

1



Quelles ressources en eau pour demain ?

Bien que très utilisée à des fins d'alimentation en eau potable, industrielle ou agricole, l'eau souterraine reste mal connue. En valorisant les modélisations hydrogéologiques spatialisées à des fins de suivi, de prévision et de projection, la plateforme de modélisation *Aqui-FR*, aujourd'hui en phase pré-opérationnelle, permet de mieux comprendre l'évolution de cette ressource en eau en fonction des pressions qu'elle subit.

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 de limiter les arrêts « sécheresse ». L'anticiper sur les prochaines décennies, via les projections climatiques, permettrait aussi 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.*, 2019) vise à produire un suivi des prévisions et des projections de la ressource en eau souterraine en France, en se fondant sur les modèles numériques précédemment élaborés pour simuler les écoulements dans de grands bassins sédimentaires, modèles d'ores et déjà utilisés par les gestionnaires de l'eau. Ces modélisations hydrogéologiques couvrent des surfaces importantes (supérieures à 10 000 km²), avec une résolution allant de 100 mètres à quelques kilomètres. Elles incluent une représentation des différentes formations aquifères superposées (jusqu'à dix couches pour certaines applications) et intègrent les nombreux points de prélèvement 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

AUTEURS



Florence HABETS

Directrice de recherche CNRS, professeure attachée au laboratoire de géologie de l'ENS
✉ florence.habets@ens.fr



Nadia AMRAOUI

Ingénieure chercheur en hydrogéologie, Direction de l'eau, de l'environnement, des Procédés et des Analyses, DEPA, BRGM
✉ n.amraoui@brgm.fr



François BESSON

Ingénieur à la direction Climatologie et des services climatiques
✉ francois.besson@meteo.fr



Delphine J. LEROUX

Chercheuse post-doctorante, CNRM-GAME
✉ delphine.leroux@meteo.fr



Jean-Pierre VERGNES

Ingénieur chercheur en hydrogéologie, DEPA, BRGM
✉ jp.vergnes@brgm.fr



Pascal VIENNOT

Ingénieur de recherches en hydrogéologie, MINES-Paristech
✉ pascal.viennot@mines-paristech.fr



◀ PHOTO 1
**Forage artésien,
émergence d'eaux
souterraines.**
© FOTOLIA

▶ PHOTO 2
**La Loire à
Saint-Denis-en-Val.**
© DOMINIQUE THIERY, BRGM

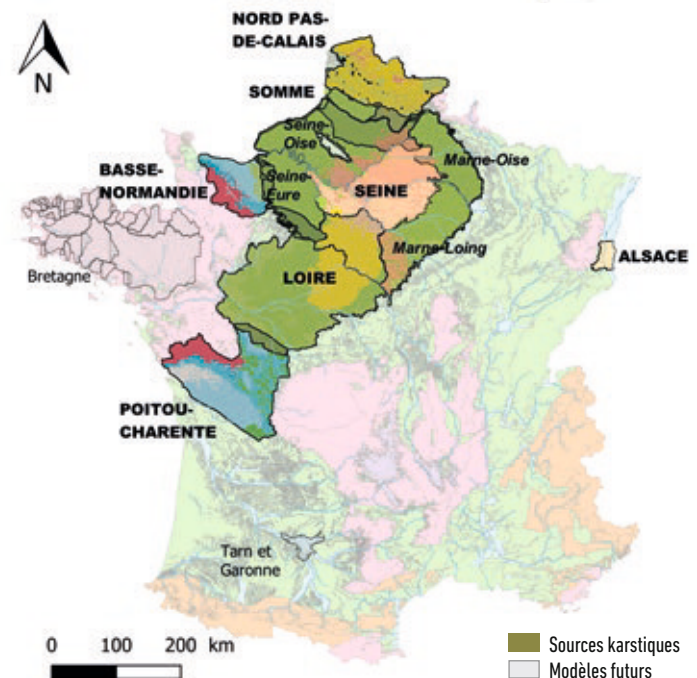
2

projet collaboratif soutenu par l'Agence française pour la biodiversité et réunissant des hydrogéologues modélisateurs du BRGM, de MINES-Paristech et du CNRS, des spécialistes du couplage numérique du Cerfacs, ainsi que des spécialistes de la modélisation atmosphérique du Centre national de recherches météorologiques de Météo-France. Aujourd'hui, 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.

Évaluation de la plateforme de modélisation AQUI-FR

La qualité des simulations a d'abord été évaluée sur une période de 60 ans, en exploitant l'analyse météorologique SAFRAN. Les simulations réalisées permettent ainsi de reconstituer la dynamique des eaux souterraines à une époque où le réseau d'observations était peu dense (une dizaine de piézomètres seulement sur le domaine en 1958, une centaine dans les années 1990 et environ 450 aujourd'hui). Sur 60 ans, on distingue en moyenne une alternance de quatre périodes de hautes eaux et de basses eaux, dont la durée varie d'environ 5 à 10 ans. Globalement, l'accord avec les niveaux des nappes observés est bon, avec un biais inférieur à 2 mètres sur 40 % des piézomètres, et des débits bien

FIGURE 1 / Les 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 verts correspondent aux systèmes karstiques. SOURCE: PROJET AQUI-FR



3



PHOTO 3

Bancs de calcaires traversés par Le Riolan (bassin de l'Estéron, Sigale, Alpes-Maritimes, 2013).

© JEAN-BAPTISTE CHARLIER, BRGM

PHOTO 4 ►►

Émergence de la Douix, principal affluent de la Seine, 45 km en aval de la source de la Seine.

© FRANÇOIS MICHEL, BRGM

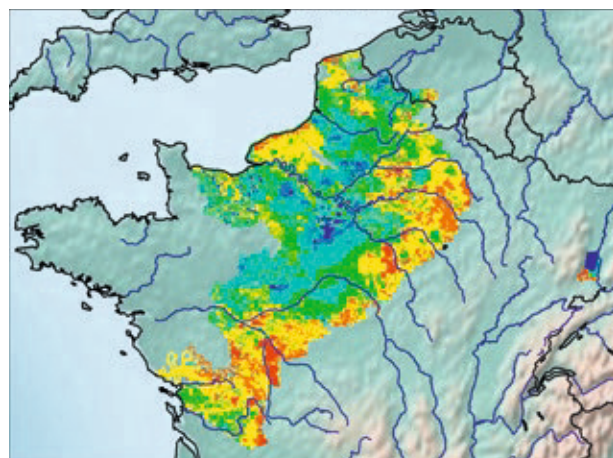
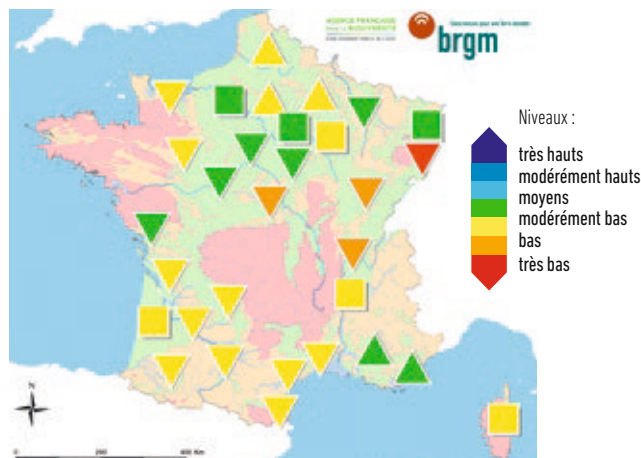
restitués (50 % des stations ont un score de Nash supérieur à 0,6, Vergnes *et al.*, 2019).

Grâce à cet historique, il est possible de comparer une situation présente avec une situation rencontrée dans le passé. C'est le principe de l'indice piézométrique standardisé (IPS), qui représente la situation des nappes par rapport à une période de retour. Ainsi, des niveaux IPS très hauts et très bas correspondent à une période de retour supérieure ou égale à 10 ans. Un effet indirect de cette représentation fréquentielle est que les biais systématiques sont supprimés. De ce fait, l'accord entre les indices standardisés observés et simulés est très bon (Vergnes *et al.*, 2019). Il est alors possible d'identifier des zones de sécheresse.

Suivi en temps réel

L'outil de modélisation Aquif-FR est aussi utilisé pour suivre l'état des nappes en temps réel. Ce suivi est donc complémentaire des observations ponctuelles. La figure 2 présente la comparaison du suivi en temps réel obtenu à partir des observations traitées par le BRGM (issues d'ADES) pour alimenter le bulletin de suivi hydrologique et simulé par Aquif-FR. Les deux estimations représentent un niveau qualitatif, l'indice piézométrique standardisé exprimant la situation par rapport à l'historique. Cependant, chaque symbole de la carte du bulletin de suivi hydrologique regroupe les données d'un ensemble de piézomètres et utilise comme période de référence la durée complète des chroniques observées, ce qui entraîne que la référence

FIGURE 2 / État des nappes au 1^{er} mai 2019 estimé par le BRGM à partir des observations (à gauche, carte du bulletin de suivi hydrologique) et simulé par Aquif-FR (à droite). Le niveau des nappes varie de très haut (bleu foncé) à très bas (rouge). SOURCE : PROJET AQUI-FR





► PERSPECTIVES DE SERVICES CLIMATIQUES INTÉGRANT LA PRÉVISION SAISONNIÈRE POUR LA GESTION DES RESSOURCES EN EAU

La mise en place de services d'aide à la décision pour la gestion saisonnière de la ressource en eau est une attente forte des décideurs, mais un défi scientifique difficile à relever du fait de la faible prévisibilité saisonnière atmosphérique sous nos latitudes.

Ainsi, dans les années 2000, les premières applications de la prévision saisonnière pour la gestion de la ressource en eau se sont développées sur les régions tropicales, car elles bénéficient d'une meilleure prévisibilité. En métropole, les services d'aide à la décision ont pris en compte l'inertie des aquifères (applications pour les nappes phréatiques) et se sont appuyés pour les eaux de surface sur des prévisions climatiques, intégrant les scénarios météorologiques des années passées (projet PREMHYCE (AFB/MTES) porté par IRSTEA).

Cependant, dans le cadre du projet FP7/Euporias (2013-2016), l'Union européenne a souhaité soutenir le développement des services climatiques reposant sur les prévisions saisonnières en Europe. Météo-France a ainsi conçu et évalué un prototype pour la gestion saisonnière de la ressource en eau de surface dénommé RIFF (<http://riff.euporias.eu/fr>), en lien étroit avec deux gestionnaires (l'EPTB Seine Grands Lacs et le Syndicat mixte d'études et d'aménagement de la Garonne) et démontré l'intérêt potentiel de ce service. En Europe, un travail équivalent a été mené par les collègues suédois du SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute).

Le passage d'un prototype à un véritable service climatique à vocation opérationnelle sur l'ensemble de la France a été mené entre 2017 et 2018 dans un contexte d'évolution rapide des outils, tant des modèles climatiques de prévision saisonnière que des outils de modélisation hydrologique. La saison d'été 2019 a permis de tester une première version du service. Celui-ci intègre les prévisions hydrologiques (débit, humidité des sols, stock nival) à échéance de 6 mois fondées sur les scénarios climatiques du modèle de prévision saisonnière de Météo-France, actualisés chaque mois. Mais il s'accompagne en outre d'une analyse du contexte (conditions climatiques et hydrologiques passées et récentes) et d'une expertise sur la prévisibilité saisonnière spécifique de la

situation en cours. Une présentation de ces différents produits est disponible sur le site extranet de prévision saisonnière : <http://seasonal.meteo.fr/node/266>

De nombreux travaux de recherche sont aujourd'hui menés pour améliorer cette première version de service climatique. En particulier, des travaux sont en cours, sous l'égide du ministère en charge de l'environnement, avec le BRGM et le Laboratoire METIS, pour développer et évaluer des prévisions saisonnières des ressources en eau souterraine à l'aide de la plateforme partenariale Aqui-FR. L'effort porte aussi sur la portabilité du service à l'échelle du bassin méditerranéen via le projet européen Medscope, avec des cas d'étude sur la Garonne, la Durance, l'Ebre et le Pô. _____



Jean-Michel SOUBEYROUX

Météo-France, Directeur Adjoint Scientifique
de la Climatologie et des Services
Climatiques, Toulouse
✉ jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

Irrigation de culture.

© ADOBE STOCK

varie d'un point à l'autre. Dans Aqui-FR, les valeurs sont disponibles en chaque maille des modèles et la période de référence est homogène sur l'ensemble du domaine (1980-2010). Ainsi, la carte estimée par Aqui-FR présente davantage de variabilités locales, avec des valeurs allant, en mai 2019, de très hauts sur le bassin de la Seine à très bas en Alsace et Poitou-Charentes, mais restant, globalement, en accord avec la carte du bulletin.

Prévisions saisonnières de la ressource en eau souterraine

Mais, au-delà du suivi en temps réel, l'enjeu reste la prévision de l'évolution de la ressource en eau souterraine. À ce jour, des prévisions météorologiques

saisonnières sont réalisées par Météo-France à une échéance de 6 mois (*voir encadré*). Mais les fortes incertitudes incitent à une diffusion uniquement sur 3 mois (<http://www.meteofrance.com/accueil/previsions-saisonnières>). Les nappes ne sont pas sensibles à tous les événements météorologiques. Elles ont un temps de réponse variant de quelques jours à plusieurs mois. Cela rend donc possible l'exploitation des prévisions pour anticiper l'évolution des nappes à longue échéance (6 mois). C'est le résultat d'une première évaluation de la prévisibilité saisonnière des nappes réalisée avec Aqui-FR. On s'est basé pour cela sur une évaluation des 24 dernières années, pour lesquelles des prévisions saisonnières ont été simulées. Ainsi, chaque mois, un



ensemble de 25 prévisions a été réalisé. Les résultats sont très encourageants, en particulier pour les prévisions réalisées de mars à juin, car elles obtiennent de bons scores, même à 6 mois d'échéance, aussi bien en termes de corrélation que d'ordonnement (capacité à prévoir pour chaque mois si les niveaux sont plus hauts ou plus bas que les autres années). L'analyse de ces prévisions montre ainsi qu'elles sont plus fiables pour les basses eaux que pour les hautes eaux. De plus, il est envisageable de prévoir de façon assez robuste l'extension des zones en déficit jusqu'à 6 mois d'échéance. Ainsi, plus de 55 % des zones de niveau très bas (sécheresse hydrogéologique) sont détectés, et même plus de 70 % lorsque la prévision débute entre avril et juin, c'est-à-dire après la recharge des nappes. À ce bon taux de détection est associé un très faible taux de fausse alarme, ce qui est nécessaire pour avoir une prévision fiable. Ces résultats encourageants ont fait l'objet d'échanges avec des gestionnaires, notamment lors de la journée Services climatiques et ressource en eau souterraine (<https://convention-services-climatiques.lsce.ipsl.fr/journee-services-climatiques-et-ressource-en-eau>). Ces échanges permettent une co-construction de ces prévisions, notamment afin d'identifier les variables les plus pertinentes. Bien qu'encore en mode recherche, des tests en conditions réelles sont réalisés.

Projections climatiques

Les conséquences du dérèglement climatique se font déjà sentir et il est important d'anticiper les futurs possibles afin d'apporter les réponses les plus adaptées en termes d'aménagement et d'usage. Dans ce contexte, les projections climatiques du dernier rapport du GIEC régionalisées par Dayon *et al.* (2018) ont été utilisées dans AQUI-FR. Trois futurs possibles sont traités, via des émissions de gaz à effet de serre différents : le scénario tendanciel (RCP8.5), le scénario se rapprochant des accords de Paris (RCP4.5) et le scénario dit à 2 °C (RCP2.6). On dispose pour chacun de ces scénarios d'un ensemble de projections comprenant de 14 à 7 réalisations. 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 seront élevées. À cela s'ajoute une augmentation de la température en France de 4,5 à 2,5 °C pour les scénarios tendanciels et de 2 °C pour le scénario (RCP2.6). Toutes ces projections impactent la ressource en eau souterraine.

Bien sûr, des hypothèses supplémentaires sont émises pour ces projections. Ainsi, on a supposé dans ce travail une occupation des sols et des prélèvements stables. La *figure 3* présente l'évolution de 1950 à 2100 de l'indice piézométrique standardisé (IPS) en moyenne sur le domaine pour les scénarios à 2 °C et tendanciels. Si le niveau des nappes est stable, les valeurs de l'IPS doivent rester autour des niveaux modérément hauts et bas (lignes bleu clair et jaune). On constate que, pour les prochaines décennies, l'indice dépasse régulièrement le niveau très bas (ligne rouge, période de retour de 10 ans de sécheresse). En fin de siècle, les efforts d'atténuation



**BUREAU D'ÉTUDES HYDROGÉOLOGIQUES
SPÉCIALISÉ EN MESURES SUR LES FORAGES**

- Etudes hydrogéologiques
- Recherche en eau
- Diagnostic – Réhabilitation des forages
- Assistance Forage
- Pompages Traçages
- Diagraphies
- Inspection vidéo
- Géothermie





IDEES-EAUX
 AGENCE DE LA DRÔME – Bourg-de-Péage - France - Tél : +33(0) 4 75 47 17 17
 AGENCE DU JURA – Saint-Lupicin – France - Tél : +33(0) 3 84 42 07 08
 Email : contact@ideeseaux.com | www.ideeseaux.com

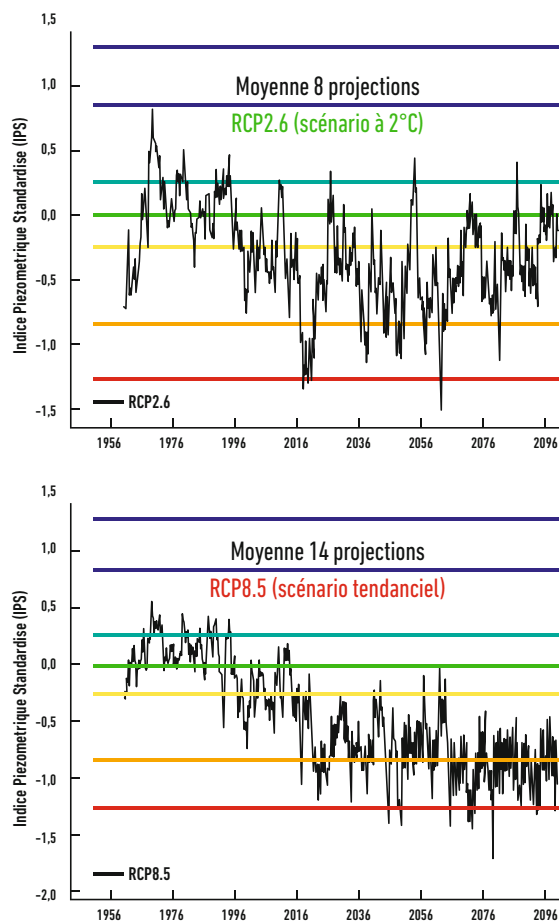
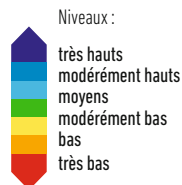


FIGURE 3
Évolution de l'indice piézométrique standardisé de 1950 à 2100 pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre : à gauche, scénario RCP2.6 dit à 2°C, à droite scénario RCP8.5 dit tendanciel.

SOURCE : FLORENCE HABETS ET AL., PROJET AQUI-FR

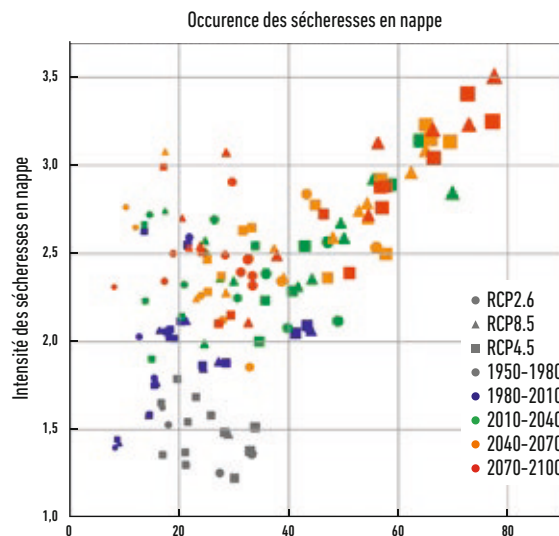


sont payants pour le scénario à 2°C et le niveau moyen des nappes revient autour de la normale, alors que pour le scénario tendanciel, celui-ci reste autour du niveau très bas. Le dérèglement climatique est donc une réelle menace pour la ressource en eau souterraine en France, alors que c'est la principale 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 4 présente l'extension des zones en sécheresse (lorsque le niveau des nappes est inférieur à un niveau très bas) en fonction de l'intensité des sécheresses, pour toutes les projections des trois 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 (RCP8.5 ou 4.5). 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 seront récurrents, même au nord de la France dans le futur.

FIGURE 4 / 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).

SOURCE : FLORENCE HABETS ET AL., PROJET AQUI-FR



Conclusion

L'important effort mené par un groupe collaboratif pour valoriser les modélisations hydrogéologiques régionales existantes au sein d'une plateforme de modélisation exploitable pour le suivi, la prévision et la projection de la ressource en eau souterraine commence à porter ses fruits. En effet, il a été possible de reconstituer 60 ans d'évolution passée de la piézométrie de façon consistante avec les observations disponibles, de mettre en place un suivi en temps réel, de montrer l'intérêt des prévisions saisonnières de la ressource en eau souterraine et d'étudier son évolution dans les prochaines décennies. L'exploitation d'un même outil pour ces différentes actions en concertation/collaboration avec les gestionnaires de l'eau permet une meilleure appropriation des résultats.



PHOTO 5 / La source karstique de la Fosse Dionne à Tonnerre, dans l'Yonne (bassin versant de l'Armançon). © FOTOLIA

5

Bien sûr, de nombreux progrès restent à faire, notamment via une meilleure représentation de l'extension des aquifères français, l'amélioration de la connaissance des prélèvements en nappe à un pas de temps compatible avec le modèle et la mise en place d'un système d'assimilation de données qui permettra de corriger l'état initial des prévisions saisonnières. ●

ABSTRACT

Although widely used for drinking, industrial and agricultural purposes, groundwater is still poorly understood. By exploiting distributed physical groundwater models to monitor and predict the availability of water resources, the AQUI-FR unique numerical platform is expected to improve our understanding and integration of past, present and future changes to aquifers, thus enabling us, ideally, to ease the pressures on them. The AQUI-FR numerical platform is now in the pre-operational phase.

REMERCIEMENTS Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des collaborateurs du projet, tous co-auteurs de Vergnes et al. (2019), ainsi que Julien Boé et Gildas Dayon du CERFACS, Claire Magand de l'AFB et les nombreuses personnes ayant soutenu ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

Dayon G., Boé J., Martin É., Gailhard J., 2018. Impacts of Climate Change on the Hydrological Cycle over France and Associated Uncertainties. Comptes Rendus, Geoscience 350, 141-53. Vergnes J.-P., Roux N., Habets F., Ackerer Ph., Amraoui N., Besson F., Caballero Y., Courtois Q., de Dreuzay J.-R., Etchevers P., Gallois N., Longuevergne L., Le Moigne P., Morel T., Munier S., Regimbeau F., Thiery D., Viennot P., 2019. The AQUIFR Hydrometeorological Modelling Platform as a Tool for Improving Groundwater Resource Monitoring over France: Evaluation over a 60-Year Period. www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hess-2019-166/