Recharge des aquifères à l'échelle de la France : estimation, évolution et incertitudes associées

Sandra LANINI[1], Yvan CABALLERO[1], Pierre LE COINTE[2], Sandra BERANGER[2], Luc ARNAUD[3], Stéphanie PINSON[3]

[1]BRGM, Université Montpellier, 1039 rue de Pinville, 34000 Montpellier, FR – s.lanini@brgm.fr, y.caballero@brgm.fr
[2]BRGM, Toulouse – p.lecointe@brgm.fr, s.beranger@brgm.fr
[3]BRGM, Orléans – l.arnaud@brgm.fr, s.pinson@brgm.fr

Parmi les processus qui participent à la recharge des aquifères, la recharge par infiltration des précipitations efficaces est la plus directement impactée par le climat. Nous proposons une méthodologie qui permet d'estimer cette recharge à l'échelle de grands territoires, sur la base de modèles hydrologiques globaux nécessitant peu de données et de paramètres. L'étude de plus de 350 bassins hydrologiques a permis de mettre en évidence pour les bassins sédimentaires, une relation entre le BaseFlow Index et l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux), qui est un indice cartographique qualitatif de potentialité d'infiltration. Sur la base de cette relation, une carte du ratio d'infiltration de la pluie efficace a pu être générée pour toute la France métropolitaine, permettant de transformer la carte de pluie efficace en carte de recharge. La méthodologie a été appliquée pour estimer la recharge future en utilisant les sorties de modèles climatiques pour deux scenarios de forçage radiatif. A l'horizon 2030, quel que soit le scénario, les résultats de la modélisation prévoient une baisse modérée de la recharge directe des aquifères sur la majorité du territoire, en dehors du bassin parisien et du pourtour méditerranéen. A l'horizon 2080, le scénario optimiste permet de revenir à des valeurs de recharge proches de l'actuel, en dehors du nord du bassin parisien. En revanche, dans le scénario pessimiste, une majorité des aquifères voit sa recharge diminuer de 10 à 30%, avec des zones plus tendues dans le bassin parisien, le pourtour méditerranéen et la Corse. Les incertitudes associées à ces résultats sont néanmoins importantes et peuvent atteindre 50% sur les prévisions les plus pessimistes.

Mots-clefs : recharge, IDPR, BFI, changement climatique, incertitude

Evaluating future groundwater recharge with associated uncertainty at the scale of France

Among aquifer recharge processes, effective precipitation infiltration is the most directly impacted by climate. We propose a methodology for estimating this recharge at the scale of large territories, based on global hydrological models requiring few data and parameters. The originality of our work lies in the use of the IDPR (Network Development and Persistence Index) which is a qualitative cartographic index of infiltration potentiality. The study of more than 350 hydrological basins made it possible to highlight a linear relation between the BaseFlow Index and the IDPR for the sedimentary basins. Based on this relationship and assuming that the effective rainfall infiltration ratio could be assimilated to the BFI, an map of this ratio was generated all over France, allowing the effective precipitation map to be converted into a recharge map. The methodology was then applied to estimate future recharge using the outputs of climate models for two contrasted radiative concentration pathway scenarios. By 2030, whatever the scenario, the modeling results predict a moderate decrease in the direct recharge of aquifers everywhere in France except in Paris basin and around the Mediterranean sea. By 2080, the optimistic scenario allows to recover recharge values close to the current ones, outside the north of the Paris basin. At the opposite, within the pessimistic scenario, a majority of aquifers would undergo a recharge decrease by 10 to 30%, with stress zones in the Paris basin, around the Mediterranean sea and in Corsica. Nonetheless, these first results should be considered carefully as the associated uncertainties are significant and can reach 50% for the most pessimistic forecasts.

Key words : Aquifer recharge, BFI, incertitude, climate change, multi-model ensemble approach

I INTRODUCTION

La recharge des aquifères représente la part renouvelable de la ressource en eau souterraine. Pour envisager les aménagements nécessaires pour l'approvisionnement en eau dans les années à venir, les gestionnaires doivent disposer d'estimations du volume d'eau que représente cette recharge ainsi que de son évolution future dans le contexte de changement climatique. Or, parmi les différents processus qui participent à la recharge des aquifères, la recharge directe par infiltration des précipitations efficaces est la plus directement impactée par le climat [de Vries & Simmers, 2002]. Elle dépend du contexte

météorologique, mais aussi des caractéristiques géomorphologiques (pente, rugosité…), des propriétés des sols (couverture végétale, type de sol, capacité de stockage en eau…) et des propriétés hydrodynamiques des formations du sous-sol. Elle ne peut pas être directement mesurée sur l'ensemble d'un bassin hydrogéologique. C'est pourquoi nous avons développé une méthodologie qui permet d'estimer cette recharge à l'échelle de grands territoires, sur la base de modèles globaux nécessitant peu de données et de paramètres. Nous présentons ici cette méthodologie, et son application pour estimer la recharge actuelle et future des aquifères à l'échelle de la France.

II MÉTHODOLOGIE

La recharge directe des aquifères correspond à la part de la pluie efficace qui s'infiltre, au contraire de la part qui ruisselle en surface ou sub-surface et atteint rapidement les cours d'eau. Notre méthodologie repose donc à la fois sur un calcul de la pluie efficace spatialisée, et sur l'estimation du ratio d'infiltration de la pluie efficace (RIPE) également spatialisé. L'originalité de notre travail repose sur l'estimation de ce RIPE à partir de l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux), qui est un indice cartographique disponible en tout point du territoire métropolitain.

II.1 Calcul de la pluie efficace

La pluie efficace est calculée à partir d'un bilan hydrique du sol appliqué à chaque cellule de 8*8 km^2 d'un maillage couvrant toute la France métropolitaine. Dans l'optique d'estimer l'incertitude liée au choix du modèle de bilan hydrique, trois formules différentes sont utilisées [Thornthwaite, 1948], [Edijatno & Michel, 1989] et [Dingman, 2002]. Ces trois modèles de bilan hydrique utilisent les mêmes données et paramètres d'entrée, à savoir les données météorologiques (pluie, température et évapo-transpiration potentielle) au pas de temps journalier pour chaque cellule [Vidal et al., 2010] et la capacité de stockage du sol (appelée Réserve Utile par les hydrologues) fournie par la carte INRA des sols au 1/1^{e}6 [base de données DoneSol INRA, 2014]. Les calculs sont réalisés à l'aide des logiciels ArcGIS© et Matlab©.

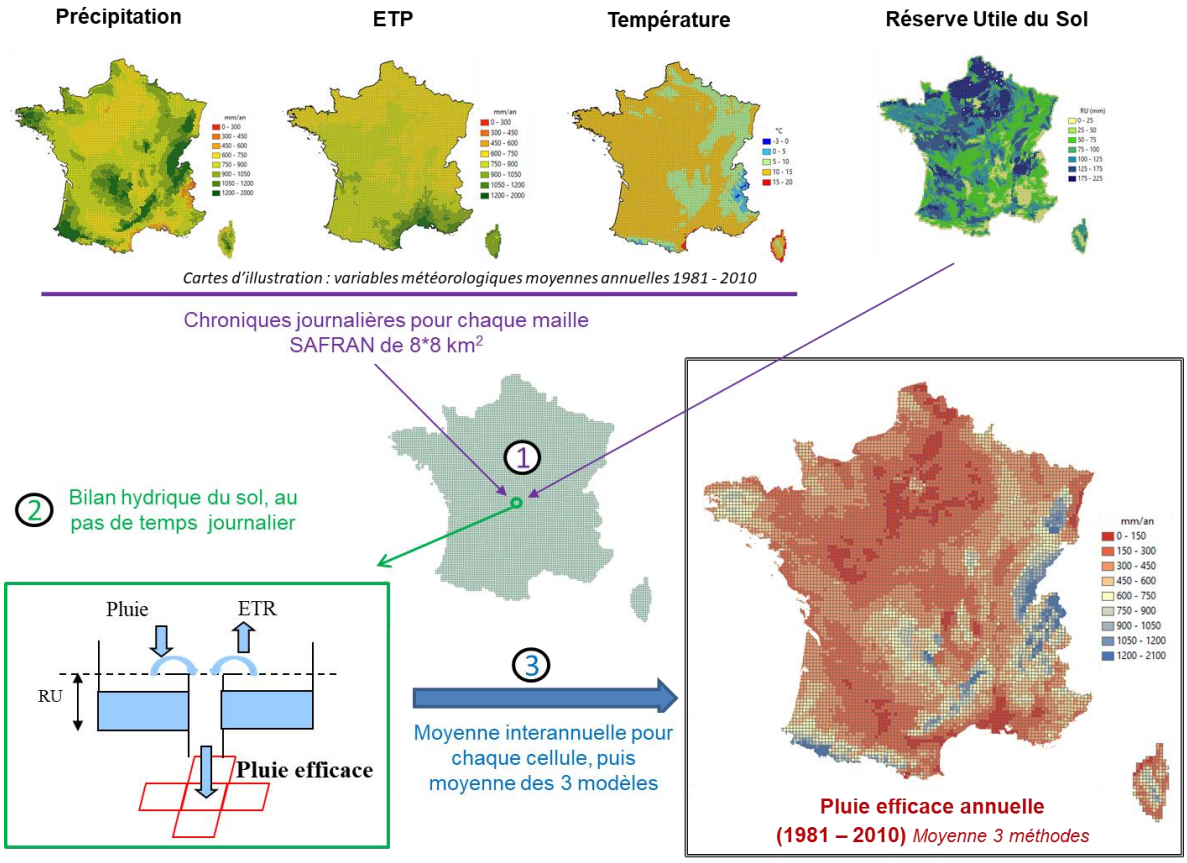


Figure 1 : Méthodologie d'estimation de la pluie efficace annuelle à l'échelle de la France et carte de la pluie efficace annuelle moyenne sur la période 1981-2010

II.2 De la pluie efficace à la recharge

Le ratio d'infiltration de la pluie efficace (RIPE) est défini comme le rapport de la recharge sur la pluie efficace. On pose l'hypothèse simplificatrice que ce coefficient est constant dans le temps. Pour proposer une cartographie du RIPE à l'échelle de la France, nous proposons une approche originale basée sur deux index : le Base Flow Index (BFI) et l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR).

II.2.1 Le BFI

Le débit de base est la part du débit d'un cours d'eau qui provient du ou des aquifères qui lui sont hydrauliquement connectés. Le BFI est le rapport entre la somme des débits de base annuels et le débit total annuel (ou module). En supposant que le bassin versant étudié n'est pas influencé, qu'il n'y a pas d'échange de flux latéralement ou par drainance au niveau de l'aquifère, et que la variation des stocks est négligeable, au pas de temps annuel on peut considérer que le module du débit est égal à la pluie efficace, et que le débit de base est égal à la recharge directe. Sous ces hypothèses, le RIPE est donc égal au BFI à l'échelle annuelle.

Il existe plusieurs méthodes, essentiellement basées sur des filtres mathématiques, pour estimer le débit de base et calculer le BFI d'un cours d'eau. [Furey & Gupta, 2001] proposent une revue de quelques filtres qui montre l'évolution progressive des méthodes utilisées en hydrologie, du filtre numérique récursif purement mathématique de [Lyne & Hollick, 1979], aux filtres pouvant être reliés aux lois physiques, tels ceux de [Boughton, 1993], [Chapman & Maxwell, 1996] ou [Eckardt, 2005]. L'Institut d'Hydrologie de Wallingford a développé une procédure de calcul du débit de base qui fait référence (voir par exemple [Gustard et al., 1992]), et que nous avons adoptée pour cette étude.

II.2.2 L'IDPR

L'IDPR est un indice cartographique qui fournit une indication qualitative sur le caractère plus ou moins infiltrant ou ruisselant des formations géologiques à l'échelle d'un territoire [Mardhel et al., 2014]. La construction de cet indice repose sur l'idée que l'organisation du réseau hydrographique n'est pas seulement dépendante de la pente et de la morphologie du terrain, mais également des formations géologiques qui le supportent. Ainsi, en comparant un réseau théorique, établi selon l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène, au réseau naturel mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène, l'IDPR révèle l'aptitude des formations du sol et sous-sol à laisser s'infiltrer et/ou ruisseler les eaux de surface vers/depuis le milieu souterrain. Par construction, l'IDPR est compris entre 0 (100% d'infiltration) et 2000 (100% de ruissellement). Dans sa dernière version, l'IDPR est disponible pour toute la France à une résolution de 25m.

En étudiant les bassins versants instrumentés en mesure de débit, on a cherché à mettre en évidence une relation entre l'IDPR et le BFI. Par extrapolation, une telle relation permettrait en effet d'estimer le BFI (et donc le RIPE) pour tous les bassins hydrographiques, et donc de calculer la recharge pour tous les aquifères à partir de la carte de pluie efficace (recharge = RIPE * pluie efficace).

Nous avons donc collecté des chroniques de débit journalier, disponibles sur la période 1980-2010, pour plus de 350 bassins hydrographiques de France métropolitaine. Les BFI annuels ont été calculés par la méthode de Wallingford. Leur valeur moyenne sur les 31 années est présentée sur la Figure 2. Parallèlement, l'IDPR moyen sur chacun de ces bassins a été calculé.

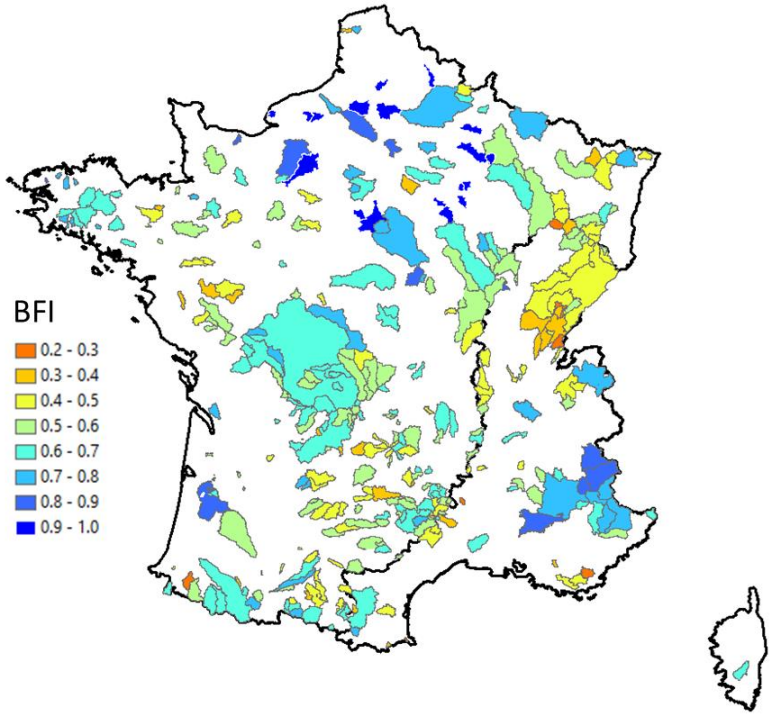


Figure 2 : BFI annuel moyen (1980 – 2010) (375 bassins)

II.3 Evolution future de la recharge

Pour étudier l'évolution de la recharge des aquifères dans le contexte de changement climatique, nous avons adopté une démarche de modélisation d'ensemble, telle que décrite par exemple par [Krysanova et al., 2018], qui combine à la fois un ensemble de projections climatiques et un ensemble de modèles hydrologiques.

Nous avons retenu deux scénarios de forçage radiatif : le RCP2.6 qui est le plus optimiste car il intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement à 2°C en 2100, et le RCP8.5 qui est le plus pessimiste (voir par exemple www.drias-climat.fr). Les sorties de quatre modèles climatiques (ou General Circulation Model) ont été considérées : BCC_CSM1-1-m, CanESM2, IPSL, NorESM1, ainsi que deux méthodes de descente d'échelle statistiques (une méthode climatique [Pagé et al. 2009] et une méthode analogue [Dayon, 2015]). Pour chaque maille à chaque pas de temps, la moyenne des pluies efficaces calculées par chacun des modèles avec chaque série de données climatiques constitue le résultat de la modélisation.

Chaque étape de cette chaîne de modélisation engendre des incertitudes sur le résultat final, l'incertitude totale étant celle de la chaine de modélisation complète [Yongdai et al., 2019]. L'indicateur que nous avons choisi pour évaluer cette incertitude totale est la moyenne des écarts absolus à la moyenne (MAD pour Mean Absolute Deviation), normalisé par deux fois la pluie efficace moyenne. Pour chaque maille, le MAD et la moyenne sont calculés sur l'ensemble constitué par les 480 pluies efficaces annuelles résultant des 24 simulations sur une période de 20 ans, réalisées pour croiser les 2 méthodes de descente d'échelle, les 4 modèles climatiques, et les 3 méthodes de bilan.

III RÉSULTATS

III.1 Recharge actuelle

En considérant l'ensemble des bassins étudiés, aucune relation simple entre l'IDPR et le BFI n'a pu être mise en évidence. En revanche, en classant les bassins en fonction de leur lithologie dominante (sur la base des informations disponibles dans la BDLisa [https://bdlisa.eaufrance.fr/], une relation linéaire entre le BFI et l'IDPR est apparue pour les 85 bassins sédimentaires, avec un coefficient de corrélation satisfaisant

(Figure 3). Pour les formations karstiques, de socle et plissées, le BFI semble distribué autour d'une valeur moyenne, indépendamment de la valeur de l'IDPR.

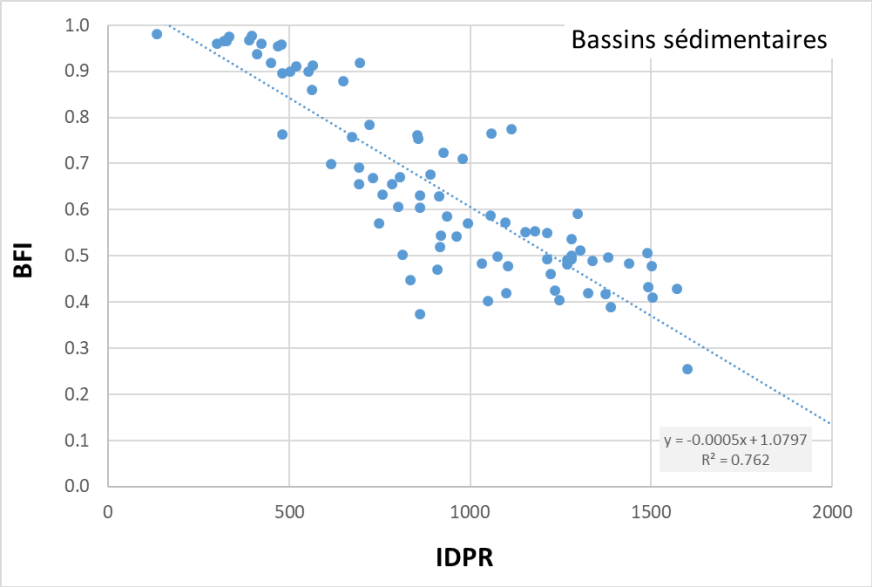


Figure 3 : Relation entre le BFI et l'IDPR pour les bassins sédimentaires

Pour transformer la carte d'IDPR en carte de RIPE, l'IDPR moyen est calculé pour chaque masse d'eau souterraine de la BDLisa. La valeur obtenue est convertie en BFI (donc en RIPE) en appliquant le relation linéaire mise en évidence pour les entités sédimentaires (auxquelles on ajoute les entités alluviales et volcaniques, trop peu nombreuses dans notre échantillon pour être étudiées spécifiquement). Pour les bassins volcaniques, un seuil minimum est imposé au RIPE pour tenir compte des résultats des travaux spécifiques sur le bassin Adour-Garonne [Le Cointe et al., 2019]. Pour les formations karstiques, de socle et plissées, en l'absence de relation évidente entre le RIPE et l'IDPR, une valeur moyenne est retenue (Tableau 1).

Formations	**Formule de calcul du RIPE**
Sédimentaire et alluvial	RIPE = -5.10^{-4} . IDPR + 1.0797 avec RIPE≤1
Volcanique	RIPE = = -5.10^{-4} . IDPR + 1.0797 avec 0.75≤RIPE≤1
Karst et socle	RIPE = 0.55
Plissées	RIPE = 0.65

Tableau 1 : Formules de calcul du BFI en fonction de la nature lithologique du bassin

En multipliant la carte de pluie efficace annuelle (voir Figure 1) par la carte du RIPE ainsi obtenue, on produit la carte de recharge annuelle (période 1981 – 2010) à l'échelle des masses d'eau (Figure 4).

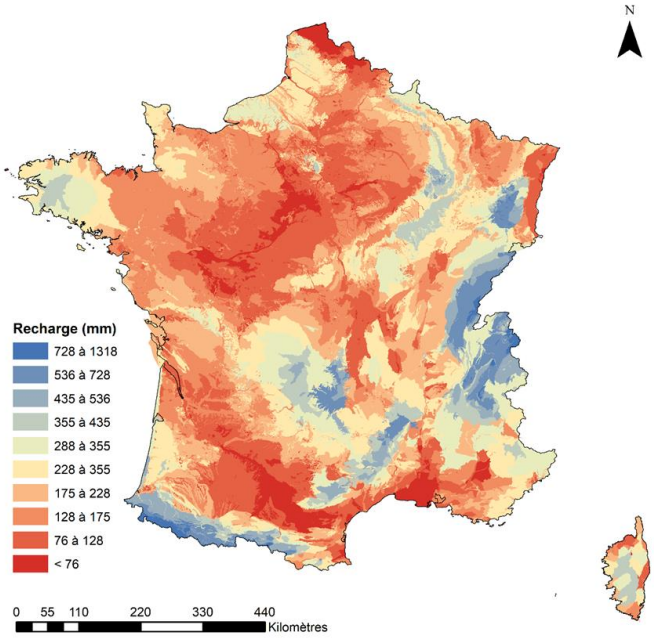


Figure 4 : Recharge annuelle moyenne 1981 – 2010 calculée à l'échelle des masses d'eau pour la France métropolitaine

III.2 Recharge future

L'anomalie de pluie efficace est définie comme la différence entre la pluie efficace moyenne de l'horizon ciblé, et celle de la période de référence 1981-2010, rapportée à la pluie efficace de la période de référence. Avec l'hypothèse de constance du RIPE dans le temps, les cartes d'anomalie de recharge sont égales à celles d'anomalie de pluie efficace. L'évolution future de la recharge est uniquement liée à celle de la pluie efficace. On présente sur la Figure 5 les cartes d'anomalies de pluie efficace pour les deux scénarios d'émissions simulés, et pour deux horizons : 2030 (moyenne des pluies efficaces annuelles sur la période 2021 – 2040) et 2080 (moyenne sur la période 2071 – 2090). Les cartes d'incertitudes associées sont présentées sur la Figure 6.

A l'horizon 2030, quel que soit le scénario, les résultats de la modélisation prévoient une baisse modérée de la recharge directe des aquifères (inférieure à 10%) sur la majorité du territoire, en dehors du bassin parisien et du pourtour méditerranéen où elle pourrait atteindre 20%. C'est également le cas du bassin aquitain dans le scénario RCP8.5. A un horizon temporel plus lointain, les deux scénarios divergent. Le scénario RCP2.6 permet de revenir à des valeurs proches de l'actuel, en dehors du nord du bassin parisien. En revanche, dans le scénario pessimiste RCP8.5, une majorité des aquifères voient leur recharge diminuer de 10 à 30% à l'horizon 2080, avec des zones plus tendues dans le bassin parisien, le pourtour méditerranéen et la Corse.

Il faut noter cependant que les incertitudes associées à ces calculs (exprimées à l'aide du MAD) sont importantes (Figure 6). En général comprises entre 5% et 20%, elles peuvent atteindre 50% en certaines mailles. Globalement, plus les anomalies estimées sont importantes, plus l'incertitude associée est forte.

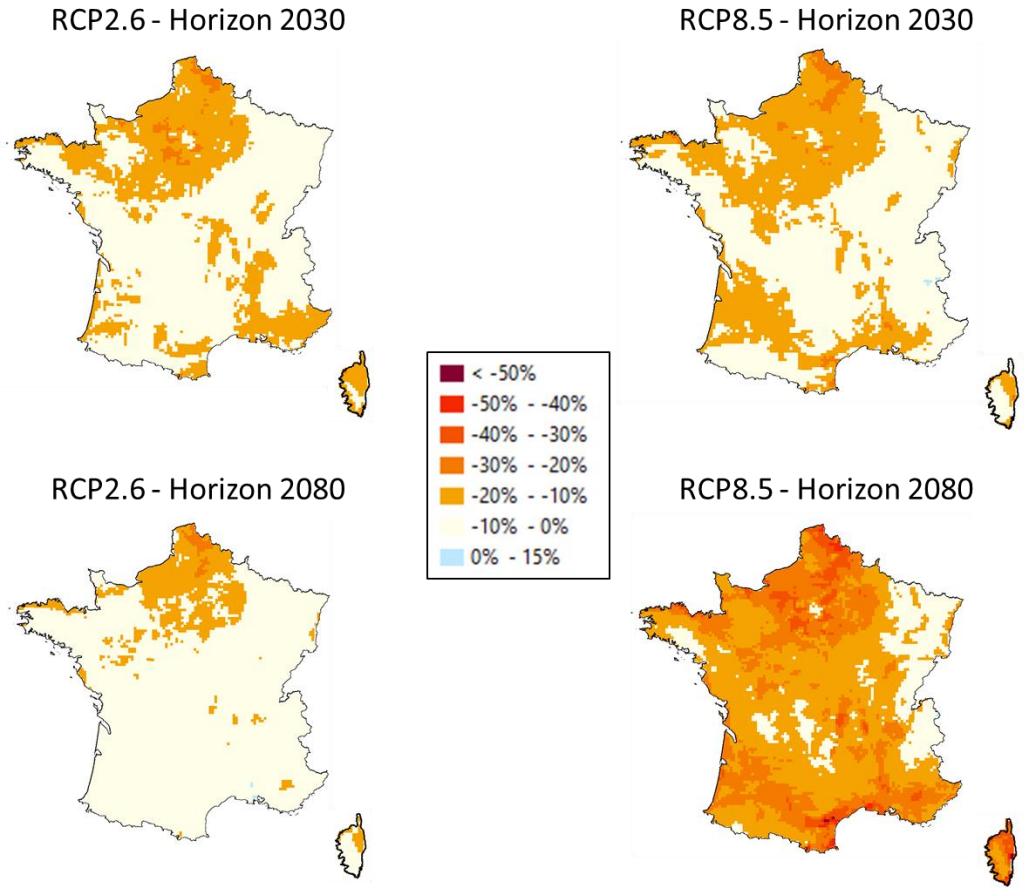


Figure 5 : Anomalie de pluie efficace (par rapport à la période 1981 – 2010) pour la France métropolitaine aux horizons 2030 et 2080 pour deux scénarios climatiques (RCP2.6 et RCP8.5)

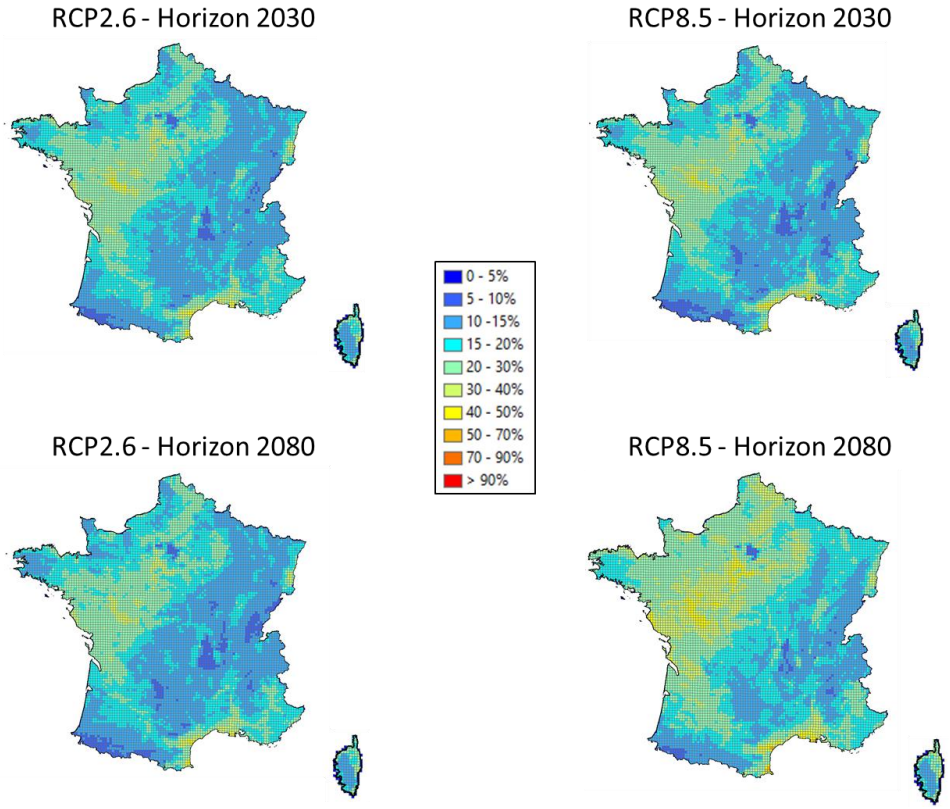


Figure 6 : Incertitudes associées aux estimations de pluie efficace aux horizons 2030 et 2080

IV CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthodologie développée, basée sur modélisation d'ensemble de modèles hydrologiques et de projections climatiques et s'appuyant sur une valorisation de l'IDPR, a permis d'estimer la recharge future des aquifères à l'échelle de la France. Les projections futures pour le scénario RCP 8.5 indiquent une baisse de la recharge potentielle de l'ordre de 10 à 30% pour la majorité des aquifères du pays. Néanmoins, l'incertitude associée aux résultats est importante, et d'autant plus grande que la recharge future est en baisse par rapport à la situation actuelle. Les principales perspectives de ce travail résident dans l'amélioration du calcul du RIPE, et dans la prise en compte de sa variation dans le temps et en fonction des conditions météorologiques ou hydrogéologiques. Il est aussi envisagé d'intégrer l'occupation du sol dans le calcul de la pluie efficace. Un effort sera également porté sur la quantification des incertitudes à chaque étape du calcul, et sur l'évaluation de la part de la recharge potentielle qui contribue effectivement à la ressource en eau stockée dans l'aquifère.

V REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée grâce au soutien financier de l'agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse et du BRGM. Les auteurs remercient également J. Lechevalier pour sa contribution aux calculs et à la cartographie du RIPE.

VI REFERENCES

Boughton W.C. (1993) *A hydrograph-based model for estimating the water yield of ungauged catchments*, paper presented at Hydrology and Water ResourceS symposium Inst. of Eng. Aust., Newcastle, N.S.W.,1993

Chapman T.G. and Maxwell A.I. (1996) *Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments*. Institute Engineers Australia National Conference.

Dayon G. (2015) *Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies*. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

De Vries, J. J. and Simmers I. (2002) *Groundwater recharge: an overview of processes and challenges*, Hydrogeol. J., 10(1), 5-17

Dingman S. L. (2002) *Physical Hydrology*, pp.575, Waveland Press, 2nd edition, ISBN: 978-1-57766-561-8

DoneSol INRA (2014) *Dictionnaire de données*, INRA, Version du 1er mai 2014, https://dw3.gissol.fr/login, last accessed 13/04/2016

Eckhardt, K. (2005) *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*, Hydrol.Process., 19(2), 507-515

Edijatno et Michel C. (1989) *Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres*. La Houille Blanche, n°2, pp 113-122.

Furey P.R. and Gupta V.K. (2001) *A physically based filter for separating base flow from streamflow time series*. Water Resources Research 37(11), 2709-2722

Gustard A., A. Bullock and J. M. Dixon (1992), *Low flow estimation in the United Kingdom*, Report n°108, Institute of Hydrology, ISBN 0 948540 45 1

Krysanova V., Donnelly C., Gelfan A., Gerten D., Arheimer B., Hattermann F., Kundzewicz Z.W. (2018) *How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change*. Hydrological Sciences Journal, 63:5, 696-720

Le Cointe P., Arnaud L., Beranger S., Caballero Y., Lanini S. (2019) – *Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin AdouR-GaronnE (RECHARGE)*. Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, 142 p., 52 ill., 12 tab., 7 ann.

Lyne V ., and Hollick M. (1979) *Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling*, I.E. Aust. Natl. Conf. Publ. 79/10, pp. 89-93, Inst. of Eng. Aust., Canberra, ACT, 1979.

Mardhel, V., Frantar P., Uhan J. and Miso A. (2004). *Index of development and persistence of the river networks as a component of regional groundwater vulnerability assessment in Slovenia*. International conference on groundwater vulnerability assessment and mapping, Ustron, Poland, 15-18 June 2004

Pagé, C., L. Terray et J. Boé, (2009) *Dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology*. Technical Report TR/CMGC/09/21, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France

Thornthwaite, C. W. (1948) *An approach toward a rational classification of climate*, Geograph. Rev., 38, 55-94,

Vidal, J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon and J. M. Soubeyroux (2010) *A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system*, Int.J.Climatol., 30(11), 1627-1644.

Yongdai K., Ilsang O., Jae-Kyoung L., Young-Oh K. (2019) *Generalizing uncertainty decomposition theory in climate change impact assessments*. Journal of Hydrology X (3) 100024.