyse. Ainsi, à chaque lancement de la prévision, les conditions initiales (*i.e.*, niveaux piézométriques, niveaux d'eau en rivière, état de la zone non saturée) sont les mêmes pour les 3 prévisions. Les prévisions divergent alors au fur et à mesure que l'échéance de la prévision (c'est-à-dire de la durée depuis l'initialisation) augmente.

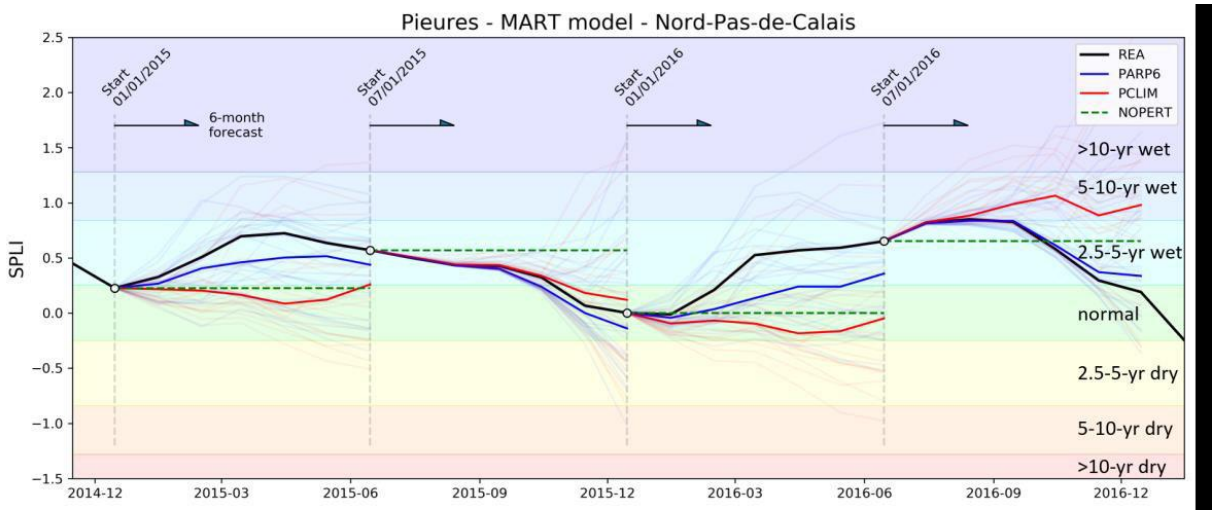


Figure 22. Illustration sur un piézomètre des différents types de prévision et de la comparaison avec la ré-analyse Aqui-FR. En noir : la ré-analyse Aqui-FR. Les ensembles des prévisions PARP6 et PCLIM sont dessinés en bleu et rouge, respectivement, avec la médiane en traits épais. La prévision déterministe naïve NOPERT est en vert pointillé. Figure issue de (Leroux *et al., s.d.*).

4.2.2. Critères d''évaluation de prévisions d'ensemble

S'agissant de prévisions d'ensemble, des critères spécifiques sont utilisés pour l'évaluation des prévisions (Rousset Regimbeau, 2007). En effet, il s'agit de prévisions probabilistes, c'est-à-dire qu'il est anticipé, en médiane, une situation en dessous de la quinquennale sèche. Pour vérifier cette affirmation, il faut que cette prévision soit vrai au moins 50% des cas. Pour automatiser ce type d'analyse, des critères statistiques sont utilisés.

- Le *Brier Score* évalue les prévisions probabilistes de variables ne pouvant prendre qu'un nombre fini de valeurs (ou « catégories »). C'est par exemple, le cas d'un dépassement d'un seuil : $\mathrm{BS} = \sum_{i=1}^{n}(p_i - o_i)^2$

  où o_i est la $i^{ème}$ observation (valant 1 si l'événement s'est réalisé et 0 sinon) et p_i correspond à la probabilité prévue correspondante de la réalisation de l'événement (entre 0 et 1).

- Le *Brier Skill Score* : l'interprétation d'une valeur du score de Brier n'est pas forcément chose aisée. Il est souvent plus judicieux de la comparer à la valeur obtenue par un autre système de prévision, appelé référence $BSS = \frac{BS}{BSref}$.

- Le *Ranked Probability Skill Score* permet d'évaluer, non plus un événement de type dépassement de seuil, mais de qualifier les prévisions d'ensemble sur toute la gamme de valeur du paramètre considéré. Il permet notamment d'évaluer la qualité de l'ordonnancement, et répond à la question de savoir si la moyenne des prévisions est référencée de la même manière que la référence. On considère que la prévision se répartie en J niveaux (proche de la normale, au-dessus de la quinquennale humide, en dessous de la quinquennale sèche). Pour chaque prévision d'ensemble, une probabilité prévue est associée à chaque catégorie : par exemple on pourrait avoir $y_1 = 0.2$, $y_2 = 0.4$, $y_3 = 0.4$. On fait la même chose pour les observations. Le RPS est alors défini comme la somme des écarts quadratiques des différentes composantes de prévision cumulée et d'observation cumulée :

  $$RPS = \sum_{m=1}^{J}\left[\left(\sum_{J=1}^{m} y_j\right) - \sum_{j=1}^{m}(o_j)\right]^2$$

  On doit effectuer ce calcul pour chaque pair de prévision, et estimer la moyenne pour un grand nombre de prévision $\overline{RPS} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} RPS_k$. Ainsi le RPSS est $RPSS = \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS}ref}$.

- Le *Relative Operating Characteristic* permet d'évaluer l'aptitude de la prévision à caractériser les évènements de haut et bas terciles. Ainsi, il répond à la question : sait-on prévoir si ce sera humide ou sec ?

4.3. Résultats de l'évaluation des prévisions rétrospectives

4.3.1. Une évaluation de prévisions rétrospectives

L'avantage de réaliser une évaluation par rapport à la ré-analyse Aqui-FR et non pas à partir des observations directement est que l'on peut estimer des scores sur l'ensemble des couches aquifères affleurantes du domaine Aqui-FR.

La Figure 23 présente la distribution des scores de corrélation obtenue sur l'ensemble du domaine Aqui-FR pour des prévisions à échéance 6-mois, en fonction du mois d'initialisation. Ici, la corrélation est donc estimée sur chaque point sur les 25 années de la prévision rétrospective. On peut constater que les prévisions à 6 mois des mois de Septembre, Octobre, Novembre, c'est-à-dire, celles disponibles dès les mois d'Avril, Mai, Juin sont celles pour laquelle la dispersion est la plus faible et les scores les plus proches de 1. On peut considérer que ce sont donc des prévisions robustes, puisque la variabilité des situations durant ces mois est bien reproduite. Les scores obtenus par la PARP6 et par PCLIM sont très comparables, et meilleurs que ceux obtenus par NOPERT. Ces prévisions sont lancées alors que la recharge des nappes est, en général, terminée et l'influence de la météo est réduite sur ces périodes par rapport à l'importance des conditions initiales.

Les prévisions réalisées en début d'année, entre Janvier et Mars, et couvrant ainsi les mois de Juin à Aout, ainsi que les prévisions lancées en Juillet pour le mois de décembre obtiennent des scores un peu moins homogènes spatialement mais qui restent satisfaisants. Les scores de corrélation atteignent, en médiane, entre 0.85 et 0.92 pour la PAPR6, des scores bien meilleurs que ceux obtenus par NOPERT et meilleurs également que la PCLIM, montrant une capacité des prévisions saisonnières météos à anticiper la fin de la période de recharge de l'année.

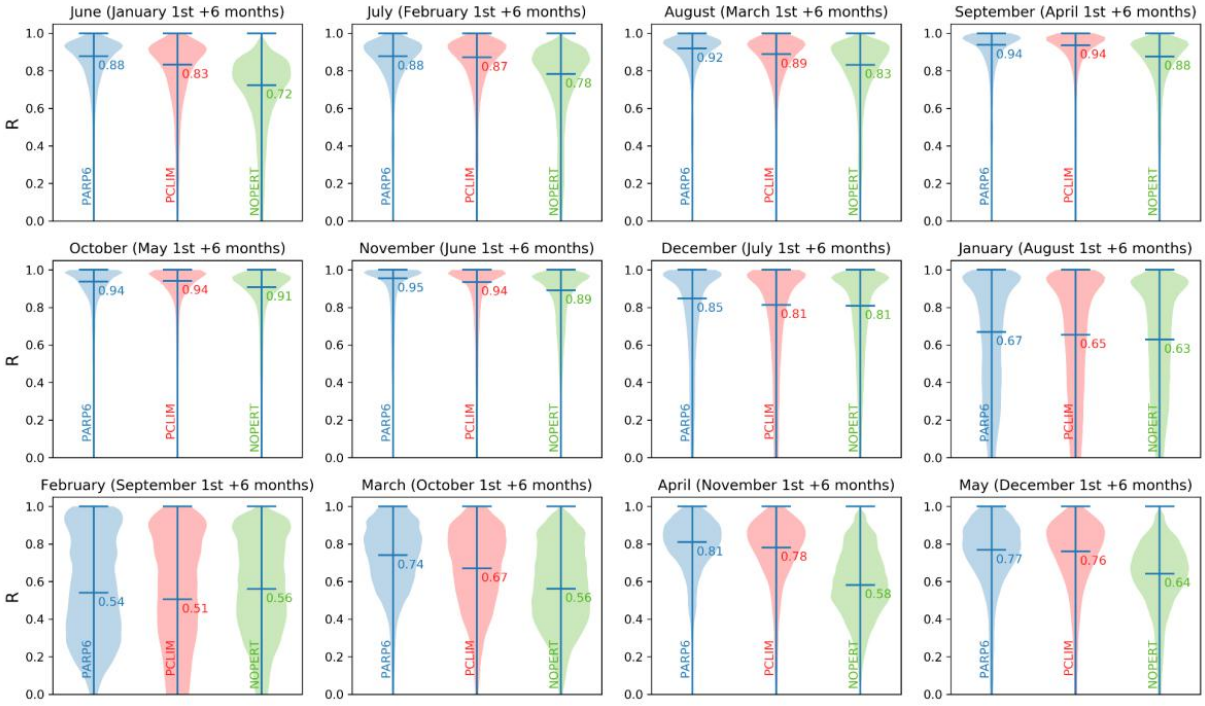


Figure 23. Comparaison des distributions sur l'ensemble des couches affleurantes d'Aqui-FR du score de corrélation obtenue par PARP6 (bleu), PCLIM (rouge), and NOPERT (verte) pour chaque mois d'initialisation et pour une échéance de prévision de 6 mois. Figure issue de (Leroux *et al.*, *s.d.*)

Les prévisions à 6 mois lancées du mois d'Aout au mois de Décembre et couvrant donc les mois de Décembre à Mai, *i.e.*, une partie ou la totalité de la période de recharge sont nettement moins bons,

avec une forte dispersion spatiale et des meilleurs scores obtenus par PARP6 et variant en médiane de 0.54 à 0.81.

Ainsi, il apparait clairement que les prévisions saisonnières sont peu exploitables sur les échéances intégrant les mois d'hiver, mais, peuvent être très pertinentes une fois que l'état initial est plus robuste. Ces résultats sont confirmés sur la Figure 24, qui présente l'évolution temporelle des scores de corrélation en fonction du mois d'initialisation et du mois de prévision (ou horizon de prévision). Le score de corrélation se dégrade lorsque l'horizon de prévision augmente, ce qui était attendu, mais la dégradation dépend fortement du mois d'initialisation. Toutes les corrélations après 1 mois de prévision sont très proches de 1.0 pour PARP6 et PCLIM, alors que le score de NOPERT est déjà inférieur à 1.0. À 2 mois d'échéance, les corrélations obtenues par la PARP6 et PCLIM sont toujours proches de 1.0, à l'exception de l'initialisation de décembre (c'est-à-dire des prévisions de janvier, autour de 0.90). Après 3 mois de prévisions, les performances commencent à se disperser selon le mois d'initialisation et peuvent encore être très bonnes comme en juin (initialisation en avril) ou dégradées comme en janvier ou février (initialisation en novembre ou décembre).

Le mois de février est le mois où les scores de prévisions sont les plus dispersés : les corrélations obtenues à 1 et 2 mois d'échéance sont supérieures à 0.95, mais dès les échéances de 3 et 4 mois, la corrélation décroit en dessous de 0, .85, et diminue encore sous 0, .55 pour les prévisions à 6 mois. Pour les prévisions couvrant les mois de Janvier à Mars, le potentiel de prévision est faible dès que l'échéance dépasse 3 mois, ce qui indique que les prévisions doivent être interprétées avec prudence. Au contraire, pour les prévisions couvrant les mois de juillet à novembre, les scores de corrélations sont bons, presque toujours supérieurs à 0,90, même après une prévision de 6 mois. Ceci est en partie dû au fait que la recharge est faible sur la période, et donc, que l'état initial peut déterminer une partie de l'évolution. Cependant, les résultats obtenus par NOPERT sont les plus faibles, ce qui implique que la modélisation physique des transferts d'eau en nappe apporte une information. De plus, les prévisions PARP6 obtiennent des scores légèrement supérieurs à ceux de PCLIM, ce qui montre que la prévision météorologique saisonnière est capable de capturer des singularités de l'année en cours sensibles pour l'hydrogéologie.

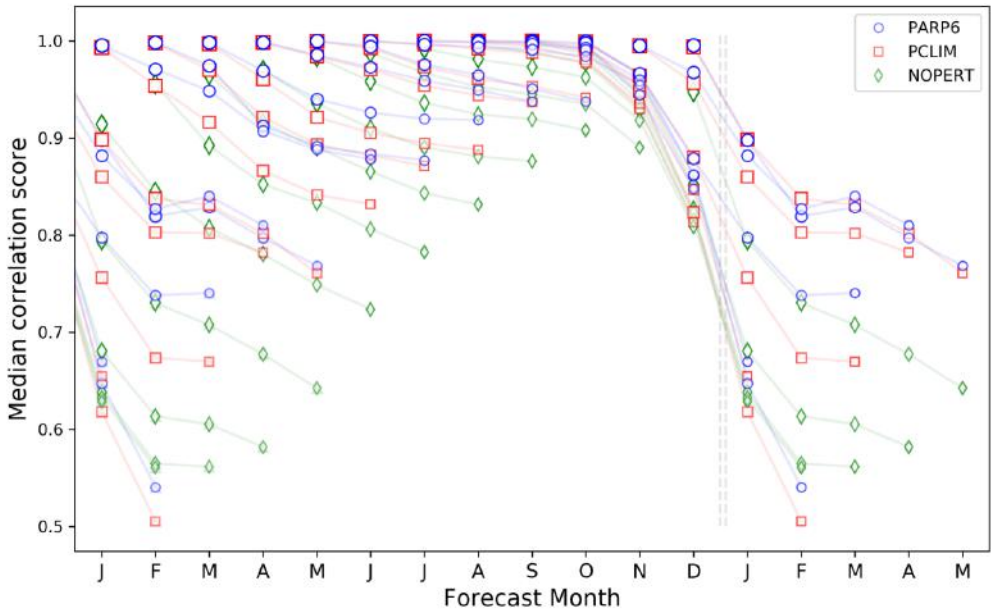


Figure 24. Scores de corrélation médians pour PARP6 (cercles bleus), PCLIM (carrés rouges) et NOPERT (losanges verts) en fonction du mois d'initialisation et de l'échéance. Les lignes simples indiquent une prévision continue sur 6 mois et la taille des marqueurs se réduit avec l'échéance. Figure issue de (Leroux *et al.*, *s.d.*).

Ces premiers résultats sur l'analyse des performances des prévisions saisonnières semblent démontrer l'intérêt de l'utilisation du système de prévisions saisonnière météorologique ARPEGE 6 par rapport à une simple climatologie qui ne sait reproduire que des conditions observées dans le passé.

4.3.1. *Variabilité spatiale de la qualité des prévisions saisonnières*

La Figure 25 montre les scores de corrélation sur 25 ans de PARP6, PCLIM et NOPERT après une prévision à 6 mois avec une initialisation le 1er février, c'est-à-dire pour une échéance en Juillet (ces cartes peuvent être dessinées pour chaque date d'initialisation et chaque mois de prévision). Les cartes de PARP6 et PCLIM sont proches en termes de distributions spatiales. La carte de NOPERT est plus sombre, indiquant une valeur de corrélation plus faible. Cependant, la distribution spatiale est assez similaire à PARP6 et PCLIM. Il semble ainsi que les zones centrales des applications soient plus prévisibles que les zones de bordures.

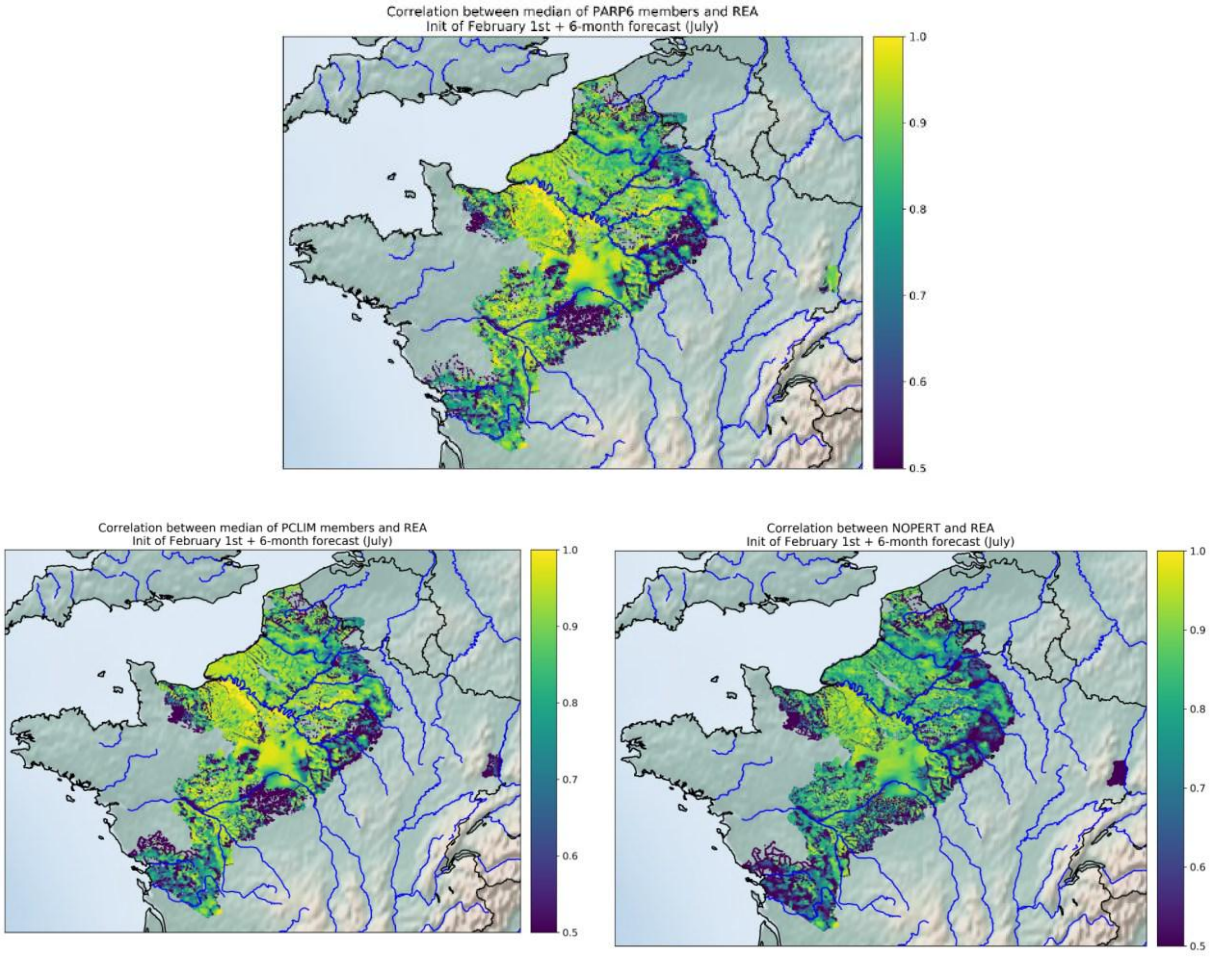


Figure 25. Cartes des scores de corrélation pour PARP6 (haut), PCLIM (bas gauche), et NOPERT (bas droite) pour une initialisation le 1er février entre 1993 et 2016, après prévision à 6 mois, par rapport à REA. Figure issue de (Leroux *et al.*, *s.d.*).

4.3.1. *Focus sur les prévisions de sécheresse*

L'intérêt des prévisions portant principalement sur la capacité à anticiper les zones de sécheresse, une attention particulière est portée sur l'évaluation de la prévision des zones en sécheresse. Ainsi, la Figure 26 présente la fiabilité de la détection des zones sèches avec 6 mois d'anticipation. Le mois indiqué correspond au moins de l'échéance (l'initialisation a donc lieu 6 mois avant). Plus les courbes sont proches du périmètre du cercle, meilleurs sont les résultats. On voit que la prévision saisonnière météo (PEARP) obtient de meilleurs scores que la PCLIM durant les mois de Mai à Aout, *i.e.*, durant les mois les plus sensibles à une sécheresse. Ces résultats sont très encourageants quant au potentiel des prévisions d'anticiper en avance les sécheresses.

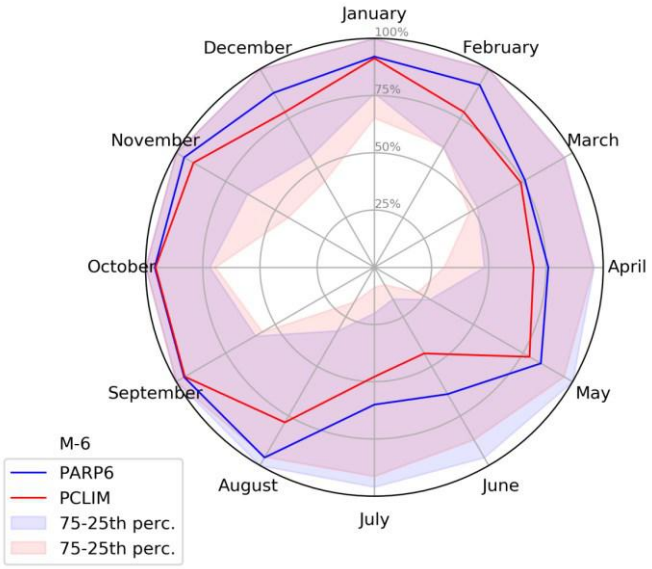


Figure 26. Evaluation de la détection, avec 6 mois d'avance, des zones de sécheresse (niveaux inférieurs aux niveaux correspondants à une période de 10 ans sec). La figure présente le pourcentage de membres de prévisions capable de détecter les zones en sécheresses identifiées par la ré-analyse. Les résultats de la PARP6 sont en bleu, ceux de PCLIM en rouge. Figure issue de (Leroux *et al.*, *s.d.*)

4.4. Mise en place opérationnelle des prévisions saisonnières Aqui-FR sur le super calculateur de Météo-France

La mise en place opérationnelle de prévisions saisonnières ont nécessité une série d'actions. En effet, il est nécessaire que le code numérique tourne sur des machines opérationnelles de Météo-France, ce qui a nécessité certaines adaptations des librairies. Puis, il faut que la chaîne entière permettant ces prévisions soit disponible : mise en place de la ré-analyse longue durée pour avoir les valeurs de référence sur les normales, mise en place de la ré-analyse temps réel, pour obtenir l'état initial, mise en place des prévisions. L'ensemble de ces actions ont permis une mise en place des prévisions Aqui-FR en temps réel au cours de l'année 2020. Elle s'est faite en plusieurs étapes, décrites ci-dessous.

Un point important est que la chaine de prévisions saisonnières de Météo-France a évolué. En effet, il est passé du modèle Arpège System 6 à Météo-France System7. Cela était attendu car les modèles de prévisions saisonnières intègrent des évolutions et changent environ tous les 2 ans. Ces évolutions doivent s'accompagner d'une amélioration. Cependant, il est quasiment impossible de réaliser une évaluation des prévisions Aqui-FR, en mode rétrospective, avec chaque chaine de prévision saisonnière au vue des délais nécessaires pour les réaliser (il faut un an pour avoir l'ensemble de la période de *hindcast*) et des temps de calcul et d'analyse de ces évaluations. On suppose donc ici que la qualité des prévisions de Météo-France System7 est au moins égale à celles de la PARP6.

Une des contraintes supplémentaires a été le nouveau super-calculateur de Météo-France fin 2020, qui a nécessité d'implémenter Aqui-FR sur les 2 générations de calculateurs.

Actuellement, l'exécution d'Aqui-FR à Météo-France repose sur 14 applications MARTHE ou EauDyssée. Les régions simulées sont : Alsace, Basse-Normandie, Loire, Marne-Loing, Marne-Oise, Nord-Pas-De-Calais, Poitou-Charentes, Seine-Eure, Seine-Oise, Seine, Somme et Tarn-et-Garonne.

4.4.1. *Simulation en mode ré-analyse du 1er août 1958 au 31 juillet 2020.*

Le fichier d'initialisation nécessaire au départ de la simulation a été obtenu par une méthode de *spin-up*. Les forçages nécessaires aux applications Aqui-FR ont été obtenus à partir des données de ruissellement et drainage issues de la ré-analyse SIM2 plaine (simulation SURFEX à 8 km de résolution, les forçages atmosphériques provenant de la ré-analyse SAFRAN).

Cette simulation a permis la construction des fonctions de distribution cumulative des hauteurs piézométriques en chaque point de simulation nécessaire au calcul de l'index piézométrique standardisé (SPLI).

4.4.2. Ré-analyse en mode temps réel

Lorsque les simulations tournent en temps réel chaque jour J, cela implique de disposer d'une analyse météorologique jusqu'au jour J. On est alors contraint par la disponibilité des observations météorologiques en temps réel. Pour assurer une meilleure qualité de l'analyse météo, l'analyse SAFRAN tourne plusieurs fois : chaque jour J, avec les données disponibles en temps réel, puis, après quelques jours de délais pour intégrer un plus grand nombres d'observations qui ont été qualifiés et corrigés, et *in fine*, chaque mois de l'année pour la réalisation d'une analyse météo annuelle.

Ainsi, pour Aqui-FR, chaque début de mois, l'estimation des drainages et ruissellements issus de SURFEX sont obtenus, d'une part, par la ré-analyse mensuelle SIM2 ayant tourné du 1er août au 22 du mois précédent, complétée jusqu'au 1er du mois par la simulation SIM2 ayant tourné en temps réel. Cela permet d'obtenir un état initial pour les applications Aqui-FR à chaque début de mois. Cela permet également d'obtenir la hauteur piézométrique moyenne sur le mois précédent. Tout cela est donc basé sur les observations météorologiques sans prise en compte des données piézométriques.

Les mois à partir du début de l'année hydrologique (1er août) sont aussi ré-analysés à cette occasion.

4.4.3. Simulation en prévision saisonnière et prévision climatologique en milieu de mois

Les différentes applications Aqui-FR sont exécutées chaque mois (après le 15) en mode prévision. Ces prévisions couvrent 6 mois d'échéance. L'état initial utilisé est celui obtenu à partir de la ré-analyse temps réel décrite précédemment. La façon dont les flux de drainage et de ruissellement issus de simulation de SURFEX sont obtenus, aussi bien pour la prévision dite saisonnière que la prévision climatologique est la suivante :

- Les 15 premiers jours du mois sont obtenus par les simulations SIM2 tournant en temps réel en mode analyse.
- Au-delà du 15 du mois :
    - pour la prévision saisonnière : simulation SURFEX en mode ensembliste (51 membres), utilisant comme forçages atmosphériques les prévisions saisonnières issus du modèle de prévision de Météo-France system7,
    - pour la prévision climatologique : simulation SURFEX en mode ensembliste (24 membres) utilisant comme forçages atmosphériques les ré-analyses météorologiques SAFRAN des années 1993 à 2016.

Le diagramme (Figure 27) décrit l'enchaînement des tâches sur une année hydrologique.

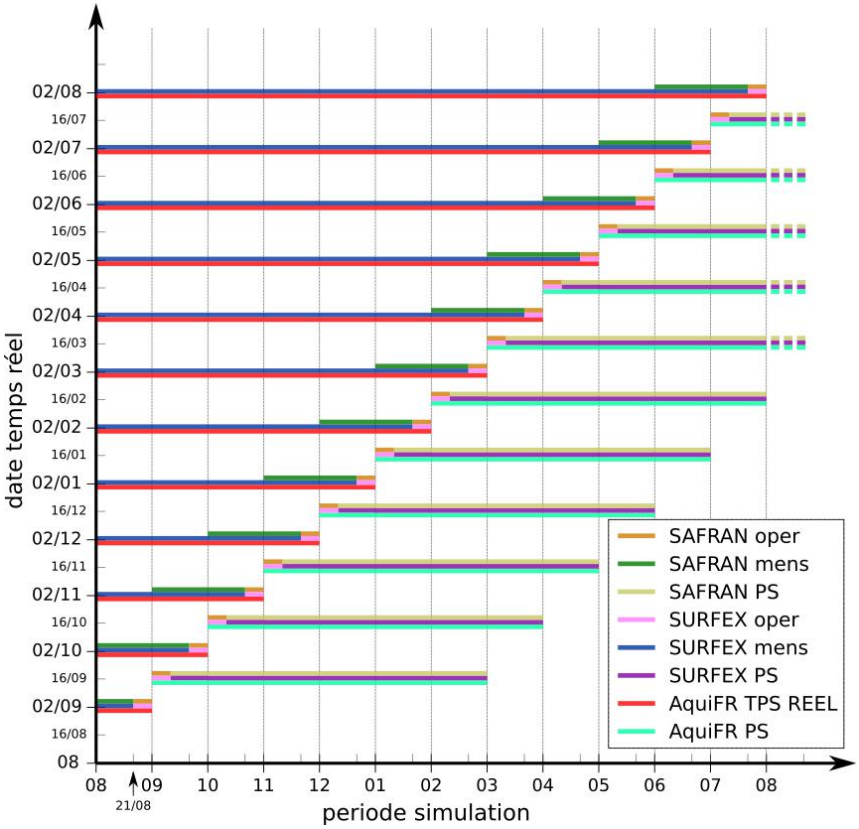


Figure 27. Description des simulations Aqui-FR sur une année hydrologique et des différents forçages utilisés. Pour chaque mois, on dispose de l'analyse SAFRAN-SURFEX jusqu'en milieu de mois (vert et bleu foncé), complétée jusqu'à la fin du mois par une analyse SAFRAN-SURFEX opérationnel (marron-rose). Ces analyses permettent de faire tourner les modèles hydrogéologiques dans Aqui-FR en mode temps réel, qui permet d'avoir accès en fin de simulation aux conditions initiales nécessaires pour les prévisions. Comme les SPLI sont estimés au pas de temps mensuel, les prévisions saisonnières débutent en début de mois bien que les prévisions saisonnières météos débutent au 15 du mois. Les 15 premiers jours sont donc complétés par l'analyse SAFRAN-SURFEX opérationnel. Les prévisions saisonnières sont tout d'abord débiaisées, ce qui conduit à la réalisation des prévisions SAFRAN SURFEX AquiFR PS (en beige, violet, vert clair).

4.4.4. Calcul et exploitation des SPLI

Le calcul des SPLI est actuellement réalisé par une tâche de post-traitement qui est lancée aussitôt la fin des simulations Aqui-FR décrite précédemment. L'exploitation des simulations repose essentiellement sur ce paramètre. Un des avantages du SPLI étant de pouvoir être comparé en des points différents, la représentation sous forme de carte prend tout son sens. La représentation sous forme de graphes aux points piézométriques est également très intéressante. Elle permet notamment d'estimer la dispersion des ensembles par un tracé de chacun des membres prenant la forme d'un panache. La normalisation du SPLI (actuellement par rapport à la période 1981-2010) apporte aussi un débiaisage des données modélisées et donc une comparaison possible des différentes modélisations. Le SPLI permet enfin le tracé de cartes caractérisant les durées de retour. Ces cartes sont alors diffusées sur le site web et ainsi mis à disposition des utilisateurs.

4.5. Co-construction des prévisions et communication

4.5.1. La co-construction

Un effort particulier de co-construction avec les gestionnaires de l'eau, potentiels utilisateurs de ces prévisions, a été mené dès la conception du projet afin de vérifier l'intérêt et d'améliorer les aspects les plus importants pour que ces prévisions soient utilisées. Ainsi, dès 2014, dans le cadre d'un pré-projet, le potentiel des prévisions avaient été présentées à des gestionnaires des bassins concernés et leurs vigilances sur des points d'attention apportés (Avignon, 2014). Des échanges réguliers ont été

maintenus depuis, notamment lors de l'organisation de la journée d'échange sur les services climatiques en Janvier 2019, suivis de plusieurs échanges en 2019, une année où les prévisions avaient pu identifier assez tôt le risque de sécheresse, principalement avec les Hauts-de-France et la DRIEE, des échanges avec l'établissement public Loire et la DREAL Pays de la Loire. En 2020, les prévisions ont été mises en place en mode opérationnel, et les échanges ont été complétés par la présentation des prévisions lors des comités de suivi hydrologique puis des CASH. L'établissement du site web a permis de diffuser les prévisions directement aux acteurs fin 2020. Ainsi, aujourd'hui, les prévisions sont accessibles à une quarantaine de personnes : 14 hydrogéologues experts régionaux du BRGM, des personnes des DREAL Hauts-de-France, Pays-de-la-Loire, Grand-Est, Normandie, Centre, Bourgogne Franche-Comté, DRIEE, 3 DDTs (80, 59, 62), ainsi qu'une personne de l'agence l'eau Seine-Normandie, et le Ministère de la Transition Ecologique (MTE). En 2021, l'étude menée sur le retour d'expérience de la 1ère année de prévision opérationnelle (stage d'André Mounier) a également donné lieu à de nombreux échanges.

Les échanges directs sont très riches, et permettent de soulever plusieurs problématiques abordées dans ce rapport, notamment concernant la représentativité des points de mesure, le choix des couches aquifères dans la cartographie, des retours sur la fiabilité de la modélisation. Les prévisions Aqui-FR sont maintenant intégrées dans les cartes d'anticipation de sécheresse (cf. section 4.5.3), qui sont des rendus très synthétiques. Les échanges avec les différents acteurs nous ont conduits à accompagner cette carte d'un bulletin de prévision, réalisé en concertation avec les experts météorologues et hydrogéologiques pour la 1ère fois en 2021.

Il ressort de ces échanges qu'un des atouts de ces prévisions saisonnières, même si encore imparfaites et avec un réel potentiel d'amélioration, est d'éclairer les débats lors des réunions des comités de sécheresse, en présentant des évolutions futures possibles et factuelles, ce qui semble important pour apaiser les débats lors de situations tendues.

4.5.2. Focus sur le site web

Un site internet a été mis en place début 2020 afin de permettre la mise en ligne des résultats de simulation : https://pro.meteofrance.com/page/index/affiche/id/265813

Son accès est limité aux partenaires du projet et à un panel d'utilisateurs (cf. section 4.5.1).

On y trouve les résultats d'Aqui-FR pour la France et pour chacun des 14 domaines d'Aqui-FR, sous forme de cartes (SPLI) et de graphes (niveaux piézométriques). Il s'agit des ré-analyses jusqu'au mois en cours, ainsi que des prévisions pour les 6 prochains mois (prévision saisonnière MFS7 et prévision climatologique). L'archive de ces prévisions (réalisées au cours des mois précédents) est aussi accessible via le site web.

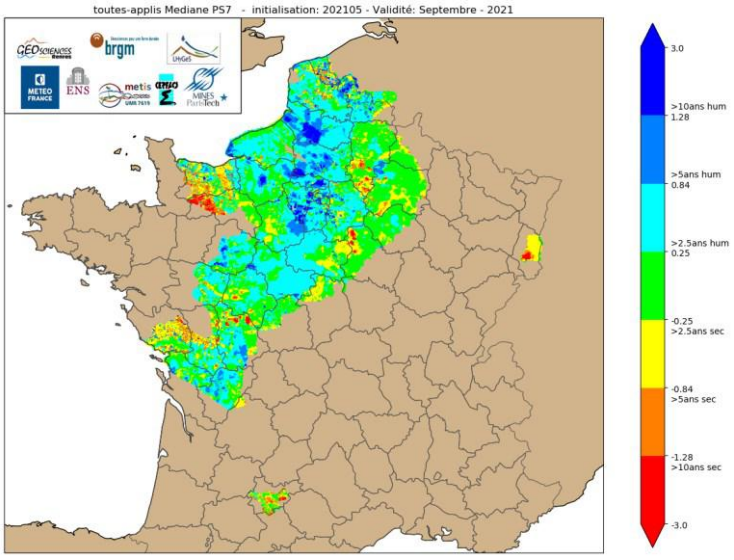


Figure 28. Exemple de carte pour la France : prévisions saisonnières réalisées le 15 mai 2021 pour le mois de Septembre pour la médiane du SPLI.

La Figure 28 montre un exemple de carte de prévision saisonnière pour le mois de juillet 2021 obtenue au mois de mars 2021 (horizon de prévision de 4 mois). La Figure 29 montre, quant à elle, un exemple de l'évolution du niveau de la nappe pour un piézomètre du bassin de la Somme, sur la période historique (à gauche) et sur la période de prévision (jusqu'à 6 mois, à droite).

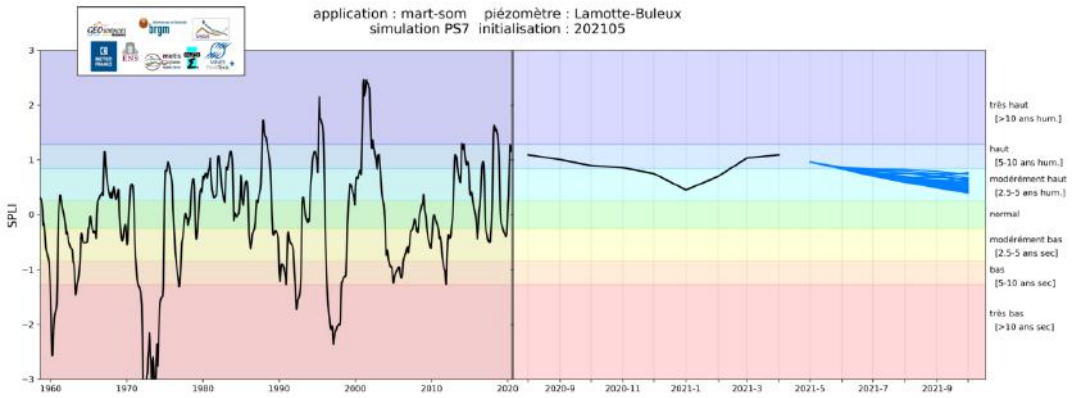


Figure 29. Exemple de graphique de niveau piézométrique : à gauche, ré-analyse depuis 1958, à droite analyse et prévisions initialisées en Mai 2021 (panache bleu) jusqu'au mois de Septembre 2021.

4.5.3. Focus sur les cartes d'anticipation des sécheresses

Les prévisions saisonnières obtenues avec Aqui-FR ont été utilisées pour réaliser les cartes d'anticipation des sécheresses du MTE en 2020 et 2021 (Figure 30). Même si l'extension spatiale d'Aqui-FR est encore réduite, sa résolution permet d'apporter une information spatialisée.

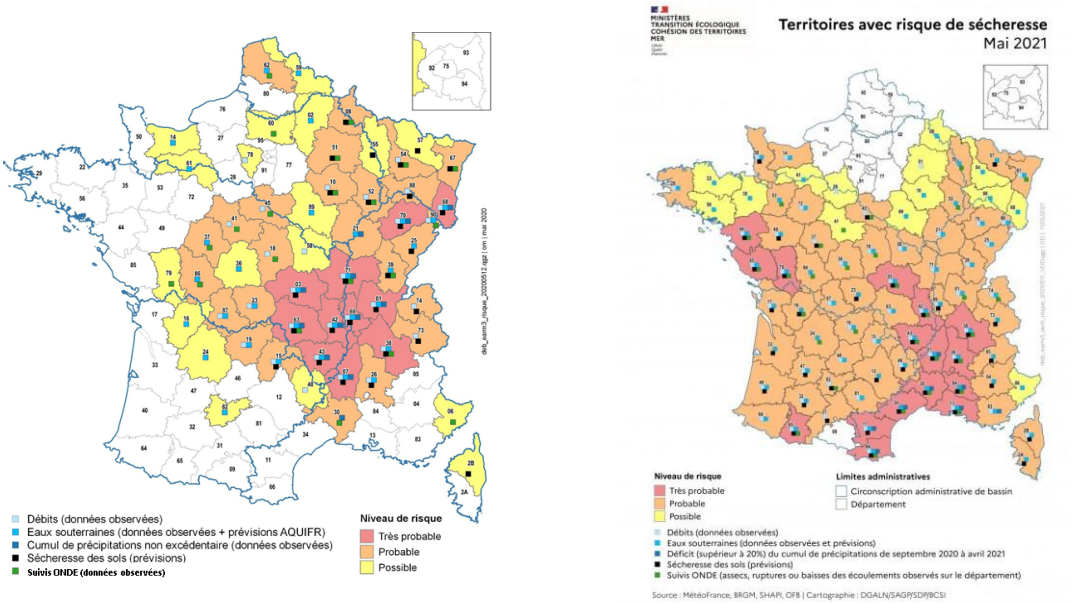


Figure 30. Cartes de l'anticipation de sécheresse publiées par le MTE en 2020 (à gauche) et en 2021 (à droite).

La contribution d'Aqui-FR pour la réalisation de ces cartes nécessite de transmettre à l'échelle départementale une information sur le risque d'apparition de sécheresse. A ce jour, nous avons choisi d'indiquer la présence d'un risque dès qu'une partie (même minime) du département est touchée par la sécheresse dans les prévisions. Cependant, cela n'est pas forcément satisfaisant, car les zones

touchées peuvent être très réduites, et parfois, associées à des biais non résolus du modèle, ou encore être associé à des prélèvements qui ne sont plus représentatifs des pratiques. Ainsi, en 2021, grâce à des échanges avec des experts météo et des experts hydrogéologiques, nous avons pu accompagner la carte d'anticipation des sécheresses du MTE par un bulletin de prévisions Aqui-FR (http://www.geosciences.ens.fr/wp-content/uploads/2021/05/Bulletin_previ_sais_Aqui-FR_Avril2021.pdf). La Figure 31 présente la carte de prévision à 6 mois publiée. Du fait des biais sur les conditions initiales, nous pensions que les prévisions sur certaines zones étaient trop humides. La réalité a été différente, du fait de conditions météos exceptionnelles durant l'été 2021 marquées par une très grande stabilité de la circulation météo ayant préservée la France des vagues de fortes chaleurs.

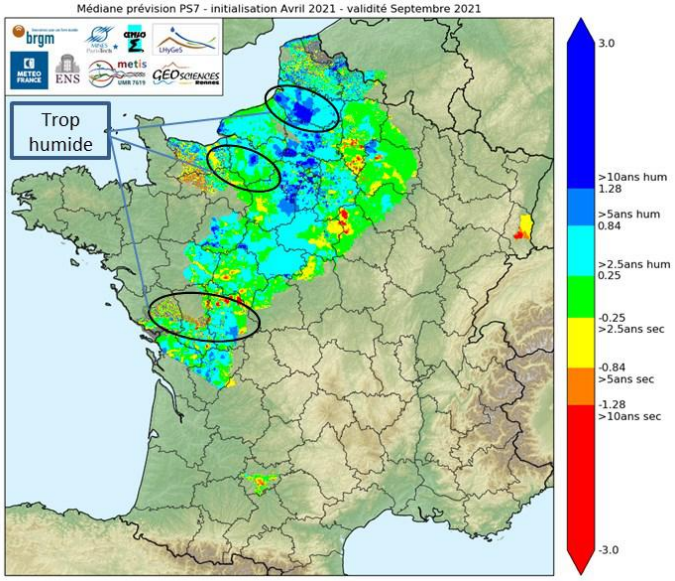


Figure 31. Accompagnement des prévisions saisonnières dans le bulletin de prévision Aqui-FR pour les prévisions à 6 mois lancé en Avril pour le mois de Septembre 2021.

Cette situation relève l'importance d'analyser les prévisions temps réels déjà réalisées. Cela a été réalisé dans le cadre du stage master d'André Mounier.

4.6. Premiers éléments du REX

Un des retours des utilisateurs sur les prévisions saisonnières était la volonté d'avoir une qualification des prévisions, non pas en comparaison de la ré-analyse Aqui-FR mais, directement à partir des observations. De plus, les scores obtenus en mode *hindcast* n'indiquent pas que chaque année à la même prévisibilité. Celle-ci varie forcément d'une année à l'autre.

L'évaluation sur une année donnée de prévisions d'ensemble ne répond cependant pas à la prévision probabiliste. On parle alors de vérification.

André Mounier a durant son stage vérifié la 1ère année de prévision saisonnière Aqui-FR, en comparant directement les prévisions avec les observations.

4.6.1. Problématiques associées à la comparaison de SPLI observés et prévues

Un premier problème identifié est l'écart entre les périodes de référence utilisées pour l'estimation des SPLI observés et prévus. En effet, les observations ne sont que rarement disponibles sur une période d'au moins 30 ans. De plus, la méthode utilisée dans le BSH pour estimer le SPLI implique l'utilisation de l'ensemble de la chronique observée disponible d'au moins 15 ans, mais, rarement au-delà de 30 ans. La Figure 32 illustre l'impact que peut avoir la période de référence. On voit dans ce cas, une période plus courte conduit à des valeurs plus basses. Il y a donc un biais d'interprétation des prévisions qui peut être marqué, si on se base sur la connaissance de l'évolution des observations.

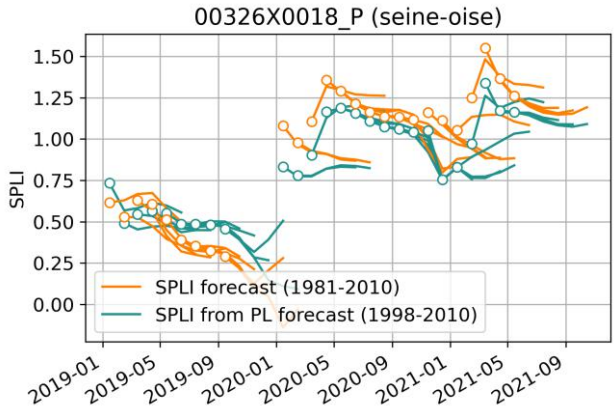


Figure 32. Illustration de l'impact de la période de référence utilisée pour le calcul du SPLI sur les prévisions à 6 mois d'un piézomètre : en orange : le SPLI estimé sur la période de référence normale, en vert, sur la période de référence incluant les observations. Chaque trait correspond à la médiane des prévisions de 6 mois. Le cercle identifie le début de la prévision. Figure issue de Mounier (2021).

Le seul moyen de remédier à cela est de recalculer les indices SPLI sur une période compatible avec chaque observation, impliquant que la signification des SPLI n'est pas homogène spatialement, et qu'il faut être prudent pour analyser les résultats. Cela est bien illustré en Figure 33, qui montre qu'en adaptant la période de référence pour le calcul du SPLI à celles des observations, la carte présente un état beaucoup plus humide, ce qui peut tromper l'utilisateur sur l'interprétation de la période de retour de la situation. Cela est particulièrement vrai en Poitou-Charentes et dans le sud du bassin de la Seine. Ce fait est d'autant plus important que le suivi des nappes par le BRGM pour le BSH et le CASH présente, comme sur la Figure 33 (droite), un SPLI calculé sur toute la durée disponible des observations, et donc, avec des points non comparables spatialement. Or, les cartes des états initiaux de la prévision Aqui-FR sont souvent comparées à ce BSH, ce qui peut conduire à une mauvaise interprétation de l'adéquation entre modèle et observation. Un des moyens de réduire ce problème est de mettre à disposition des cartes comme celle de la Figure 33 (droite) pour faciliter la comparaison avec les observations.

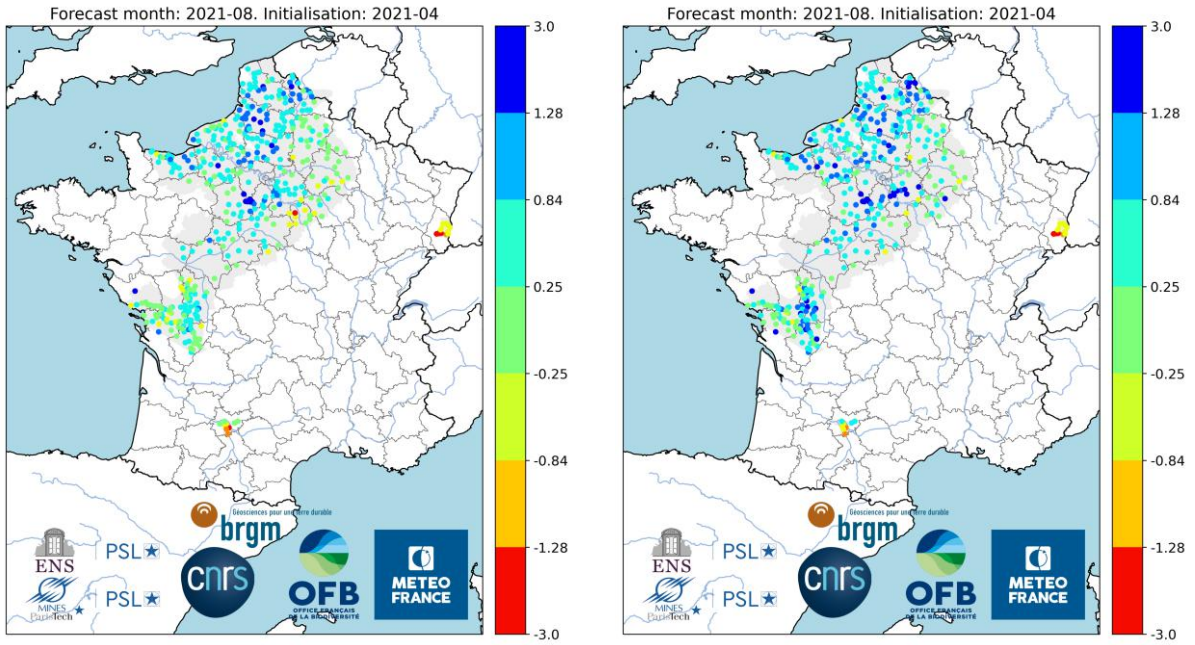


Figure 33. Comparaison des cartes de SPLI prévus aux piézomètres pour le mois d'Aout 2021 avec une période de référence homogène (à gauche) et recalculé sur la période de disponibilité des observations (à droite). Figure issue de Mounier (2021).

4.6.1. Sélection des piézomètres pour la vérification des prévisions

Pour effectuer la vérification sur la période de disponibilité des prévisions, il a fallu sélectionner les observations selon 2 critères : disponibilité des données en 2020 et 2021 (période couvrant les prévisions), et des observations sur une durée minimum pour pouvoir estimer un SPLI. Ainsi, sur les 701 piézomètres dont l'évolution journalière est extraite de la simulation Aqui-FR, 693 sont téléchargeables sur l'API Hub'eau du BRGM (https://hubeau.eaufrance.fr/). En effet, la possibilité de téléchargement régulier des données est importante si l'on veut vérifier les prévisions de façon régulière, car il faut à chaque fois mettre à jour les chroniques observées. La qualité de l'API Hub'eau permet d'accéder facilement à toutes les données. Cependant, seuls 448 parmi ces 693 piézomètres ont des données sur 2020 et 2021. Parmi eux, seuls 245 sont également disponibles sur 30 ans, alors qu'en restreignant cette période à 3 ans, on peut conserver 443 piézomètres. C'est le choix fait par la suite

4.6.2. Vérification des prévisions

La vérification des prévisions se fait pour chaque piézomètre, en comparant les SPLI observés et prévus calculés avec la même période de référence. Le SPLI étant estimé au pas de temps mensuel, cela permet de comparer les 6 échéances de prévision avec les observations, et ce, pour chaque prévision. La Figure 34 illustre ces comparaisons sur un piézomètre de l'application Nord-Pas-de - Calais. On a pu rassembler deux ensembles de prévisions : i) celles réalisées lors du post-doc de Delphine Leroux sur l'année 2019, alors qu'elle travaillait à l'évaluation des prévisions rétrospectives pour apporter des éléments temps réel de cette année prévue comme sèche (on constate des SPLI inférieur à -0.5) : ces prévisions ont été réalisées avec la génération précédente de modèle de prévision saisonnière, PARP6 ; ii) celles réalisées en opérationnelles depuis Janvier 2020, avec le nouveau système de prévision saisonnière Météo-France system7. Il s'avère que cette période est globalement plus humide.

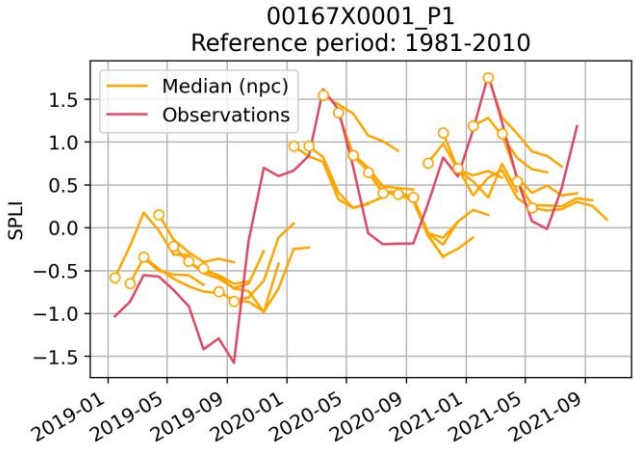


Figure 34. Comparaison entre les SPLI observés (en rouge) et prévus pour chaque échéance de prévision en médiane (orange, le cercle identifie le début de la prévision) sur l'ensemble de la période où des prévisions ont été réalisées en temps réel : les prévisions en 2019 ont été réalisées avec PARP6 par D. Leroux durant sont post-doc, alors que les prévisions en 2020 sont obtenues avec les prévisions Aqui-FR opérationnelles. Figure issue de Mounier (2021).

On peut constater que les prévisions peuvent être assez cohérentes d'un mois à l'autre, en particulier, celles débutant entre Mai et Septembre de chaque année, dont les trajectoires tendent à se confondre, alors que les prévisions lancées en hiver peuvent montrer de fortes dispersions d'un mois à l'autre, ce qui se caractérise notamment par un SPLI du 1er mois d'échéance très différent d'un mois à l'autre. En particulier, on voit que le 1er mois des prévisions des mois de Mars 2020 et 2021 ont un SPLI beaucoup plus élevé que ceux de Février de la même année, ce que est lié à des précipitations abondantes sur ces périodes. Or, ces précipitations ont été très mal prévues en médiane par les prévisions saisonnières. Ces adaptations d'un mois à l'autre permettent de se rapprocher des observations. On note cependant que pour ce piézomètre, l'évolution à la baisse du SPLI à partir du mois de Mars est moins rapide dans les prévisions que dans les observations.

Il est possible de faire cette analyse pour chaque piézomètre disponible et de vérifier la qualité des

prévisions saisonnières par rapport aux observations en estimant la corrélation entre l'évolution du SPLI observée et prévue en médiane sur les 6 mois d'échéance de la prévision (*i.e.* calcul de la corrélation entre les observations en rouge et un des « fils jaunes prévus » sur la Figure 34). La Figure 35 illustre les cartes des corrélations pour 2 mois de début de prévision, Avril et Septembre 2020. On constate que pour les deux dates, l'évolution sur 6 mois de la piézométrie peut être très bien anticipée (score proche de 1, en bleu foncé) ou très mal anticipée (score proche de -1, en rouge foncé). En termes de cohérence spatiale, il y a également une certaine dispersion. Cependant, quelques éléments ressortent : globalement, les scores obtenus en Avril (pour des prévisions d'Avril à Septembre) sont meilleurs que ceux obtenus en Septembre (pour des prévisions de Septembre à Février), ce qui était attendu, au vue des résultats de la prévision rétrospective (Leroux *et al.*, *s.d.*). En Avril 2020, on constate que les scores semblent moins bons en Poitou-Charentes, ce qui peut être lié à plusieurs facteurs : forte inadéquation des pluies prévues par rapport à celles réellement tombées sur la région, associée à une dynamique assez rapide des aquifères affleurants du domaine, mauvaise anticipation des prélèvements en nappe sur ces zones.

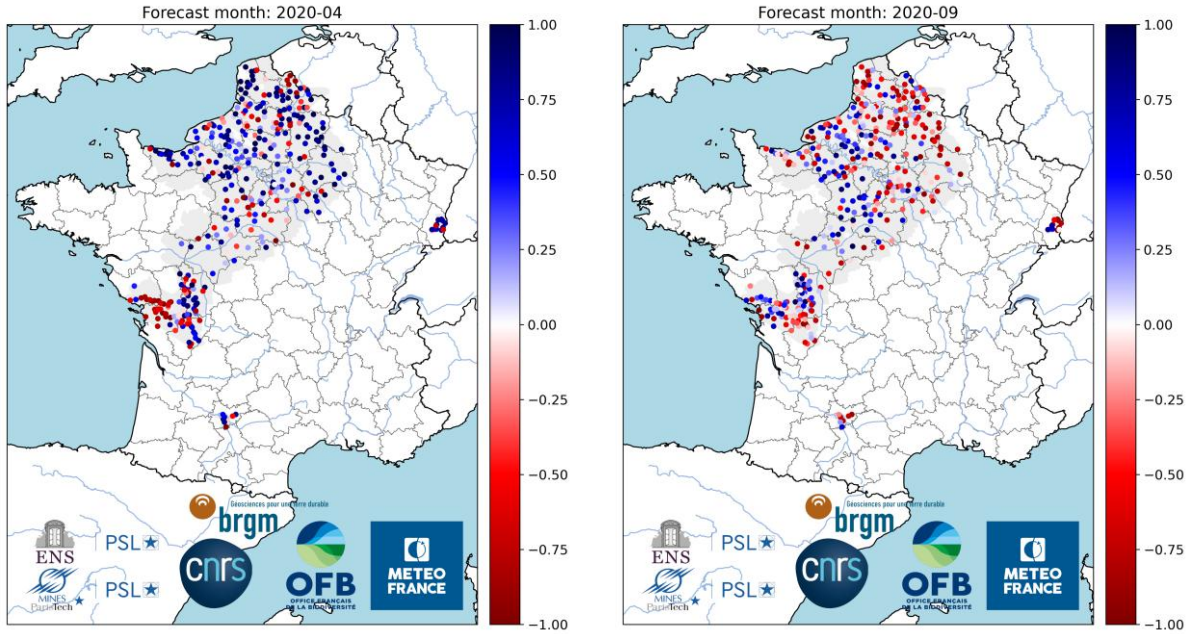


Figure 35. Visualisation de la qualité des prévisions saisonnières lancées en Avril 2020 (à gauche) et Septembre 2020 : corrélation entre les 6 mois du SPLI de la médiane des prévisions et les 6 mois de SPLI observé : les corrélations proches de 1 (bleu foncé) ont des scores parfaits, les valeurs négatives indiquent une évolution opposée. Figure issue de Mounier (2021).

Il est possible de synthétiser ces cartes en estimant la distribution des scores de corrélation en chaque point, et ainsi, de regarder l'évolution temporelle de cette distribution. C'est ce qui est fait en Figure 36. Plusieurs éléments ressortent de cette figure : i) la vérification directe aux observations obtient des meilleurs scores pour les prévisions lancées en début d'année civile (après la période de recharge) plutôt qu'en fin d'année civile (avant la période de recharge), comme cela avait analysé lors de l'évaluation de la période rétrospective (cf. section 4.3), ii) les scores sont plus élevés à partir de 2020 qu'en 2019 : cela peut être lié à la singularité des années étudiées, mais, peut être également lié à l'amélioration des prévisions saisonnières météorologiques, puisque cela correspond au passage de la PARP6 à Météo-France system7. iii) les scores de corrélation obtenus sont cependant moins bons que ceux obtenus sur la période rétrospective : cela peut être lié soit à la singularité des années vérifiées, soit à la comparaison directe aux observations plutôt qu'à la ré-analyse Aqui-FR. Pour discriminer ce point, la même analyse a été réalisée en comparant cette fois ci les prévisions à la ré-analyse *Figure 37*

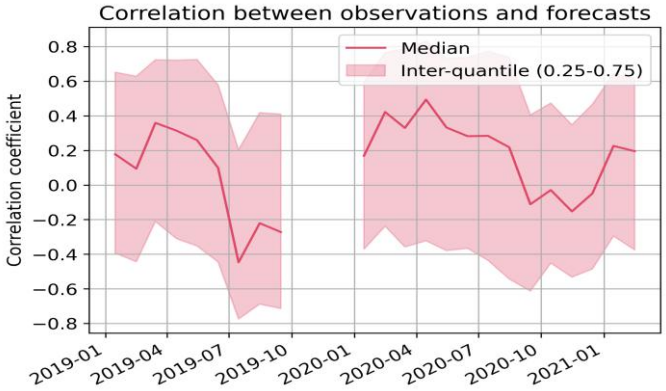


Figure 36. Evolution temporelle de la distribution des scores de corrélation entre les 6 mois de prévisions de SPLI et les SPLI observées sur l'ensemble des piézomètres du domaine AquiFR disponible : ligne rouge : médiane de la distribution, zone rose représentant la dispersion de 50% des scores. Les SPLIs sont calculés avec une période de référence adapaté à chaque piézomètre. Les prévisions sont issus de PARP6 en 2019, puis de Météo-France System7 à partir de 2020. Figure issue de Mounier (2021)*.*

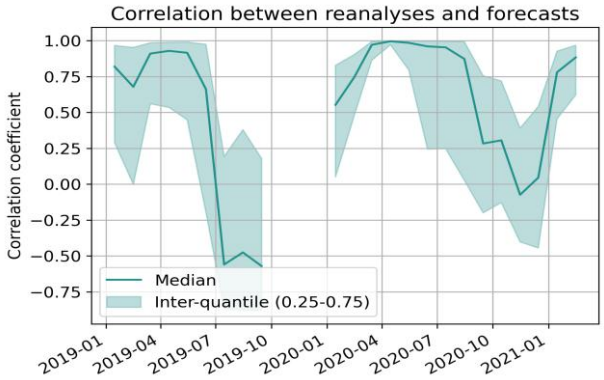


Figure 37. Même chose que Figure 36, mais cette fois ci, les corrélations sont calculées entre les prévisions et l'analyse Aqui-FR. Figure issue de Mounier (2021)*.*

La comparaison entre prévision et réanalyse obtient des scores de corrélation du même ordre de grandeur que ceux obtenus lors de l'évaluation rétrospective, impliquant que même s'il s'agit d'années singulières, on peut utiliser les connaissances acquises lors de l'évaluation rétrospective pour anticiper la fiabilité de ces prévisions, en paticulier le fait que les prévisions commencant en début d'années sont fiables.

L'écart important en termes de corrélation entre les résultats obtenus entre la comparaison des prévisions directement aux observations ou à l'analyse Aqui-FR relève donc l'écart entre observations et simulation Aqui-FR. Ces différences ont été analysées en section 3 (Vergnes *et al.*, 2020). Des améliorations sont possibles, *via* l'amélioration des calages des modèles (cf. section 2.2). Une mise à jour des données de prélèvements serait également bienvenue. Cependant, il est probable que des biais persisteront. L'identification de biais systématiques pourrait être utilisée pour réaliser une correction statistique des prévisions réalisées par Aqui-FR, et ainsi améliorer la comparaison des prévisions aux observations.

4.6.3. Focus sur la prévision des sécheresses hydrogéologiques

On a pu voir précédemment que les sécheresses hydrogéologiques historiques étaient assez bien restituées par la ré-analyse Aqui-FR (cf. section 3.2.1) et qu'elles pouvaient être bien anticipées par les prévisions saisonnières (cf. section 4.3.1). La vérification des sécheresses est difficile sur la période de prévisions opérationnelles, démarrant en 2020, car les sécheresses étaient peu étendues sur le domaine Aqui-FR en cette période. Cependant, ce domaine a été impacté par les sécheresses

en 2019. Il est donc possible de vérifier l'extension des sécheresses prévues avec Aqui-FR, forcé par la PARP6. L'idée est de se baser à la fois sur les observations et sur la carte des arrêtés sécheresse mis à disposition par Propluvia (http://propluvia.developpement-durable.gouv.fr/propluvia/faces/index.jsp). La Figure 38 présente les résultats pour la prévision du mois de Septembre 2019, prévue avec 5 mois d'avance, avec en rouge les zones où 90% des membres anticipent une sécheresse, comparée avec la carte des arrêtés sécheresse au 1er octobre 2019. La comparaison est très qualitative, d'une part parce que le zonage des arrêtés sécheresses concerne des masses d'eau qui n'ont pas forcément la même extension que les zones en sécheresse, d'autre part parce que la décision d'émettre un arrêté sécheresse inclut une part de libre arbitre et ne repose pas que sur des valeurs factuelles (exemple : les seuils d'alertent sont dépassées, mais, une amélioration à court termes est anticipée, certains arrêtés sécheresse peuvent ne pas être explicitement adressés à la nappe mais plutôt aux eaux de surface, et in fine, les critères objectives ne sont pas forcément situées sur les zones impactées). Ainsi, la Figure 38 montre que sur les zones anticipées en sécheresse par le modèle, il y a parfois peu de piézomètres concernés. C'est le cas particulièrement entre Vienne et Charente, ainsi que sur l'Aisne et la Marne. Cela rend difficile voire impossible la comparaison avec les observations. De plus, il faut rajouter que la carte de prévision s'appuie sur le dépassement d'un seuil de SPLI correspondant à la quinquennale sèche (inférieur à -0.84), avec un SPLI estimé sur la période de référence 1981-2010 pour laquelle tous les piézomètres ne sont pas disponibles.

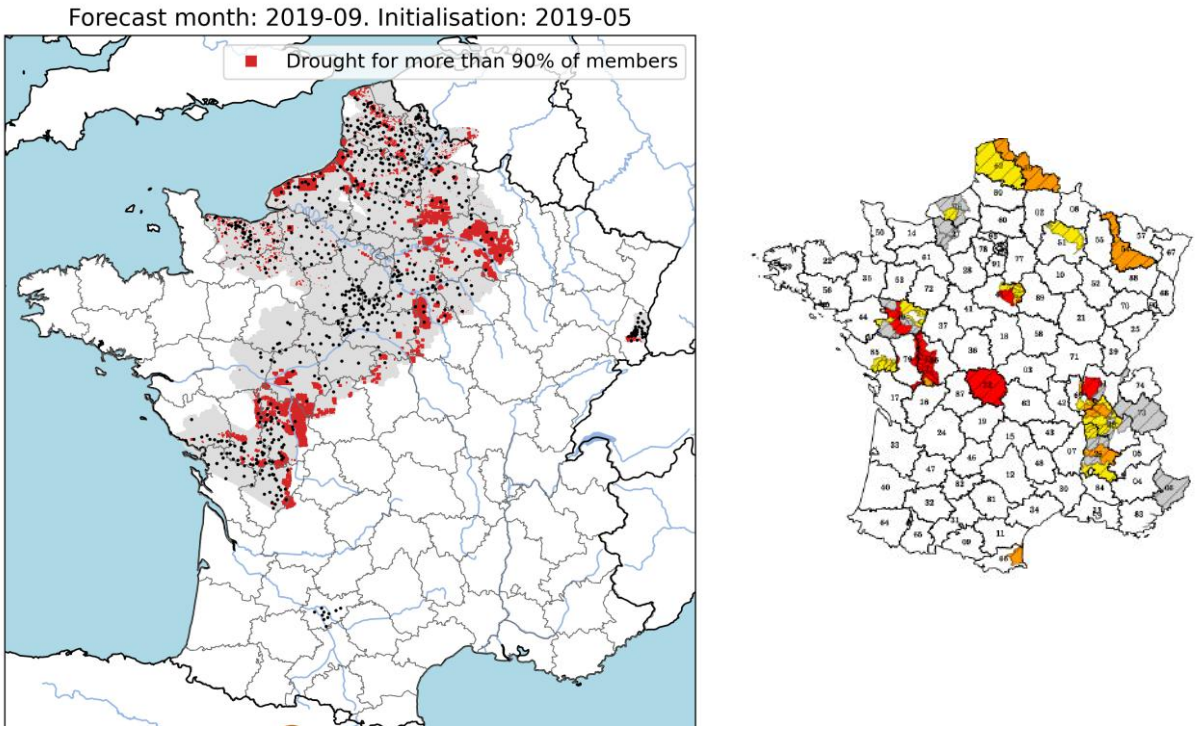


Figure 38. Comparaison entre à gauche : l'extension des sécheresses hydrogéologiques de Septembre 2019 prévues à 5 mois par Aqui-FR (prévisions débutant en Mai 2019) et à droite : arrêtés sécheresses concernant uniquement l'eau souterraine, à fin Septembre 2019 issus de Propluvia (jaune = vigileance, orange = alerte, rouge = crise). A gauche, les zones en rouge sont celles pour lesquelles 90% des membres prévoient une sécheresse, et les points représentent la localisation des piézomètres pouvant servir au contrôle. Figure issue de Mounier (2021).

Malgré tous ces éléments qui limitent la portée de la vérification, les informations sur l'extension des sécheresses prévues par Aqui-FR 5 mois en avance sont globalement cohérentes avec les arrêtés pris sur le moment.

Il faudra acquérir une plus longue période pour être capable de pousser l'évaluation de la prévision des sécheresses.

5. Etudes associées

5.1. Impact du dérèglement climatique sur la ressource en eau souterraine

Dans le cadre combiné du projet Aqui-FR OFB et de la convention service climatique (https://convention-services-climatiques.lsce.ipsl.fr/), des projections climatiques de l'évolution de la ressource en eau souterraine ont été réalisées. Ces projections climatiques ont utilisés des modèles de climat de l'exercice CMIP5, régionalisés par Dayon et al. (2018). Trois futurs possibles ont été traités, ces scénarios étant caractérisés par différents niveaux d'émission de gaz à effet de serre, qui se traduisent par une augmentation plus ou moins marquée du bilan d'énergie de la planète. Ces scénarios, sont nommés RCP suivi d'un numéro représentant la hausse en W/m^2 du bilan d'énergie de la Terre. Le scénario RCP8.5 poursuit la croissance des émissions quasiment jusqu'à la fin du siècle, et est souvent appelé scénario tendanciel. Le scénario RCP4.5 réduit les émissions à partir de 2050, et pourrait être compatible avec les engagements pris lors des accords de Paris. Le scénario RCP2.6 conduit à une baisse des émissions dès l'horizon 2020, et parvient à des émissions nulles voir négatives en fin de siècle : ce scénario est compatible avec un réchauffement de la planète limité à 2°C.

Les principaux impacts attendus en Europe de l'Ouest sont une modification des précipitations, plus faibles partout en été, et diminuant au Sud mais augmentant au Nord en hiver. Ces impacts étant d'autant plus intenses que les émissions de gaz à effet de serre sont importantes. La Figure 39 présente les projections de la moyenne de l'évolution des précipitations annuelles en fin de siècle pour l'ensemble des modèles de climat régionalisés utilisant le scénario RCP8.5. A cela s'ajoute une augmentation de la température allant en France de 4.5 à 2.5°C pour les scénarios tendanciels et à 2°C, respectivement. Toutes ces projections impactent la ressource en eau souterraine. Bien sûr, des hypothèses supplémentaires sont faites pour ces projections. Ainsi, on a supposé dans ce travail une occupation des sols et des prélèvements stables.

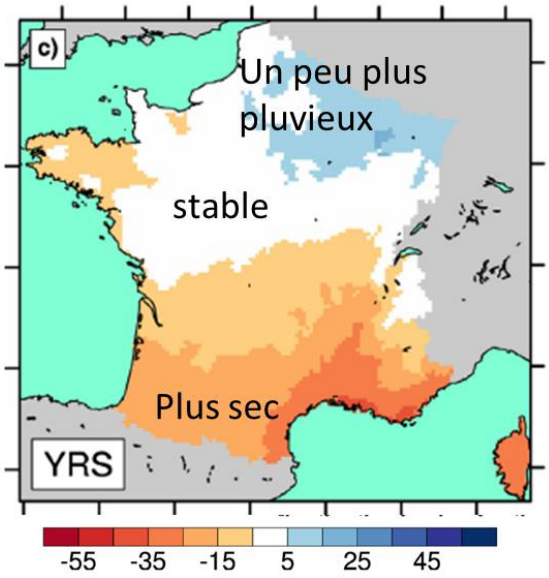


Figure 39. Evolution en % des précipitations annuelles sur la période 2070–2100 par rapport à la période 1960–1990 en moyenne sur 14 projections climatiques de CMIP5 sous scénarios RCP8.5. Figure issue de (Dayon *et al.*, 2018b).

On dispose pour chacun de ces scénarios d'un ensemble de projections comprenant de 14 à 8 membres. Le Tableau 4 présente en moyenne sur le domaine Aqui-FR la moyenne et l'écart type des évolutions de recharge, du nombre de jour de recharge effective (c'est-à-dire, du nombre de jours où le niveau de la nappe est en hausse), et des volumes apportés par la nappe aux rivières entre la période 2070-2100 et 1960-1990 pour les 3 scénarios d'émissions. Du fait du gradient Nord-Sud du changement de précipitation qui est encore plus marqué pour le scénario RCP8.5 que pour les autres, un certains nombres de modèles conduisent à une augmentation de la recharge sur le domaine Aqui-FR (jusqu'à +8%), mais, un plus grand nombre projette une réduction plus marquée (jusqu'à -37%).

Ainsi, en moyenne sur l'ensemble des modèles, la recharge diminue de 8% pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, et reste stable pour le RCP2.6. Même si la recharge est plus importante en volume, elle peut être plus concentrée en durée. Ainsi, si on s'intéresse à la recharge effective de la nappe (qui est représentée dans le BSH par un triangle orienté vers le haut quand la nappe monte ou vers le bas quand la nappe baisse, ou un carré quand elle est stable), on constate qu'elle se produit sur un nombre de jour fortement réduit pour les scénarios RCP4.5 et 8.5 (-10% et -15%), avec un accord vers une réduction du nombre de jour pour l'ensemble des projections. Seule le RCP2.6 pour lequel l'évolution des précipitations est plus réduite montre une fluctuation à la baisse ou à la hausse du nombre de jours de recharge effective, avec une moyenne à la réduction de 4%.

En moyenne pluriannuelle, on peut s'attendre, *a priori*, à ce que l'évolution de la recharge se reporte à 100% sur les échanges nappe-rivière, l'impact est en fait modulé par plusieurs effets (cf. Equation ci-dessous): une partie de la recharge de la nappe est prélevée par les activités humaines, et ce volume est considéré comme constant dans ces projections. Une partie des évolutions peut être compensée par une évolution du volume d'eau en nappe, notamment *via* les échanges entre couches aquifères. Cela peut bénéficier aux échanges nappes-rivières, celles-ci étant plutôt situées sur les points bas.

$$Recharge = \sum volume\ \ stocké\ dans\ les\ napes + \sum prélèvements + \sum échanges\ nappe.rivière$$

Le Tableau 4 montre que si en moyenne l'évolution des échanges nappe-rivière est du même ordre de grandeur que la recharge, l'écart type peut être nettement plus important (jusqu'à -58% pour le RCP 8.5)

Tableau 4. Evolution sur le domaine Aqui-FR de la recharge, du nombre de jours de recharge effective (i.e. du nombre de jours où le niveau de la nappe est en hausse), et des volumes apportés par la nappe aux rivières.

	RCP 2.6 8 projections	**RCP 4.5** 14 projections	**RCP 8.5** 14 projections
Evolution recharge (%)	~ -1 [-7; 0]	~-8 [-30; +8]	~-8 [-37 ; +7]
Evolution nb jours recharge effective (%)	-4 [-7;+9]	~-10 [-18 ; -4]	~-15 [-21 ; -9]
Evolution échange nappe rivière (%)	~0 [-7; +9]	~-7 [-33; +1]	~-6 [-58; +12]

La Figure 40 présente l'évolution de 1950 à 2100 de l'indice piézométrique standardisé en moyenne sur le domaine et pour l'ensemble des modèles de climat pour les 3 scénarios d'émission, au pas de temps mensuels. On constate que malgré que les résultats soient fortement moyennés, il peut y avoir d'importantes fluctuations d'une année à l'autre. Pour les prochaines décennies, l'indice dépasse régulièrement le niveau très bas (ligne rouge), correspondant à la période de retour 10 ans sec. En fin de siècle, les efforts d'atténuation sont payants pour le scénario à 2°C, et le niveau moyen des nappes revient autour de la normale, alors que pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, le niveau des nappes reste autour du niveau de l'actuel décennale sèche.

Le dérèglement climatique est donc une réelle menace pour la ressource en eau souterraine en France, alors que c'est la principale ressource pour notre alimentation en eau potable…

Bien sûr, ces résultats moyens masquent des disparités entre les différents modèles de climat. Pour mieux se rendre compte de ces écarts, la Figure 41 présente l'extension des zones en sécheresse (c'est-à-dire où le niveau des nappes est inférieur à un niveau très bas) en fonction de l'intensité des sécheresses, pour toutes les projections des 3 scénarios d'émission et par période de 30 ans. De plus, la durée des sécheresses est représentée par la taille du symbole (plus large lorsque la durée est plus longue). On peut constater que l'intensité des sécheresses augmente pour toutes les projections, ainsi que leur extension spatiale et leur durée, et ce pour la plupart des projections sous scénario tendanciel ou Accord de Paris (RCP 8.5 ou 4.5).

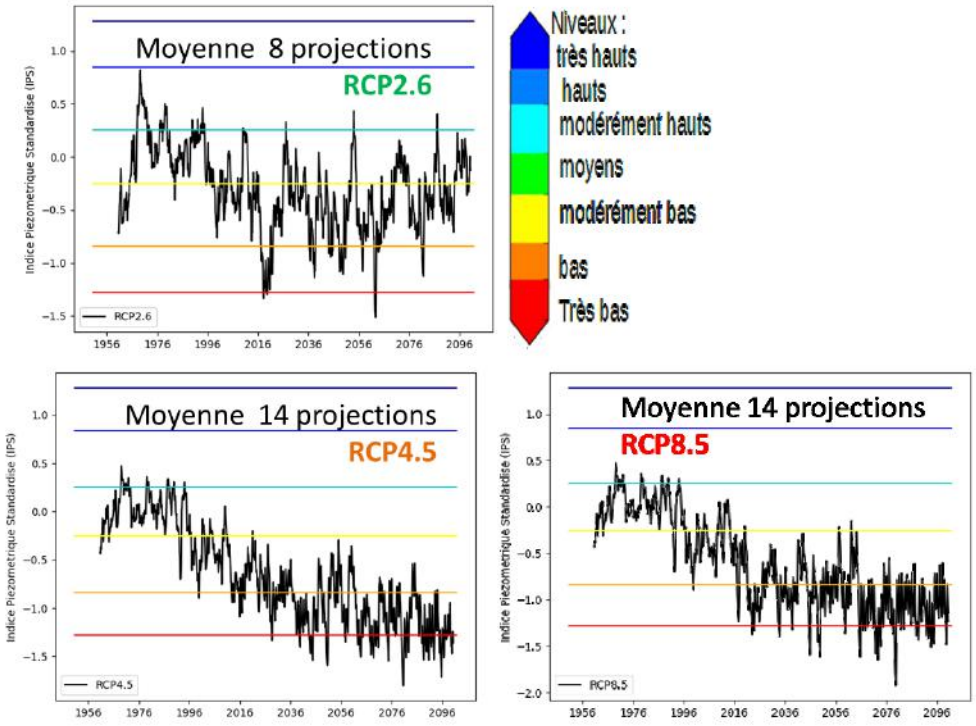


Figure 40. Evolution moyenne sur le domaine Aqui-FR et sur l'ensemble des modèles de climat de l'indice piézométrique standardisé de 1950 à 2100 pour les 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre

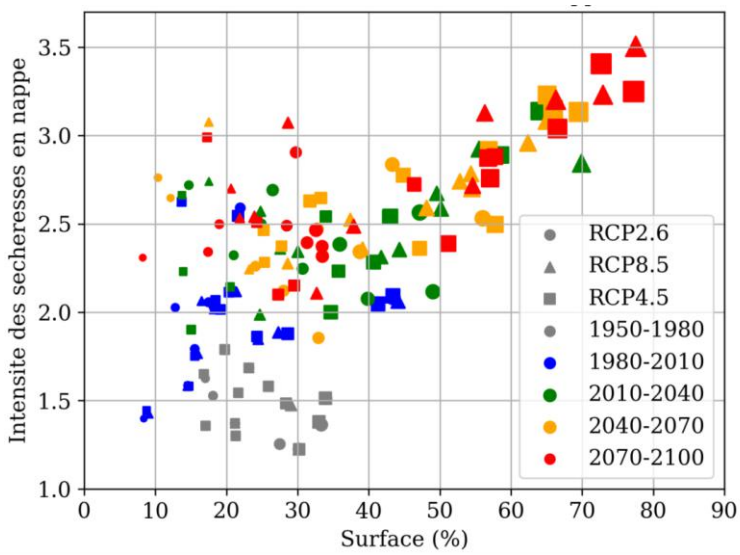


Figure 41. Occurrence des sécheresses en nappe sur le domaine Aqui-FR: pour chaque période de 30 ans (couleurs), et tous les modèles de climat de chaque scénario RCP (forme du symbole). Chaque point présente l'extension moyenne (en abscisse), l'intensité moyenne (en ordonnée) et la durée (taille du symbole) des épisodes de sécheresse en nappe pour chaque période de 30 ans indiquée en couleur. Une sécheresse est considérée avec un niveau très bas (période de retour 10 ans).

Une autre façon d'illustrer ces sécheresses hydrogéologiques futures est de tracer leurs extensions. La Figure 42 présente les cartes de la durée en sécheresse hydrogéologique en moyenne sur

l'ensemble des modèles de climat et pour les 3 scénarios d'émission en fin de siècle. On constate que certaines zones sont tout le temps en sécheresse (zone en rouge foncée sur la figure). Cela correspond à des zones avec des prélèvements importants en nappe, notamment associés à des prélèvements pour l'eau potable. Le choix de conserver des prélèvements constants dans le temps n'est pas compatible avec l'évolution de la ressource en eau souterraine. En moyenne la durée des sécheresses hydrologiques atteindrait en moyenne sur le domaine 14% pour le RCP2.6, et de l'ordre de 30% pour les RCP4.5 et 8.5.

Aqui-FR simulant les débits et les échanges nappes-rivières, il est également possible de s'intéresser à l'évolution des sécheresses en rivière. Pour cela, de façon similaire aux nappes, on a calculé un indice standardisé des débits mensuels (SFI pour Standardised Flow Index), qui permet ainsi d'identifier les périodes de sécheresse en débit comme étant celles en dessous de la décennale sèche.

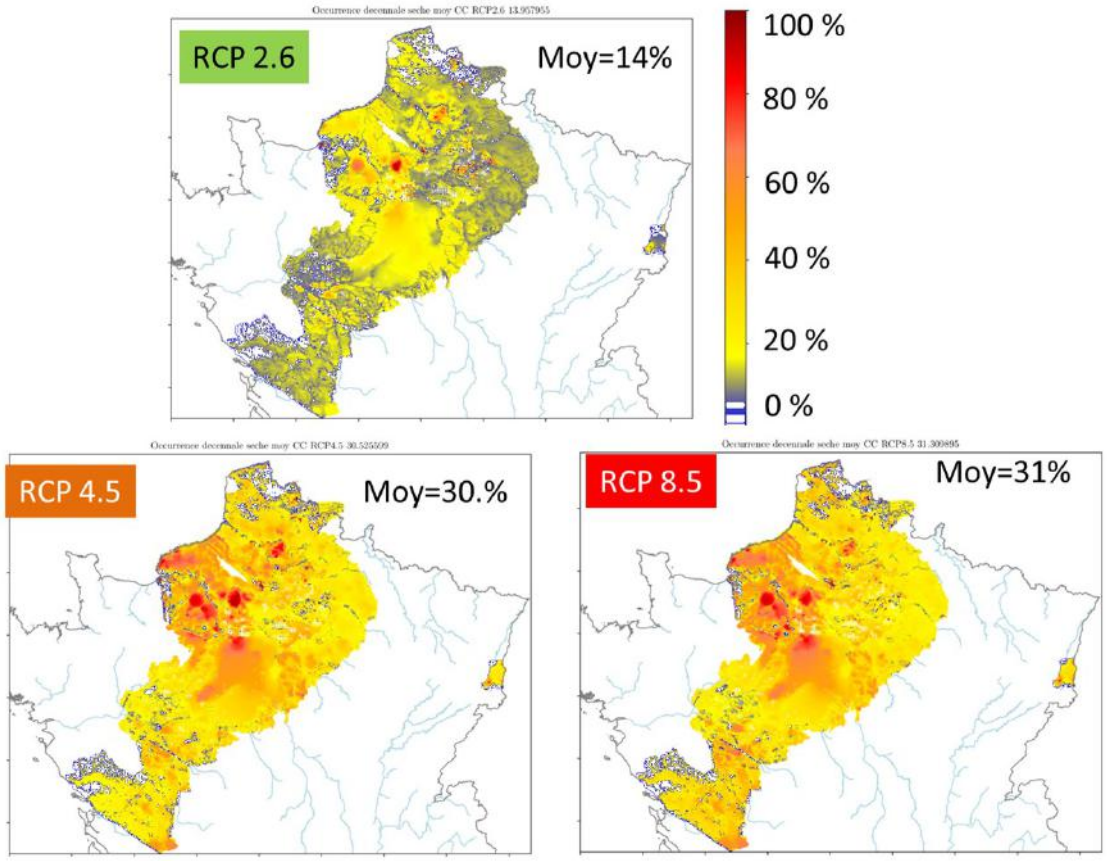


Figure 42. Durée des sécheresses hydrogéologiques (SPLI en dessous de la décennale sèche) en fin de siècle (2070-2100) exprimée en pourcentage du temps, en moyenne sur les modèles de climat pour chacun des 3 scénarios d'émission.

Les cartes montrent une augmentation de la durée des sécheresses en rivière en fin de siècle, avec des durées atteignant en moyenne sur le domaine 14% sous RCP2.6 et plus de 27% sous les RCP4.5 et 8.5. Cependant, ces évolutions ne sont pas homogènes spatialement. Les amonts de bassin tendent à être marqués par de plus longues durées de sécheresses que les cœurs de bassin. Le réseau de rivière d'Aqui-FR est assez fin, jusqu'à 100 m de résolution pour certaine application, *i.e.*, beaucoup plus fin que celui utilisé aujourd'hui dans SIM2 (Le Moigne *et al.*, 2020). On arrive ainsi à reproduire les débits sur des têtes de bassin. Certaines de ces têtes de bassin apparaissent en rouge sur la Figure 43, indiquant que ces rivières sont asséchées de façon permanente en fin de siècle. Cela s'explique par le fait que ces têtes de bassin, souvent situé sur des points hauts de la nappe, ne peuvent plus être alimentées par la nappe.

De façon similaire, on s'est intéressé à l'évolution des hautes eaux en nappe et en rivière, estimée

comme étant les moments où le SPLI ou le SFI sont supérieurs à la décennale humide. La Figure 44 présente l'évolution de ces épisodes par période de 30 ans, en intensité, durée et extension, pour chaque modèle de climat. Comme il s'agit d'indice estimé au pas de temps mensuel, les hauts débits ne peuvent pas ici être assimilés à des crues, même si les crues de la Somme voir même de la Seine peuvent durer plusieurs semaines. Il s'avère qu'il n'y a pas de fortes évolutions des caractéristiques des hauts débits dans le futur. Pour les hauts niveaux de nappe à l'inverse, des épisodes plus intenses sont projetées dans le futur, sur des extensions similaires à l'actuelle, et sur des durées légèrement plus courtes, et cela, surtout pour les scénarios d'émission les plus émetteurs.

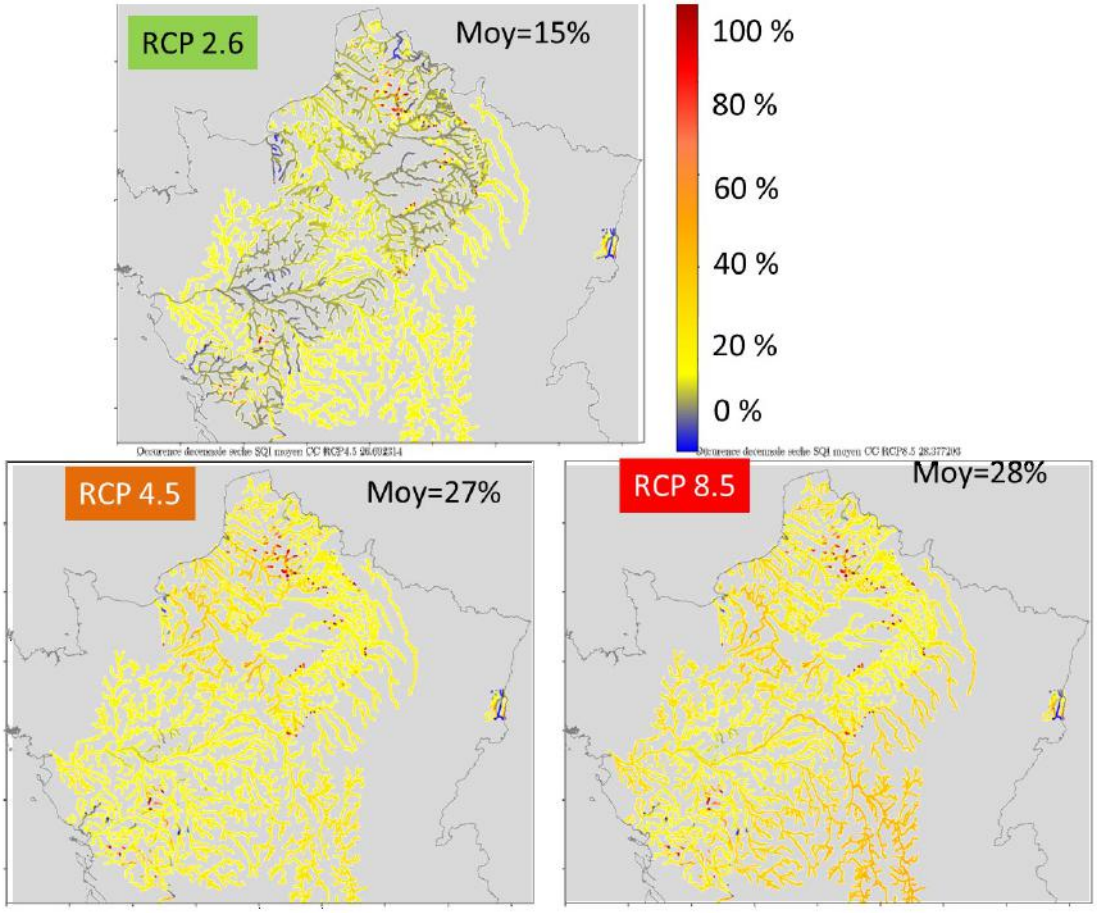


Figure 43. Durée des sécheresses hydrologiques (indice standardisé des débits mensuels en dessous de la décennale sèche) en fin de siècle (2070-2100) exprimée en pourcentage du temps, en moyenne sur les modèles de climat pour chacun des 3 scénarios d'émission.

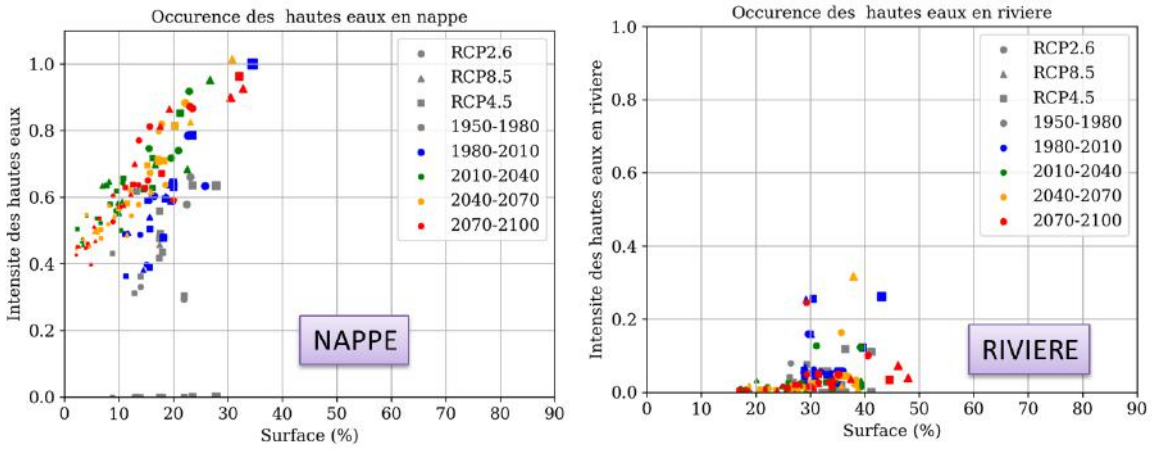


Figure 44. Idem que la Figure 41 mais pour les hautes eaux en nappes (à gauche) et en rivière (à droite)

Ainsi, il apparaît très probable que sans un effort important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les problèmes de gestion de l'eau associés aux sécheresses seront récurrents même au Nord de la France dans le futur, sans pour autant qu'il y ait une réduction marquée des risques de hautes eaux en nappe.

Ces travaux ont été complétés par des projections issues de modèles de climat régionaux (RCM), régionalisées avec une version antérieure d'Adamont, dans le cadre du stage master de Tom Mendiboure (Mendiboure, 2019). Cependant, des biais dans la méthode de débiaisage conduisaient à des valeurs de précipitations trop élevées. Après de nombreux échanges avec Météo-France, il a été décidé de ne pas conserver ces projections.

Des projections utilisant les RCMs de CMIP5 seront réalisées dans le cadre du projet Explore2 (https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244) dans lequel Aqui-FR est partie prenante.

5.2. Premiers travaux sur l'assimilation de données pour améliorer l'estimation des conditions initiales

L'amélioration des prévisions météorologiques a nettement bénéficié de l'assimilation de données. Une part importante de la qualité des prévisions saisonnières hydrogéologiques dépend également de la qualité des conditions initiales. Or, on a vu que l'estimation de la piézométrie peut être différente de celle observée (cf. section 3.1). Certains de ces biais sont liés à une détermination des paramètres hydrodynamiques inadaptés, mais, une partie peut être liée à des aspects plus dynamique : mauvaise estimation de la recharge et des prélèvements notamment. Cela est particulièrement vrai en temps réel puisque les dernières informations météo proviennent d'une analyse SAFRAN intégrant moins de données observées et donc dégradée (cf. section 4.4.3). Cette partie des biais doit pouvoir être corrigé par assimilation de données. D'autre part, une méthode développée pour l'assimilation de données doit pouvoir aider à améliorer l'estimation des paramètres, et donc, réduire l'autre partie du biais. C'est pourquoi les travaux menés par (Maina, Delay and Ackerer, 2017) via l'utilisation d'une méthode adaptative, c'est-à-dire, permettant d'adapter la résolution du modèle inverse sont prometteurs. Ainsi, Audrey Gervereau a, durant son stage master, testé cette méthode sur le bassin de la Somme (Gervereau, 2018). Dans cette approche, le modèle HPP est utilisé. Il permet la résolution de l'équation de diffusivité en utilisant les éléments finis non conformes de Crouzeix-Raviart. Le calage de ce modèle est automatique : les paramètres (capacité de stockage, perméabilité) sont déterminés grâce à une méthode dite « indirecte », c'est-à-dire à partir des niveaux piézométriques mesurés localement dans le système. Cette approche inverse utilise l'algorithme de minimisation de Quasi-Newton. La fonction objective est de type moindres carrés, et s'applique sur la différence entre piézométrie observée et simulée, et ses gradients dérivent de l'état adjoint du système. La paramétrisation multi-échelle est utilisée pour la prise en compte de l'hétérogénéité dans la procédure d'inversion du modèle de la zone saturée. L'idée est de partir avec un champ

relativement réduit de valeurs de départ réaliste. Le champ est alors raffiné spatialement là où l'information permet de réduire la fonction objective.
Ici, l'idée n'est pas uniquement de corriger l'état initial, mais, d'optimiser les paramètres du modèle afin de minimiser l'écart entre l'évolution temporelle de la piézométrie simulée par rapport à celle observée.
On a choisi le bassin de la Somme (6 433 km^2) qui présente l'avantage d'être monocouche et d'avoir une assez forte densité de piézomètre. On utilise le modèle HPP (Maina, Delay and Ackerer, 2017) en partant des paramètres hydrodynamique fournie par EauDyssée, dont l'application Somme n'a pas été recalée avec les flux SURFEX (cf. section 2.2.3). Plusieurs étapes sont nécessaires :

- Construction du maillage en éléments finis. Cette étape s'est relevée un peu plus longue que prévue, car la densité du réseau hydrographique imposait un refinement du maillage trop important. Il a fallu, en quelque sorte, optimiser la forme du réseau hydrographique pour limiter le nombre de mailles à 15 544 et 7 834 nœuds (*Figure 45*).

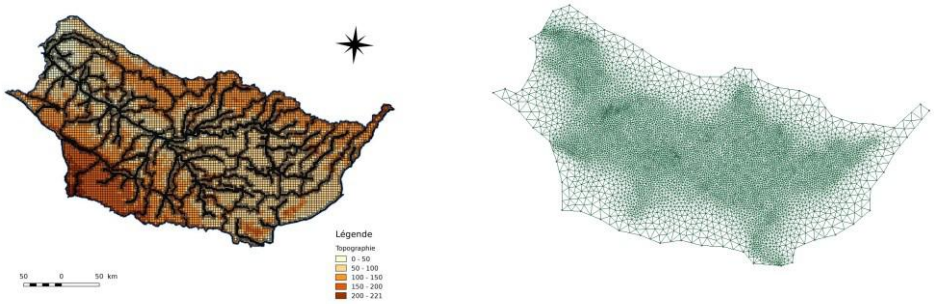


Figure 45. Maillages du bassin de la Somme, à gauche, dans EauDyssée, à droite, dans HPP. Figure issue de (Gervereau, 2018).

- Etablissement d'une première distribution de paramètres hydrodynamique (perméabilité, emmagasinnement) sur le maillage HPP, en se basant sur les paramètes d'EauDyssée,
- Modification du code pour intégrer la recharge estimée par SURFEX,
- Identification des points de contrôle piézométrique et intégration des chroniques piézométriques pour l'optimisaiton : 58 piézomètre sont utilisés.

On a ciblé la période de la crue de la Somme en 2001 pour tester la méthode, car il est apparu que les modèles hydrogéologiques aussi bien MARTHE qu'EauDyssée ont du mal à bien reproduire la dynamique des nappes observées lors de cette crue (Habets *et al.*, 2010). L'inversion a été d'abord testée sur des périodes de 2 à 5 ans, avant de décider qu'il fallait utiliser au moins 10 ans de chroniques, chacune de ces simulations terminant en 2002, et étant initialisées avec les conditions en régime permanent. Deux types de configuration ont été testés pour l'inversion multi-échelle : une grille de 5 nœuds et une grille de 30 nœuds (Figure 46).

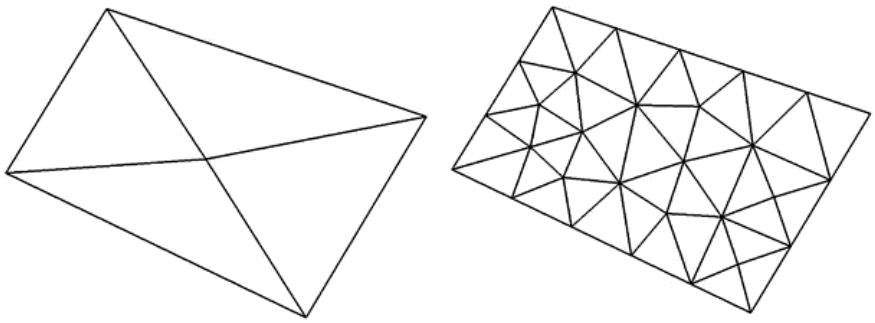


Figure 46. Grilles de 5 (gauche) et 30 (droite) nœuds utilisées au départ pour l'inversion multi-échelle (Gervereau, 2018).

Il s'avère que la convergence est plus rapide avec une grille de départ à 30 nœuds. Ainsi, c'est cette configuration qui a été conservée.

Les résultats montrent que la simulation HPP diffère sensiblement de celles d'EauDyssée et de MARTHE (Figure 47). S'il reste des biais (Tableau 5), la dynamique temporelle est relativement bien restituée.

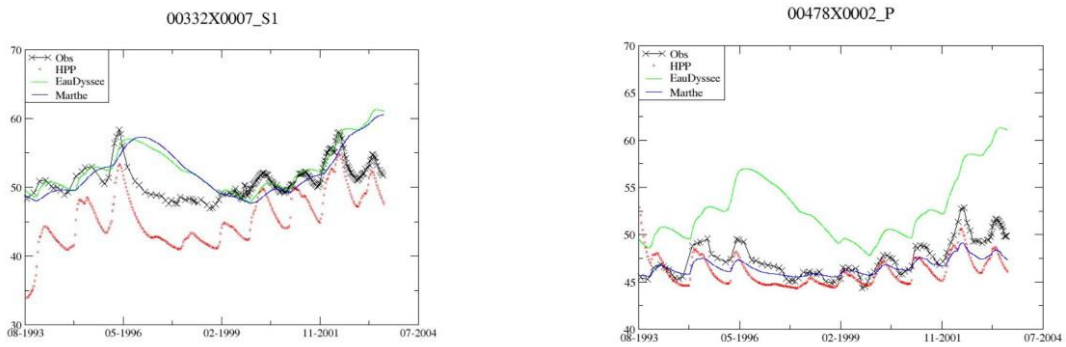


Figure 47. Comparaison de l'évolution de la nappe observées (noir) et simulés par HPP (rouge) EauDyssée (vert) et MARTHE (bleu) entre 1992 et 2002 sur 2 piézomètres du bassin de la Somme.

Tableau 5. Biais obtenus par les 3 modèles sur le domaine Somme avec la recharge estimée par SURFEX sur l'ensemble des 58 piézomètres : biais moyen et valeurs minimales et maximales du biais, nombre de piézomètre ayant un biais supérieur à 10 m ou inférieur à -10 m.

	HPP	MARTHE	EauDyssée
Biais moyen (m)	-1.38	-1.26	-17.46
Biais minimal (m)	-99.83	-25.76	-127.20
Biais maximal (m)	89.92	6.09	45.90
Nb de biais >10m	15	0	11
Nb de biais <-10m	21	1	31

Les résultats sont globalement bien meilleurs que ceux d'EauDyssée (qui étaient non calés), mais moins bons que ceux de MARTHE. Les paramètres hydrodynamiques inversés par le modèle sont assez différents de ceux imposés à l'origine. A titre d'exemple, la Figure 48 présente les cartes du logarithme de la perméabilité. On constate qu'il y a un ordre de grandeur de différence entre les distributions de paramètres.

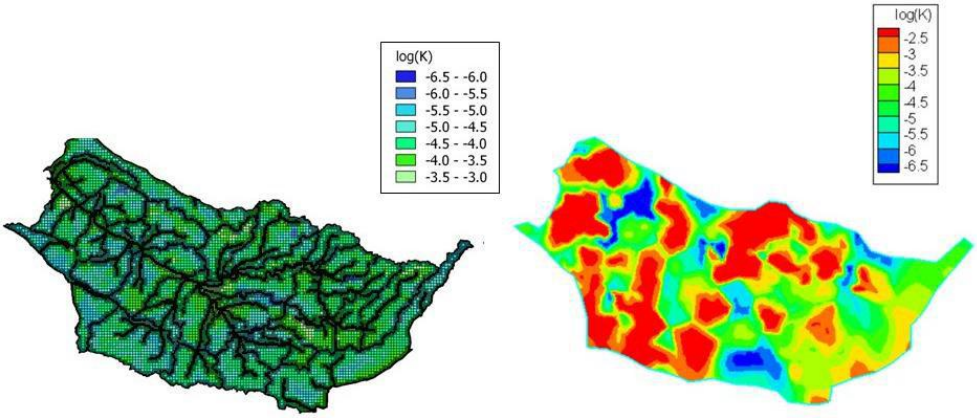


Figure 48. Cartes du logarithme de la perméabilité sur le bassin versant de la Somme (à gauche EauDyssée, à droite HPP).

L'inversion réalisée avec HPP a permis de réaliser une modélisation de la nappe de Somme relativement pertinente dans un délai court : un stage de M2 de 6 mois. Cela montre l'efficacité de l'approche. Cependant, l'approche a été simplifiée, avec notamment l'absence d'estimation des débits, et donc des échanges nappe-rivière. Ainsi, la représentation physique de HPP diffère de celles de MARTHE et EauDyssée. Cela implique qu'il est difficile d'utiliser HPP pour inverser les paramètres ou dériver les conditions initiales des applications inclues dans Aqui-FR. Il semble donc qu'il soit nécessaire d'utiliser une autre approche pour inverser les paramètres hydrodynamiques et/ou assimiler les observations piézométriques dans les applications intégrées dans Aqui-FR. Mais, l'intégration d'une application développée sur HPP serait pertinente.

5.3. Evaluation de la recharge lors des pluies intenses

Suite à l'épisode de précipitations intenses de Juin 2016 (Philip *et al.*, 2018), la mauvaise estimation de la dynamique de la nappe semble liée à une mauvaise dynamique des flux de la recharge simulée par SURFEX (Figure 49). Ainsi, sur le site de Fagnières (Ballif and Dutil, 1983; Yin *et al.*, 2020), un cumul de plus de 70 mm de drainage est observé en une dizaine de jours alors que dans le modèle, il faut plus d'un mois pour atteindre ce volume.

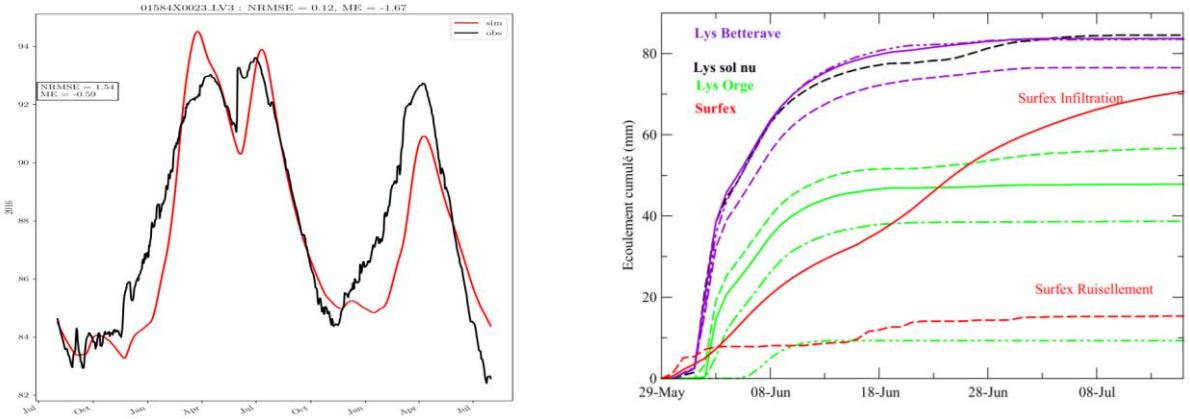


Figure 49. Comparaison entre, à gauche : l'observation (en noir) et la simulation (en rouge) de la piézométrie à Grandes Loges par Aqui-FR entre Juillet 2015 et Juillet 2016 ; à droite : comparaison entre les observations de drainage sur les lysimètres de Fagnières (Ballif and Dutil, 1983; Yin *et al.*, 2020) *couvert par différents types de culture (en vert et violet) et flux simulés par SURFEX en rouge (drainage en trait continu, ruissellement en pointillé) entre la fin mai et la mi-juillet 2016.*

Si les épisodes de précipitations intenses sont rares, ils sont amenés à être de plus en plus conséquent avec le dérèglement climatique. Ainsi, dans le cadre de la thèse d'Antoine Sobaga cofinancée par Météo-France, l'Agence de l'eau Seine Normandie, et le laboratoire de géologie de l'ENS, des observations de lysimétrie sont utilisées dans le but de comprendre la dynamique des flux d'eau lors de ces épisodes pour améliorer la simulation de la recharge. En effet, plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces erreurs : i) une partie des écoulements lors de ces précipitations intenses sont des écoulements préférentiels qui se produisent via des macroporosités, un processus non pris en compte par SURFEX, ii) mauvaise estimation des paramètres du sol ou de la végétation ; iii) des biais dans les précipitations.

La 1ère parte de la thèse utilise 7 lysimètres provenant de 2 sites de mesures différents, le GISFI (http://gisfi.univ-lorraine.fr/fr/) et l'OPE (https://meusehautemarne.andra.fr/landra-en-meusehaute-marne/installations/lobservatoire-perenne-de-lenvironnement), et mesurant les flux d'eau à 2 m, l'humidité, la pression matricielle et la température du sol à 3 ou 4 profondeurs, ainsi que la masse totale de chaque lysimètre. Les chroniques observées sont disponibles sur au moins 5 ans, et sur l'ensemble des 2 sites, une douzaine d'épisode de précipitations intenses (supérieur au quantile 99, et ici, supérieur à 30mm/jour), générant un ensemble de 42 écoulement sur l'ensemble des lysimètres. Chacun des lysimètres a pu être modélisé avec SURFEX (Sobaga *et al.*, 2021). Il s'avère qu'avec une bonne estimation des paramètres hydrodynamique du sol, et avec des variables météorologiques issues d'observations locales, SURFEX est capable de bien reproduire la dynamique des flux observés (Figure 51). Cependant, une modification du modèle est proposée : les équations de

fermetures de Brooks and Corey, (1966), originellement utilisées par SURFEX sont combinées à celles de van Genuchten (1980), l'évolution du potentiel matriciel avec l'humidité du sol étant définie par van Genuchten (1980), alors que l'évolution de la conductivité hydraulique avec l'humidité du sol reste définie par Brooks and Corey, (1966). Cette modification est suggérée directement par les observations d'humidité du sol et de pression matricielle qui indique une meilleure adéquation avec l'équation de de van Genuchten (1980) (Figure 50). Le critère de Nash sur le composite atteint alors 0.73.

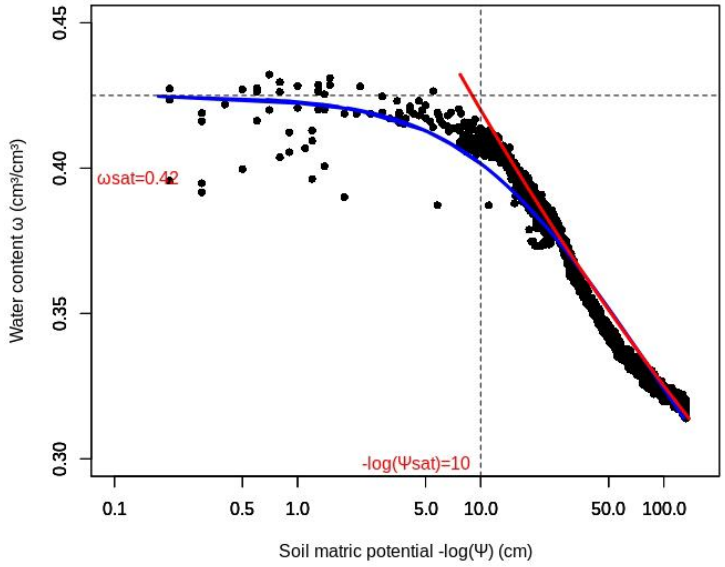


Figure 50. Observations de l'humidité du sol en fonction du potentiel matriciel observé (point noir) et déduit en rouge par l'équation de Brooks and Corey, (1966) et en bleu par celle de van Genuchten (1980)

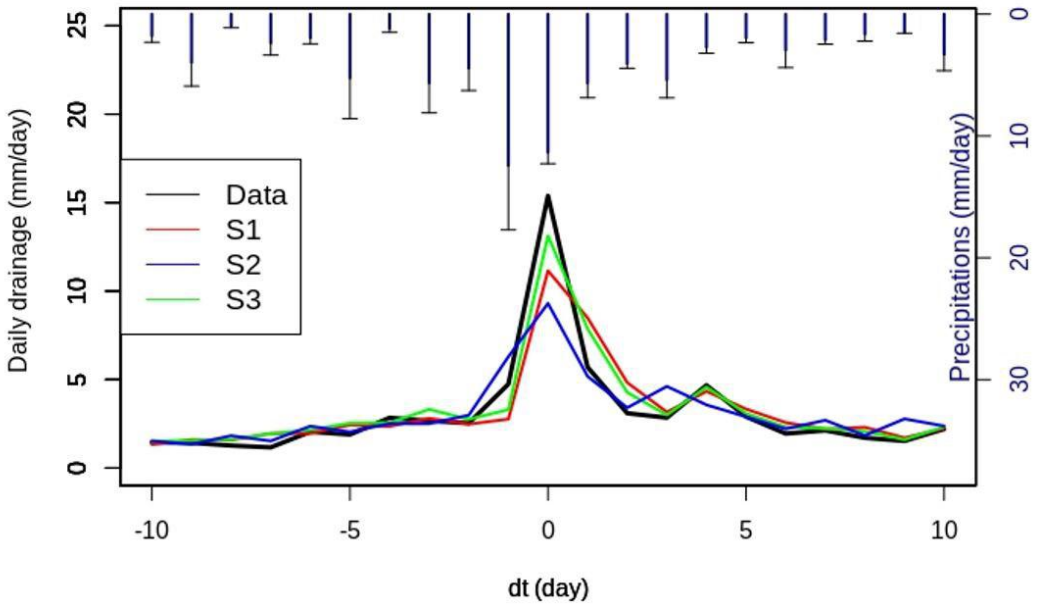


Figure 51. Composite des écoulements se produisant lors des 12 épisodes de précipitations intenses : chaque épisode est centré sur le pic de drainage, puis la moyenne des épisodes est estimée: drainage observé (en noir) et simulé selon 3 configurations de SURFEX (en rouge, avec les équations

de fermeture de Brooks & Corey, en bleu avec Van Genuchten, en vert, la combinaison des deux). L'intensité moyenne des précipitations journalière est indiquée en haut. Figure issue de (Sobaga *et al.*, 2021)

Les améliorations dans la physique de SURFEX seront dans la suite de la thèse testées à l'échelle d'une application Aqui-FR avant d'être étendu si cela est concluant sur l'ensemble de la France.

Un autre apport de cette étude est l'intérêt d'une bonne connaissance des profils du sol, les observations sur les 2 sites expérimentaux montrant une forte variation des paramètres hydrodynamiques avec la profondeur. L'exploitation de la base de données RMQS (King *et al.*, 2003) pourrait permettre d'améliorer la prise en compte des profils du sol en France pour SURFEX et Aqui-FR.

6. Conclusions et Perspectives

6.1. Conclusions

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 (codes numériques) hydrogéologiques, sur 19 applications (dont 6 bassins karstiques) couvrant 149 000 km^2 et représentant 57 couches aquifères ou aquitards.

Cette deuxième phase a permis de faire évoluer la plateforme, notamment par l'extension des applications (Tarn-et-Garonne), recalage avec les flux de la dernière version de SURFEX, et évolution des pré- et post traitements.

Une étape importante a été l'évaluation des simulations sur une longue période de la réanalyse (60 ans) qui a conduit à la publication de Vergnes *et al.*, 2020. Cette évaluation montre que si des biais important peuvent persister entre observations et simulations de la piézométrie, ils sont fortement réduits lorsque l'indice de piézométrie standardisé (SPLI) est utilisé. Globalement, Aqui-FR représente bien les évolutions observées. Cette analyse permet d'identifier des variabilités pluriannuelles avec des périodes de plusieurs années en hautes ou basses eaux. Un effort particulier a été menée pour évaluer la reconstitution des basses eaux et plus particulièrement des sécheresses depuis 1958 (stages masters Nalivaev, 2020; Mounier, 2021). Cette évaluation est rendue difficile par le fait que peu de piézomètres ont des longues chroniques observées. L'utilisation du SPLI est alors impossible. L'évaluation de l'occurrence de niveaux piézométriques en dessous du 1er décile sec permet de montrer une bonne adéquation entre observations et simulations sur la période de plus de 60 ans, avec cependant une tendance à sous-estimer ces périodes sèches depuis 2015. Les causes ne sont pas explicitées, mais, une mise à jour des données de prélèvement semble être un bon point de départ pour tenter d'améliorer ce biais.

L'étape majeure franchie durant cette phase par Aqui-FR est l'évaluation puis le passage en mode opérationnel de prévisions saisonnières de la ressource en eau souterraine. L'évaluation sur une période prospective de 25 ans a été menée lors du post-doc de Delphine Leroux financée d'abord par la convention service climatique puis par ce projet. L'évaluation de ces prévisions d'ensemble est réalisée en comparant les prévisions à la ré-analyse. Cette évaluation montre un fort potentiel des prévisions saisonnières, même à 6 mois d'échéance, pour les prévisions débutant en début d'année civil jusqu'à Juillet, et plus particulièrement à partir de Mars, période à laquelle la plus grande partie de la recharge des nappes a déjà eu lieu. Les scores se dégradent sensiblement lorsque les prévisions intègrent les périodes de fortes recharges, *i.e.*, les mois de novembre à janvier. La plus-value des prévisions saisonnières météorologiques, alors réalisées par la version 6 du système de prévisions saisonnières de Météo-France est apparente comparée à des prévisions climatiques basées sur des années historiques (prévision climatique), ainsi que comparée à des prévisions naïves considérant une persistance de l'anomalie par rapport à la normale sur les prochains mois. La capacité d'évaluer l'extension des sécheresses restituées par la ré-analyse a également été évaluée, et les scores sont bons, avec une grande majorité des membres de la prévision se situant en état de sécheresse. Ce travail a fait l'objet d'une publication en préparation, (Leroux et al., *s.d.*) qui n'a pu être finalisé à ce stade suite à des aléas administratifs ayant conduits à une fin prématurée du post-doc. Un effort doit être mené pour finaliser la valorisation de ce travail. Face aux résultats encourageants obtenus lors de la validation, les prévisions ont été portées en opérationnel par Météo-France, en utilisant cette fois

les prévisions du dernier système de prévisions saisonnières (Météo-France system7). Ces prévisions sont ainsi réalisées chaque mois depuis Janvier 2020. Un site web dédié permettant d'accéder à ces prévisions a été créé, et les accès ont été transmis à une quarantaine d'acteurs de l'eau fin 2020. Un retour d'expérience (REX) de cette première année de prévision a été réalisé (Mounier, 2021). Ce REX a réalisé une vérification des prévisions, via des comparaisons directes entre observations et prévisions des indices standardisés. Il faut souligner qu'il ne peut pas s'agir d'une validation, car les prévisions d'ensemble ne peuvent s'évaluer sur une seule année. Le REX a montré la difficulté de comparer directement les prévisions AquiFR avec les observations, tout d'abord du fait de la disponibilité des observations. En effet, alors que l'indice standardisé d'Aqui-FR est calculé sur la même période de référence de 30 ans, cet indice est calculé sur des périodes variables et généralement plus courtes et plus récentes dans les observations. Cela tend à rendre un signal plus humide dans les observations que les simulations, et donc, les prévisions. Il est donc nécessaire pour ces comparaisons de recalculer les SPLI sur la même période. Les scores alors obtenus sont qualitativement cohérents avec ceux obtenus lors de la validation sur la période rétrospective, avec des meilleurs résultats sur les prévisions réalisées de Janvier à Juillet. Cependant, ces scores sont environ deux fois plus faibles. Cela est lié à la comparaison directe aux observations, la comparaison à la ré-analyse permettant de retrouver des scores équivalents lors de la vérification que de la validation rétrospective. Cela conduit à envisager qu'une méthode une adaptation statistique des prévisions basées sur un apprentissage des erreurs entre ré-analyse et observation pourrait être appliquée aux observations et ainsi améliorer sensiblement les comparaisons entre prévisions et observations..

Aqui-FR a également été utilisée pour projeter l'impact du dérèglement climatique sur la ressource en eau souterraine. Un ensemble de projections climatiques issues du 5^{ième} rapport du GIEC régionalisés par Dayon et al., 2018 sous trois scénarios possibles d'évolution de gaz à effet de serre a été analysé. Les projections indiquent une diminution de la ressource en eau souterraine et une augmentation de l'intensité et de la durée des sécheresses en nappe et en rivière sur le domaine pour les scénarios les plus émetteurs (RCP8.5 et RCP4.5). Ces impacts sont fortement atténués avec le scénario le moins émetteur (RCP2.6).

6.2. Perspectives

6.2.1. Amélioration de l'exploitation des prévisions saisonnières

Les échanges avec les acteurs de l'eau menés lors du retour d'expérience associés aux développements réalisés permettent d'envisager une amélioration de la diffusion des prévisions saisonnières. Il s'agit d'une part d'améliorer la cartographie, via un choix plus judicieux des couches aquifères aflleurante et une meilleure intégration de la variabilité spatiale de la taille des mailles, et d'autre part, de porter les scripts de comparaison avec les observations en opérationnel afin de faciliter la diffusion des vérifications des prévisions. De plus, le système de prévision va de nouveau rapidement évolue. On se propose donc de poursuivre la vérification des prévisions avec le système actuel (Météo-France system7) et de préparer une validation sur le prochain (Météo-France system8).

6.2.2. Evaluation du potentiel de prévisions des débits d'étiages

Jusqu'à présent, la chaîne mise en place pour la prévision saisonnière s'est concentrée sur la prévisibilité des niveaux des nappes souterraines. Or, la plateforme Aqui-FR permet de modéliser, outre le niveau des nappes, les débits en rivière et les échanges entre la nappe et la rivière. Ces deux quantités n'ont été que peu exploitées jusqu'ici. Etudier leur comportement dans le système de prévision saisonnière permettrait de mieux caractériser le fonctionnement des hydrosystèmes lors d'épisodes extrêmes, notamment en ce qui concerne les débits de base lors des étiages sévères. Ce sera en particulier l'objet d'un post doctorat demandé lors de la phase 3.

6.2.3. Amélioration et Extension de la modélisation

L'amélioration et l'extension des applications Aqui-FR est nécessaire pour intégrer les principaux aquifères français dans le système de prévision. L'effort dans la prochaine phase sera principalement ciblé sur l'intégration de l'application tertiaire sur la Seine (Gallois *et al.*, 2017), recalée avec les flux SURFEX, et l'intégration de l'extension des aquifères de socles bretons. Une mise à jour des prélèvements devra être réalisée, en se basant sur les données Base Nationale de Données sur les Prélèvements (BNPE) maintenant accessible via une API dédiées sur le site web hub'eau. Une

ouverture vers l'intégration du modèle MODFLOW est également envisagée suite aux travaux de thèse d'Alexandre Gauvain à Rennes. Il serait alors possible vers l'intégration d'applications développées sur MODFLOW sur le bassin Rhône Méditerranée Corse (cf. synthèse échangée avec Laurent Cadhilac de l'AERMC).

6.2.4. Assimilation de données

Un effort particulier doit être mené sur l'assimilation de données pour améliorer la prévision de la ressource en eau souterraine. En effet, la bonne adéquation des conditions initiales est en une condition nécessaire à la bonne estimation de l'évolution future. Cela s'applique également pour la ressource en eau souterraine. Or, les évaluations montrent la persistance de biais entre modèle et observations. L'assimilation de données, menée à la fois pour l'amélioration de l'adéquation du modèle avec les observations via l'inversion de paramètres, ou via la correction d'états initiaux suite à des erreurs sur l'estimation de la recharge des derniers mois ou de la méconnaissance des prélèvements en temps réel doit être développée. Ce travail conséquent nécessite l'implication d'une thèse. On envisage actuellement un co-financement de cette thèse par le BRGM.

6.2.5. Amélioration de l'estimation de la recharge

Les travaux menés dans le cadre de la thèse d'Antoine Sobaga sur l'évaluation de la recharge des nappes lors d'épisodes de précipitations intense devraient pouvoir menés à une évolution de la recharge simulée par SURFEX. Une telle amélioration est envisagée dans les 2 ans à venir.

7. 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.

8. Bibliographie

Amraoui, N. *et al.* (2019) *La plate-forme de modélisation Aqui- FR : état d'avancement en 2018 et évaluation de la simulation longue durée 1958-2017*.

Avignon, C. (2014) *PROJET PRÉ-AQUI-FR : ENQUÊTE SUR L'INTÉRÊT DU PROJET AQUI-FR ET DÉFINITION DES BESOINS AUPRÈS DE DIFFÉRENTS GESTIONNAIRES*.

Ballif, J. and Dutil, P. (1983) 'Lysimétrie en sol de craie non remanié. I. — Drainage, évaporation et rôle du couvert végétal. Résultats 1973- 1980', *Agronomie*, 3(9), pp. 857–866.

Batte, L. and Deque, M. (2016) 'Randomly correcting model errors in the ARPEGE-Climate v6.1 component of CNRM-CM: Applications for seasonal forecasts', *Geoscientific Model Development*, 9(6), pp. 2055–2076. doi: 10.5194/gmd-9-2055-2016.

Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1966) 'Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow', *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 92(2), pp. 61–88. doi: 10.1061/JRCEA4.0000425.

Cornette, N. *et al.* (2021) 'Hydrogeological controls on stream discharge dynamics in bedrock catchments : exploring the combined effects of seepage development and heterogeneity', in. doi: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7360.

David, C. H. *et al.* (2011) 'RAPID applied to the SIM-France model', *Hydrological Processes*, 25(22). doi: 10.1002/hyp.8070.

Dayon, G. *et al.* (2018a) 'Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties', *Comptes Rendus - Geoscience*, 350, pp. 141–153. doi: 10.1016/j.crte.2018.03.001.

Dayon, G. *et al.* (2018b) 'Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties', *Comptes Rendus - Geoscience*, 350(4), pp. 141–153. doi: 10.1016/j.crte.2018.03.001.

Dorel, L. *et al.* (2017) 'Documentation of the METEO-FRANCE Pre-Operational seasonal forecasting system', p. 32. Available at: http://seasonal.meteo.fr/sites/data/Documentation/doc_modele/Model_MF-S6_C3S_technical_en.pdf.

Duchaine, F. *et al.* (2015) 'Analysis of high performance conjugate heat transfer with the OpenPALM coupler Analysis of high performance conjugate heat transfer with the OpenPALM coupler', *Computational Science & Discovery*. IOP Publishing. doi: 10.1088/1749-4699/8/1/015003.

Durand, Y. *et al.* (1993) 'A meteorological estimation of relevant parameters for Snow Models', *Annals of Glaciology*, 18, pp. 65–71.

Gallois, N. and Viennot, P. (2018) *Modélisation de la pollution diffuse d'origine agricole des grands aquifères du bassin Seine-Normandie : Actualisation des modélisations couplées STICS-MODCOU / Préparation de l'état des lieux AESN 2019*.

Gallois, N., Viennot, P. and Verjus, P. (2017) *Modélisation mathématique du comportement hydrogéologique des formations tertiaires du bassin parisien*.

van Genuchten, M. T. (1980) 'A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils', *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892–898. doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

Gervereau, A. (2018) *Assimilation de données pour la correction des états initiaux dans un contexte de prévision opérationnelle des systèmes aquifères*.

Habets, F. *et al.* (2010) 'Multi-model comparison of a major flood in the groundwater-fed basin of the Somme River (France)', *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1).

King, D. *et al.* (2003) 'Soil Mapping and soil monitoring: State of Progress and use in France', pp. 139–146.

Ledoux, E. (1980) *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydro- logique.* ENSMP-UPMMC.

Leroux, D. J. *et al.* (no date) 'Seasonal forecast of the groundwater resources over France with the Aqui-FR platform Seasonal forecast of the groundwater resources over France with the Aqui-FR platform', *en préparation*.

Maina, F. H., Delay, F. and Ackerer, P. (2017) 'Estimating initial conditions for groundwater flow modeling using an adaptive inverse method', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 552, pp. 52–61. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.041.

Marçais, J., de Dreuzy, J. R. and Erhel, J. (2017) 'Dynamic coupling of subsurface and seepage flows solved within a regularized partition formulation', *Advances in Water Resources*, 109, pp. 94–105. doi: 10.1016/j.advwatres.2017.09.008.

Masson, V. *et al.* (2013) 'The SURFEXv7 . 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and Ocean fluxes Science', pp. 929–960. doi: 10.5194/gmd-6-929-2013.

Mendiboure, T. (2019) *Dynamique des eaux souterraines face au changement climatique et estimation des incertitudes*.

Le Moigne, P. *et al.* (2020) 'The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France', *Geoscientific Model Development*, 13(9), pp. 3925–3946. doi: 10.5194/gmd-13-3925-2020.

Mounier, A. (2021) *Return of experience on the first year of operational seasonal forecasts of the groundwater resource André Mounier*.

Nalivaev, A. (2020) *Le modèle AQUI-FR : réanalyse de données piézométriques (1958-2020) et reconstitution historique des sécheresses passées*, *Rapport stage L3*.

Philip, S. *et al.* (2018) 'Validation of a rapid attribution of the May/June 2016 flood-inducing precipitation in France to climate change', *Journal of Hydrometeorology*, 19(11), pp. 1881–1898. doi: 10.1175/JHM-D-18-0074.1.

Philippe, E. *et al.* (2011) 'Improvement of the solute transfer in a conceptual unsaturated zone scheme: A case study of the Seine River basin', *Hydrological Processes*, 25(5). doi: 10.1002/hyp.7865.

Rousset Regimbeau, F. (2007) *Modélisation des bilans de surface et des débits sur la France, application à la prévision d 'ensemble des débits*. Toulouse III.

Saleh, F. *et al.* (2011) 'Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream-aquifer interactions at the regional scale', *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 400(3–4), pp. 490–500. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.001.

Sobaga, A. *et al.* (2021) 'Improvement of the soil drainage simulation based on observations from lysimeters', *Water Resour. Res*, pp. 1–32.

Thiéry, D. (2016) *Didacticiel du code de calcul MARTHE v7.5*. doi: BRGM/RP-64997-FR.

Thiéry, D. (2018) *Modélisation hydrologique globale des débits de 23 sources karstiques avec le logiciel ÉROS*.

Vergnes, J.-P. *et al.* (2020) 'The AquiFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: evaluation over a 60-year period', *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2), pp. 633–654. doi: 10.5194/hess-24-633-2020.

Vergnes, J. P. *et al.* (2020) 'The AquiFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: Evaluation over a 60-year period', *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(2), pp. 633–654. doi: 10.5194/hess-24-633-2020.

Vergnes, J. P., Amraoui, N. and Thiéry, D. (2020) *La plate-forme de modélisation Aqui- FR : état d'avancement en 2019*.

Vidal, J.-P. *et al.* (2010) 'Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite', *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(3).

Voldoire, A. *et al.* (2019) 'Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1', *Journal of*

Advances in Modeling Earth Systems, 11(7), pp. 2177–2213. doi: 10.1029/2019MS001683.

Yin, X. *et al.* (2020) 'Long-term modelling of soil N mineralization and N fate using STICS in a 34-year crop rotation experiment', *Geoderma*, 357(March 2019). doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113956.

9. Tables des illustrations et tableaux

Figure 1. Extension des aquifères simulés dans Aqui-FR: en couleur: les applications sédimentaires distribuées (les différentes formations superposées sont représentées par des couleurs différentes), en gris, les aquifères de socle bretons, les points correspondent aux systèmes karstiques. 8
Figure 2. Aqui-FR : des projections reposant sur la connexion de plusieurs modèles climatiques (Vergnes et al, 2020) 9
Figure 3. Limites du modèle en plan (schéma à gauche) et selon une coupe A-B (schéma ià droite). Source : BRGM/RP-65583-FR. 11
Figure 4. Localisation des points d'observation : piézomètres et stations hydrométriques, les piézomètres utilisés dans l'évaluation des modèles sont entourés d'un cercle rouge 13
Figure 5. Exemple de chroniques piézométriques simulées (rouge) et observées (noir) dans les alluvions du Tarn et Garonne 14
Figure 6. Extension des modèle craies de la Seine 15
Figure 7. SPLI de l'application Tarn-et-Garonne (août 1958 – mai 2020) 23
Figure 8. SPLI de l'application Seine (août 1958 – mai 2020) ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 9. Ratio de mailles dont le SPLI mensuel est inférieur au seuil fixé (ensemble des domaines, 1958-2019) 21
Figure 10. Chronique d'une sécheresse : février 1971 – décembre 1975 22
Figure 11. Extraits de la chronique de la sécheresse de mai 1989-septembre 1992 23
Figure 12. Comparaison du pourcentage de mailles et de piézomètres affectés par les sécheresses dans le Nord-Pas-de-Calais (en haut : modèle ; en bas : observations) ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 13. Comparaison du pourcentage de mailles et de piézomètres affectés par les sécheresses en Alsace ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 14. Comparaison des ratios de mailles et de piézomètres affectés par les sécheresses dans le Poitou-Charentes ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 15. Composants du système de prévisions saisonnières utilisé Dorel et al. (2017) 25
Figure 16. Schéma des différentes simulations exécutées pour les prévisions saisonnières: REA est la simulation à long terme de référence, PARP6 est la prévision saisonnière physique du modèle ARPEGE System 6 (25 membres), PCLIM est la prévision saisonnière de climatologie (24 membres pour lesquels 24 conditions atmosphériques sont répétées du passé), et NOPERT où l'anomalie de l'état initial se répète le long de la prévision à 6 mois. La plateforme Aqui-FR est composée d'un modèle de surface terrestre SURFEX et de modèles hydrogéologiques pour produire des simulations de hauteurs piézométriques, de débits fluviaux et d'échanges entre les rivières et les aquifères. 26
Figure 17. Cartes des scores de corrélation pour PARP6 (haut), PCLIM (bas gauche), et NOPERT (bas dtoite) pour une initialisation le 1er février entre 1993 et 2016, après prévision à 6 mois, par rapport à REA 30
Figure 18. Scores de corrélation médians pour PARP6 (cercles bleus), PCLIM (carrés rouges) et NOPERT (losanges verts) en fonction du mois d'initialisation et du délai. Les lignes simples indiquent une prévision continue sur 6 mois et les marqueurs deviennent plus petits avec le délai (le plus grand pour les prévisions sur 1 mois, le plus petit pour les prévisions sur 6 mois). 29
Figure 19. Description des simulations Aqui-FR sur une année hydrologique et des différents forçages utilisés. 33
Figure 20. Exemple de carte pour la France : prévisions saisonnières réalisées le 15 mars 2021 pour le mois de juillet pour la médiane du SPLI. 34
Figure 21. Exemple de graphique de niveau piézométrique :sur la gauche, réanalyse depuis 1958, sur la droite analyse et prévisions (panache bleu) jusqu'au mois d'août 2021 35
Figure 22. Evolution de l'indice piézométrique standardisé de 1950 à 2100 pour 2 scénarios d'émission de gaz à effet de serre : à gauche scénario RCP2.6 dit à 2°C, à droite scénario RCP 8.5 dit tendanciel 44
Figure 23. Occurrence des sécheresses en nappe sur le domaine Aqui-FR: pour chaque période de 30 ans (couleurs), et tous les modèles de climat de chaque scénario RCP (forme du symbole), les points représentent l'extension moyenne (abscisse), l'intensité moyenne (ordonnée) et la durée (taille du symbole) des épisodes de sécheresse en nappe. Une sécheresse est considérée avec un niveau très bas (période de retour 10 ans) 44

Tableau 1. Termes du bilan hydrologique moyen à l'échelle du domaine modélisé pour le modèle MOD82 de référence, avec le schéma SURFEX (période 1995-2014). 13
Tableau 2. Scores correspondant aux dix piézomètres de la Figure 4 pour le MOD82-SURFEX sans et avec calibration du champ de perméabilité 13
Tableau 3. Critères de simulation des 5 bassins amont du modèle POC avec les forçages SURFEX R03 14
Tableau 4. Sécheresses identifiées sur la période août 1958-mai 2020 ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 5. Sécheresse la plus importante depuis 1958, pour 8 des bassins versants étudiés (selon critère d'analyse ; les indices font référence aux 8 périodes de sécheresse, voir Tableau 4; en rouge, la sécheresse de février 1971-décembre 1975)..... **Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 6. Occurrence des sécheresses depuis 1958, par bassin versant (analyse du SPLI médian : nombre de mois sur la période où le SPLI est inférieur au seuil de sécheresse fixé, resp. 5 ans sec (gauche) et 10 ans sec (droite)..... **Erreur ! Signet non défini.**

10. Remerciements

Plusieurs personnes fortement impliqué dans le déploiement du projet l'ont quitté suite à des départs en retraite, mutation, ou fin de contrat. Nous tenons à remercier François Besson et Delphine Leroux, Thierry Morel, Pascal Viennot, Dominique Thierry, pour leurs implications cruciales dans ce projet.