

Influence historique de l'irrigation dans le bassin de la Seine

Agnès Ducharne^{1*}, Pedro Arboleda-Obando¹, Lucia Rinchuso¹, Luiza Vargas¹, Aurélien Baro¹, Amen Al-Yaari¹, Frédérique Cheruy², Eric Sauquet³

¹ UMR METIS / Sorbonne Université, CNRS, EPHE, IPSL, Paris

² Laboratoire de Météorologie Dynamique / Sorbonne Université, CNRS, Ecole Normale Supérieure, Ecole Polytechnique, IPSL, Paris

³ UR RiverLy / INRAE, Villeurbanne

* agnes.ducharne@upmc.fr

Résumé

L'irrigation vise à augmenter et stabiliser les rendements agricoles, notamment face aux sécheresses, dont on attend l'intensification sous l'effet du réchauffement climatique. La littérature scientifique montre cependant que, si l'irrigation réduit les sécheresses agronomiques, elle augmente les sécheresses hydrologiques. Pour préciser les impacts potentiels de l'irrigation sur l'hydrologie et le climat régional du bassin de la Seine, nous nous sommes d'abord appuyés sur des observations sans pouvoir mettre en évidence de relation évidente. Nous espérons pouvoir approfondir cette analyse grâce à la modélisation, qui permet de comparer des situations avec et sans irrigation, toutes choses par ailleurs. Cette démarche est illustrée à partir de simulations climatiques globales réalisées pour le sixième rapport du GIEC. La description de l'irrigation qui vient d'être implémentée dans le modèle ORCHIDEE offre ainsi de nombreuses perspectives, y compris pour aborder l'évolution future de l'hydrosystème Seine.

Points clefs

- ✓ Les surfaces irriguées ont été multipliées par 4 depuis 1970 dans le bassin de la Seine, et par 3 sur la seule décennie 1970-1980
- ✓ Pas de tendance robuste des débits observés tout au long de la période 1979-2021 malgré une faible augmentation de l'évapotranspiration
- ✓ Le modèle ORCHIDEE permet de décrire l'irrigation et son influence sur les ressources en eau mais il doit être mieux validé dans le bassin de la Seine

Abstract

Irrigation aims to increase and stabilize agricultural yields, particularly in the face of droughts, which are expected to intensify as a result of global warming. However, the scientific literature shows that, while irrigation reduces agronomic droughts, it increases hydrological droughts. In order to specify the potential impacts of irrigation on the hydrology and regional climate of the Seine basin, we firstly relied on observations without being able to highlight any obvious relationship. We hope to deepen this analysis thanks to modelling, which allows us to compare situations with and without irrigation, all other things being equal. This approach is illustrated using global climate simulations carried out for the sixth IPCC report. The description of irrigation that has just been implemented in the ORCHIDEE model thus offers numerous perspectives, including the assessment of the future evolution of the Seine river basin.

Key points

- ✓ Irrigated surfaces have multiplied by 4 since 1970 in the Seine basin, and by 3 in the 1970-1980 decade alone
- ✓ No robust trend in observed streamflows throughout the period 1979-2021 despite a slight increase in evapotranspiration
- ✓ The ORCHIDEE model can be used to describe irrigation and its influence on water resources, but it must be better validated in the Seine basin

Introduction

Comme la fertilisation, la mécanisation, la sélection variétale, et les produits phytosanitaires, l'irrigation fait partie des techniques agricoles le plus recommandées pour augmenter et stabiliser les rendements des cultures, ce qui explique par exemple l'irrigation de la pomme de terre dans le nord du bassin de la Seine. Toutefois, à l'image de ces autres techniques, l'irrigation ne doit pas être employée aveuglément vu les effets pervers qui peuvent l'accompagner.

Outre la salinisation des sols, les principaux inconvénients de l'irrigation résultent de sa dépendance extrême aux ressources en eau, qui sont nécessaires pour permettre une irrigation utile, mais qui diminuent si l'irrigation augmente. En d'autres termes, si l'irrigation vise à réduire les sécheresses agronomiques, elle augmente les sécheresses hydrologiques (Wan et al., 2018), ce qui justifie d'ailleurs les mesures de restriction des prélèvements en période de sécheresse pour protéger la ressource. Ce type de situations, de plus en plus fréquentes en France (MTE, 2020), soulève un autre problème quant à l'efficacité et la durabilité de l'irrigation. En effet, plus la surface équipée pour l'irrigation est importante, plus l'est aussi la surface plantée avec des cultures à forte demande en eau, qui produisent un rendement élevé si elles sont bien alimentées en eau, mais qui sont moins résilientes aux sécheresses que d'autres. Leur rendement est donc très vulnérable aux sécheresses intenses, lors desquelles les prélèvements sont soit interdits, soit tout bonnement impossibles faute d'eau. Augmenter les surfaces irriguées augmente donc la vulnérabilité aux sécheresses intenses, y compris si l'irrigation est alimentée par des réservoirs artificiels (Habets, 2019).

Ces considérations montrent que l'irrigation, pour être utile, doit être maîtrisée et adaptée aux ressources en eau disponibles et à leur variabilité saisonnière et interannuelle. Cette péréquation est déjà compliquée en climat stationnaire et si l'on veut aussi répondre aux demandes pour d'autres usages que l'irrigation, mais elle peut devenir extrêmement délicate alors que le climat change, de plus en plus vite, sous l'influence des activités humaines (Masson-Delmotte et al., 2021). C'est notamment le cas en France métropolitaine, où les ressources en eau ont commencé à baisser depuis le début du XXI^{ème} siècle suite à une augmentation de l'évaporation avec le réchauffement (MTE, 2022), baisse que la grande majorité des projections climatiques voient se renforcer encore (d'autant plus que les émissions en GES progresseront au niveau mondial), notamment dans une large moitié sud du pays, et dans toute la France en été (*e.g.* Ducharme et al., 2007 ; Habets et al., 2013 ; Dayon et al., 2018).

Dans ce contexte, faut-il voir dans l'irrigation, même soutenue par des réserves artificielles nouvelles qui ne seront pas forcément remplies puisque les ressources baisseront, la meilleure piste d'adaptation au changement climatique parmi celles évoquées dans les conclusions du « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique » publiées en février 2022 ? Par ailleurs, de nombreuses études ont montré, par la modélisation climatique ou l'analyse d'observations, que l'irrigation influençait le climat régional, en diminuant la température de l'air (Thiery et al., 2020), mais avec des effets très variables sur les précipitations (Al-Yaari et al., 2019). On peut enfin se demander dans quelle mesure l'irrigation peut donc moduler la trajectoire du changement climatique régional, comme démontré récemment par Arboleda-Obando et al. (2022) concernant l'humectation des sols par les eaux souterraines.

Dans cet écheveau complexe, la question de recherche qui nous anime dans cette étude est d'identifier si et comment l'irrigation est susceptible d'influencer tant le fonctionnement hydrologique que le climat régional dans le bassin de la Seine. Cette question est explorée en section 1 de ce rapport sur la période historique, à partir d'une analyse d'observations des débits et de l'irrigation, puis en section 2 à partir des résultats de plusieurs outils de modélisation (modèle de surface continentale ORCHIDEE, modèles de climats déployés pour l'exercice CMIP6 qui alimentent le sixième rapport du GIEC). Une perspective de ce travail sera de compléter l'analyse en climat futur.

1. Données historiques

Dans cette partie, à partir de l'analyse d'observations passées, nous cherchons à examiner l'hypothèse selon laquelle l'augmentation historique des surfaces irriguées dans le bassin de la Seine pourrait entraîner une tendance baissière des débits, comme il est très probable dans les zones fortement irriguées de la planète (Scanlon et al., 2007), ainsi qu'en Espagne et dans le Sud-Ouest de la France (Vicente-Serrano et al., 2019). Il est important de noter que l'analyse des observations ne permet jamais une inférence absolue à cause du bruit météorologique provenant des imprécisions et erreurs de mesures, et des nombreux autres facteurs d'évolution du milieu, comme la mise en place des barrages-réservoirs, l'urbanisation et tous les changements d'occupation des sols et de pratiques agricoles (drainage, fertilisation, etc. ; Mignolet et al., 2012), ainsi que le changement climatique déjà réalisé sur la période historique (Sterling et al., 2013).

1.1. Données sur l'irrigation

Nous nous appuyons sur plusieurs sources de données complémentaires sur l'irrigation et son évolution dans le bassin de la Seine.

Les données de prélèvements pour l'irrigation et les autres usages sont disponibles sur la période 2012-2018 dans la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE), où sont bancarisés les volumes prélevés déclarés par les usagers soumis à la redevance pour prélèvement auprès des agences et offices de l'eau, pour ceux qui sont supérieurs à 10 000 m³/an (ou 7 000 m³/an dans les zones de répartition des eaux, c'est-à-dire celles où un déficit durable de la ressource en eau est reconnu). Les prélèvements inférieurs à ce seuil ne sont pas comptabilisés dans la BNPE. Les prélèvements sont documentés au pas de temps annuel par point de prélèvement. Nous avons spatialisé les prélèvements 2018 en agrégeant les valeurs ponctuelles par commune.

Pour les surfaces irriguées, la source principale est le recensement agricole (RA) 2010, avec des données de surface irriguée fournies à l'échelle communale. Nous n'avons pas encore réussi à obtenir les données équivalentes issues du RA 2020 et nous nous sommes donc appuyés sur une note de France Nature Environnement (FNE, 2022) qui indique une augmentation des surfaces irriguées de 15% entre 2010 et 2020 en France à partir des données du RA 2020 agrégées au niveau régional. On note que certaines des fortes augmentations régionales recoupent partiellement le bassin de la Seine (+78% en Hauts de France), avec aussi de fortes augmentations en Normandie et Ile-de-France (+26% et +14% respectivement).

Nous n'avons pas encore traité les données de surface irriguée dans les RA antérieurs à 2010, et pour documenter les évolutions anciennes, nous avons exploité les données de surface effectivement irriguée du projet LUH2 (*Land-Use Harmonization*, Hurtt et al., 2020), disponibles sur l'ensemble des continents à la résolution de 1/4° (environ 25 km en longitude et 17 km en latitude dans le bassin de la Seine) sur la période 1900-2100. Cette base constitue la source de l'occupation du sol dans les simulations climatiques CMIP6 (Eyring et al., 2016) historiques et futures analysées dans le sixième rapport du GIEC (Masson-Delmotte et al., 2021). Sur la période historique, les cartes annuelles viennent de la base HYDE (Klein Goldewijk et al., 2017), et sont basées en France sur les données suivantes, comme détaillé dans Vargas (2022) :

- 1900-1960 : cartes de surfaces équipées pour l'irrigation reconstruites tous les 10 ans dans la *Historical Irrigated Database* (HID, Siebert et al., 2015) et transformées en surfaces effectivement irriguées à partir des cartes de ces deux types de surfaces irriguées en 2005 dans la base FAO/Aquastat « Global Map of Irrigation version 5 » (GMIA5, Siebert et al., 2013)
- 1960-2005 : données nationales FAOSTAT de surface effectivement irriguées distribuées selon le motif spatial de la base MIRCA (Portmann et al., 2010) autour de l'année 2000.

La Figure 1 montre que les prélèvements pour l'alimentation en eau potable et l'industrie sont distribués de manière beaucoup plus régulière dans le bassin de la Seine que ceux pour l'irrigation, qui sont logiquement concentrés dans les zones où la part irriguée des communes est la plus forte (

Figure 2-gauche). Ces zones se retrouvent principalement en Beauce, au sud de la Seine, sur l'Oligocène (nappe de Beauce), et en Champagne sèche, à l'est de Paris, sur le Crétacé supérieur (nappe de la craie).

La Figure 2-droite montre enfin une très forte augmentation des surfaces effectivement irriguées dans le bassin de la Seine, qui ont été multipliées par plus de 4 entre 1970 et 2000. La baisse ultérieure selon la base globale LUH2, compatible avec les tendances départementales reportées par Loubier et al. (2013), devra être vérifiée à partir des données des RA 1970, 1979, 1988, 2000, et 2020. Il faut enfin noter que le bassin de la Seine, avec une surface irriguée totale de 164 337 ha selon le RA 2010, ne contient que 3% des surfaces

irriguées françaises, concentrées dans les bassins Adour-Garonne, Loire-Bretagne et Rhône-Méditerranée-Corse (83% à eux trois selon le RA 2010).

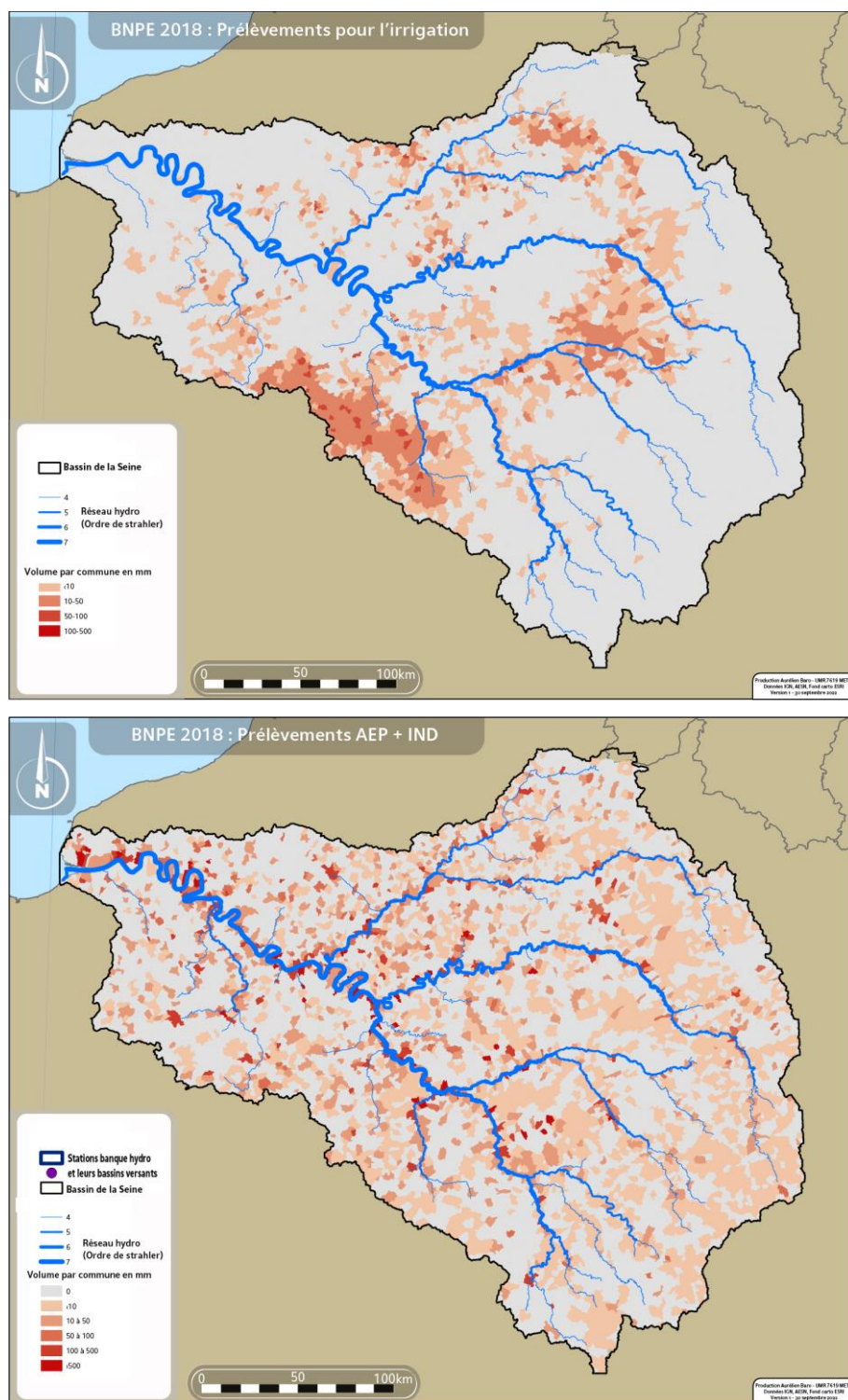


Figure 1. Prélèvements 2018 en mm/an dans les communes du bassin de la Seine : (haut) pour l’irrigation, (bas) pour l’alimentation en eau potable et l’industrie (hors navigation et énergie). Source BNPE.

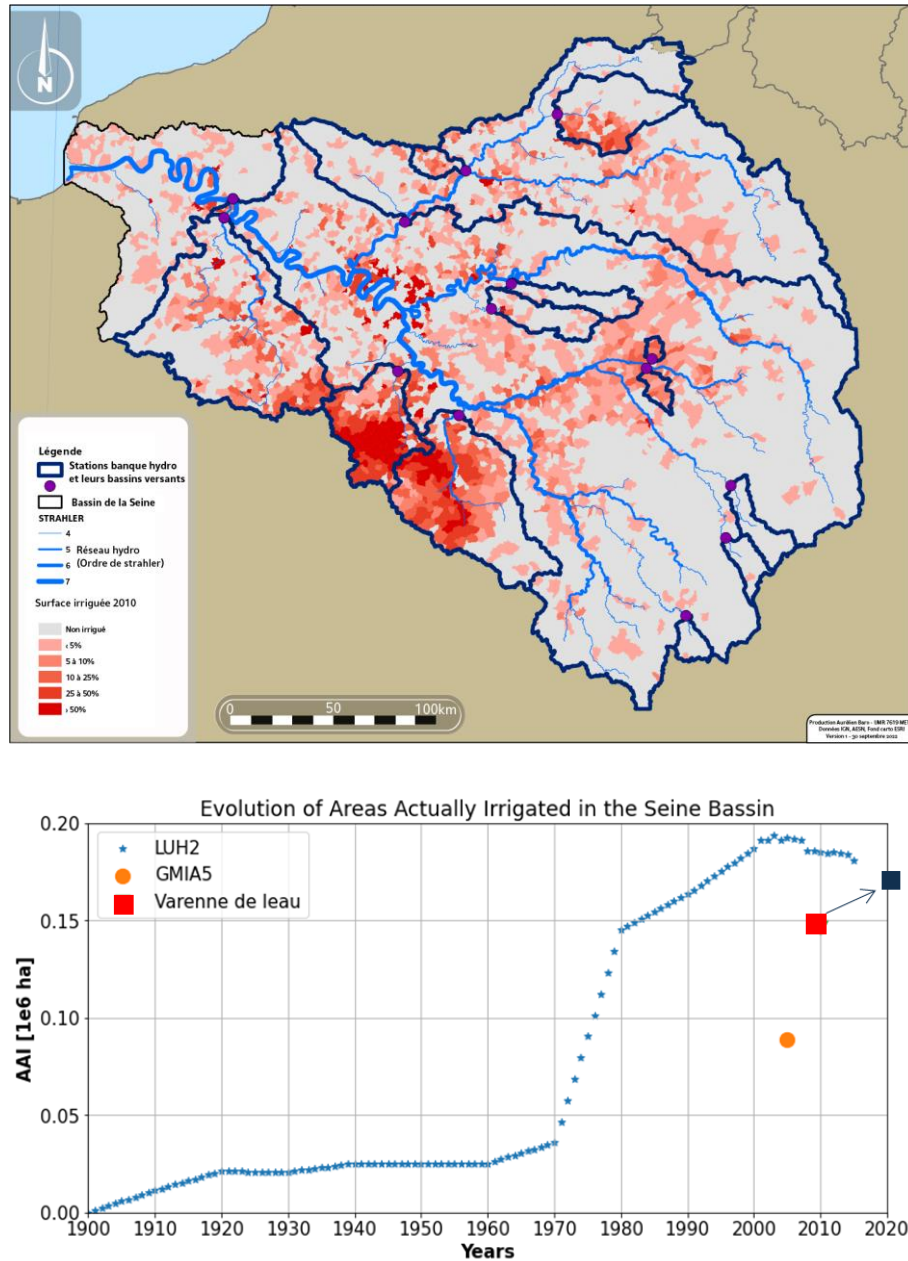


Figure 2. Surfaces irriguées dans le bassin de la Seine : (haut) pourcentage par commune selon le RA 2010, (bas) évolution de la surface effectivement irriguée totale dans le bassin depuis 1900 (en millions d’hectares) selon les bases globales LUH2 (depuis 1900) et GMIAS (en 2005), et selon le RA 2010 (Varenne de l’eau, carré rouge), avec une estimation 2020 (carré bleu foncé) en multipliant la valeur 2010 par l’augmentation nationale de +15% des surfaces irriguées (FNE, 2022). La carte de gauche montre les 14 bassins versants sélectionnés pour l’étude des tendances hydro-climatiques en section 1.3.

1.2. Données hydro-climatiques

Nous analysons ici les évolutions climatiques dans le bassin de la Seine selon la base de données SAFRAN (Vidal et al., 2010), qui renseigne les précipitations, températures de l’air à 2 m et évapotranspiration potentielle (ETP) sur tout le territoire métropolitain depuis 1958 au pas de temps journalier et à la résolution de 8x8 km². La tendance passée de chacune de ces variables est estimée comme la pente de la droite de régression entre les moyennes annuelles de la variable et les années (représentée en couleur sur la Figure 3). La significativité statistique de la régression est évaluée par un test de Fisher avec une p-value de 0.05.

Les tendances des moyennes annuelles de ces variables climatiques sont comparées en Figure 3 et en Tableau 1 aux tendances des débits moyens annuels à l’aval du bassin (stations hydrométriques de Poses de

1941 à 2006, et Vernon de 1975 à 2020). Les données de débits analysées dans ce rapport (Poses, Vernon et 13 autres stations décrites plus bas) sont toutes issues de l’Hydroportail (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>).

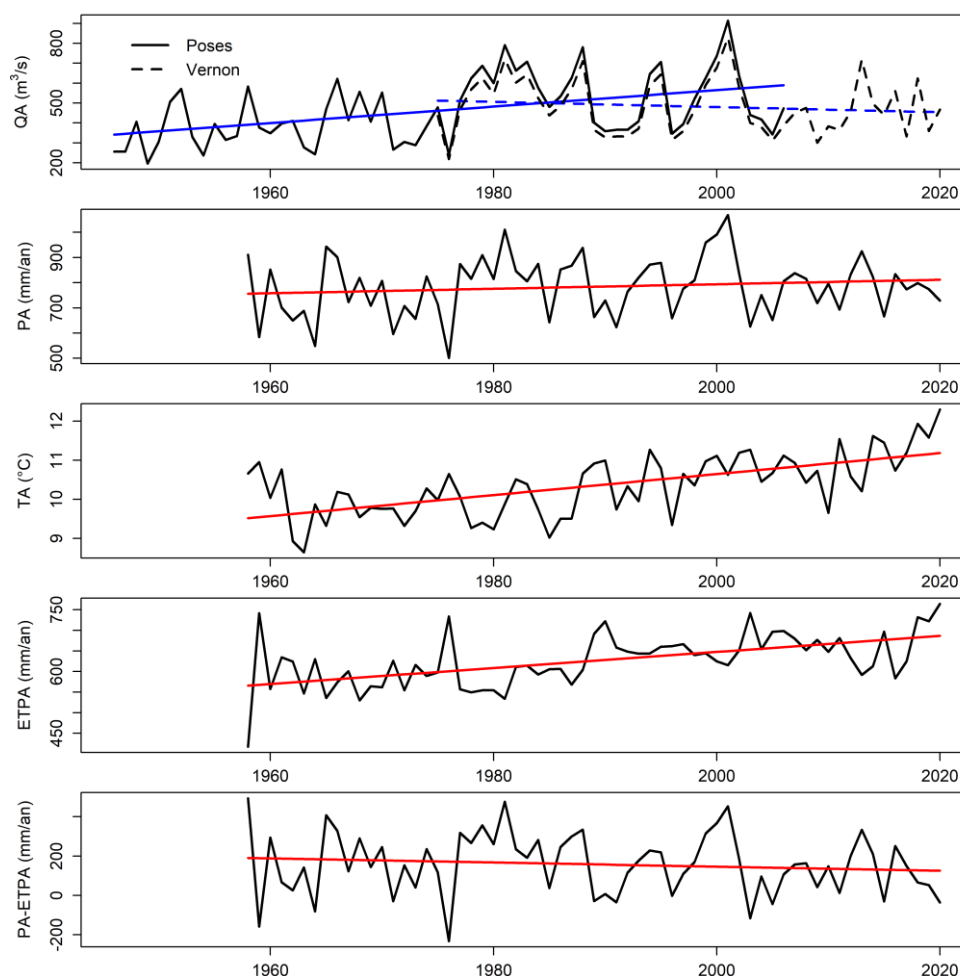


Figure 3. Evolution temporelle des moyennes annuelles de plusieurs variables hydro climatiques entre 1941 et 2020. De haut en bas : débit à Poses et Vernon, et moyennes spatiales dans le bassin de la précipitation, température de l’air à 2 m, ETP, et pluie efficace. Les droites de régression entre moyennes annuelles de variables et années apparaissent en couleur.

Tableau 1. Récapitulatif des tendances hydro-climatiques passées dans le bassin de la Seine sur les périodes indiquées en deuxième colonne. Détails sur le calcul des tendances et de leur significativité dans le texte.

Variables	Période analysée	Tendance moyenne par décennie
Précipitations P	1958-2020	+9 mm/an / dec
Température à 2 m	1958-2020	+0.27 °C / dec
ETP	1958-2020	+19.5 mm/an / dec
Précipitations efficaces (P-ETP)	1958-2020	-10.5 mm/an / dec
Débits à Poses	1941-2006	+41 m³/s / dec
Débits à Vernon	1975-2020	-13 m³/s / dec

La Figure 3 et le Tableau 1 montrent une augmentation significative de la température de l’air dans le bassin de la Seine depuis 1958, qui est la conséquence du réchauffement climatique global. La tendance de +0.27°C par décennie amène à un réchauffement d’environ +1.6°C au cours des 60 dernières années, tout à fait cohérent avec l’estimation récente d’un réchauffement moyen en France de +1.66°C depuis 1900-1930, principalement porté par les 60 dernières années (Ribes et al., 2022). Ce réchauffement explique l’augmentation, elle aussi significative, de l’ETP, alors que les précipitations efficaces, définies par la

différence entre les précipitations et l'ETP annuelles, montre une décroissance non significative, car l'augmentation de l'ETP est partiellement compensée par une légère augmentation des précipitations.

Les variations de débit à Poses et Vernon sont très cohérentes sur la période commune car les deux stations sont très proches et non séparées par un affluent important. On peut aussi noter une forte similitude entre les variations interannuelles des débits à ces stations et les précipitations efficaces moyennes sur le bassin. Les tendances pluriannuelles à Poses et Vernon sont cependant de signe différent, car elles ne sont pas extraites sur la même période. Ceci est révélateur d'une variabilité basse fréquence importante devant de possibles tendances de long terme (Boé et Habets, 2014 ; Bonnet et al., 2020 ; Baulon et al., 2022), et qui peut donc masquer ces dernières.

Tableau 2. Synthèse de l'irrigation et des tendances de débit dans l'échantillon des 14 stations / bassins versants sélectionnés : les 11 premiers avec irrigation, les 3 derniers sans. QA désigne le débit annuel, QMNA le débit mensuel minimum de chaque année. Pour chaque période, le tableau donne d'abord leur moyenne interannuelle en m³/s, puis leur tendance (pente de la droite de régression, en % de la moyenne interannuelle 1989-2021). Les pentes négatives/positives sont en orange/vert, et en gras si le coefficient de détermination $R^2 > 0.1$. La dernière colonne donne la différence relative de pente (DRP, cf Equation 1) en 1989-2021.

Code SANDRE Bassin		Fraction irriguée 2010 %	Prélèvements 2018		1979-2021		1989-2021					
			Irrigation mm	Totaux mm	QA m3/s	Pente %/dec	QA m³/s	Pente %/dec	QMNA m³/s	Pente %/dec	DRP %/dev	
H4042010	Essonne à Ballancourt	39,9	27,7	49,3	8,7	-8,65	8,0	1,01	6,03	-0,27	-1,21	
H1503910	Herbissonne à Allibaudières	15,3	26,6	26,6	0,3	-14,15	0,3	19,12	0,02	-13,49	-20,27	
H1513210	Barbuise à Pouan	8,5	18,5	24,7	0,8	-7,30	0,7	12,45	0,19	8,87	-10,02	
H3621010	Loing à Episy	12,3	14,2	33,9	20,3	-2,54	18,6	11,92	6,58	12,70	-7,44	
H7423711	Aronde à Clairoix	6,0	12,0	32,9	1,2	-13,92	1,1	-8,35	0,67	-13,83	-0,19	
H7162010	Serre à Pont à Bucy	3,3	6,4	14,3	14,6	-6,25	13,9	-2,33	6,55	-5,83	-0,43	
H9501010	Eure à Louviers	4,7	4,1	30,1	25,1	-6,13	23,5	-0,09	15,57	0,03	0,11	
H8110010	Seine à Vernon	2,9	3,7	2643,9	504,7	-6,00	481,2	5,54	215,60	1,93	-4,67	
H7611010	Oise à Creil	1,2	2,4	653,9	111,3	-6,50	104,5	0,08	39,18	-0,32	-0,20	
H5412020	Petit Morin à Jouarre	0,7	0,7	9,8	3,4	-5,06	3,4	0,45	1,14	-5,88	-2,44	
H5732010	Grand Morin à Pommeuse	0,7	0,5	12,1	5,5	-8,48	5,2	-9,25	2,31	-3,33	7,76	
H0321030	Ource à Attricourt	0	0	64,7	6,4	-8,65	5,9	5,01	0,79	-1,27	-5,19	
H0100010	Seine amont à Nod	0	0	2,1	4,6	-7,12	4,3	2,98	0,68	-0,89	-3,12	
H2322010	Serein à Bierre	0	0	0,8	2,4	-10,26	2,2	3,51	0,15	6,83	-3,05	

1.3. Tendances de débit en 14 stations contrastées sur l'irrigation

Pour explorer davantage la possibilité d'un lien entre l'irrigation et des tendances baissières des débits, soit en moyenne, soit en basses eaux, nous avons travaillé sur un échantillon de 14 stations hydrométriques où les débits sont disponibles sans trop de lacunes sur la plus longue période commune possible, à savoir 1979-2021 (43 ans). Il a été choisi de débuter les analyses en 1979 pour s'affranchir au maximum de l'influence de la sécheresse 1976 au début des chroniques, qui pourrait artificiellement favoriser une tendance haussière. Ce choix empêche cependant d'examiner les tendances de débits pendant la décennie 1970-1980 où l'expansion des zones irriguées a été la plus rapide (Figure 2).

Le Tableau 2 récapitule les tendances des débits dans ces 14 stations, sur deux périodes (1979-2021 et 1989-2021), et en séparant 11 stations dont le bassin est influencé à des degrés divers par l'irrigation et 3 stations non influencées qui servent de témoin. Les contours des 14 bassins définis par ces stations sont visibles sur la

Figure 2-gauche, et les 3 bassins non irrigués sont les plus à l'est.

La Figure 4 illustre les évolutions et tendances des débits à partir de l'exemple du bassin le plus irrigué de l'échantillon (l'Essonne à Ballancourt, dont 40% de la surface est irriguée en 2010), et d'un bassin témoin sans irrigation (l'Ource à Attricourt). Ces deux bassins ont des modules assez proches (entre 5 et 10 m³/s selon les périodes) mais une variabilité hydrologique très différente, liée à une influence des eaux souterraines beaucoup plus forte dans l'Essonne que dans l'Ource. Cette influence se matérialise par une faible différence entre les débits annuels (QA) et les débits mensuels minimum (QMNA) dans l'Essonne, qui traduit un bon soutien des étiages par le débit de base, et par une variabilité basse fréquence beaucoup plus marquée, comme analysé dans Baulon et al. (2022).

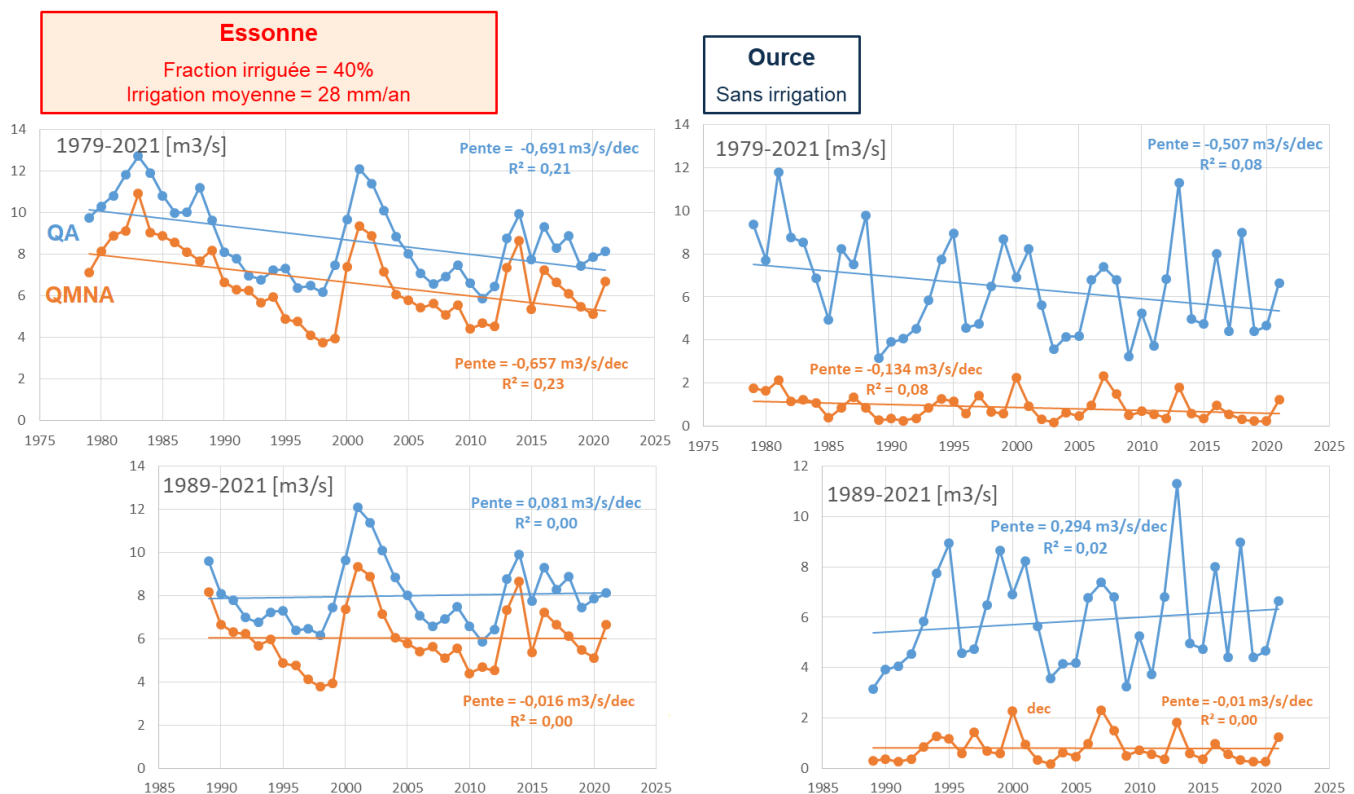


Figure 4. Tendances des débits annuels (QA en bleu) et mensuels minimum (QMNA en orange) sur la période 1979-2021 en haut et 1989-2021 en bas, avec les droites de régression, leur équation et leur coefficient de détermination. À gauche, le bassin le plus irrigué (Essonne à Ballancourt), et à droite un des bassins témoin sans irrigation (Ource à Attricourt).

Les deux bassins montrent cependant la même tendance à la baisse des QA sur la période 1979-2021. Cette tendance assez claire dans les deux cas est très probablement liée à la baisse des précipitations efficaces sur la période (Figure 3), et elle se retrouve dans les 14 bassins du Tableau 2. Elle se répercute sur les QMNA, quoique très faiblement dans l'Ource. La Figure 4 montre aussi une inversion des tendances de QA dans les deux bassins sur la période 1989-2021, plus marquée dans l'Ource qui réagit plus rapidement aux variations

de précipitation par absence de formation aquifère. Ces tendances positives sont cependant très faibles et non significative, tout comme les tendances négatives des QMNA sur cette période 1989-2021. Dans les deux bassins, en revanche, les QMNA montrent toujours une tendance baissière sur 1989-2021, quoiqu'également très faible et non significative. Au final, les différences de tendances de débit entre l'Essonne et l'Ource semblent plus marquées par l'influence des nappes souterraines que par celle de l'irrigation.

Le Tableau 2 confirme que sur l'ensemble des 14 stations étudiées, les tendances des débits sont le plus souvent non significatives ($R^2 < 0.1$), et non robustes dans le temps. Les tendances des QA sont négatives sur la période 1979-2021 dans les 14 bassins, y compris donc dans les bassins non irrigués, alors que les tendances des débits annuels sont majoritairement positives en 1989-2021, y compris dans les bassins les plus irrigués. Ces tendances semblent donc majoritairement contrôlées par la variabilité climatique. Sur cette période 1979-2021, on ne peut cependant pas exclure que l'irrigation puisse intensifier les tendances à la baisse des débits, puisque la valeur des prélèvements 2018 pour l'irrigation explique 25% de la variabilité des tendances des débits dans les 11 bassins irrigués étudiés ici (Figure 5-gauche).

Le lien entre irrigation et tendances de débit est encore plus difficile à mettre en évidence sur la période 1989-2021 où les QA tendent plutôt à augmenter. On trouve un plus grand nombre de bassins avec une baisse de QMNA (9/14) qu'avec une baisse de QA (4/11), mais cette inversion (QMNA baisse alors que QA augmente) existe aussi dans les bassins non irrigués (2/3). Dans ce contexte où la variabilité climatique tend plutôt à augmenter les débits dans le temps, nous nous sommes intéressés à la différence de tendance entre les QMNA et les QA. L'hypothèse est ici que l'irrigation devrait exercer une influence plus forte sur les QMNA, qui soit diminueraient alors que les QA augmentent, soient augmenteraient moins vite que les QA. Pour pouvoir comparer des bassins de taille et module différents, nous avons retenu une métrique de différence relative de pente, DRP, où la différence de pente de régression temporelle entre les QMNA et les QA est normalisée par le débit annuel moyen sur la période considérée (le module) :

$$DRP = \frac{Pente(QMNA) - Pente(QA)}{\text{module}} \times 100. \quad (1)$$

Comme attendu, cette métrique DRP diminue dans la plupart des bassins irrigués en 1989-2021, et la valeur des prélèvements 2018 pour l'irrigation dans ces bassins explique 43% de cette baisse (Figure 5-droite). Il est probable qu'une métrique plus robuste, c'est-à-dire exploitable en cas de tendances haussières et baissières du débit, doive impliquer la différence ou le rapport des pentes relatives de QMNA et QA (pour comparer pente(QMNA)/Moy(QMNA) et pente(QA)/module).

Surtout, les corrélations statistiques mises en évidence en Figure 5 ne doivent pas être confondues avec des preuves de l'influence de l'irrigation sur les débits. A titre d'exemple, on aurait de bonnes corrélations entre baisse des débits et irrigation si l'irrigation baisse les débits, mais aussi si la baisse des débits réduit les prélèvements pour l'irrigation (ce qui est fort plausible), et enfin si prélèvements et baisse des débits sont tous deux modulés par une tierce variable. Une solution classique pour résoudre l'impossibilité intrinsèque d'attribuer une cause à des corrélations statistiques est de recourir à la modélisation, comme abordé en section suivante.

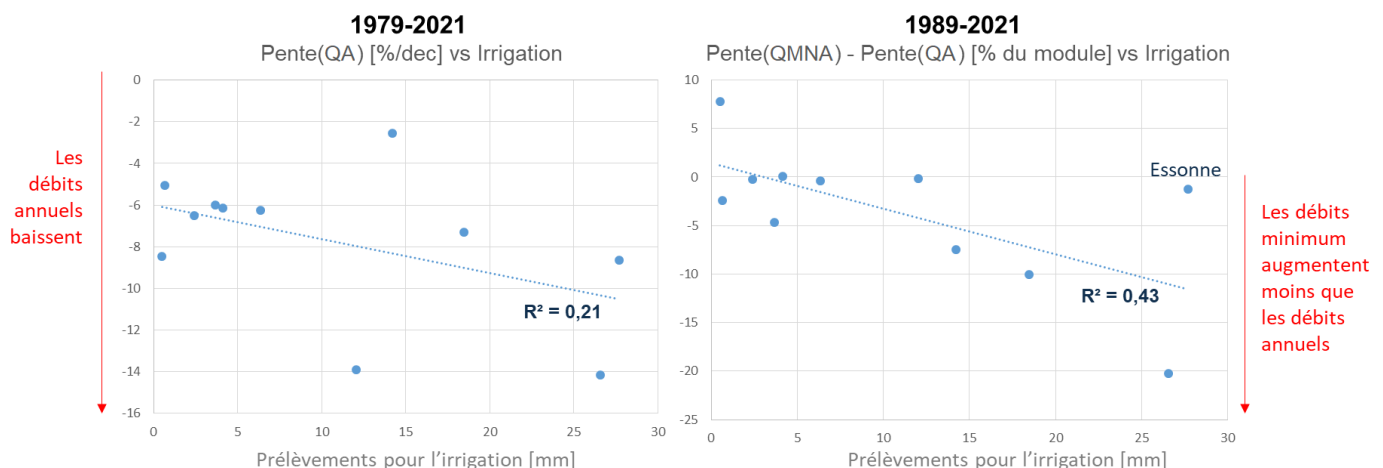


Figure 5. Régression entre les tendances hydrologiques et les prélèvements pour l'irrigation dans les 11 bassins irrigués de l'échantillon étudié. Gauche : régression avec les tendances des QA sur 1979-2021 ; Droite : régression avec les DRP en 1989-2021 (dernière colonne du Tableau 2).

2. Modélisation

L'intérêt de la modélisation pour étudier l'influence d'un facteur comme l'irrigation sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant ou le climat régional vient de ce que l'on peut facilement comparer des situations avec et sans irrigation, toutes choses égales par ailleurs, ce qui est impossible avec des observations. Si le modèle est suffisamment réaliste, la différence entre les simulations avec et sans irrigation renseigne directement sur l'impact de l'irrigation, qui est bruité dans les observations par les imprécisions et erreurs de mesures et les nombreux autres facteurs d'évolution du milieu. Nous présentons dans la suite quelques résultats préliminaires dans ce sens, qui seront complétés dans la suite de la Phase 8 du programme PIREN-Seine.

2.1. Modélisation climatique

La démarche de comparaison de simulations avec et sans irrigation a été déployée de manière non systématique à partir de l'ensemble de simulations du climat historique réalisée dans le cadre du projet international CMIP6 (*Coupled model intercomparison project Phase 6* ; Eyring et al., 2016). Ces simulations sont celles qui sont poursuivies sous scénarios de forçages radiatifs futurs pour alimenter les analyses du GIEC. Dans Al-Yaari et al. (2022), nous avons analysé les simulations historiques (1900-2014) par 18 modèles de climat globaux, dont trois seulement représentent l'irrigation, avec des paramétrisations simples où la demande en eau par les cultures est toujours satisfaite (pas de limitation de l'irrigation par la disponibilité des ressources). La comparaison de l'échantillon des trois modèles irrigués (CMIP6.irr) avec les 15 modèles sans irrigation (CMIP6.noirr) a permis de démontrer l'influence historique de cette technique agricole sur le climat régional, notamment dans les zones les plus fortement irriguées (Inde, Pakistan, Chine), où la prise en compte de l'irrigation dans 3 modèles leur permet notamment une représentation plus fidèle des évolutions de l'évaporation et de la température de l'air, par comparaison avec des estimations de ces variables basées sur de la fusion modèles/données et distribuées sur l'ensemble des continents. Nous avons repris cette analyse dans le bassin de la Seine, couvert par quelques mailles de ces modèles de climat dont la résolution est d'environ 100 x 100 km². La Figure 6 montre une évaporation beaucoup plus forte par les simulations CMP6.irr que sans irrigation, mais les tendances depuis 1970 (en termes de pente moyenne des courbes) ne sont pas notablement différentes entre les deux jeux de simulations, comme confirmé par la Figure 7 sur la période 1983-2014. Cette figure montre que, dans les deux cas, l'évapotranspiration simulée augmente sur la période récente, ce qui reproduit bien les tendances des produits basés sur des observations. Cette augmentation de quelques W/m² en 30 ans est cependant très faible par rapport l'évapotranspiration moyenne sur la période, d'environ 45 W/m². Pour les 3 autres variables de la Figure 6, les différences entre les deux jeux de simulations sont très faibles, et l'on peut juste noter que les simulations climatiques capturent les tendances documentées à partir de SAFRAN (Tableau 1) : pas de variation significative des précipitations annuelles, et augmentation des températures, avec une pente moyenne cohérente avec SAFRAN sur les 50 dernières années.

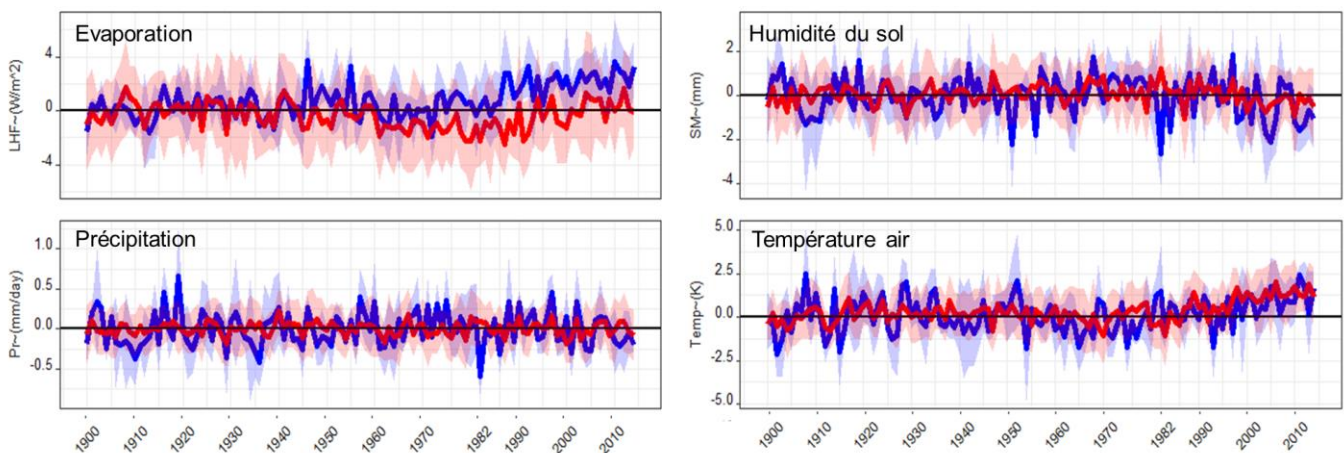


Figure 6. Evolution de 4 variables climatiques sur la période 1900-2018, en moyenne sur le bassin de la Seine. Les courbes bleues et rouges sont les moyennes des 3 et 15 simulations avec (CMIP6.irr) et sans (CMIP6.noirr) irrigation respectivement, et les enveloppes bleues et rouges correspondent à +/- un écart type autour de chaque moyenne.

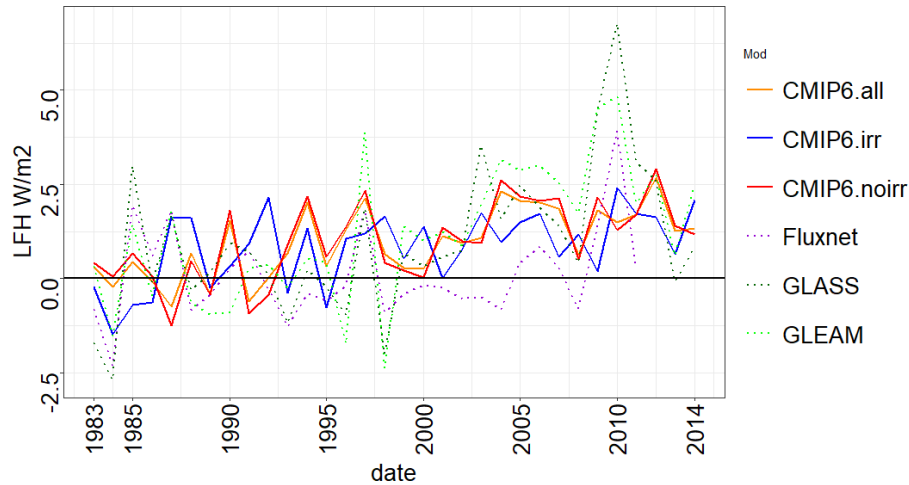


Figure 7. Comparaison des tendances d'évapotranspiration (ici exprimée en W/m^2) selon les simulations CMIP6.irr et CMIP6.noirr avec celles de 3 produits basés sur des observations. Les séries chronologiques sont toutes recentrées sur leur moyenne en 1983-1989, ce qui empêche de discerner la différence de moyenne entre les simulations CMIP6.irr et CMIP6.noirr visible en Figure 6.

2.2. Développements en cours dans le modèle ORCHIDEE de l'IPSL

Le modèle ORCHIDEE a été développé à l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) pour décrire le fonctionnement des surfaces continentales, notamment les flux d'eau, d'énergie et de carbone depuis les sols et la biosphère, dans le modèle de climat de l'IPSL (IPSL-CM6, Boucher et al., 2020). Il peut également être utilisé seul, forcé par des données atmosphériques. Dans tous les cas, le domaine simulé est subdivisé en mailles, qui ont souvent une résolution grossière, notamment dans les applications globales (de 50 à 200 km de côté dans ce cas). Les principales fonctionnalités du modèle ORCHIDEE sont décrites dans un précédent rapport PIREN-Seine (Ducharne et al., 2020).

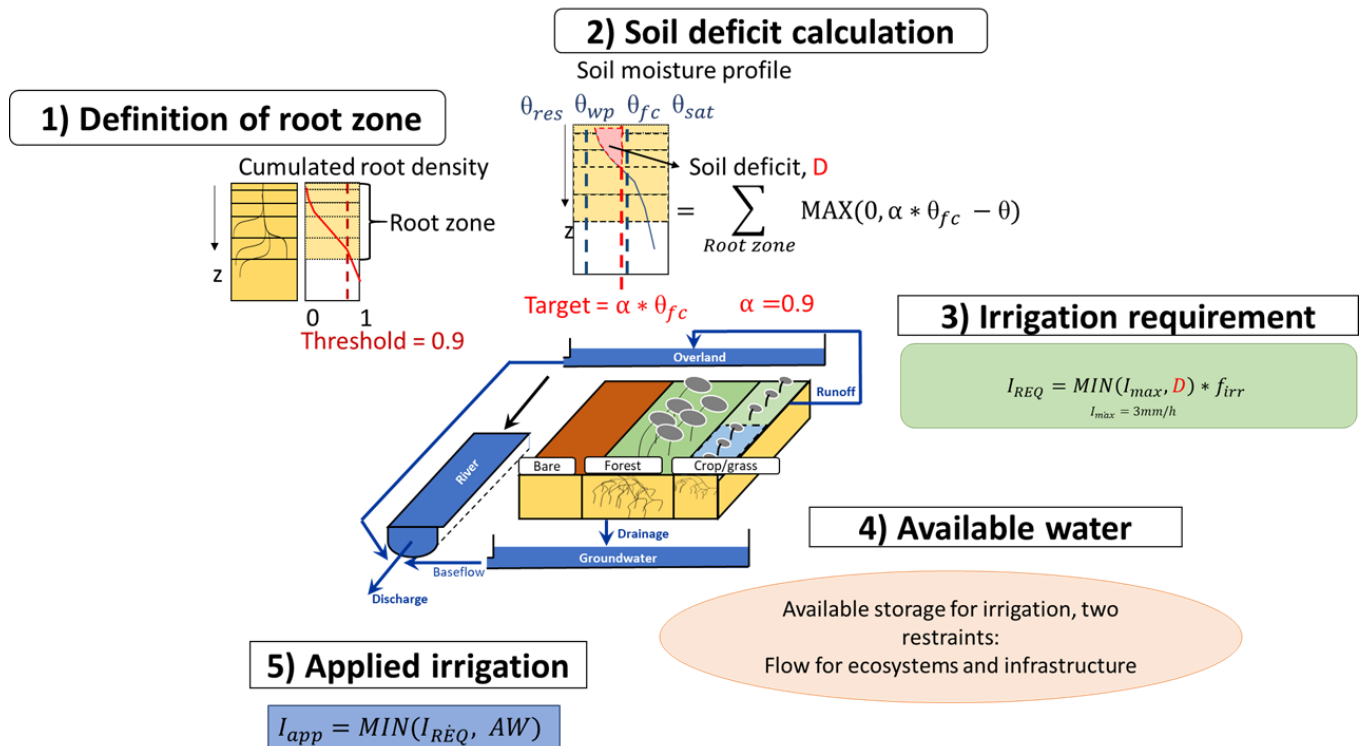


Figure 8. Schématisation de la paramétrisation de l'irrigation du modèle ORCHIDEE.

Une des simulations CMIP6.noirr sur la Figure 6 ci-dessus a été réalisée avec le modèle climatique IPSL-CM6, donc sans irrigation. Depuis, nous avons entrepris de développer une paramétrisation de l'irrigation dans le modèle ORCHIDEE, schématisée en Figure 8, pour pouvoir estimer l'influence de ce processus sur les bilans hydrologiques et sur le climat simulé par le modèle IPSL-CM6.

L'irrigation n'est possible que sur les sols couverts de cultures (C3/blé, C4/maïs) ou prairies, et nous prenons d'abord soin que la fraction irriguée de chaque maille (décrite par exemple à partir de la base de données LUH2 mentionnée en section 1.1) soit inférieure ou égale à la fraction couverte par ces types de végétation. La demande en eau est alors déduite à chaque pas de temps du modèle (30 minutes) du déficit d'humidité du sol dans la fraction du sol couverte par les cultures et les prairies. Ce déficit D est la différence entre l'humidité réelle du sol dans la zone racinaire et une cible d'humidité du sol définissant une irrigation « optimale ». La profondeur de la zone racinaire et la cible d'humidité du sol sont tous deux définis par l'utilisateur. La demande en eau (I_{req} sur la Figure 8) se base sur ce déficit d'humidité, mais peut être réduite pour ne pas dépasser un taux d'irrigation maximum par pas de temps pour empêcher de générer trop de ruissellement.

Le volume d'eau effectivement utilisé pour l'irrigation (I_{app} sur la Figure 8) correspond au minimum entre cette demande I_{req} et la disponibilité de l'eau des rivières et des réservoirs souterrains, mais en garantissant un débit environnemental (c'est-à-dire que l'irrigation ne peut pas épuiser complètement les réservoirs). En outre, nous définissons dans chaque maille si l'irrigation est prélevée prioritairement dans les eaux de surface ou souterraines, à partir de la carte de Siebert et al. (2010). En pratique, cela signifie qu'une maille sans infrastructure pour l'irrigation par des eaux souterraines, par exemple, prendra toute l'eau d'irrigation dans la rivière, et vice versa. Cela ajoute une contrainte supplémentaire à la disponibilité de l'eau. Enfin, le volume d'eau I_{app} est appliqué sur la fraction de sol couverte par les cultures et prairies, ce qui augmente l'humidité du sol et l'évapotranspiration. Par manque d'informations à l'échelle globale sur les types d'irrigation, cette paramétrisation est ciblée sur l'irrigation gravitaire et goutte-à-goutte, et l'irrigation par aspersion est simplifiée en supposant que l'eau est apportée au sol et pas sur les feuilles.

Les différents paramètres impliqués ont pour l'instant été ajustés dans des simulations globales en mode forcé, sous forçage météorologique GSWP3 à la résolution de 0.5° (van den Hurk et al., 2016). Les paramètres sont supposés uniformes sur tous les continents, et leur valeur est ajustée pour reproduire correctement le volume d'irrigation cumulé sur l'ensemble des pays du monde selon la banque AQUASTAT de la FAO, pour l'année 2000 ($2660 \text{ km}^3/\text{an}$). Pour s'affranchir partiellement de la variabilité interannuelle, nous comparons cette valeur à la moyenne simulée sur 5 ans centrés sur 2000, comme pour l'ensemble des résultats de la Figure 9Figure 8.

Cette figure permet de valider les bonnes performances de la simulation ORCHIDEE avec irrigation, malgré une légère sous-estimation (de 8%) de l'irrigation FAO Aquastat par le modèle ORCHIDEE. Cette sous-estimation se concentre dans les zones les plus irriguées (Chine, nord de l'Inde, USA), erreur compensée à l'échelle globale par une surestimation dans les zones moins irriguées comme la France. Le dernier panel de la Figure 9 montre par ailleurs une nette amélioration de l'évapotranspiration simulée en tenant compte de l'irrigation (en bleu), avec un faible biais négatif quelle que soit la fraction irriguée, alors que la simulation sans irrigation (en rouge) montre un biais négatif d'autant plus fort que la fraction irriguée est forte.

Finalement, la Figure 10 montre un extrait des simulations globales à la résolution de 0.5° dans le bassin de la Seine. Elle confirme que l'irrigation augmente l'évapotranspiration, donc diminue les débits simulés, avec une réponse modulée saisonnièrement : baisse des débits simulés en été quand l'irrigation est effective, mais légère augmentation en hiver, conséquence d'une augmentation de l'humidité du sol en été qui persiste tout l'automne et l'hiver. On peut aussi noter que l'irrigation simulée est principalement alimentée par les eaux souterraines (à plus de 75%), ce qui semble réaliste dans le bassin mais devra être consolidé à partir des informations de la BNPE.

En termes de réalisme toujours, les trois simulations considérées sont dans la gamme, large, des produits d'évapotranspiration. En ce qui concerne les débits, la saisonnalité dans le modèle ORCHIDEE est très mauvaise, ce qui fait l'objet d'un travail en cours. C'est la simulation avec l'irrigation la plus forte (fractions irriguées HID) qui donne le module le plus réaliste, quoique toujours surestimé de 17%, avec une récession plus rapide qui semble plus pertinente même si elle est mal phasée. Il faut noter cependant que le choix du forçage atmosphérique a une influence de premier ordre sur les bilans d'eau, et nous comparerons prochainement ces simulations à celles qui sont en cours sur la France entière avec le forçage SAFRAN de Météo-France, dans une généralisation du travail de Kiliç et al. (2022) dans le bassin de la Seine.

Enfin, pour revenir sur la question des tendances abordée en section 1, il faudra vérifier si l'irrigation dans les simulations ORCHIDEE change les tendances de débit et d'évapotranspiration dans le bassin de la Seine. Des simulations plus longues seront nécessaires pour vérifier si la légère augmentation de

l'évapotranspiration perceptible en fin de période 1980-2013 dans la simulation plus irriguée (HID en vert) de la Figure 10, et plus présente dans les produits dérivés d'observations, se confirme, et si elle est absente de la simulation non irriguée. La comparaison des tendances des simulations avec et sans irrigation sur les différentes périodes investiguées en section 1 à partir d'observations du débit sera également utile pour consolider des conclusions.

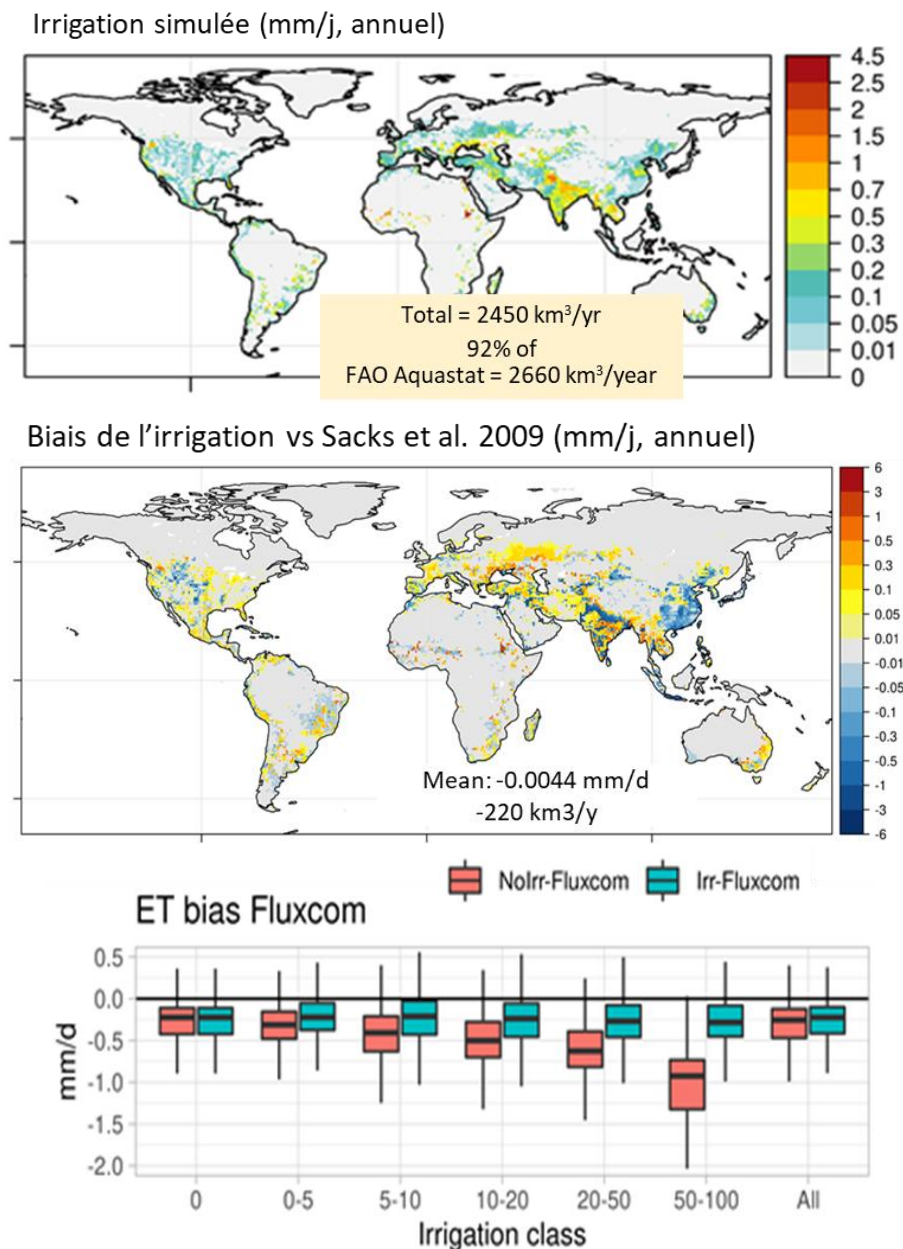


Figure 9. Validation globale de la paramétrisation de l'irrigation développée dans le modèle ORCHIDEE, sur 5 ans autour de 2000 sous forçage GSWP3 : (haut) Irrigation, simulée ; (milieu) biais de l'irrigation simulée par rapport à la reconstruction de Sacks et al. (2009) ; (bas) comparaison des biais d'évaporation par rapport au produit Fluxcom (Jung et al., 2019) entre une simulation avec irrigation (en bleu) et sans (en rouge). Les boîtes à moustaches représentent l'ensemble des points de plusieurs classes de fraction irriguée (en %) dans la maille.

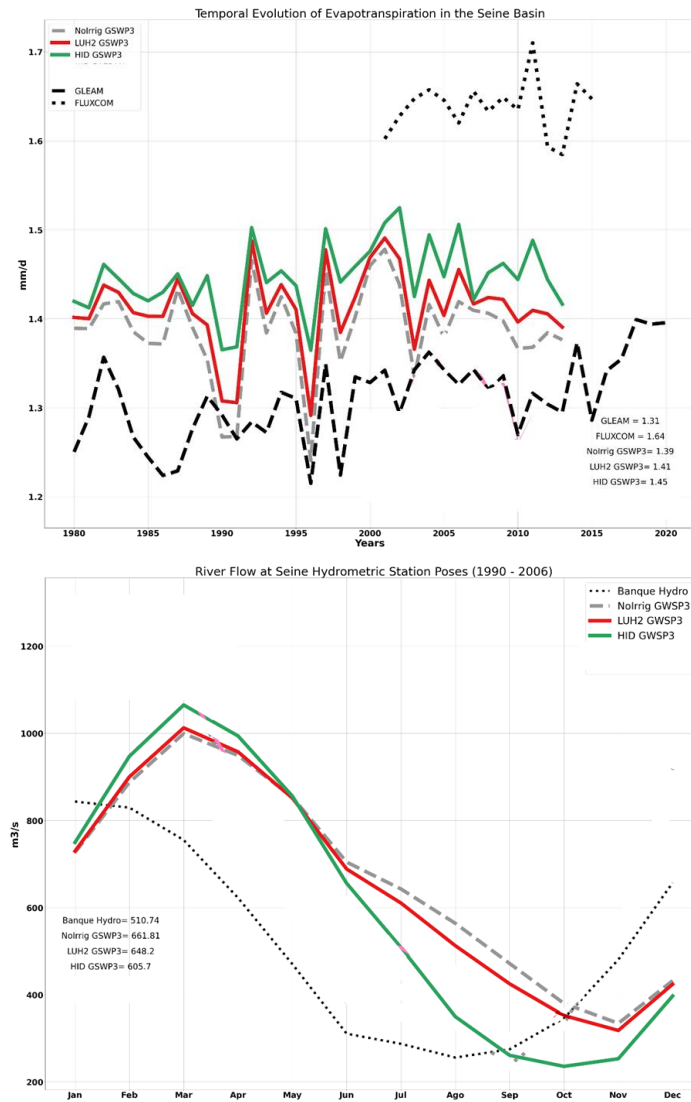


Figure 10. Moyennes spatiales des simulations globales sous forçage atmosphérique GSWP3 à 0.5° (sans irrigation en gris, avec irrigation et fractions irriguées LUH2 en rouge, et par les fractions irriguées HID de Siebert et al., 2015 en vert). Haut : Evolution temporelle de l'évapotranspiration de 1980 à 2013, avec comparaison à deux produits basés sur des observations en pointillés noirs (Martens et al., 2017 ; Jung et al., 2019); Bas : Cycle saisonnier moyen du débit à Poses, avec comparaison aux débits observés extraits de l'Hydroportail en pointillé noir (moyenne 1990-2006).

Conclusion

Nous avons présenté un ensemble de travaux encore préliminaires devant permettre à terme de mieux quantifier l'influence de l'irrigation sur le fonctionnement hydrologique et le climat régional du bassin de la Seine. Nous nous sommes intéressés à la période historique, pendant laquelle les surfaces effectivement irriguées ont été multipliées par plus de 4 entre 1970 et 2000, avec une expansion particulièrement rapide (multiplication par 3) pendant la décennie 1970-1980. Nous n'avons cependant pas pu mettre en évidence de tendance robuste des débits observés tout au long de la période 1979-2021, même dans les zones les plus irriguées du bassin de la Seine. L'évapotranspiration montre une légère augmentation sur cette période selon les produits basés sur des observations, cohérente avec l'augmentation de l'ETP SAFFRAN, et largement attribuable au réchauffement climatique. Cette augmentation de l'évapotranspiration se retrouve dans les simulations des modèles climatiques CMIP6 et dans les simulations forcées du modèle ORCHIDEE, qu'elles intègrent ou pas une description de l'irrigation.

Plusieurs directions seront donc explorées pour approfondir ce travail. Tout d'abord, nous allons réaliser de nouvelles simulations forcées dans le bassin de la Seine, plus longues et avec le forçage SAFRAN (1958-2021). Elles bénéficieront du calage et de la validation du modèle ORCHIDEE qui est en cours pour le projet Explore 2¹. Pour tenter de quantifier, dans les tendances historiques de débit, ce qui vient du réchauffement climatique, des changements d'occupation des terres, des prélèvements pour l'irrigation et des autres prélèvements, nous comparerons plusieurs simulations historiques sous forçage SAFRAN où ces différents facteurs seront désactivés, selon le principe général des études d'attribution (Gillett et al., 2016 ; Guimberteau et al., 2017). Ainsi, nous pourrions activer ou ne pas activer l'irrigation (ignorée dans le projet Explore2), nous pourrions supprimer l'impact de l'occupation des terres dans une simulation où la végétation n'évolue pas mais reste à son état de 1958 jusqu'en 2021, et nous pourrions supprimer l'influence du changement climatique historique dans une simulation forcée par une répétition du forçage des 17 premières années de SAFRAN (1958-1974), qui ne montrent pas de tendance forte sur les précipitations ni la température (Figure 3). Nous espérons que des simulations plus longues que dans ce rapport, intégrant la décennie d'expansion maximale des surfaces irriguées (1970-1980), permettront de mieux isoler les tendances attribuables à l'irrigation.

En complément du projet Explore2, nous étudierons aussi comment les impacts hydrologiques des projections de changement climatique considérées (Soubeyroux et al., 2020) diffèrent selon que l'on active ou pas l'irrigation dans les simulations. Pour les simulations avec irrigation, nous distinguerons un scénario conservatif, où les surfaces irriguées restent les mêmes qu'aujourd'hui, d'un scénario d'accroissement des surfaces irriguées, comme décrit dans LUH2 pour le scénario SSP5-8.5 (Hurtt et al., 2020). A partir de ce jeu de projections hydrologiques, nous examinerons à quel point l'irrigation est susceptible de diminuer les sécheresses agronomiques mais aussi d'augmenter les sécheresses hydrologiques, et si des points de bascule peuvent être identifiés quant à la résilience des ressources en eau du bassin de la Seine.

Cette démarche sera généralisée grâce à des simulations couplées surface - atmosphère avec le modèle climatique IPSL-CM6 (Boucher et al., 2020). Elles seront réalisées en 2023 dans le cadre du projet BLUEGEM², et permettront d'explorer si l'irrigation est susceptible de moduler la trajectoire future du changement climatique à l'échelle régionale du bassin de la Seine (régime des pluies, réchauffement et canicules). Dans cette éventualité, la quantification de ces modulations, seulement accessibles dans des simulations couplées surface - atmosphère, permettra de compléter l'analyse des incertitudes des projections climatiques "classiques" qui négligent pour leur grande majorité l'impact de l'irrigation sur le climat (Al-Yaari et al., 2022).

Enfin, il serait également intéressant, pour guider les politiques d'adaptation de la gestion de l'eau au changement climatique, de pouvoir décrire dans un modèle comme ORCHIDEE certaines des solutions préconisées dans les conclusions du « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique ». Nous aimerions notamment pouvoir quantifier les conséquences sur les ressources en eau de d'alimenter l'irrigation par des retenues artificielles, ou de mettre en place des pratiques de conservation des sols. De tels développements ne seront cependant pas accessibles d'ici la fin de la Phase 8 du programme PIREN-Seine.

Bibliographie

Al-Yaari, A., Ducharne, A., Thiery, W., Cheruy, F., and Lawrence, D. M. (2022). The Role of Irrigation Expansion on historical climate change: insights from CMIP6. *Earth Future*, accepté.

Al-Yaari A., Ducharne A., Cheruy F., Crow W.T., Wigneron J.P. (2019). Satellite-based soil moisture provides missing link between summertime precipitation and surface temperature biases in CMIP5 simulations over conterminous United States. *Scientific Reports* 9, article number 1657.

Arboleda-Obando, P.F., Ducharne, A., Cheruy, F., Jost, A., Ghattas, J., Colin, J., Nous, C. (2022). Influence of hillslope flow on hydroclimatic evolution under climate change. *Earth Future*, accepté.

Baulon, L., Massei, N., Allier, D., Fournier, M., and Bessiere, H. (2022). Influence of low-frequency variability on high and low groundwater levels: example of aquifers in the Paris Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 2829–

¹ Le projet national Explore2 (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>) vise à actualiser les projections de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie en France métropolitaine.

² Le projet international BLUEGEM (<https://www.metis.upmc.fr/~ducharne/bluegem/>) vise à explorer comment les réserves en eau, l'irrigation et le climat évoluent et s'influencent pendant l'Anthropocène (1900-2100).

2854.

Boé, J. and Habets, F. (2014). Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 691–708.

Bonnet, R., Boé, J., and Habets, F. (2020). Influence of multidecadal variability on high and low flows: the case of the Seine basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 1611–1631.

Boucher, O., Servonnat, J., and 76 others (2020). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Earth System Modeling* 12, e2019MS002010.

Dayon, G., Boé, J., Martin, E., & Gailhard, J. (2018). Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), 141-153.

Ducharne, A., Arboledo-Obando, P., Cheruy, F. (2020). Effets de l'humectation des sols par les nappes sur la trajectoire du changement climatique dans le bassin de la Seine et en Europe. *Rapport du programme PIREN-Seine Phase 8*, 17 pp.

Ducharne, A., Baubion, C., Beaudoin, N., Benoît, M., Billen, G., Brisson, N., ... & Viennot, P. (2007). Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375(1-3), 292-311.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958.

FNE (2022). Primo-analyse des données Irrigation de la statistique agricole. *Rapport France Nature Environnement*, 18 mai 2022, 5 pp.

Gillett, N. P., Shiogama, H., Funke, B., Hegerl, G., Knutti, R., Matthes, K., Santer, B. D., Stone, D., and Tebaldi, C. (2016). The Detection and Attribution Model Intercomparison Project (DAMIP v1.0) contribution to CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3685–3697.

Guimberteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J. P., Dutra Aguiar, A. P., Biemans, H., De Deurwaerder, H., Galbraith, D., Kruijt, B., Langerwisch, F., Poveda, G., Rammig, A., Rodriguez, D. A., Tejada, G., Thonicke, K., Von Randow, C., Von Randow, R. C. S., Zhang, K., and Verbeeck, H. (2017). Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 1455–1475.

Klein Goldewijk, K., Beusen, A., Doelman, J., and Stehfest, E. (2017). Anthropogenic land use estimates for the Holocene - HYDE 3.2. *Earth System Science Data*, 9(2):927–953.

Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., ... & Viennot, P. (2013). Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in northern France. *Climatic change*, 121(4), 771-785.

Habets, F. (2019). Barrages et réservoirs : leurs effets pervers en cas de sécheresses longues. *The Conversation*, 20 février 2019.

Hurt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., Frolking, S., Bodirsky, B. L., Calvin, K., Doelman, J. C., Fisk, J., Fujimori, S., Klein Goldewijk, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Heinemann, A., Hummel, F., Jungclaus, J., Kaplan, J. O., Kennedy, J., Krisztin, T., Lawrence, D., Lawrence, P., Ma, L., Mertz, O., Pongratz, J., Popp, A., Poulter, B., Riahi, K., Shevliakova, E., Stehfest, E., Thornton, P., Tubiello, F. N., van Vuuren, D. P., and Zhang, X. (2022). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 13, 5425–5464.

Jung, M., Koirala, S., Weber, U., Ichii, K., Gans, F., Camps-Valls, G., ... & Reichstein, M. (2019). The FLUXCOM ensemble of global land-atmosphere energy fluxes. *Scientific data*, 6(1), 1-14.

Kiliç, D., Rivière, A., Gallois, N., Ducharne, A., Wang, S., Peylin, P., Flipo, F. (2022). Assessing water and energy fluxes in a regional hydrosystem: case study of the Seine basin. *Comptes Rendus Géosciences*, accepted.

Loubier, S., Campardon, M., Morardet, S. (2013). L'irrigation diminue-t-elle en France ? Premiers enseignements du recensement agricole de 2010, *Sciences Eaux & Territoires*, 11, 12-19. <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2013-2-page-12.htm>

- Martens, B., Miralles, D.G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R.A.M., Fernández-Prieto, D., Beck, H.E., Dorigo, W.A., and Verhoest, N.E.C. (2017). GLEAM v3: satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture, *Geoscientific Model Development*, 10, 1903–1925.
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi:10.1017/9781009157896.
- Mignolet, C., Schott, C., Benoît, M., & Meynard, J. M. (2012). Transformations des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970: une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. *Innovations agronomiques*, 22, 1-16.
- MTE (2020). Eau et milieux aquatiques - Les chiffres clés. Édition 2020, Ministère de la transition écologique, Service des données et études statistiques (SDES) en partenariat avec l'Office français de la biodiversité (OFB).
- MTE (2022). Évolutions de la ressource en eau renouvelable en France métropolitaine de 1990 à 2018, Ministère de la transition écologique, Service des données et études statistiques (SDES).
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., and Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9, 3461–3482.
- Portmann, F. T., Siebert, S., and Döll, P. (2010). MIRCA2000—Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochem. Cycles*, 24, GB1011.
- Ribes, A., Boé, J., Qasmi, S., Dubuisson, B., Douville, H., and Terray, L. (2022). An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth Syst. Dynam.*, 13, 1397–1415.
- Sacks, W. J., Cook, B. I., Buening, N., Levis, S., & Helkowski, J. H. (2009). Effects of global irrigation on the near-surface climate. *Climate Dynamics*, 33(2), 159-175.
- Scanlon, B. R., Jolly, I., Sophocleous, M., and Zhang, L. (2007). Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality, *Water Resour. Res.*, 43, W03437.
- Siebert, S., Kumm, M., Porkka, M., Döll, P., Ramankutty, N., and Scanlon, B. R. (2015). A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 1521–1545.
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken, K., and Burke, J. (2013). Global Map of Irrigation Areas version 5 (GMIA5). *Rheinische Friedrich-Wilhelms-University, Bonn, Germany / Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, Italy. <https://www.fao.org/aquastat/en/geospatial-information/global-maps-irrigated-areas/latest-version/>
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and earth system sciences*, 14(10), 1863-1880.
- Sterling, S., Ducharne, A., Polcher, J. (2013). The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 3, 385-390.
- Soubeyroux, J. M., Bernus, S., Corre, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., ... & Vautard, R (2020). Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS-2020 pour la Métropole. *Rapport Météo-France*. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>
- Thiery, W., Visser, A. J., Fischer, E. M., Hauser, M., Hirsch, A. L., Lawrence, D. M., ... & Seneviratne, S. I. (2020). Warming of hot extremes alleviated by expanding irrigation. *Nature communications*, 11(1), 1-7.
- van den Hurk, B., Kim, H., Krinner, G., Seneviratne, S. I., Derksen, C., Oki, T., Douville, H., Colin, J., Ducharne, A., Cheruy, F., Viovy, N., Puma, M. J., Wada, Y., Li, W., Jia, B., Alessandri, A., Lawrence, D. M., Weedon, G. P., Ellis, R., Hagemann, S., Mao, J., Flanner, M. G., Zampieri, M., Matera, S., Law, R. M., and Sheffield, J. (2016). LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: the Land Surface, Snow and Soil moisture Model Intercomparison Project – Aims, setup and expected outcome, *Geosci. Model Dev.* 9, 2809–2832.

- Vargas, L. (2022). Irrigation in the ORCHIDEE model: Evaluating inputs and results in metropolitan France. *Rapport de stage du M2 Géosciences STEPE, ENS*. [PDF](#)
- Vicente-Serrano, S. M., Peña-Gallardo, M., Hannaford, J., Murphy, C., Lorenzo-Lacruz, J., Dominguez-Castro, F., et al. (2019). Climate, irrigation, and land cover change explain streamflow trends in countries bordering the Northeast Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 46, 10,821–10,833.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.* 30, 1627-1644.
- Wan, W., Zhao, J., Li, H. Y., Mishra, A., Hejazi, M., Lu, H., ... & Wang, H. (2018). A holistic view of water management impacts on future droughts: A global multimodel analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(11), 5947-5972.