

19-20 Juin 2024



<https://jmssc2024.sciencesconf.org/>

JMSSC 2024

Strasbourg (France)
Pôle GE2I—Manufacture des tabacs

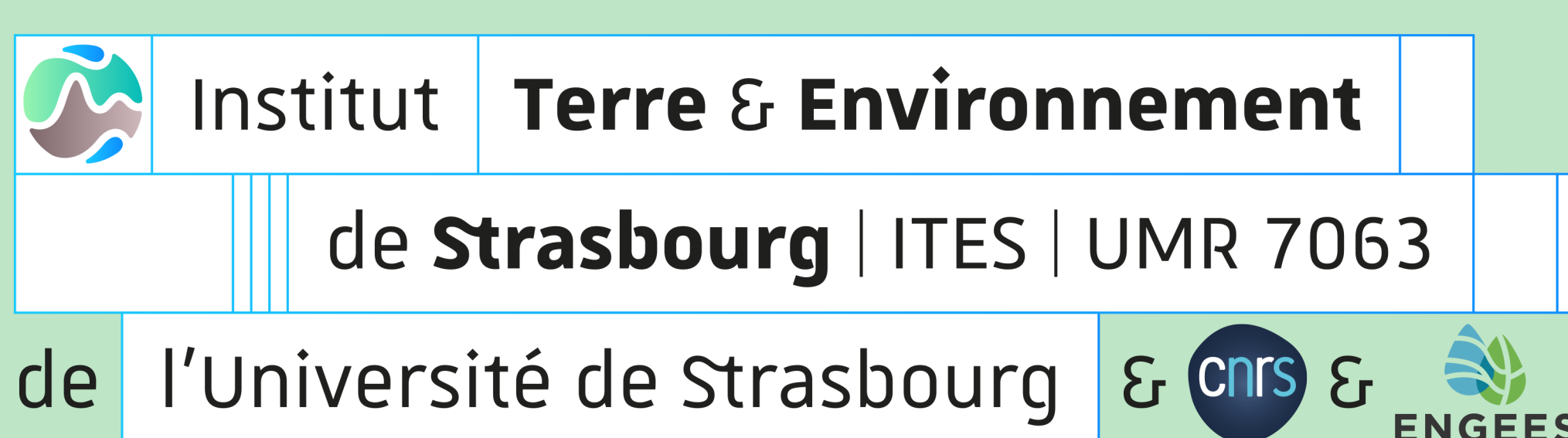


Journées de Modélisation des Surfaces Continentales

Recueil des résumés

(version du 17/06/2024)

Remerciements aux soutiens financiers de la manifestation



Université

de Strasbourg





JMSC 2024

Institut Terre & Environnement
de Strasbourg | ITES | UMR 7063
de l'Université de Strasbourg

5^{èmes} Journées de Modélisation des Surfaces Continentales

19 - 20 juin 2024 – STRASBOURG

Remerciements aux soutiens financiers des JMSC-2024



Le Centre national de la recherche scientifique français compte parmi les plus grandes institutions de recherche au monde. Ses scientifiques explorent le vivant, la matière, l'Univers et le fonctionnement des sociétés humaines pour répondre aux grands défis d'aujourd'hui et de demain. Reconnu internationalement pour l'excellence de sa recherche scientifique, le CNRS est une référence dans le monde de la recherche et du développement, ainsi qu'auprès du grand public. La délégation Alsace soutient financièrement le colloque JMSC 2024.



L'université de Strasbourg (Unistra) est une université pluridisciplinaire de recherche française qui compte 54 853 étudiants dont 7 993 nouveaux bacheliers, 3 470 enseignants et enseignants-chercheurs, 2 643 personnels des bibliothèques, ingénieurs, administratifs, techniciens, sociaux et de santé, ... et 70 unités de recherche. Les JMSC 2024 bénéficient du soutien financier du conseil scientifique de l'Université à travers le projet Idex Colloques et Symposiums.



JMSC 2024

Institut **Terre & Environnement**
de **Strasbourg** | ITES | UMR 7063
de l'Université de Strasbourg

5^{èmes} Journées de Modélisation des Surfaces Continentales

19 - 20 juin 2024 – STRASBOURG



L'ENGEES est une grande école de l'Eau et de l'Environnement, engagée dans la formation et la recherche en faveur de la résilience et de la lutte contre le changement climatique. Son offre de formation s'articule autour de sa formation d'ingénieur.e, de sa licence professionnelle environnement, de ses 3 mastères (eau potable assainissement, gestion traitement et valorisation des déchets, gestion des eaux usées et pluviales) et de masters co-accrédités par l'Unistra (géosciences pour l'environnement, mécanique numérique en ingénierie, ...). L'établissement s'appuie sur 4 unités mixtes de recherche qui s'intéressent à l'hydraulique urbaine et le traitement des eaux (ICube équipe MecaFlu), l'hydrologie de surface et souterraine en lien avec les aspects quantitatifs et qualitatifs (ITES), les questions socio-économiques autour de la gestion de l'eau (GESTE) et des travaux de recherche en lien avec l'hydro-écologie et l'hydro-morphologie (LIVE). L'ENGEES soutient financièrement les JMSC 2024 et met à disposition une partie de ses locaux au sein du pôle GE2I (Manufacture des Tabacs).



L'Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES) (UMR7063) a démarré au 1er janvier 2021 sous les tutelles du CNRS, de l'Université de Strasbourg et de l'ENGEES. Cette nouvelle UMR (issue de la fusion de l'IPGS et du LHYGES) s'appuie sur les 4 piliers disciplinaires d'étude de la Terre et de son environnement de surface : Hydrologie, Géochimie, Géologie et Géophysique. L'ITES compte regroupe 83 chercheurs et enseignants-chercheurs, 41 ingénieurs et techniciens, 17 chercheurs non permanents et 62 doctorants ; ce personnel est réparti au sein de 6 équipes : Biogéochimie ISotopique et Expérimentale // Déformation Active, Géologie Océans Lithosphère Sédiments // Géophysique et Imagerie des Processus // Sismologie // Transferts dans les Hydrosystèmes Continentaux. Les JMSC 2024 sont portées par l'équipe de modélisation "TrHyCo".



JMSC 2024

Institut Terre & Environnement
de Strasbourg | ITES | UMR 7063
de l'Université de Strasbourg

5^{èmes} Journées de Modélisation des Surfaces Continentales

19 - 20 juin 2024 – STRASBOURG



OZCAR est une infrastructure de recherche nationale dédiée à l'observation et à l'étude de la zone critique, la zone habitable des continents, des hauts reliefs jusqu'aux régions côtières. OZCAR met en synergie des sites instrumentés en France et à l'étranger qui s'appuient sur des observations long terme de l'eau des rivières et profonde, des glaces, des sols, des zones humides et de leur biodiversité. OZCAR est une plateforme communautaire qui s'intéresse à l'état et au devenir de la ressource en eau et en sol selon une vision scientifique intégrée et long terme rassemblant les disciplines. A Strasbourg, l'ITES s'implique fortement dans le fonctionnement de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE), que beaucoup connaissent sous le nom de bassin versant du Strengbach, et qui appartient au réseau OZCAR. L'IR OZCAR soutien financièrement l'organisation des JMSC 2024.



Institution française publique de recherche, l'IRD défend un modèle original de partenariat scientifique équitable avec les pays du Sud et une science interdisciplinaire et citoyenne, engagée pour la réalisation des Objectifs de développement durable. A ce titre, l'IRD soutient la prise en charge de collègues issus des pays du sud et souhaitant présenter leurs travaux de recherche lors des JMSC.



JMSC 2024

Institut Terre & Environnement
de Strasbourg | ITES | UMR 7063
de l'Université de Strasbourg

5^{èmes} Journées de Modélisation des Surfaces Continentales

19 - 20 juin 2024 – STRASBOURG 



Si l'histoire de la météorologie remonte à l'Antiquité, la France dispose d'un service dédié depuis 1878 et le Bureau central météorologique, devenu par la suite l'Office national météorologique, la Météorologie nationale et enfin Météo-France depuis 1993. Parmi ses nombreuses missions et les services associés, la recherche occupe une place privilégiée au sein de Météo-France tant elle vient en support à l'ensemble des métiers de l'établissement. Elle est la source des progrès qui sont ensuite mis en œuvre en matière d'observation, de prévision numérique du temps et du climat. Elle permet à l'établissement d'améliorer sans cesse la qualité de ses produits opérationnels et d'ouvrir de nouveaux chantiers pour répondre aux attentes de la société et des pouvoirs publics. Parmi les axes stratégiques à l'horizon 2030: mieux prévoir les phénomènes extrêmes, mieux représenter notre environnement, anticiper les architectures de calcul de demain, mieux répondre aux besoins de nos usagers.



Le programme PEPR exploratoire FairCarboN a pour ambition de mobiliser, de manière exhaustive, la communauté scientifique française étudiant le carbone dans les écosystèmes continentaux. Doté de 40 M€ sur 6 ans, FairCarboN doit permettre de préciser la contribution possible des écosystèmes continentaux à l'atténuation du changement climatique, sans laquelle l'objectif de l'accord de Paris sur le climat n'est pas atteignable.



JMSC 2024

Institut Terre & Environnement
de Strasbourg | ITES | UMR 7063
de l'Université de Strasbourg

5^{èmes} Journées de Modélisation des Surfaces Continentales

19 - 20 juin 2024 – STRASBOURG



Le PEPR TRACCS : Transformer la modélisation du climat pour les services climatiques Le programme TRACCS (Transformer la modélisation du climat pour les services climatiques) fait partie des lauréats de la deuxième vague de l'appel à projets pour des Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) exploratoires visant à consolider des domaines scientifiques clés pour les transformations technologiques, économiques, sociales ou environnementales en cours (voir l'article "France 2030 : 600 millions d'euros pour 13 nouveaux programmes de recherche"). TRACCS rejoint donc notamment les programmes FairCarbon et OneWater, sélectionnés en 2021, et IRIMa, sélectionné à l'été 2022, qui portent respectivement sur le cycle du carbone, le cycle de l'eau et les risques.

Présentations orales

Mercredi 19 juin 2024

n°	Titre	Oratrice / Orateur
1	Utilisation de la base de données SoilGrids pour améliorer la représentation physique de l'impact de la matière organique sur la thermique des sols dans le modèle ORCHIDEE	Cuynet Amélie
2	Modélisation hydro-géochimique d'expériences sur colonnes de sol avec HYDRUS-WITCH : Conséquences de la sécheresse sur la dynamique des nutriments dans les sols forestiers	Saphy Adrien
3	Effets de changements dans la variabilité climatique sur le ruissellement et l'érosion dans la région de la ceinture loessique ouest européenne (NW, France)	Bunel Raphaël
4	Modélisation de changements d'occupation des sols en Afrique sub-saharienne	Crespin-Boucaud Arthur
5	Impact des pratiques agricoles sur la modélisation éco-hydrologique en zone agropastorale endoréique sahélienne	Etchanchu Jordi
6	La mission spatiale TRISHNA - Applications au suivi de l'état hydrique et de l'évapotranspiration des surfaces continentales	Oliosio Albert
7	Modélisation du cycle de l'azote dans ISBA	Decayeux Jeanne
8	Modélisation hydrologique de la surface du sol : avons-nous vraiment besoin de tous les paramètres ?	Ackerer Philippe
9	Apport de la modélisation intégrée dans la caractérisation des échanges nappes rivières dans la région de Niamey (Sud-Ouest Niger)	Halidou Mounkaila Abdoul Wahab
10	Moteurs naturels et anthropiques de la dynamique de nappe dans une zone humide riparienne	Renaud Adrien
11	Etude régionale des impacts simulés de l'irrigation sur les interactions surface-atmosphère	Tiengou Pierre
12	Une modélisation simple des prélèvements en eau pour l'irrigation dans un modèle de surface global	Decharme Bertrand
13	Etat et évolution du bilan hydrologique d'une retenue d'eau dans un contexte tempéré sous l'action du changement climatique	Coche Alexandre

Présentations orales

Mercredi 19 juin 2024

n°	Titre	Oratrice / Orateur
14	Evolution de la ressource mondiale en eau sous l'effet combiné du changement climatique et des prélèvements pour l'irrigation	Costantini Maya
15	Usages de l'eau et changement climatique sur le bassin du Rhône: quantification de l'impact sur la ressource du changement climatique et des stratégies de gestion des grandes retenues hydro-électriques	Branger Flora
16	Irrigation et effet physiologique du CO2 : quelle influence sur les impacts hydrologiques du changement climatique simulés en France ?	Ducharne Agnes
17	Représentation des aquifères, des plaines inondées et de l'irrigation dans un modèle global de climat : effet sur le climat présent et le changement climatique projeté	Colin Jeanne

Utilisation de la base de données SoilGrids pour améliorer la représentation physique de l'impact de la matière organique sur la thermique des sols dans le modèle ORCHIDEE

A. Cuynet^a, C. Ottlé^a, E. Salmon^a

^aLaboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ,
Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

Mots-clés: matière organique du sol, ORCHIDEE, SoilGrids, thermique des sols, hautes latitudes

La teneur en matière organique dans les sols est une composante importante des surfaces continentales, et en particulier dans les régions de hautes latitudes où les sols peuvent être particulièrement riches en carbone. En effet, la présence de cette matière a un impact significatif sur les propriétés thermiques et hydrologiques des sols, en augmentant leur porosité ainsi que les effets d'isolation thermique. Certains modèles de surfaces continentales, dont ORCHIDEE, tiennent compte de cette matière organique, mais parfois de manière très simplifiée, en se basant par exemple uniquement sur le stock de carbone organique dans le sol. Toutefois, plus d'informations concernant la répartition de la matière minérale et organique dans les sols sont désormais disponibles, grâce à des bases de données telles que SoilGrids, qui fournissent des cartes globales et à haute résolution spatiale des propriétés physico-chimiques des sols. On s'intéresse notamment à la densité apparente des sols, la répartition entre matière fine et grossière ainsi qu'à la concentration en carbone organique dans la matière fine, discrétisés sur 6 niveaux entre 0 et 2 m, permettant ainsi d'avoir une estimation beaucoup plus précise de la composition des sols. Les propriétés thermiques sont alors dérivées de ces informations. Afin d'évaluer cette nouvelle paramétrisation, des simulations sur plusieurs sites situés dans des régions de hautes latitudes sont effectuées, et les résultats sont confrontés aux mesures de température dans le sol à différentes profondeurs.

Modélisation hydro-géochimique d'expériences sur colonnes de sol avec HYDRUS-WITCH : Conséquences de la sécheresse sur la dynamique des nutriments dans les sols forestiers

A. Saphy^a, E. Bealieu^a, M.-C. Pierret^a

^aInstitut Terre-Environnement Strasbourg, Université de Strasbourg, Ecole nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg

Mots-clés: Nutriments ; Forêts ; Modélisation hydro-géochimique ; Colonnes de sol

1 Introduction

Les écosystèmes forestiers font face à de nombreux stress qui amplifient leur vulnérabilité comme le stress hydrique, l'exploitation sylvicole intensive ou la pollution atmosphérique. Les baisses de fertilité des sols sont une cause reconnue de dépérissement forestier, notamment en lien avec l'acidification des sols. Ainsi, la réactivité et la disponibilité des nutriments dans les sols forestiers sont important à étudier, quantifier, modéliser et prédire.

Les solutions de sol sont une source majeure de nombreux nutriments (Ca, Mg, P, K, N) pour les plantes. Modéliser les concentrations en nutriments dans les solutions de sol est un point clé pour comprendre la dynamique des nutriments à l'interface eau-sol-plante, prédire les concentrations futures et prévenir d'éventuelles carences nutritionnelles.

Le site de cette étude se situe sur le bassin versant forestier du Strengbach (massif vosgien, France) suivi depuis 1986 par l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE - <http://ohge.unistra.fr>). Il s'agit d'une parcelle monospécifique d'épicéa (*Picea abies*) en déclin, sur sol brun acide développé sur socle granitique, particulièrement pauvre en calcium et magnésium, nutriments essentiels pour les arbres. L'objectif de ce travail est de modéliser la signature chimique des solutions de sol de cette parcelle à différentes profondeurs.

2 Matériel et méthodes

Afin de mieux comprendre les cycles biogéochimiques des nutriments, deux approches ont été développées : expérimentale et modélisatrice. Des expériences en conditions contrôlées ont été réalisées : une solution de composition fixes percole sur des colonnes de sol analogues au terrain de 30 cm de haut. Un pattern de pluie semblable au terrain a été testé avec une sécheresse de 3 semaines consécutives. Les lessivats en sortie de colonne ont été analysés afin de calibrer le modèle.

La modélisation des solutions de sol a été réalisée avec une cascade de modèles. Les écoulements non-saturés ont été simulés avec le modèle HYDRUS. Les paramètres d'écoulement ont été déterminés à partir d'expériences hydrodynamiques sur cylindres de sol. Les sorties d'HYDRUS sont ensuite utilisées comme forçage au modèle géochimique WITCH, modèle permettant de calculer l'évolution des concentrations des éléments chimiques dans les solutions de sol. Tous les paramètres du modèle géochimique (Minéralogie, granulométrie, CEC,...) ont été déterminés grâce à des analyses de sol réalisées en laboratoire.

La cascade de modèles HYDRUS-WITCH permet de simuler correctement l'évolution des concentrations en cations majeurs. Cette modélisation permet de mieux comprendre les sources en nutriments dans la solution de sol et de mieux contraindre certains processus plus complexes à modéliser comme la dynamique de la phase échangeable, les interactions cations - matière organique, ou encore les conséquences de la sécheresse sur l'évolution des concentrations en nutriments dans les écosystèmes forestiers.

Effets de changements dans la variabilité climatique sur le ruissellement et l'érosion dans la région de la ceinture lœssique ouest européenne (NW, France)

R. Bunel^a, N. Lecoq^a, Y. Copard^a, N. Massei^a

^a Univ Rouen Normandie, Université de Caen Normandie, CNRS, Normandie Univ, M2C UMR 6143, F-76000 Rouen, France

Mots-clés: Changement climatique, Ceinture lœssique ouest européenne, Modélisation hydro-sédimentaire

Le ruissellement et l'érosion des sols sont très marqués dans la ceinture lœssique ouest européenne [1]. Dans cette étude, le modèle distribué à base physique CLiDE [2] est calibré, validé et appliqué à un bassin versant de cette zone (Dun, NW, France) afin d'évaluer les impacts hydrosédimentaires de scénarios de changement climatique (figure 1). Malgré les progrès considérables réalisés au cours de la dernière décennie dans l'étude du ruissellement et de l'érosion des sols dans le contexte du changement climatique [3-12], les effets de changements dans la variabilité temporelle des pluies restent mal compris, en particulier à l'échelle d'un bassin fluvial. Afin de réaliser un examen précis de ces relations, un générateur stochastique de climat a été conçu pour ajuster individuellement les composantes qui structurent la variabilité temporelle des pluies (figure 1). Les scénarios climatiques considérés représentent des projections à l'horizon 2100 de la variabilité temporelle des pluies sur le NW de l'Europe. Les scénarios s'appuient sur des chroniques journalières historiques de pluie (1990-2012) et sont basés sur 4 hypothèses exploratoires : diminution de 50 % du régime pluviométrique interannuel (scénario 6yD), augmentation de 100 % du régime pluviométrique interannuel (scénario 6yI), augmentation de 50 % du régime pluviométrique saisonnier (scénario 1yI) et augmentation de 50 % du régime pluviométrique synoptique (scénario 3dI). Les débits/flux sédimentaires journaliers et les cartes d'érosion/dépôt simulés pour chaque scénario sont comparés à ceux simulés pour la situation sans modification des pluies. Les séries temporelles ont été agrégées sur différents intervalles de temps pour permettre une analyse multi-échelle des écarts. Les résultats indiquent que le modèle permet une prédiction satisfaisante des débits et flux sédimentaires du bassin, notamment sur la période de calibration. L'augmentation de la variabilité climatique, que ce soit à une échelle synoptique (3dI), saisonnière (1yI) ou interannuelle (6yI), entraîne un accroissement du ruissellement et de l'érosion (figure 1). L'augmentation de la variabilité synoptique des pluies (3dI) génère la hausse la plus forte des valeurs moyennes annuelles de ruissellement (23 % contre 3 à 7 % pour les autres scénarios) et d'érosion (214 % contre 52 à 66% pour les autres scénarios). Seule la diminution de la variabilité interannuelle des pluies (6yD), permet la baisse de ces valeurs (4 % pour le ruissellement et 33 % pour l'érosion) avec une réduction sensible des flux lors des événements de crue catastrophiques.

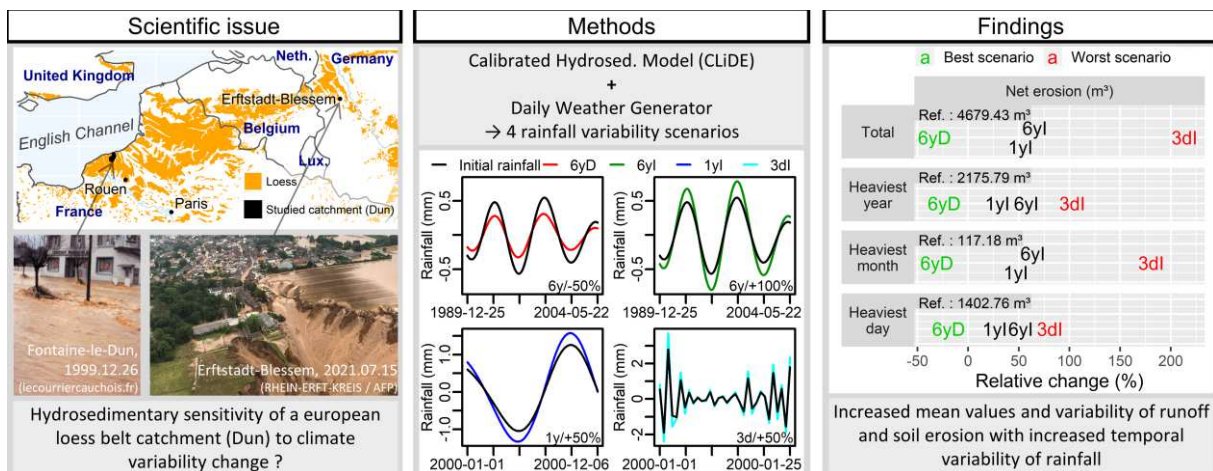


Figure 1 : Effets de changements dans la variabilité climatique sur l'érosion dans la région de la ceinture lœssique ouest européenne (NW, France)

Références

- [1] Koks E.E., Van Ginkel K.C.H., Van Marle M.J.E., Lemnitzer A., 2021. Brief communication: critical infrastructure impacts of the 2021 mid-July western European flood event, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, preprint
- [2] Barkwith A., Hurst M.D., Jackson C.R., Wang L., Ellis M.A., Coulthard T.J., 2015. Simulating the influences of groundwater on regional geomorphology using a distributed, dynamic, landscape evolution modelling platform, *Environ. Model. Softw.*, 74, 1–20.
- [3] Favis-Mortlock D., Boardman J., 1995. Nonlinear responses of soil erosion to climate change: a modelling study on the UK south downs, *Catena*, 25, 365–387.
- [4] Souchère V., Cerdan O., Dubreuil N., Le Bissonnais Y., King C., 2005. Modelling the impact of agrienvironmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France), *Catena*, 61, 229–240.
- [5] Ducharne A., Habets F., Pagé C., Sauquet E., Viennot P., Déqué M., Gascoïn S., Hachour A., Martin E., Oudin L., Terray L., Thiéry D., 2010. Climate change impacts on water resources and hydrological extremes in northern France. In: Proceedings of the XVIII International Conference on Computation Methods in Water Resources, Barcelona, pp. 21–24.
- [6] Evrard O., Nord G., Cerdan O., Souchère V., Le Bissonnais Y., Bonté P., 2010. Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 138, 83–94.
- [7] Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.Y., Sauquet E., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche-Revue internationale de l'eau*, 5–15.
- [8] Dumas P., Hallegatte S., Quintana-Sequi P., Martin E., 2013. The influence of climate change on flood risks in France: first estimates and uncertainty analysis, *Natural Hazards and Earth Systems Science*, 13, 808–821.
- [9] Leta O.T., Bauwens W., 2018. Assessment of the impact of climate change on daily extreme peak and low flows of Zenne basin in Belgium, *Hydrology*, 5, 38.
- [10] Mullan D., Matthews T., Vandaele K., Barr I.D., Swindles G.T., Meneely J., Boardman J., Murphy C., 2019. Climate impacts on soil erosion and muddy flooding at 1.5 versus 2°C warming, *Land Degrad. Dev.*, 30, 94–108.
- [11] Brannigan N., Mullan D., Vandaele K., Graham C., McKinley J., Meneely J., 2022. Modelling soil erosion by water under future climate change: addressing methodological gaps, *Catena*, 216, 106403.
- [12] Yuan L., Zhang X.-C., Busteed P., 2022. Simulating Storm Intensification Impact on Soil erosion and Soil Hydrology in Various Cropping and Tillage Systems under Climate Change, *Land Degradation & Development*, Accepted Author Manuscript.

Modélisation de changements d'occupation des sols en Afrique sub-saharienne

A. Crespin-Boucaud^a, C. Peugeot^a, B. Nigro^a & the CECC project team

^a*HydroSciences Montpellier (IRD, Univ. Montpellier, CNRS, IMT-Mines Alès) Montpellier, France.*

Mots-clés: Occupation des sols, changement d'usage, scénarios, dynamiques spatiales, Afrique sub-saharienne.

L'évolution des régimes hydrologiques dépend à la fois par l'évolution du climat (régimes pluviométriques, hausse des températures), et des changements de propriétés de surface des bassins versants induits par l'accroissement de la population et le développement économique (déforestation, aménagements, urbanisation, intensification agricole, ...) en cours en Afrique sub-saharienne, et au Sahel en particulier. Ces régimes hydrologiques pilotent la disponibilité, le renouvellement des ressources en eau et l'aléa inondation.

La modélisation hydrologique permet de comprendre les évolutions des hydrosystèmes à l'horizon 2050 / 2100, et leurs effets sur les ressources et les risques d'inondations. Il est nécessaire pour cela de disposer, en plus des scénarios climatiques, de scénarios qualitatifs d'évolutions de l'occupation et l'usage des sols des bassins versants entre la zone sahéenne et la zone guinéenne.

Pour cela, nous proposons de construire une méthodologie de modélisation de dynamiques spatiales probabiliste robuste et simple visant à simuler les changements possibles d'occupation et d'usage des sols d'origine anthropique.

Pour la construction de scénarios, nous nous appuyons sur des connaissances expertes, la littérature, ainsi que sur des travaux précédents tel que la prospective Agrimonde-Terra sur les usages des terres et la sécurité alimentaire à l'échelle globale [1]. Ces connaissances permettent de traduire les scénarios qualitatifs et de les formaliser en règles qualitatives et quantitatives décrivant des transitions entre des états (usage des sols) adaptées à la zone d'étude dans différents scénarios [2]. A l'aide du langage Ocelet [3], des simulations basées sur des règles génériques sont implémentées, puis combinées et comparées à des règles spécifiques d'un bassin versant de la zone soudano-sahéenne.

L'approche proposée permet à la fois de modéliser des trajectoires de changements d'occupation et d'usage des sols selon des variables biophysiques (ex. occupation des sols, proximité des cours d'eau) et socio-économiques (ex. proximité aux infrastructures). Trois principaux narratifs sont avancés bornant l'horizon des futurs possibles représentant des politiques étatiques fortes soutenant l'intensification agroécologique, une forte artificialisation laissant une place plus importante à la déforestation (agrobusiness), ou la coexistence de ces différents modèles agricoles.

La méthode de modélisation permet à la fois de représenter la zone d'étude dans un espace grillé tout en conservant, de manière statistique, une pluralité d'états au sein d'un même pixel.

Ce modèle simple permet de mobiliser des scénarios de long terme de changement d'occupation et d'usage des sols à l'échelle d'un bassin versant, et de proposer des résultats d'usage des sols pouvant être transférés facilement dans des modèles quantitatifs de simulation des régimes hydrologiques. L'approche est développée de manière générique afin de pouvoir être transférée facilement à d'autres disciplines.

De manière plus spécifique, un cas d'étude est proposé sur le bassin de versant de l'Ouémé au Bénin à travers la modélisation de différents narratifs.

Références

- [1] Le Mouël, C., Lattre-Gasquet, D., & Mora, O. (2018). *Land use and food security in 2050: a narrow road* (p. 400). éditions Quae.
- [2] Mora, O., Mouël, C. L., Lattre-Gasquet, M. de, Donnars, C., Dumas, P., Réchauchère, O., Brunelle, T., Manceron, S., Marajo-Petizon, E., Moreau, C., Barzman, M., Forslund, A., & Marty, P. (2020). Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios. *PLOS ONE*, 15(7).
- [3] Degenne, P., & Lo Seen, D. 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX*, 5, 89-95.

Impact des pratiques agricoles sur la modélisation éco-hydrologique en zone agropastorale endoréique sahélienne

J. Etchanchu¹, J. Demarty¹, L. Collet¹, A. Dezetter¹, N. Farhani¹, I. Mainassara¹, C. Ollivier¹, B. Raynaud-Schell¹, S. Vauclare¹, H. Barral^{1,2}, N. Chahinian¹

¹ *HydroSciences Montpellier (HSM), Univ Montpellier, CNRS, IRD, 15 avenue Charles Flaubault, Bâtiment Hydropolis, 34093 Montpellier, France*

² *Institut des Géosciences de l'Environnement, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble-INP, Grenoble, France*

Mots-clés: Ecohydrologie, Flux turbulents, Evapotranspiration, Infiltration, modèle SiSPAT, Afrique de l'Ouest

Des années 1970 à la fin du XX^e siècle, la région du Sahel a souffert d'une période de sécheresse dont la durée et l'intensité demeurent inégalées. Malgré un regain des précipitations depuis, on assiste à une intensification des événements climatiques, avec une hausse des températures et une augmentation de la fréquence des événements extrêmes. Cette évolution climatique engendre des modifications profondes des cycles biogéochimiques des surfaces continentales, à commencer par ceux de l'eau et de l'énergie. La forte croissance démographique de cette région la rend particulièrement vulnérable vis-à-vis de la gestion quantitative et qualitative de l'eau, de la sécurité alimentaire ou encore des risques hydro-climatiques. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de proposer des méthodologies facilitant le suivi et la projection des ressources en eau et végétales en région sahélienne. Ces méthodologies doivent cependant reposer sur une compréhension fine du fonctionnement thermo-hydrrique des grands types d'écosystèmes et de ses réponses aux changements globaux. Dans ce cadre, notre étude se focalise sur l'analyse de l'impact des pratiques agricoles dans les modèles de transfert Sol-Végétation-Atmosphère (SVA), outils dédiés à la quantification des bilans d'eau et d'énergie à la surface, et à leurs projections dans le futur. Elle a comme objectif : i) d'identifier les processus clés régissant la répartition des flux afin d'évaluer la pérennité des systèmes agricoles actuels face aux changements socio-climatiques, et ii) d'identifier les leviers d'action pour une adaptation durable de ces systèmes. En l'occurrence, cette étude vise à mieux comprendre les impacts de la pratique de la mise en jachère qui est traditionnellement conduite au Sahel agropastoral, sur les bilans d'eau. Dans ce but, le modèle SiSPAT a été mis en place et étalonné sur le site de mesure de flux de Wankama, dans le Sud-Ouest du Niger, sur une parcelle agricole incluant une phase de culture de mil après une première phase de mise en jachère. L'étalonnage du modèle s'est appuyé sur plusieurs types de mesures in-situ, i.e. des mesures de flux turbulents, de conduction de chaleur dans le sol, ainsi que d'humidité et de température de sol, afin de contraindre au mieux les différents processus régissant la répartition des flux de surface. Mené année par année en incluant la rotation des couverts, il a permis de mettre en évidence les effets du labour effectué au moment de cette rotation sur les propriétés hydrodynamiques des premières couches du sol : hausse de plus de 10 % de la porosité, conductivité hydraulique multipliée par 5, avec une atténuation au fil des ans. Ceci impacte la capacité d'infiltration du sol, en faveur d'une infiltration plus importante, relativement franche quelques temps directement après la rotation et perdurant plusieurs années. La répartition entre évaporation et transpiration s'en trouve elle aussi impactée, au profit de la transpiration du fait du stockage de l'eau en profondeur. L'étude de la phase de rotation inverse (mil vers jachère) est également en cours d'analyse à l'aide des données disponibles et du modèle SiSPAT, afin de comprendre l'impact à plus long terme du cycle de rotation complet, tant sur les propriétés du sol que les processus d'infiltration et de recharge diffuse en milieu agricole. Ces travaux revêtent ainsi un intérêt tout particulier pour la projection de l'évolution future des ressources hydrologiques et végétales au Sahel, permettant d'adosser aux scénarios climatiques différents scénarios de pratiques culturelles et d'en évaluer l'impact combiné sur les flux de surface.

La mission spatiale TRISHNA

Applications au suivi de l'état hydrique et de l'évapotranspiration des surfaces continentales

Philippe Gamet^{1,2}, Jean-Louis Roujean², Sébastien Marcq¹, Emilie Delogu¹, Renaud Binet¹,
Philippe Maisongrande¹, Gilles Boulet², Albert Olioso³, Bimal Bhattacharya⁴, Samuel Mwangi^{3,2},
Vincent Rivalland², Victor Penot², Olivier Merlin², Nesrine Farhani⁵, Jordi Etchanchu⁵, Jérôme Demarty⁵,
Chloé Ollivier⁵, Tian Hu⁶, Kanishka Mallick⁶, Aolin Jia⁶, Jennifer Adams⁷, Alexander Damm⁷, Kathrin
Naegeli⁷, José Sobrino⁸, Mark Irvine⁹, Jérôme Ogée⁹, Frédéric Jacob¹⁰, Samuel Buis¹¹, Marie Weiss¹¹...

Présentation par Albert Olioso, albert.olioso@inrae.fr

¹CNES, Toulouse, France

²CESBIO, Toulouse, France

³URFM, Avignon, France

⁴SAC/ISRO, India

⁵HSM, Montpellier, France

⁶IIST, Belvaux, Luxembourg

⁷Université de Zurich, Suisse

⁸Université de Valence, Espagne

⁹ISPA, Bordeaux, France

¹⁰LISAH, Montpellier, France

¹¹EMMAH, Avignon, France

Mots-clés:

Téledétection, infrarouge thermique, température de surface, évapotranspiration, stress hydrique, TRISHNA

La mission spatiale TRISHNA (Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment, [1], [2]) est une coopération entre les agences spatiales française (CNES) et indienne (ISRO), dont le lancement est prévu en 2026. Elle se destine à mesurer pendant 5 ans, de deux à trois fois par semaine, le signal infrarouge thermique du système surface-atmosphère à l'échelle mondiale et à une résolution de 60 mètres pour les continents et les océans côtiers. En opération, cette mission apportera des données thermiques à haute résolution spatiale avec une forte répétitivité temporelle ce qui est inédit jusqu'à présent et qui est d'un grand intérêt pour alimenter la modélisation des surfaces continentales

Les données (libres et ouvertes) fournies par la mission comprendront en particulier :

- les réflectances spectrales de surface dans 5 canaux visibles et infrarouges
- les températures de surface terrestre et des eaux continentales et côtières
- les émissivités de surface dans les 4 canaux infrarouges thermiques.
- l'albédo, l'indice foliaire, le taux de couverture et la fraction de rayonnement PAR absorbé
- l'évapotranspiration journalière en continu (avec une incertitude associée)

Dans cette présentation nous décrirons succinctement les caractéristiques principales de la mission et nous aborderons les modèles de surface utilisés pour produire les cartographies d'évapotranspiration (modèles EVASPA [3,4], STIC [5,6], SimpKcET [7]). Différentes activités sont en cours autour de la définition des algorithmes d'estimation de l'évapotranspiration, en particulier : benchmarking par rapport à des mesures in-situ et des produits disponibles d'ET, définition de méthodologies de détermination de l'incertitude d'estimation de l'évapotranspiration, analyse de l'impact de l'anisotropie des signaux infrarouge thermique, prise en compte de la variation spatiale des forçages météorologiques, impact de la topographie, à la résolution des pixels TRISHNA...

Les travaux aval en cours portent sur l'utilisation des données de température de surface et d'évapotranspiration, telles qu'elles seront produites par TRISHNA, pour la modélisation du fonctionnement des cultures et d'évaluation de leurs besoins en eau, la modélisation du fonctionnement hydro(-géo-)logiques avec de meilleures contraintes pour la détermination de la recharge, la modélisation du fonctionnement hydrique des forêts et l'évaluation du risque incendie...

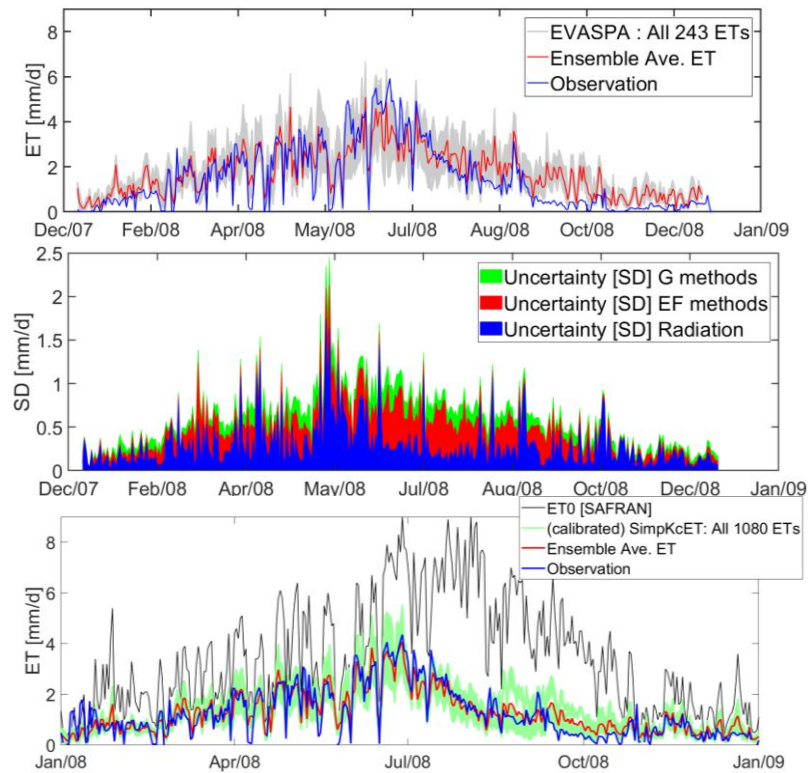


Figure 1 : exemples de suivi de l'évapotranspiration ET de la forêt de Puéchabon (Hérault) au moyen de la plateforme de simulation du bilan d'énergie de surface EVASPA à partir des données MODIS (haut) et du modèle de bilan hydrique SimpKcET à partir des données fCOVER COPERNICUS (bas). Les deux modèles prédisent l'évapotranspiration journalière et une incertitude autour de la valeur estimée par une modélisation d'ensemble multi-modèle multi-données (243 membres pour EVASPA, 1080 membres pour SimpKcET). Le panneau central présente les incertitudes sur l'évapotranspiration journalière liées au forçage de rayonnement solaire incident et aux algorithmes de calcul de la fraction évaporative (EF) et du flux de chaleur dans le sol (G) qui sont deux variables intermédiaires dans le calcul de l'évapotranspiration. ET₀ est l'évapotranspiration de référence fournies dans SAFRAN (calculée au moyen du modèle de Penman-Monteith avec des paramètres spécifiques à Météo-France).

Références

- [1] Lagouarde, J.-P., Bhattacharya, B. K., Crébassol, P., Gamet, P., et al. 2019. Indo-French High-resolution Thermal Infrared Space Mission for Earth Natural Resources Assessment and Monitoring - Concept and Definition of TRISHNA. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W6-403-2019>, 2019
- [2] Gamet, Ph., et al. 2023. TRISHNA: towards daily evapotranspiration from remote sensing thermal data. International Workshop on High-Resolution Thermal EO 2023, ESA, Vidéo : <https://youtu.be/T7NKdYfrQsM?t=4071>
- [3] Gallego-Elvira, Belen, et al. 2013. EVASPA (EVapotranspiration assessment from SPACe) tool: An overview. *Procedia Environmental Sciences*, **19**, 303–310
- [4] Allies, A. et al. 2020, Evapotranspiration estimation in the Sahel using a new ensemble- contextual method. *Remote Sensing*, **12**, 380
- [5] Mallick K. et al., 2014. A Surface Temperature Initiated Closure (STIC) for surface energy balance fluxes. *Rem.sens.Env.* **141**, 243
- [6] Hu T. et al., 2023. Evaluating European ECOSTRESS Hub Evapotranspiration Products Retrieved from Three Structurally Contrasting SEB Models over Europe. *Water Resources Research*. **59**, e2022WR034132.
- [7] Ollivier C., et al. 2021. An evapotranspiration model driven by remote sensing data for assessing groundwater resource in karst watershed. *Science of the Total Environment*, **781**, 146706.



MODÉLISATION DU CYCLE DE L'AZOTE DANS ISBA

J. DECAYEUX[^], C. DELIRE[^], B. DECHARME[^]

[^]LABORATOIRE CNRM- 31100 TOULOUSE

MOTS-CLÉS: CYCLE DE L'AZOTE, VÉGÉTATION, EXPÉRIENCE FACE

Du fait des activités humaines, les émissions de carbone dans l'atmosphère augmentent chaque année [1]. Une partie de ce flux est absorbé par l'atmosphère, augmentant alors la concentration atmosphérique de CO₂, tandis que le reste est absorbé par les océans et les surfaces continentales. Cette dernière composante capte le carbone grâce à la végétation qui agit comme un puits de carbone, et on observe un effet de fertilisation. C'est à dire que ce puits augmente, en réponse à l'augmentation du carbone dans l'atmosphère. Cependant, de nombreuses incertitudes pèsent sur la tendance à long terme de cet effet de fertilisation. En effet, des expériences ont été réalisées, comme celle sur le site de Duke, pour étudier la réponse d'une forêt à une concentration atmosphérique en CO₂ plus élevée. Les résultats montrent une perte de capacité de l'écosystème à agir comme puits de carbone qui serait la conséquence d'un manque de nutriments [2].

Récemment, les modèles ESM ont développé des paramétrisations permettant de représenter d'autres cycles biogéochimiques que celui du carbone, en particulier celui de l'azote [3-5]. La prise en compte des nutriments qui ont un effet limitant pour la croissance de la végétation et donc l'absorption du carbone par celle-ci, va permettre d'améliorer les prédictions futures. Il est donc important d'inclure la représentation du cycle de l'azote dans ISBA, le modèle de sol et de végétation du CNRM. Cette présentation mettra en lumière les différents choix de modélisation pris et présentera les premiers résultats.

Dans notre modèle, la dynamique du cycle de l'azote suit d'une part celle du carbone, grâce à des ratios N/C prescrits et d'autre part a des réservoirs dynamiques spécifiques : un dans la plante et un dans le sol. Les plantes ne peuvent récupérer l'azote directement de l'atmosphère. Elles le font par le biais de leurs racines dans le sol. Cette contrainte est concrétisée par 2 flux distincts, un premier entrant de l'atmosphère vers le sol puis un second du sol vers la plante. De l'azote rentre à nouveau dans le sol lors de la décomposition des débris végétaux morts. De nombreuses transformations chimiques ont lieu dans le sol ce qui mène à des pertes d'azote sous forme de gaz.

Le modèle a ensuite été appliqué sur le site de Duke afin d'étudier l'impact du cycle de l'azote sur celui du carbone. Les résultats obtenus sont mis en perspective avec ceux observés.

RÉFÉRENCES

- [1] LE QUÉRÉ C. ET AL., 2018. GLOBAL CARBON BUDGET 2018, *EARTH SYST. SCI. DATA*, 10, 2141-2194.
- [2] NORBY K ET AL., 2010. CO₂ ENHANCEMENT OF FOREST PRODUCTIVITY CONSTRAINED BY LIMITED NITROGEN AVAILABILITY, *PNAS*, 107, 19368-19373.
- [3] ZAEHLE S. AND FRIEND A. D., 2010. CARBON AND NITROGEN CYCLE DYNAMICS IN THE O-CN LAND SURFACE MODEL: I. MODEL DESCRIPTION, SITE-SCALE EVALUATION, AND SENSITIVITY TO PARAMETER ESTIMATES, *GLOBAL BIOGEOCHEM. CYCLES*, 24.
- [4] WILTSHIRE A. ET AL., 2021. JULES-CN: A COUPLED TERRESTRIAL CARBON-NITROGEN SCHEME (JULES VN5.1), *GEOSCI. MODEL DEV.*, 14, 2161-2186.
- [5] THUM T. ET AL., 2019. A NEW MODEL OF THE COUPLED CARBON, NITROGEN, AND PHOSPHORUS CYCLES IN THE TERRESTRIAL BIOSPHERE (QUINCY V1.0; REVISION 1996), *GEOSCI. MODEL DEV.*, 12, 4781-4802.

Modélisation hydrologique de la surface du sol : avons-nous vraiment besoin de tous les paramètres ?

P. Ackerer¹, D. Luitenauer¹, A. Dell'Oca², A. Guadagnini², S. Weill¹

1 Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg, CNRS, ENGEES, F-67000 STRASBOURG, France

2 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italie

Mots-clés: Modélisation, analyse de sensibilité, paramètres

1 Introduction

Les modèles décrivant le cycle de l'eau à la surface terrestre (Land Surface Model - LSM) fondés sur des modèles mathématiques à base physique pour le bilan énergétique et hydrique nécessitent la connaissance de nombreux paramètres pour leur mise en œuvre. Il est souvent difficile (voire impossible) d'estimer ces paramètres par la mesure compte tenu de la difficulté de la mesure en elle-même et de sa représentativité à l'échelle spatio-temporelle du modèle. Il est donc légitime de se poser ces questions : a-t-on vraiment besoin de tous ces paramètres ? quel niveau de précision doit-on apporter à leur estimation ? Quel est l'impact d'une mauvaise estimation de ces paramètres sur les sorties du modèle ? Nous apportons des éléments de réponse à ces questions par une analyse de sensibilité globale *ab initio*. Nous montrons que l'incertitude et l'importance relative des paramètres dépendent de la variable de sortie du modèle et dépendent des conditions climatiques. Un invariant cependant, les incertitudes sur les paramètres décrivant les capacités de stockage du sol et la dynamique hydrique dans le sol impactent fortement les sorties des LSM.

2 Matériel et méthodes

Le modèle de surface développé à ITES a été utilisé pour calculer l'évaporation, la transpiration et la recharge de nappe. Ce modèle est à base physique et les variables de sortie sont calculées à l'aide d'un bilan d'énergie et d'eau dans un système sol-plante-atmosphère. Les paramètres nécessaires à sa mise en œuvre ont été estimés à partir des conditions locales du site et de l'abondante littérature existante. Des valeurs minimales et maximales ont été définies et près de 100 000 simulations ont été effectuées en tirant aléatoirement chaque valeur de paramètre dans l'intervalle min-max selon une loi uniforme. A un temps donné, il existe donc 100 000 valeurs différentes d'évaporation, transpiration et recharge de nappe. Il est possible de les décrire sous forme d'une fonction de densité de probabilité (pdf), en prenant toutes les valeurs des paramètres (courbe rouge, figure 1) ou en imposant une valeur d'un paramètre (courbes de couleur bleu). On note sur la figure 1a que le choix de la valeur du paramètre influe fortement la pdf (ce choix est donc important), alors que sur la figure 1b, les pdfs sont identiques et donc la valeur de ce paramètre influe peu la variable de sortie analysée.

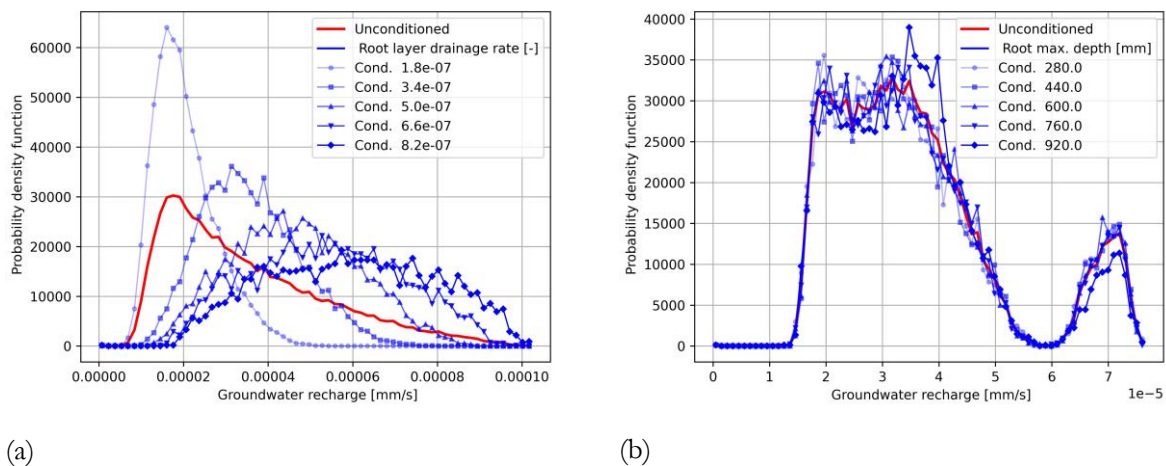


Figure 1 : Pdf de la recharge de nappe.

Plusieurs descripteurs de sensibilité ont été utilisés qui permettent d'analyser l'impact de l'incertitude sur la pdf en entier (Borgonovo), sur la variance de la pdf (Sobol et AMAV) et sur la moyenne de la pdf (AMAE). Tous ces descripteurs sont compris en 0 (paramètre dont la valeur impacte très peu) à 1 (paramètre dont l'incertitude impacte fortement le descripteur). A titre d'exemple, la figure 2 représente ces descripteurs sur une année hydrologique pour l'évaporation réelle et pour chacun des 41 paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle.

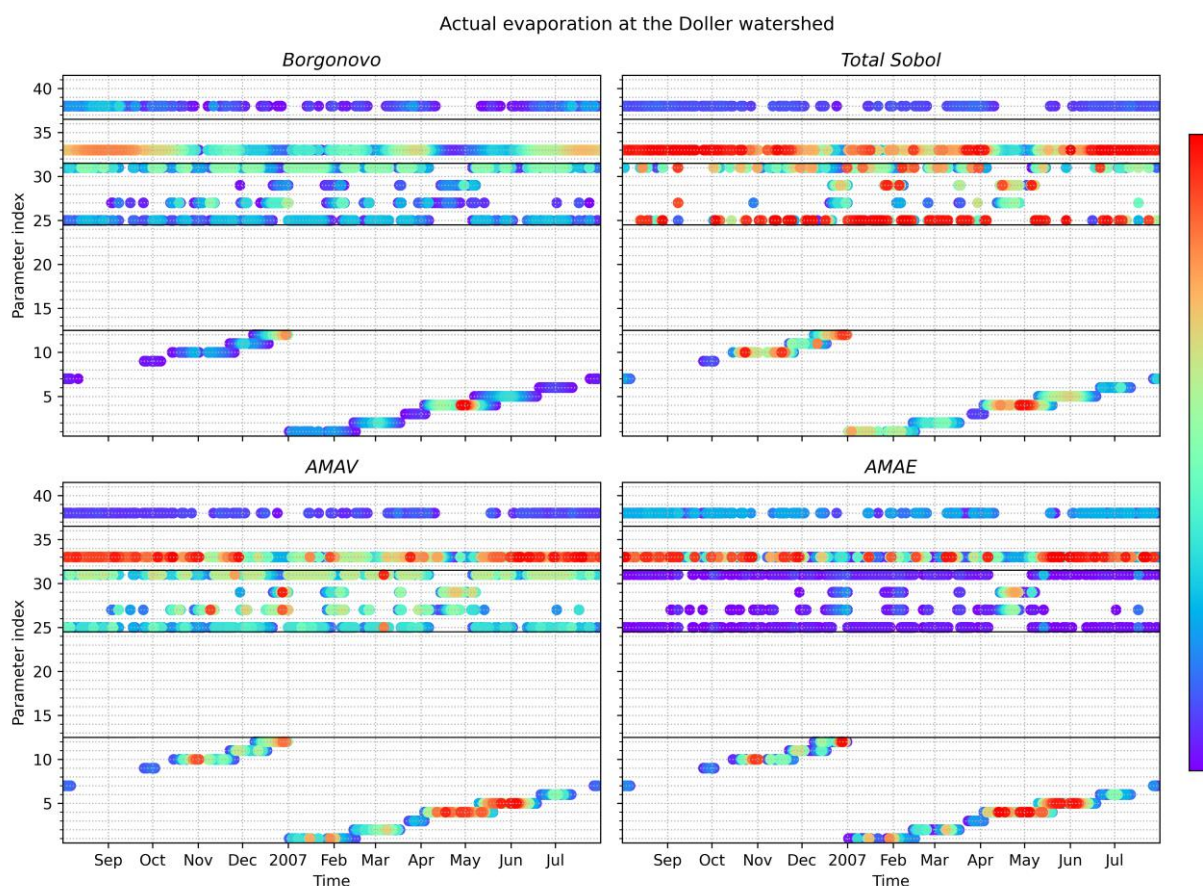


Figure 2 : Evolution temporelle des descripteurs de sensibilité.

Apport de la modélisation intégrée dans la caractérisation des échanges nappes rivières dans la région de Niamey (Sud-Ouest Niger)

HALIDOU M. Abdoul-Wahab^a ; LAWIN Emmanuel^a ; COHARD Jean Martial^b ; NAZOU MOU Yahaya^c ; BOUCHER Marie^b.

^aUniversité d'Abomey Calavi, Institut National de l'Eau, 01 BP : 526 INE/UAC COTONOU, BENIN

^bUniversité Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement, 38400 Saint-Martin-d'Hères Grenoble, FRANCE

^cUniversité Abdou Moumouni de Niamey, Laboratoire Eaux Souterraines et Géoressources, Rive droite 10896 Niamey, NIGER

Mots clés : Fleuve Niger, Barrage de Kandadji, Modélisation Intégrée, ParFlow-CLM

Depuis plusieurs décennies, le sahel fait face à des aléas hydro-climatiques (alternance de période de sécheresses et de précipitations importantes). Les profondes modifications environnementales et climatiques qu'a connu la région sahélienne a conduit au Sud-Ouest Niger, à une augmentation des ruissellements, qui a eu comme conséquence ultime la hausse du niveau piézométrique des aquifères dans la région [1]. Dans une perspective de gestion durable des ressources en eau dans la région, le gouvernement du Niger en collaboration avec ses partenaires techniques et financiers, a lancé la construction d'un barrage à Kandadji (189 km en amont de Niamey) qui aura pour rôles de renforcer la sécurité alimentaire et énergétique des populations mais également de réguler des débits du Fleuve Niger. Cependant l'une des questions que l'on pourrait se poser, est qu'avec la construction dudit barrage en amont, et dans un contexte de hausse piézométrique avérée au Sud-Ouest Niger, quel serait la contribution des eaux souterraines pour soutenir les étiages du Fleuve Niger en aval. Notre approche méthodologique consiste à utiliser le modèle hydrologique ParFlow-CLM [2] afin mettre en œuvre des simulations 2D le long des versants perpendiculaires au Fleuve Niger pour documenter ces flux. Nous avons travaillé sur un versant de 5100 m dans le secteur de Goudel Gab-Goura dans la région de Niamey où des données de forages on permit de renseigner la géométrie des horizons pédo-géologiques. Les résultats des simulations indiquent que globalement le modèle simule de manière satisfaisante la dynamique de fluctuation de niveau de nappes, et d'évapotranspiration le long du versant. Les résultats des calculs des flux obtenus suite à l'utilisation de l'équation de Darcy nous indiquent que les apports souterrains vers le Fleuve Niger s'effectuent essentiellement en période de basses eaux (Mars Avril), avec une variabilité interannuelle dépendante de la pluviométrie de la saison précédente.

Références

[1] Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., & Cappelaere, B. (2008). Land clearance and hydrological change in the Sahel : SW Niger. *Global and Planetary Change*, 61(3–4), 135–150

[2] Maxwell, R. M., & Miller, N. L. (2004). On the development of a coupled land surface and groundwater model. *Développements in Water Science*, 55(PART 2), 1503–1510. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(04\)80161-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(04)80161-8)

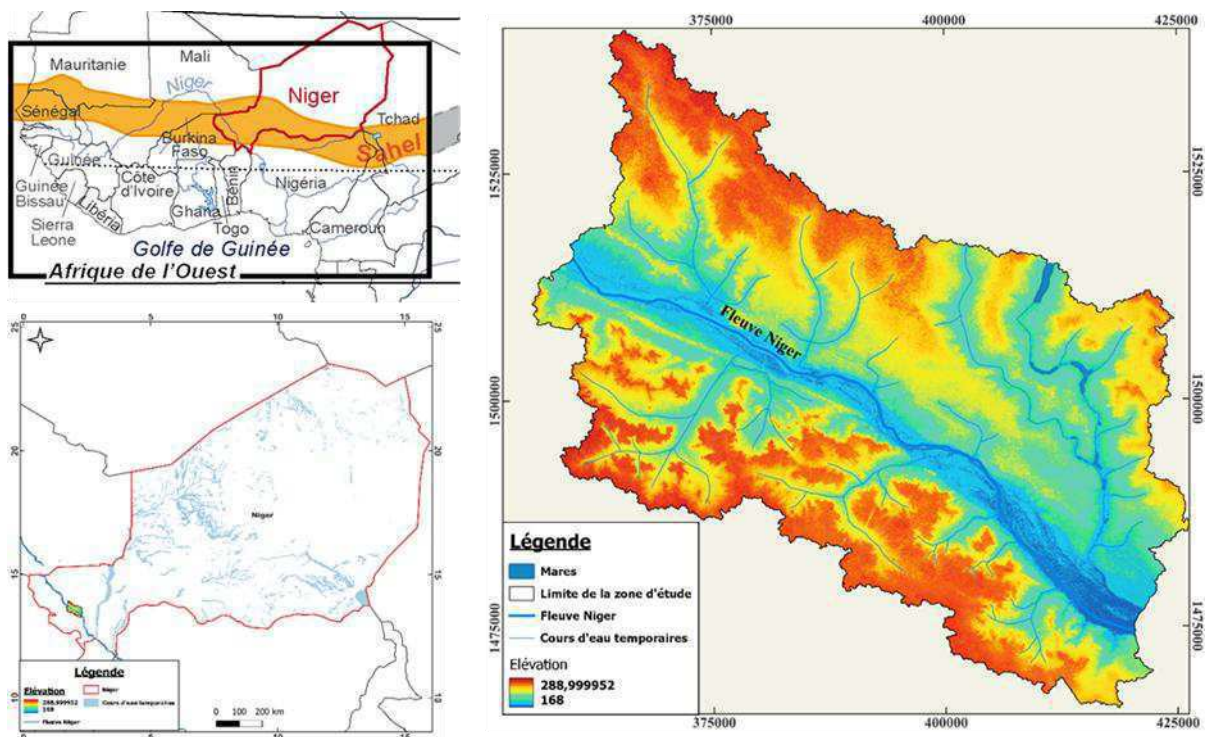


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Moteurs naturels et anthropiques de la dynamique de nappe dans une zone humide riparienne

A. Renaud^{abc}, C. Mügler^b, V. Durand^a, E. Léger^a, M. Pessel^a

^aLaboratoire GEOPS, Université Paris-Saclay, Orsay, 91405, France

^bLaboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Université Paris-Saclay, CNRS, CEA, UVSQ, Gif-sur-Yvette, 91191, France

^cSorbonne-Université, EPHE, CNRS, UMR METIS, Paris, 75005, France

Mots-clés: dynamique de nappe, tourbière, modélisation, variabilité saisonnière

1 Introduction

Le fonctionnement des zones humides ripariennes repose sur une saturation de leur sol tout ou partie de l'année. Ces zones sont alimentées en eau par les précipitations, les eaux souterraines et les eaux de surface environnantes. Elles sont donc sensibles aux conditions météorologiques, qui tendent à évoluer du fait du réchauffement climatique, ainsi qu'aux contraintes anthropiques comme la modification des régimes hydrauliques des rivières liée au changement des modes de gestion imposé par la directive cadre sur l'eau. S'intéresser aux moteurs de la dynamique des niveaux d'eau dans de tels milieux, reconnus comme sensibles, est donc essentiel pour déterminer leur vulnérabilité dans ces contextes changeants. Mais quels sont ces moteurs : la variation conjointe des précipitations et de la demande atmosphérique en eau ? La végétation ? La connectivité hydraulique avec la rivière ? Les facteurs anthropiques ? Et quelles sont leurs importances relatives ?

2 Matériel et méthodes

Afin de répondre à ces questions, des mesures de terrain couplées à une modélisation numérique ont été utilisées pour étudier trois ans d'évolution temporelle du niveau d'eau dans une roselière située dans la plaine alluviale de la rivière Essonne (France). Ce site est instrumenté depuis 2018 avec un réseau de puits d'observation dont trois sont présentés dans cette étude, avec un suivi à haute fréquence de la piézométrie (échantillonnage toutes les 10 min) [1]. Deux sondages carottés ont été réalisés sur site afin de caractériser le type de sol constitutif de la zone humide ainsi que différentes propriétés physiques : densité sèche apparente, porosité, contenu en matière organique. Des tests hydrauliques de type *slug test* ont aussi été effectués dans les piézomètres afin de déterminer le paramètre de conductivité hydraulique à saturation. Enfin, un modèle de type transect en deux dimensions a été construit à partir du code distribué HydroGeoSphere [2], avec une calibration et une validation sur les trois années de suivi. Les simulations ont ensuite été étendues aux périodes pour lesquelles aucune mesure de profondeur de nappe n'était disponible.

3 Résultats

L'étude des carottes de sol non-remanié ainsi que les tests hydrauliques ont permis d'établir que le marais était une tourbière constituée de deux couches de sol superposées aux propriétés contrastées : une couche plus minérale en surface, d'environ un mètre d'épaisseur, avec une conductivité hydraulique horizontale élevée facilitant le transfert latéral de l'eau, et une couche organique moins perméable en profondeur. Les simulations comme les observations ont montré que les fortes fluctuations de la nappe dans le marais, avec l'alternance de niveaux élevés en hiver et bas en été, étaient principalement dues au cycle de croissance saisonnier de la végétation. Les simulations ont souligné que l'approvisionnement en eau du marais par les apports latéraux, notamment la rivière, favorisés par cette couche perméable en surface, était essentiel lorsque la végétation était active en limitant l'abaissement de la nappe pendant les périodes de forte demande atmosphérique. Les données et les simulations ont également démontré l'importance en été des précipitations, même ponctuelles, sur la profondeur de la nappe.

Références

[1] Renaud A. 2023. Compréhension du fonctionnement hydrologique et géochimique d'une zone humide riparienne : cas du marais de Jarcy (Essonne, France). Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay soutenue le 21/02/2023.

[2] Therrien R., McLaren R.G., Sudicky E.A., Panday S.M. 2010. HydroGeoSphere: A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo, ON 830.

Etude régionale des impacts simulés de l'irrigation sur les interactions surface-atmosphère

P. Tiengou^{a,b}, A. Ducharne^a, F. Cheruy^b, P. Arboleda^a, Y. Meurdesoif^c, A. Bierjon^d

^aMilieux Environnementaux, Transferts et Interactions dans les hydrosystèmes et les Sols

^bLaboratoire de Météorologie Dynamique, ^cLaboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, ^dInstitut Pierre-Simon-Laplace

Mots-clés: irrigation, atmosphère, couplages

1 Introduction

On observe depuis quelques années un intérêt et des efforts croissants pour inclure la simulation de l'irrigation dans les modèles de climat afin de mieux prendre en compte les effets de ce processus anthropique sur le climat et les rétroactions sur le cycle de l'eau continental.[1]

Cette étude analyse les impacts de l'irrigation simulée sur les interactions surface-atmosphère avec ICO-LMDZ et ORCHIDEE, les composantes atmosphérique et de surface continentale du modèle de climat de l'IPSL.

2 Méthodes et domaine d'étude

Une nouvelle configuration à aire limitée (LAM) est utilisée pour mener une étude régionale sur la péninsule ibérique entre 2010 et 2022. Elle utilise les mêmes descriptions physiques que le modèle global mais permet de travailler avec des résolutions plus fines pour un moindre coût en calcul. Une nouvelle représentation de l'irrigation, basée sur un calcul de déficit d'humidité du sol, a récemment été développée dans ORCHIDEE [2] et des simulations avec et sans cette représentation sont comparées afin d'étudier la réponse du modèle à l'irrigation simulée.

Les simulations sont évaluées à l'aide de produits d'évapotranspiration, de mesures de débit, et de réanalyses. De plus, le domaine de simulation englobe la vallée de l'Ebre où la campagne de terrain LIAISE (Land-surface Interactions with the Atmosphere In Semi-Arid Environment [3]) a été menée en 2021. Cette campagne a été spécifiquement conçue pour fournir une meilleure compréhension des impacts locaux et régionaux de l'irrigation et des hétérogénéités de surface qu'elle crée, et permettra de compléter l'évaluation des simulations.

Les effets directs à l'interface surface-atmosphère (humidité du sol, flux turbulents, température) sont analysés en premier lieu, avant de se concentrer sur la structure de la couche limite, les précipitations et le bilan d'eau à l'échelle régionale. Différentes résolutions du modèle seront comparées pour mieux comprendre l'importance des paramétrisations de la couche limite atmosphérique pour la description des couplages surface-atmosphère.

Références

- [1] Yao, Yi, et al. "Irrigation-expansion-induced impacts model-intercomparison project (IRRMP)." *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2023.
- [2] Arboleda-Obando, P. F., Ducharne, A., Yin, Z., and Ciais, P. (2023). Validation of a new global irrigation scheme in the land surface model orchidee v2. 2. *EGUsphere*, 2023:1–34.
- [3] Boone, A. A. (2019). Land surface interactions with the atmosphere over the iberian semi-arid environment (liaise). *Gewex News*.

Une modélisation simple des prélèvements en eau pour l'irrigation dans un modèle de surface global

Decharme B.^a, Costantini M.^a, Colin J.^a

^aCentre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France

Mots-clés: hydrologie, prélèvement en eau, échelle globale

Depuis l'avènement de l'agriculture en Mésopotamie il y a plus de 10000 ans, l'homme n'a cessé de développer l'irrigation des cultures pour augmenter les rendements et nourrir la population. L'irrigation a beaucoup évolué depuis et des systèmes d'irrigation modernes avancés permettent aujourd'hui d'accroître son efficacité (Jägermeyr *et al.*, 2015). Les terres irriguées représentent environ 40 % de la production agricole mondiale et 90 % de la consommation mondiale d'eau (Siebert *et al.*, 2010, 2015; Wada *et al.*, 2011). En conséquence, la ressource en eau de certaines régions du globe est susceptible de diminuer considérablement, en particulier dans les régions identifiées comme des points chauds de l'irrigation intensive, tels que les grandes plaines américaines, la vallée centrale de la Californie, le bassin indo-gangétique et le nord de la Chine (Jasechko *et al.*, 2024; de Graaf *et al.*, 2019). De plus, l'irrigation intensive pourrait être en mesure de modifier localement ou régionalement l'équilibre énergétique de surface et donc les échanges entre la surface et l'atmosphère (Cook *et al.*, 2015; Al-Yaari *et al.*, 2022). Ce bref aperçu souligne l'importance de représenter aujourd'hui ces processus anthropiques dans les modèles globaux dit du « système terre » généralement utilisés pour réaliser des projections climatiques futures. Peu de ces modèles représentent aujourd'hui les prélèvements en eau pour l'irrigation, et ces représentations sont encore très basiques. L'eau est généralement puisée dans les rivières et le pompage des eaux souterraines est négligé. Lorsque l'eau des rivières n'est pas suffisante pour assurer l'irrigation, de l'eau est ajoutée au système ou pompée dans l'océan.

L'objectif de notre étude est de proposer une méthode simple pour représenter les prélèvements d'eau d'irrigation dans le modèle surface ISBA-CTRIP (Decharme *et al.*, 2019) utilisé dans le modèle du « système terre » du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France et du CNRS. Dans ce but, nous nous concentrons uniquement sur la paramétrisation des prélèvements d'eau, c'est-à-dire que la demande en eau d'irrigation n'est pas directement calculée par ISBA-CTRIP mais imposée comme un forçage préférentiellement dans la partie des surfaces cultivées de chaque maille du modèle en utilisant les données récentes de prélèvement de Huang *et al.* (2018). Pour fermer le bilan d'eau global, ce flux d'eau irriguée est prélevé dans les eaux souterraines et dans de petits réservoirs de surface, qui peuvent être considérés comme de petits barrages agricoles généralement négligés dans les modèles globaux. Ces réservoirs de surface permettent de stocker l'eau des rivières pendant la saison des pluies afin de la fournir à l'irrigation pendant la saison sèche. Cette nouvelle paramétrisation est évaluée à l'échelle globale sur la période 1971-2010 en mode « forcé » (c'est-à-dire en utilisant des variables météorologiques mélangeant réanalyses et observations en entrée d'ISBA-CTRIP). Pour cette évaluation, nous avons utilisé des estimations satellitaires de stock d'eau continentaux et des observations *in-situ* de débits et de profondeurs de nappes aquifères. L'impact de ces prélèvements en eau sur le bilan hydrique continental simulé sera aussi montré.

Références

Al-Yaari, A., Ducharme, A., Thiery, W., Cheruy, F., and Lawrence, D.: The Role of Irrigation Expansion on Historical Climate Change: Insights From CMIP6, *Earth's Future*, 10, <https://doi.org/10.1029/2022EF002859>, 2022.

Cook, B. I., Shukla, S. P., Puma, M. J., and Nazarenko, L. S.: Irrigation as an historical climate forcing, *Climate Dynamics*, 44, 1715–1730, <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2204-7>, 2015.

de Graaf, I. E., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P., Sutanudjaja, E. H., and Bierkens, M. F.: Environmental flow limits to global groundwater pumping, *Nature*, 574, 90–94, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4>, 2019.

Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J., Alias, A., Saint-Martin, D., Séférian, R., Sénési, S., and Voldoire, A.: Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line

Hydrological Applications, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 1207–1252, <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>, 2019.

Huang, Z., Hejazi, M., Li, X., Tang, Q., Vernon, C., Leng, G., Liu, Y., Döll, P., Eisner, S., Gerten, D., Hanasaki, N., and Wada, Y.: Reconstruction of global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971–2010 and analysis of their spatiotemporal patterns, Hydrology and Earth System Sciences, 22, 2117–2133, <https://doi.org/10.5194/hess-22-2117-2018>, 2018.

Jägermeyr, J., Gerten, D., Heinke, J., Schaphoff, S., Kummu, M., and Lucht, W.: Water savings potentials of irrigation systems: Global simulation of processes and linkages, Hydrology and Earth System Sciences, 19, 3073–3091, <https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015>, 2015.

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., and Kirchner, J. W.: Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally, Nature 2024 625:7996, 625, 715–721, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>, 2024.

Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., and Portmann, F. T.: Groundwater use for irrigation - A global inventory, Hydrology and Earth System Sciences, 14, 1863–1880, <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>, 2010.

Siebert, S., Kummu, M., Porkka, M., Döll, P., Ramankutty, N., and Scanlon, B. R.: A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005, Hydrology and Earth System Sciences, 19, 1521–1545, <https://doi.org/10.5194/hess-19-1521-2015>, 2015

Wada, Y., Van Beek, L. P., and Bierkens, M. F.: Modelling global water stress of the recent past: On the relative importance of trends in water demand and climate variability, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 3785–3808, <https://doi.org/10.5194/hess-15-3785-2011>, 2011.

Etat et évolution du bilan hydrologique d'une retenue d'eau dans un contexte tempéré sous l'action du changement climatique

A. Coche^a, R. Abhervé^b, J-Y. Gaubert^c, L. Aquilina^a, J-R. De Dreuzya^a

^aUniv Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France

^bCentre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland

^cEau du Bassin Rennais, Société Publique Locale, 35000 Rennes, France

Mots-clés: réservoir, barrage, prévision, gestion

1 Introduction

Les réservoirs artificiels représentent en France une source importante pour l'alimentation en eau potable. Les gestionnaires de l'eau doivent néanmoins souvent composer avec un certain nombre d'inconnues dans la réponse des réservoirs à leur environnement. En particulier, les échanges entre le réservoir et la nappe phréatique sont rarement connus, de même que la surverse. À cela s'ajoute l'évolution du cycle de l'eau sous l'effet du changement climatique qui réduit également la visibilité sur le comportement futur des réservoirs. Dans ce contexte, les modèles prédictifs de retenues d'eau apparaissent comme un complément nécessaire aux modèles de nappe et de débit des cours d'eau, avec lesquelles ils doivent également s'articuler.

Pour approvisionner en eau potable les 500 000 habitants de son territoire, la Collectivité Eau du Bassin Rennais s'appuie sur 17 ressources, parmi lesquelles deux réservoirs artificiels principaux, dont le barrage de la Chèze. Cette aire d'alimentation représente habituellement autour de 8-18 % des prélèvements annuels et permet le stockage de 14,5 millions de m³, ce qui en fait une ressource essentielle dans le schéma d'alimentation en eau potable.

Dans le contexte d'une incertitude croissante sur les ressources en eau du fait du changement climatique, Eau du Bassin Rennais souhaite être en mesure d'anticiper les niveaux d'eau dans le réservoir de la Chèze afin d'ajuster au mieux la temporalité de remplissage et de prélèvement du réservoir ainsi que la répartition des prélèvements entre les différentes aires d'alimentation.

2 Matériel et méthodes

2.1 Site d'étude

Le réservoir de la Chèze se situe dans le bassin versant de la Chèze au sud-ouest de Rennes. La lithologie de ce bassin versant (grès armoricain et schistes rouges) se traduit par un aquifère de faible porosité et épaisseur efficaces [1]. Les débits y sont particulièrement sensibles au régime de précipitations.

2.2 Modèle

Le site d'étude a été modélisé avec l'application HydroModPy, particulièrement adaptée pour représenter les contrôles géologiques et topographiques des écoulements souterrains dans les aquifères non-confinés peu profonds comme les aquifères de socles bretons [2]. HydroModPy est une application open-source développée en Python et conçue pour être facilement déployée sur les sites d'études. Un module pour modéliser le réservoir a été développé en implémentant le module Lake (*LAK*) de MODFLOW via la librairie Python *Flopy*. Ce modèle permet d'intégrer le réservoir artificiel dans le cycle de l'eau en incluant les échanges du réservoir avec l'atmosphère, les cours d'eau et la nappe phréatique, tout en prenant également en compte la gestion opérationnelle du réservoir telle que l'alimentation du réservoir, les prélèvements, le débit de restitution et la surverse.

3 Résultats

Une première partie a consisté à reproduire avec le modèle les mesures historiques de niveau du barrage (Fig. 1). La modélisation du réservoir au sein du bassin versant a permis d'identifier les flux imputables aux échanges entre le réservoir et la nappe, ainsi que ceux imputables à la surverse (Fig. 2). La fuite du réservoir vers la nappe est localisée à l'aval du réservoir là où la hauteur d'eau est la plus grande, et est relativement constante dans l'année, ce qui en fait un soutien important du cycle de l'eau en aval, notamment l'été. L'alimentation du réservoir par la nappe se fait quant à elle par l'amont, de manière plus ou moins étendue

en fonction de la période (Fig. 3). La surverse représente une part significative des flux sortants du réservoir, du même ordre de grandeur que les fuites vers la nappe.

Une deuxième partie consiste à prédire l'évolution du niveau du réservoir sur les six prochains mois à partir de prévisions climatiques saisonnières. Pour initialiser la prévision du réservoir, le modèle simule dans un premier temps l'état présent à partir des données les plus récentes (climatiques, hydrologiques et gestion opérationnelle) récupérées automatiquement. Dans un second temps, le modèle permet d'explorer simultanément plusieurs scénarios de prévisions climatiques et plusieurs scénarios de gestion.

Les perspectives d'amélioration de l'ergonomie de l'outil, ainsi que la représentation des incertitudes, sont discutées. La possibilité d'anticiper la surverse de manière simplifiée à partir des prévisions à court terme du débit de la Chèze est examinée.

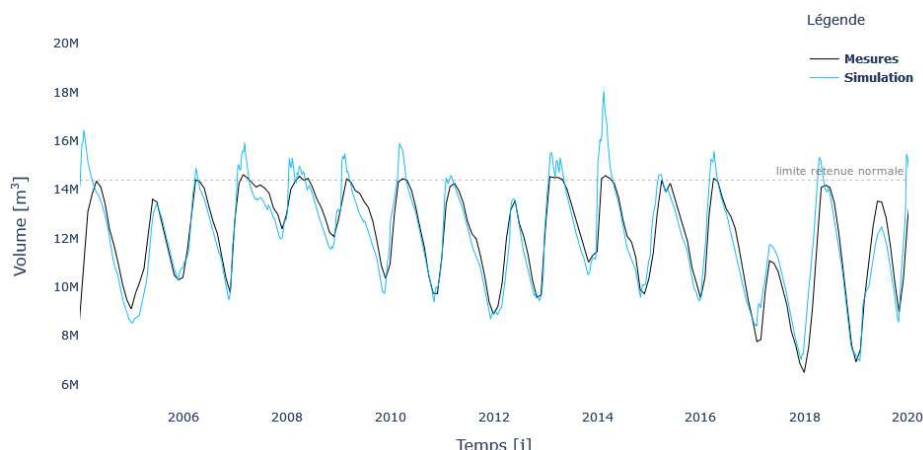


Fig. 1 Chroniques de niveau du réservoir de la Chèze.

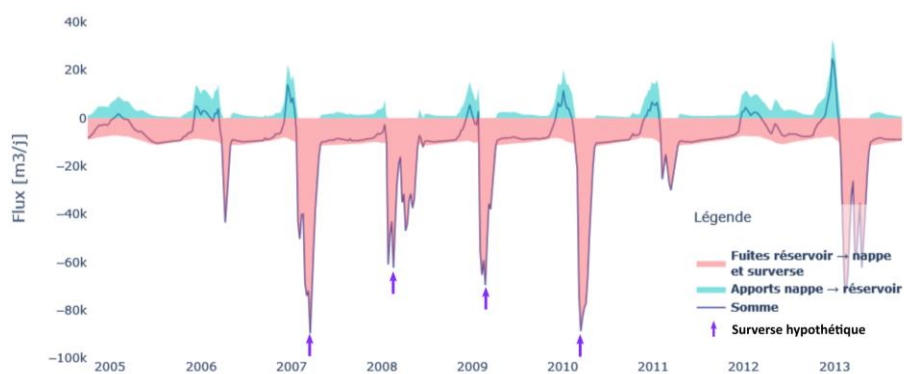


Fig. 2. Surverse et échanges souterrains.

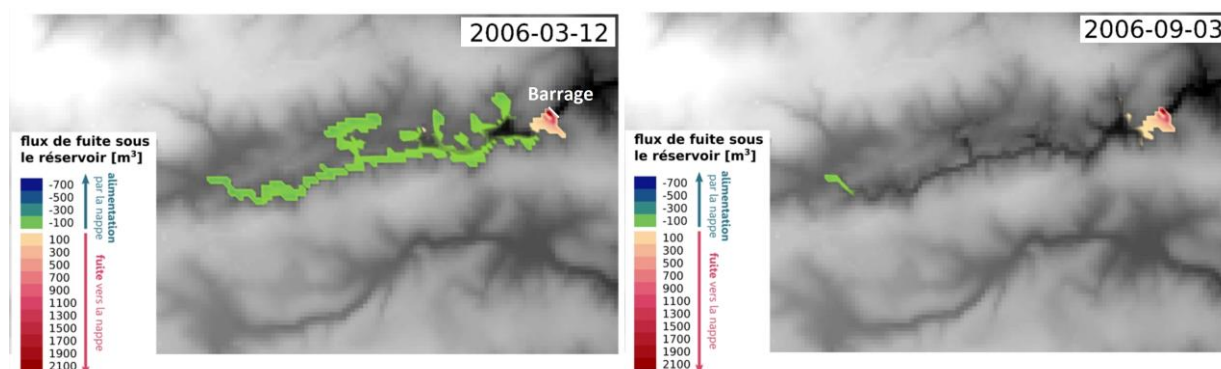


Fig. 3 Flux d'échanges entre le réservoir et la nappe phréatique.

Références

- [1] Abhervé, R. 2022. Intégration du changement climatique dans la gestion de la ressource en eau: exemple du bassin rennais (Thèse de doctorat), Université de Rennes.
- [2] Gauvain A., Abhervé R., Le Mesnil M., Roques C., Marçais J., et al. 2023. HydroModPy: Une application python pour automatiser le déploiement des modèles de bassin versant à grande échelle, 28ème édition de la Réunion des sciences de la Terre (RST 2023), Société Géologique de France (SGF), Rennes, France.

Evolution de la ressource mondiale en eau sous l'effet combiné du changement climatique et des prélèvements pour l'irrigation.

M. Costantini^a, B. Decharme^a, J. Colin^a

^a *Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo- France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France*

Mots-clés: Ressource mondiale en eau, Irrigation, Modèle de Climat

Depuis le début du siècle, la demande en eau est croissante dans toutes les régions du monde [1,2]. Soumis à une forte demande d'augmentation de sa productivité, le secteur agricole est en grosse partie responsable de l'augmentation de cette demande en eau afin d'irriguer les cultures. En effet, l'irrigation permet d'améliorer le rendement des cultures en réduisant leur stress hydrique là où l'apport des précipitations n'est pas suffisant [3].

Aujourd'hui, l'irrigation représente environ 70% des prélèvements d'eau douce [4] et les terres irriguées assurent environ 40% de la production agricole mondiale. Ces pratiques nécessitent de puiser de grandes quantités d'eau dans la réserve hydrologique et impactent directement le cycle hydrologique dont elles modifient les flux. De plus, l'irrigation redistribue les eaux de surface en se réinfiltrant en partie dans les sols, perturbe la recharge et participe à la modification des débits des fleuves [5]. Elle a aussi un impact sur les conditions météorologiques de l'échelle locale à régionale via des modifications d'évapotranspiration, de précipitations, mais aussi de températures de surface [6, 7].

Les réserves hydrologiques n'étant pas infinies, les prélèvements d'eau doivent être réalisés consciencieusement pour ne pas déclencher de pénuries pouvant être catastrophiques pour les écosystèmes (ainsi que pour les êtres humains). Dans certaines régions, l'augmentation des prélèvements pour faire face au changement climatique et/ou à l'augmentation de la demande agricole, renforce la pression sur les réserves hydrologiques qui verront sûrement leurs sollicitations augmenter et leur ressource diminuer [5]. Les enjeux liés à la ressource en eau étant multiples, il est donc fondamental de développer des méthodes permettant d'estimer son évolution face au changement climatique tout en prenant en compte les prélèvements.

Ici, nous avons utilisé le modèle global de climat du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) afin d'étudier l'évolution de la ressource mondiale en eau sous les effets combinés du changement climatique et des prélèvements pour l'irrigation. Pour ce faire, nous avons intégré à ce modèle de climat une paramétrisation simple des prélèvements destinés à l'irrigation. Dans ce schéma, les prélèvements proviennent des eaux souterraines ainsi que des réservoirs de surface et sont imposés comme forçage à partir des données passées [8] et futures [9] provenant de modèles hydrologiques. Nous avons réalisé un ensemble de simulations avec et sans irrigation, couvrant la période historique (1900-2014) et trois scénarios futurs (2014-2100) : SSP126, SSP245 et SSP585.

Les résultats montrent que le changement climatique pilote l'évolution de la ressource en eau sur la majorité du globe. Néanmoins, dans certaines régions irriguées, les prélèvements prennent le pas sur le changement climatique et affectent significativement la ressource en eau. Ces effets sont suffisamment importants pour affecter de manière significative

l'évolution globale du stock d'eau souterraine. En effet, ce dernier augmente avec le changement climatique mais diminue lorsque les prélèvements d'eau destinés à l'irrigation sont pris en compte. Ces résultats mettent en lumière l'importance de représenter l'irrigation et les prélèvements en eau associés dans les modèles de climat.

Références

- [1] Wada Y., van Beek L.P.H., Bierkens M.F.P. 2011. Modelling global water stress of the recent past: On the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15, 3785–3808
- [2] Siebert, S., Kummu, M., Porkka, M., Döll, P., Ramankutty, N., Scanlon, B. R. 2015. A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19(3). 1521–1545
- [3] Wada, Y., Wisser, D., Eisner, S., Flörke, M., Gerten, D., Haddeland, I., Hanasaki, N., Masaki, Y., Portmann, F. T., Stacke, T., Tessler, Z., and Schewe, J. 2013. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate change. *Geophysical Research Letters*. 40(17). 4626–4632.
- [4] 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.
- [5] de Graaf, I. E. M., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H., Bierkens, M. F. P. 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*. 574(7776). 90–94.
- [6] Cook, B. I., Shukla, S. P., Puma, M. J., Nazarenko, L. S. 2015. Irrigation as an historical climate forcing. *Climate Dynamics*. 44(5–6). 1715–1730.
- [7] Al-Yaari, A., Ducharme, A., Thiery, W., Cheruy, F., Lawrence, D. 2022. The Role of Irrigation Expansion on Historical Climate Change: Insights From CMIP6. *Earth's Future*. 10(11).
- [8] Huang, Z., Hejazi, M., Li, X., Tang, Q., Vernon, C., Leng, G., Liu, Y. 2018. Reconstruction of global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971 – 2010 and analysis of their spatiotemporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22. 2117–2133.
- [9] Khan, Z., Thompson, I., Vernon, C. R., Graham, N. T., Wild, T. B., Chen, M.. 2023. Global monthly sectoral water use for 2010-2100 at 0.5° resolution across alternative futures. *Scientific Data*. 10(1). 201.

Usages de l'eau et changement climatique sur le bassin du Rhône : quantification de l'impact sur la ressource du changement climatique et de stratégies de gestion des grandes retenues hydro-électriques

F. Branger^a, J. Bonneau^{a,b}, N. Pellerin^a, L. Mimeau^a, E. Sauquet^a

^aINRAE, UR Riverly, Villeurbanne, France

^bINSA LYON DEEP, Villeurbanne, France

Mots-clés: ressource en eau, changement climatique, usages, barrages, régime nival

Le changement global (changement climatique et anthropique) représente une menace pour la ressource en eau des grands bassins versants aménagés comme celui du Rhône, en modifiant le fonctionnement hydrologique du bassin et en perturbant la gestion des usages de la ressource en eau. Sur le bassin hydrographique du Rhône et ses affluents, des situations de crise locale ont déjà été recensées sur certains territoires/affluents, ce qui menace la gestion globale de la ressource sur le bassin et sa pérennité en climat futur.

En s'appuyant sur un modèle hydrologique distribué développé sur l'ensemble du bassin versant du Rhône et prenant en compte les principaux usages de l'eau, J2000-Rhône, nous avons défini et croisé des projections climatiques et des scénarios d'évolution d'un des principaux usages sur la partie française : la gestion des grandes retenues hydroélectriques. Les projections climatiques retenues sont issues du projet national français Explore 2, qui vise à actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (ressource et aléa) et en faciliter le transfert vers les acteurs de l'eau. Trois scénarios de gestion des retenues ont été définis, correspondant au maintien de la gestion moyenne actuelle, à une adaptation aux effets du changement climatique en hydrologie naturelle, et au maintien de débits estivaux aux valeurs actuelles, dans un objectif de vision globale du régime hydrologique.

Les résultats montrent une évolution significative des débits, notamment au niveau des variations saisonnières, ainsi qu'un fort contraste spatial. Les affluents alpins apparaissent très impactés, avec la disparition des régimes hydrologiques purement nivaux ou nivo-glaciaires connus actuellement. La stratégie de gestion des barrages apparaît avoir un impact sur certains affluents. Sur le fleuve Rhône, le changement climatique induit un régime plus contrasté avec une baisse significative des débits estivaux. Ces évolutions pourraient se traduire par une pression plus forte à usage constant ou accru sur la ressource d'un fleuve déjà bien mobilisé. La perspective de ce travail est d'intégrer d'autres usages et des scénarios de leur évolution dans la modélisation (en particulier prélèvements pour l'eau potable et l'irrigation) de manière à obtenir une vision globale des pressions sur le fleuve et son bassin versant.

Irrigation et effet physiologique du CO₂ : quelle influence sur les impacts hydrologiques du changement climatique simulés en France ?

Agnès Ducharne¹, Peng Huang¹, Pedro Arboleda¹, Vladislav Bastrikov²

¹ METIS-IPSL (Sorbonne Université/CNRS/EPHE, Paris, France)

² Science Partners (Paris, France)

Le projet Explore2 vise à quantifier l'évolution des ressources en eau (débits et écoulements souterrains) jusqu'en 2100 en France métropolitaine, ainsi que les incertitudes associées. Dans ce but, un large ensemble de projections hydrologiques a été généré, grâce à 9 modèles hydrologiques, alimentés par une quarantaine de projections climatiques régionalisées et débiaisées, couvrant plusieurs scénarios de forçage radiatif futur (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). Un choix fort de ce projet est de cibler les impacts hydrologiques du seul changement climatique, en ignorant ceux du changement d'occupation des terres ou de l'évolution des prélèvements en eau.

L'IPSL a participé à cet exercice avec son modèle de surface continentale ORCHIDEE, calibré pour restituer les variations passées de l'évapotranspiration et des débits. Contrairement à la majorité des modèles hydrologiques utilisés dans Explore2, ORCHIDEE offre une description détaillée du fonctionnement de la végétation et de son influence sur les ressources en eau. En particulier, il permet de tenir compte des changements d'occupation des terres et de leur possible irrigation, dont les volumes sont calculés en fonction des surfaces irriguées, de l'humidité des sols et des ressources en eau disponibles, lesquelles sont en retour réduites par les prélèvements effectués pour l'irrigation. ORCHIDEE rend également compte des deux effets antagonistes du CO₂ sur la végétation (effets anti-transpirant et fertilisant).

Les projections hydrologiques que nous avons réalisées pour Explore2 supposent une occupation des terres constante (selon la carte de 2005), en négligeant l'irrigation (i.e. en supposant que les surfaces irriguées sont nulles), mais en tenant compte de l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique (depuis 317 ppm en 1960 à 1000 ppm en 2100 sous émissions RCP8.5). Pour examiner l'incertitude associée à ces deux derniers choix, nous avons généré des simulations alternatives pour 4 projections climatiques contrastées RCP8.5 : soit en activant le calcul de l'irrigation, soit en désactivant les effets biophysiques du CO₂ sur la végétation (tout en en gardant bien sur les effets radiatifs sur le climat).

Les résultats indiquent que l'effet biophysique du CO₂ sur la végétation fait généralement baisser l'évapotranspiration et augmenter les écoulements, ce qui signifie que l'effet anti-transpirant domine dans ORCHIDEE sur l'effet fertilisant. On trouve cependant le contraire, c'est à dire une baisse des écoulements en tenant compte de l'effet biophysique du CO₂, dans les conditions très sèches. Nous trouvons aussi que l'irrigation fait baisser les écoulements et les ressources en eau, comme attendu, mais avec une influence quantitativement plus faible que l'effet biophysique du CO₂. Nous terminerons en discutant les conséquences de ces résultats sur les projections hydrologiques Explore2, leurs incertitudes, et leur interprétation.

Représentation des aquifères, des plaines inondées et de l'irrigation dans un modèle global de climat : effet sur le climat présent et le changement climatique projeté

J. Colin^a, B. Decharme^a, M. Costantini^a

^aCentre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France

Mots-clés: hydrologie, aquifères, plaines inondées, irrigation, changement climatique, modélisation climatique globale

L'hydrologie continentale fait partie intégrante du système climatique, via les échanges d'eau et d'énergie à l'interface surface-atmosphère. Ainsi, l'état des réservoirs d'eau continentale évolue sous l'effet du changement climatique et des prélèvements humains (de Graaf et al., 2019 ; Costantini et al., 2023 ; Jasechko et al., 2024). Et en retour, ces évolutions sont susceptibles d'affecter l'état moyen de l'atmosphère et sa variabilité (Wang et al., 2018, Arboleda et al., 2022 ; Colin et al., 2023). Pourtant, la plupart des modèles globaux de climat ne représentent qu'une partie des réservoirs et flux d'eau continentale. En effet, rares sont ceux qui intègrent une représentation des eaux souterraines (aquifères) ou des plaines d'inondation saisonnière (débordement des rivières). Une représentation de l'irrigation a récemment été implémentée dans un nombre de croissant de modèles, mais ces derniers sont encore minoritaires.

Au cours des dernières années, la version du modèle ISBA-CTRIP (intégré à SURFEX) qui est utilisée dans les modèles globaux de climat du CNRM (CNRM-CM6-1 (Voldoire et al., 2019) et CNRM-ESM2-1 (Séférián et al., 2019)) s'est dotée d'une représentation des aquifères et des plaines d'inondation (Decharme et al., 2019), incluant les écoulements horizontaux d'eau souterraine, les échanges bidirectionnels aquifère/rivière et aquifère/sol, l'évaporation directe des surfaces inondées et l'infiltration de cette eau dans le sol. Plus récemment, une paramétrisation des prélèvements d'eau pour l'irrigation a été implémentée dans ISBA-CTRIP. Celle-ci repose sur l'utilisation de jeux de données de prélèvements, imposés comme forçage au modèle, qui va puiser l'eau à irriguer dans les aquifères et des réservoirs de surface et la distribue sur les surfaces cultivées.

Nous proposons ici de présenter les principaux résultats de trois études que nous avons récemment menées afin d'évaluer l'effet de ces différentes composantes de l'hydrologie continentale (aquifères, des plaines d'inondation et irrigation) sur le climat et le changement climatique simulé par CNRM-CM6-1. La première étude porte sur l'effet conjoint de l'ajout des aquifères et des plaines d'inondation sur le climat de la période récente (1980-2014). La deuxième se concentre sur les aquifères, en s'intéressant à l'effet de celles-ci sur le signal de changement climatique évalué à partir de simulations réalisées avec un forçage pré-industriel (climat pré-industriel) et après un quadruplement de la concentration atmosphérique en CO₂ (climat 4xCO₂). Enfin, dans la troisième étude, nous évaluons l'impact de l'irrigation sur le changement climatique simulé en suivant trois scénarios futurs d'évolution de la concentration de gaz à effet de serre (SSP126, SSP245 et SSP585).

Les résultats montrent que chacune de ces trois composantes du système hydrologique (aquifères, plaines d'inondation et irrigation) influe essentiellement sur l'évapotranspiration, ce qui entraîne une diminution des températures chaudes et une augmentation des précipitations dans certaines régions. Cet effet tend à être plus marqué dans les projections climatiques futures (scénario SSP et climat 4xCO₂, ce qui se traduit par une modulation du signal de changement climatique (atténuation du réchauffement, réduction de l'assèchement ou amplification de l'augmentation des précipitations).

Références

Arboleda Obando, P. F., Ducharme, A., Cheruy, F., Jost, A., Ghattas, J., Colin, J. and Nous, J.: Influence of hillslope flow on hydroclimatic evolution under climate change, *Earth's Future*, 10, e2021EF002613, <https://doi.org/10.1029/2021EF002613>, 2022.

Colin, J., Decharme, B., Cattiaux, J., and Saint-Martin, D.: Groundwater feedbacks on climate change in the CNRM global climate model. *Journal of Climate*, 36(21), 7599-7617. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0767.1>, 2023

Costantini, M., Colin, J., and Decharme, B. : Projected Climate- Driven Changes of Water Table Depth in the World's Major Groundwater Basins. *Earth's Future*, 11(3), e2022EF003068, <https://doi.org/10.1029/2022EF003068>, 2023

Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J., Alias, A., Saint-Martin, D., Séférian, R., Sénési, S., and Voldoire, A.: Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 1207–1252, <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>, 2019.

de Graaf, I. E., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P., Sutanudjaja, E. H., and Bierkens, M. F.: Environmental flow limits to global groundwater pumping, *Nature*, 574, 90–94, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4>, 2019.

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., and Kirchner, J. W.: Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally, *Nature* 2024 625:7996, 625, 715–721, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>, 2024.

Voldoire, A. and Coauthors: Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM CM6 1,- - *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 2177–2213, <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>, 2019.

Séférian, R. and Coauthors: Evaluation of CNRM Earth System model, CNRM- ESM2 1: role of Earth system processes in present day and future climate, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 4182-4227, <https://doi.org/10.1029/2019MS001791>, 2019

Wang, F., Ducharne, A., Cheruy, F., Lo, M.-H, and Grandpeix J.-Y.: Impact of a shallow groundwater table on the global water cycle in the IPSL land–atmosphere coupled model, *Clim Dyn* 50, 3505–3522, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3820-9>, 2018.

Présentations orales

Jeudi 20 juin 2024

n°	Titre	Oratrice / Orateur
18	Conférence invitée	Fadji Maina
19	Nouveau modèle de représentation du continuum sol-plante-atmosphère à l'échelle de l'écosystème : présentation et étude de cas en forêt tempérée	Corvi Oscar
20	Higher global gross primary productivity under future climate with more advanced representations of photosynthesis	Cuntz Matthias
21	Modélisation en transport-réactif de la géochimie des eaux dans quatre bassins versants de montagne en contexte carbonaté (IR OZCAR)	Ackerer Julien
22	Contrôles hydrologiques et géochimiques des interactions roche-eau-plante	Kuppel Sylvain
23	Evaluation des contributions à l'écoulement simulées par un modèle hydrologique distribué à partir de données biogéochimiques	Grandjouan Olivier
24	Comparaison de deux approches de métamodélisation pour la calibration robuste d'un modèle hydrologique de transfert de pesticides	Radisic Katarina
25	Une étape vers la détection des poches d'eau intra-glaciaires, le cas de Tete Rousse (Massif du Mt. Blanc) revisité.	Ozenda Olivier
26	Disponibilité de la ressource en eau actuelle et future dans le bassin versant de la Sanaga: cas des sous bassins de Mbakaou et Bamendjing	Ebodé Valentin Brice
27	Jusqu'à quel point un modèle global de surface continental peut-il décrire une dynamique hydrologique locale ? Une tentative avec ORCHIDEE sur une parcelle	Maugis Pascal
28	Favoriser le développement de modèles interdisciplinaires de la Zone Critique dans OZCAR pour une compréhension intégrée des processus et impacts	Rivière Agnès
29	A modèle, modèle et demi... réflexion participative	Charpentier Isabelle

Nouveau modèle de représentation du continuum sol-plante-atmosphère à l'échelle de l'écosystème : présentation et étude de cas en forêt tempérée

O. Corvi^{1a}, B. Belfort^a, M. Cuntz^b, S. Weill^a

^a Université de Strasbourg, CNRS, ENGEEES, Institut Terre et Environnement de Strasbourg, UMR 7063, 5 rue René Descartes, Strasbourg F-67084, France

^b Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy, France

Mots-clés: continuum sol – plante – atmosphère ; photosynthèse ; hydrodynamique en milieux poreux

Introduction

Un des effets du changement climatique global en cours sera l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Les forêts sont vulnérables aux sécheresses et le seront d'autant plus dans le futur [1], provoquant d'importants dépérissements forestiers, une mortalité accrue des peuplements [2] et perturbant les cycles de l'eau et du carbone dans ces écosystèmes [3]. L'hydraulique des arbres regroupe l'ensemble des processus participants au transport de l'eau à travers les différentes parties d'un arbre, depuis l'absorption racinaire jusqu'à la transpiration des feuilles de la canopée. Ce cadre conceptuel fait l'objet d'une attention croissante de la part de divers champs de recherche à cause de son rôle important dans la caractérisation du fonctionnement des écosystèmes forestiers en contexte de climat changeant [4]. Une approche mécaniste des processus hydrauliques des plantes permet de mieux comprendre les interactions complexes entre les différents processus bio-physiques des plantes, mieux caractériser l'impact des sécheresses sur leurs fonctions écophysologiques et améliorer la capacité prédictive des flux d'eau ou de carbone des écosystèmes forestiers soumis à un stress hydrique [2, 4]. Différents modèles incorporant le transport hydraulique des plantes ont été développés ces dernières années. Ces modèles se heurtent néanmoins à d'importantes difficultés, à la fois d'ordre numérique pour coupler des processus non-linéaires complexes, mais aussi d'ordre pratique pour paramétrer la représentation des différents processus régissant les transferts d'eau et d'énergie depuis le bas du sol jusqu'au sommet de la canopée [2, 4]. Cette communication précise les formalismes intégrés dans le modèle SoVegI (Soil Vegetation Interaction model), un nouveau modèle de représentation efficace du cycle de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère à l'échelle de l'écosystème, et présente la capacité du modèle à représenter les flux d'eau et de carbone en contexte de sécheresse dans une forêt tempérée.

Matériel et méthodes

Vue d'ensemble des formalismes intégrés dans SoVegI

SoVegI représente les transferts hydriques dans le sol, le système hydraulique de l'arbre et la canopée. Le sol est décrit comme un milieu poreux variablement saturé où les écoulements sont décrits selon l'équation de Richards et utilisant les relations fonctionnelles de Mualem-van Genuchten pour décrire les relations entre conductivité, teneur en eau et pression hydrique. Le prélèvement racinaire est fonction de la différence de pression entre le sol et le système racinaire, permettant des échanges d'eau entre la plante et le sol dans les deux sens. Le transport hydraulique dans la plante, des racines aux feuilles est décrit par un formalisme analogue au transport hydraulique en milieu poreux. L'équation de Richards avec des relations hydrodynamiques spécifique aux plantes (courbes PLC) est utilisé pour modéliser les potentiels hydriques dans la végétation, à fine échelle spatiale. L'ensemble des transferts dans le sol, les racines et le tronc de l'arbre est résolu ensemble par un schéma numérique performant s'appuyant sur une linéarisation de Newton-Raphson. Un modèle de transfert radiatif permet de représenter simplement l'absorption de la lumière par la végétation. Il fait la distinction entre les parties ensoleillées et ombragées de la canopée. Un modèle couplé de bilan d'énergie, assimilation photosynthétique et conductance stomatale permet de

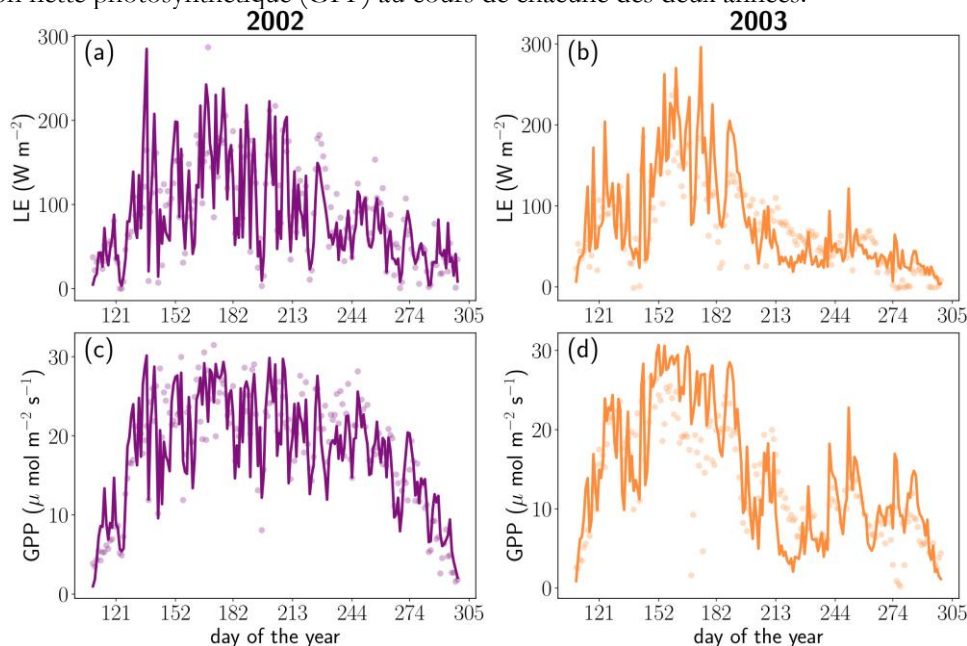
déterminer les différents flux énergétiques échangés avec l'atmosphère. Plusieurs modèles de conductance stomatale sont implémentés, testant différents niveaux de couplage entre l'hydraulique de la plante, les réserves en eau du sol et les processus bio-physiques de la canopée. Le couplage entre le modèle hydraulique et le modèle couplé énergie-photosynthèse est réalisé de façon séquentielle en utilisant la pression en haut du tronc comme variable d'échange.

Le site expérimental choisi

Le site expérimental de Hesse est une parcelle forestière de 0,6 ha située dans la partie centrale de la forêt domaniale du village de Hesse, dans l'est de la France (48° 04.53 N, 7° 03.877 E). Les arbres sont principalement des hêtres européens (*Fagus sylvatica* L., 95%) constituant une canopée presque fermée, de sorte que la végétation de l'étage inférieur est peu abondante. L'indice annuel de surface foliaire (LAI) varie entre 5,2 et 7,1 [5] et la hauteur moyenne des arbres en 2005 était de 16,2 m. Le type de sol est intermédiaire entre un luvisol et un luvisol stagnant. La texture de la couche supérieure du sol est l'argile limoneuse. La majeure partie de la biomasse racinaire est située dans la couche de sol de 0 à 40 cm de profondeur. Le site expérimental fait partie du réseau de surveillance ICOS. Les données d'Eddy-covariance et micrométéorologiques sont collectées depuis 1997 [6]. Une station météorologique située à 22,5 m de hauteur enregistre le rayonnement incident dans différentes gammes de longueur d'ondes, ainsi que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et la pluie. La teneur en eau du sol est mesurée à cinq profondeurs de sol (0,10, 0,30, 0,55, 0,80 et 1,20 m de profondeur).

Résultats

Le modèle SoVegI a été calé sur l'année 2002 (année hydrologique normale) et testé sur l'année 2003 ayant fait face à une sécheresse importante. La figure suivante présente les flux de chaleurs latents (LE) et l'assimilation nette photosynthétique (GPP) au cours de chacune des deux années.



Références

- [1] Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., ... & Zanne, A. E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, 491(7426), 752-755.
- [2] Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531-539.
- [3] Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Venetier, M., ... & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, 259(4), 660-684.
- [4] Torres- Ruiz, J. M., Cochard, H., Delzon, S., Boivin, T., Burlett, R., Cailleret, M., ... & Martin- StPaul, N. K. (2024). Plant hydraulics at the heart of plant, crops and ecosystem functions in the face of climate change. *New Phytologist*, 241(3), 984-999.
- [5] Tuzet, A., Perrier, A. and Leuning, R. 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, 26 (7): 1097–1116.
- [6] Granier, A., Bréda, N., Longdoz, B., Gross, P., & Ngao, J. (2008). Ten years of fluxes and stand growth in a young beech forest at Hesse, North-eastern France. *Annals of Forest Science*, 65(7), 1.

Higher global gross primary productivity under future climate with more advanced representations of photosynthesis

Matthias Cuntz^c, Jürgen Knauer^{a,b}, Benjamin Smith^a, Josep G. Canadell^b, Belinda E. Medlyn^a, Alison C. Bennett^d, Silvia Caldararu^{e,f}, Vanessa Haverd^b

^aHawkesbury Institute for the Environment, Western Sydney University, Penrith, NSW, Australia

^bCSIRO Environment, Canberra, ACT, Australia

^cUniversité de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy, France

^dSchool of Ecosystem and Forest Science, University of Melbourne, Richmond, VIC, Australia

^eBotany, School of Natural Sciences, Trinity College Dublin, Dublin, Ireland

^fiCRAG SFI Research Centre in Applied Geosciences, Dublin, Ireland

Keywords: Land surface model, Coordination, Acclimation

1 Abstract

Gross primary productivity (GPP) is the key determinant of land carbon uptake, but its representation in terrestrial biosphere models (TBMs) does not reflect our latest physiological understanding. We implemented three empirically well supported but often omitted mechanisms into the TBM CABLE-POP: photosynthetic temperature acclimation, explicit mesophyll conductance, and photosynthetic optimization through redistribution of leaf nitrogen. We used the RCP8.5 climate scenario to conduct factorial model simulations characterizing the individual and combined effects of the three mechanisms on projections of GPP. Simulated global GPP increased more strongly (up to 20% by 2070–2099) in more comprehensive representations of photosynthesis compared to the model lacking the three mechanisms. The experiments revealed non-additive interactions among the mechanisms as combined effects were stronger than the sum of the individual effects. The modeled responses are explained by changes in the photosynthetic sensitivity to temperature and CO₂ caused by the added mechanisms. Our results suggest that current TBMs underestimate GPP responses to future CO₂ and climate conditions.

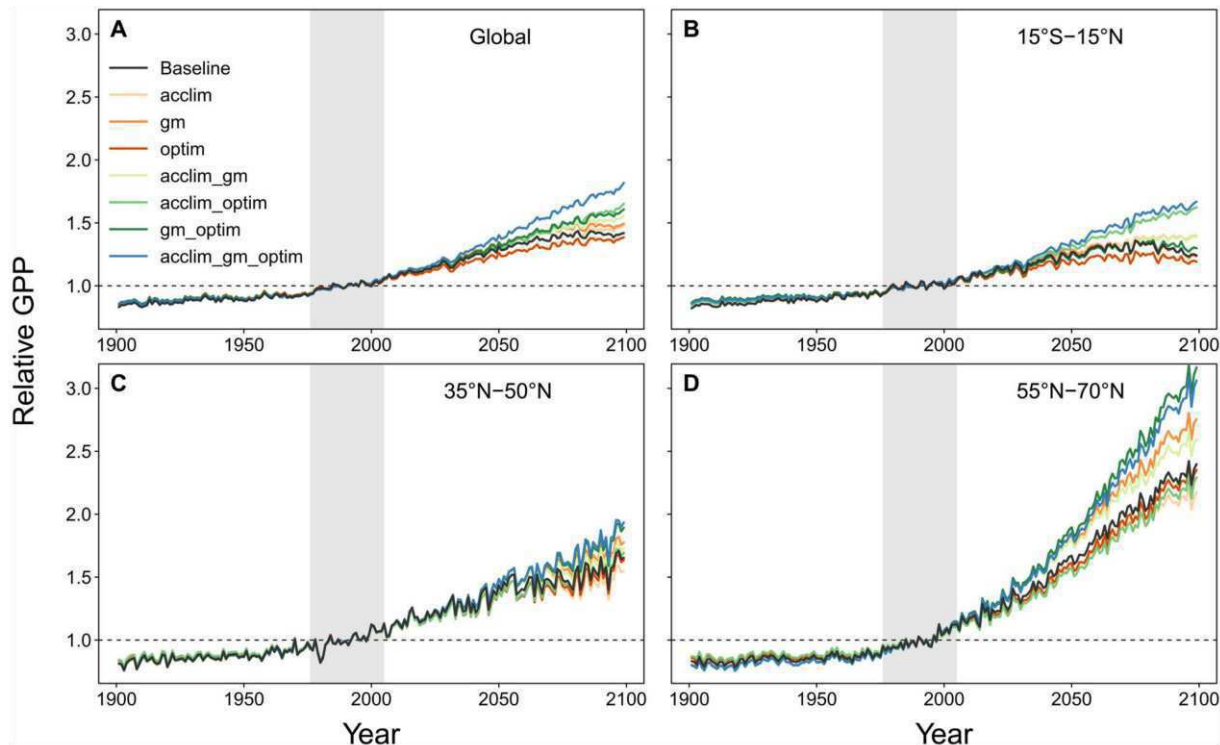


Figure 1: Time series of normalized GPP. Shown are factorial model runs performed in this study for the RCP8.5 climate scenario for (A) the globe, (B) the inner tropics (15° S to 15°N), (C) the temperate zone (35°N to 50°N), and (D) the boreal zone (55°N to 70°N). GPP was normalized to the mean of the 1976–2005 reference period (gray shaded area) for each model experiment and each latitude band.

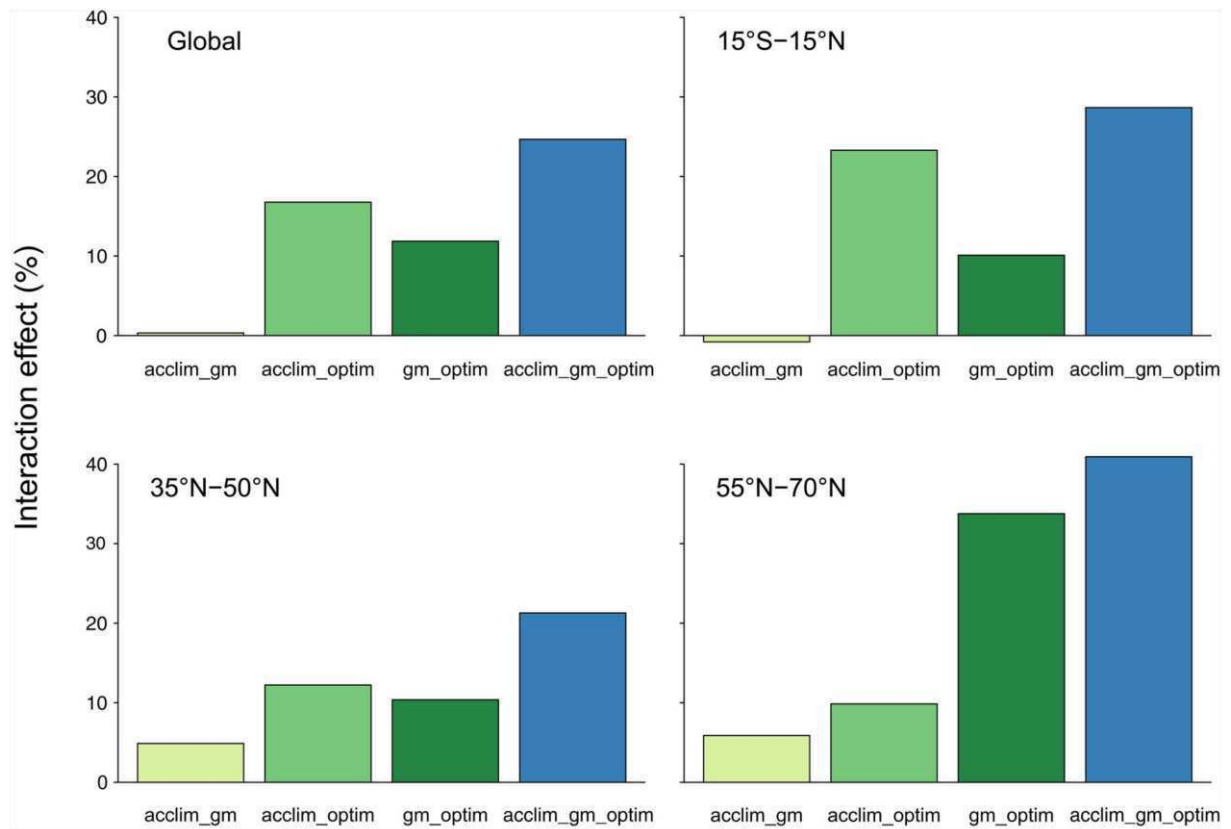


Figure 2: Interaction effects of the mechanisms. Interaction effects were calculated as the difference between the combined effect, calculated from Eq. 6 for the experiment with two or three mechanisms included, and the sum of the effects of the model experiments including the respective mechanisms individually. Values higher than 0 indicate that the combined mechanisms led to stronger increases in GPP than one would expect from the sum of their individual effects.

References

- [1] Knauer J., Cuntz M., Smith B., Canadell J.G., Medlyn B.E., Bennett A.C., Silvia Caldararu S., Haverd V. 2023. Higher global gross primary productivity under future climate with more advanced representations of photosynthesis, *Science Advances*, 9(46), eadh9444, doi: [10.1126/sciadv.adh9444](https://doi.org/10.1126/sciadv.adh9444).

Modélisation en transport-réactif de la géochimie des eaux dans quatre bassins versants de montagne en contexte carbonaté (IR OZCAR)

Ackerer J.¹, Legout C.¹, Nord G.¹, Le Bouteiller C.^{1,2}, Spadini L.¹, Hachgenei N.¹, Wild B.³,
Fischer O.¹, Boudevillain B.¹, Gaillardet J.⁴, Braud I.⁵

¹Institut des Geosciences de l'Environnement, IGE, 460 rue de la Piscine, 38400, St Martin d'Hères, France.

²INRAE, 2 rue de la Papeterie, 38402, St Martin d'Hères, France. ³ISTerre, 1381 rue de la Piscine, 38610, Gières,

France. ⁴Institut de Physique du Globe, IGP, 1 rue Jussieu, 75005, Paris, France. ⁵INRAE, 5 rue de la Doua,

69100, Villeurbanne, France.

L'infrastructure de recherche OZCAR offre l'opportunité de réaliser des études multi-sites pour explorer le fonctionnement de la zone critique dans différents contextes climatiques, géologiques et anthropiques. Dans cette étude, la géochimie des eaux de rivière de quatre bassins versants fortement instrumentés (Le Laval, Le Galabre, La Claduègne et le Gazel) et appartenant à deux observatoires à long-terme (Draix-Bléone et OHMCV) a été étudiée en détail. L'analyse des relations concentrations-débits (relations C-Q) et leurs modélisation par une approche en transport-réactif (KIRMAT) permettent de discuter les processus d'altération majeurs à l'œuvre dans ces bassins versants de montagne à la lithologie carbonatée. Une des particularités de ces observatoires est notamment d'offrir la possibilité d'étudier des bassins versants imbriqués, permettant de discuter l'effet de la méso-échelle spatiale sur l'hydrogéochimie. Premièrement, notre travail a apporté une évaluation de la composition minéralogique des roches et du temps de transfert des eaux dans les quatre bassins versants. Une interprétation des variations géochimiques lors des crues mène également à un désaccord intéressant entre des résultats antérieurs obtenus via des décompositions d'hydrogrammes et nos résultats récents. Et d'une façon surprenante, le passage à la méso-échelle n'a aucune conséquence sur les concentrations des éléments géochimiques investigués, suggérant un contrôle géomorphologique sur le temps de transfert des eaux. Finalement, cette étude amène un nouveau pas dans notre compréhension des interactions hydrologiques et géochimiques dans les observatoires des régions méditerranéennes en contexte carbonaté.

augmentant le coefficient de corrélation de Pearson de plus de 100 % (passant de 0,3 à 0,63). La validation croisée de la performance de la DA montre une réduction de l'erreur d'environ ~13 % dans le débit quotidien simulé. Cette performance résultante nous permet d'analyser la dynamique spatiotemporelle des débits journaliers sur le CRB avec plus de fiabilité, en se concentrant sur les événements de crues et de sécheresses (Figure 1). Des téléconnexions peuvent être établies avec des événements climatiques à grande échelle tels que l'Oscillation Australe El Niño (ENSO), qui est le principal moteur des précipitations tropicales. Par exemple, les inondations de 1997-1998 qui ont affecté le sud et le centre du BFC sont principalement associées statistiquement à un important El Niño à la même période. Les sécheresses sévères de 1983-1984 et de 2011-2012 qui ont principalement affecté le nord et le sud du CRB présentent une forte corrélation avec de grands événements El Niño et La Niña (respectivement) qui se sont produits 10 à 12 mois avant.

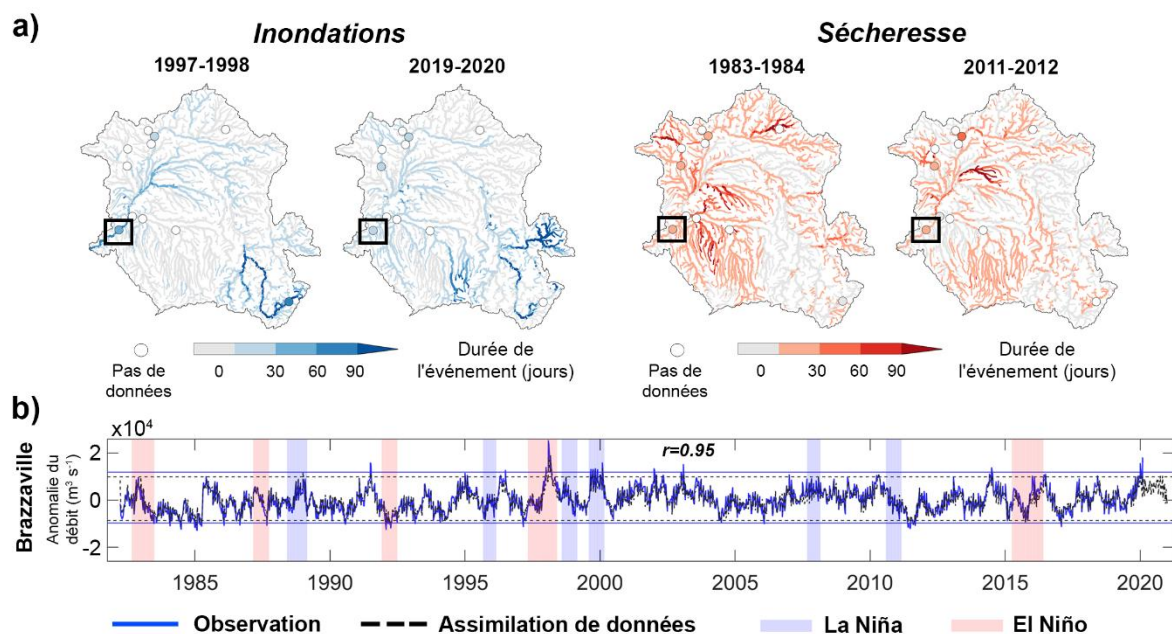


Figure 1. a) Cartes du nombre de jours pendant les périodes d'inondation et de sécheresse en palettes bleues et rouges, respectivement, pour des événements spécifiques. Les résultats des simulations MGB sont indiqués pour chaque tronçon de rivière et les observations sont représentées par des cercles. b) Séries temporelles des anomalies de débit interannuelles provenant des observations (bleu) et des simulations MGB (noir pointillé) à la station de Brazzaville. Les lignes horizontales représentent les seuils estimés pour les observations et les simulations. Les barres verticales opaques représentent les événements La Niña (bleu) et El Niño (rouge) (adapté de Wongchuig et al., 2023).

Cette étude fournit de nouvelles perspectives sur la complexe variabilité hydrologique spatiotemporelle du CRB, enrichissant également notre compréhension des possibles interconnexions avec d'autres processus du système Terre.

Contrôles hydrologiques et géochimiques des interactions roche-eau-plante

Sylvain Kuppel^a, Yves Goddérés^a, Jean Riotte^{a,b}, Laurent Ruiz^{b,c}, Muddu Sekhar^{b,d} & Jacques Schott^a

^aGéosciences Environnement Toulouse, CNRS – IRD – UPS – CNES, Toulouse

^bCellule Franco-Indienne de Recherche en Sciences de l'Eau (CEFIRSE), Indian Institute of Science, Bangalore, Inde Environmental Sciences Area, Berkeley, États-Unis

^cG-EAU, INRAE-AgroParisTech-Cirad-IRD-Montpellier Sup.Agro-Univ Montpellier

^dCivil Engineering Department, Indian Institute of Science, Bangalore, Inde

Mots-clés: altération chimique ; écohydrologie ; eaux souterraines

L'eau est le facteur de contrôle de premier ordre des réactions d'altération. Bien que la modélisation écohydrologique ait bénéficié de développements permettant de simuler les flux d'eau et le temps de séjour de l'eau dans les différents compartiments de la zone critique, la complexité des interactions eau-roche reste souvent restée souvent modélisée avec une hydrologie très simple, ou vice-versa. Il reste donc difficile de distinguer les impacts des inévitables incertitudes hydrologique et géochimique dans les outils utilisés par des communautés disciplinaires encore partiellement cloisonnées. On présente ici le développement et application du modèle de zone critique WITCH₂O, conçue pour suivre les flux et des réserves d'eau, ainsi que les flux d'altération et de transport des produits d'altération (y compris la consommation de CO₂ atmosphérique), de façon spatialement explicite et à des échelles de temps submensuelles à décennales. Il s'agit d'une mise en cascade du modèle écohydrologique Ech₂O-iso alimentant le modèle d'interaction eau-roche WITCH. Nous avons déployé WITCH₂O le long d'un profil gneiss-saprolite-ferralsol dans un petit bassin versant forestier tropical de l'Inde du sud, Mule Hole. Des observations à long terme des flux d'eau et des flux géochimiques sont disponibles, ce qui permet de calibrer et d'évaluer le modèle en deux étapes (hydrologique et géochimique) pour les différents processus simulés. En utilisant différentes moyennes temporelles des flux d'eau simulés et des réserves, les résultats préliminaires soulignent que la variabilité hydrologique saisonnière (entraînée par la dynamique de la mousson et l'absorption d'eau par les racines profondes) est essentielle pour capturer la dynamique des concentrations de nutriments dans les eaux souterraines, malgré des variations de la nappe phréatique très tamponnées. Nous explorons également comment cette dépendance non linéaire des flux d'altération par rapport aux états hydrologiques est modulée par la propagation des incertitudes concernant i) l'hydrologie modélisée et ii) les propriétés géohydrochimiques (p. ex. surfaces réactives, pression en CO₂ et produits de solubilité).

Évaluation des contributions à l'écoulement simulées par un modèle hydrologique distribué à partir de données biogéochimiques

O. Grandjouan^a, F. Branger^a, M. Masson^a, B. Cournoyer, N. Robinet^c, P. Dusseux^d, A. Dominguez Lage^b, M. Coquery^a

^aINRAE, UR Riverly, Centre de Lyon-Villeurbanne, F-69625, Villeurbanne, France

^bUniv Lyon, UMR Ecologie Microbienne (LEM), Université Claude Bernard Lyon 1, VetAgro Sup, France

^cUMR CNRS 5194 Pacte, Université Grenoble Alpes, Cermosem, 1064 chemin du Pradel, 07170 Mirabel, France

^dInstitut d'Urbanisation et de Géographie Alpine, Université Grenoble-Alpes, CNRS, PACTE, 38100, Grenoble, France

Mots-clés : décomposition du débit ; modèle de mélange ; modélisation distribuée ; cours d'eau

1 Introduction

Les chemins de l'eau peuvent être largement modifiés en milieu péri-urbain. La diversité des paysages (naturel, agricole, urbain) et la présence de nombreux éléments anthropiques (réseau d'assainissement, surfaces imperméables...) ont un impact important sur les processus hydrologiques [2]. Les modèles hydrologiques distribués sont des outils prometteurs pour représenter les contributions hydrologiques dans un bassin versant péri-urbain, mais sont associés à des difficultés dans la validation des résultats [1]. La composition biogéochimique de l'eau peut également révéler des informations sur son origine et les chemins empruntés avant de rejoindre le cours d'eau. En effet, au cours de son transfert dans les différents compartiments hydrologiques, l'eau peut se charger en divers composés liés aux sols et aux éléments anthropiques avec lesquels elle est mise en contact. Ces composés peuvent ensuite être retrouvés dans les eaux de mélange du cours d'eau. L'objectif de cette étude est de développer une approche couplée d'évaluation d'un modèle hydrologique distribué à partir de données biogéochimiques issues de prélèvements d'eaux de surface. Cette approche est appliquée au modèle hydrologique distribué J2000P [4] mis en œuvre sur le bassin versant péri-urbain du Ratier, sous-bassin versant de l'Yzeron dans l'ouest Lyonnais et site d'étude de « L'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine » (OTHU) et de l'infrastructure de recherche nationale « Observatoire de la zone Critique : Applications et Recherche » (OZCAR).

2 Matériel et méthodes

Le bassin versant du Ratier est situé dans l'ouest Lyonnais et s'étend sur une superficie d'environ 19,8 km². La géologie du bassin est quasi-uniforme avec des gneiss sur l'ensemble de la surface à l'exception d'un dépôt de colluvions à proximité de l'exutoire, marqué par la présence d'un aquifère local. L'occupation de sol est hétérogène et représentative d'un milieu péri-urbain (forestier, agricole, urbain). Le bassin versant du Mercier est un sous-bassin, imbriqué dans celui du Ratier, d'environ 8 km² à dominante plus forestière et agricole.

La méthodologie a consisté à construire un modèle de mélange biogéochimique en définissant des sources qui correspondent à des sous-bassins versants élémentaires (0,5 km² en moyenne), homogènes dans l'hypothèse que l'eau issue de chacune de ces sources a des caractéristiques biogéochimiques spécifiques. Au total 7 sources ont été identifiées et prélevées dont trois correspondant à des sous-bassins à dominance respectivement de forêt, de prairie et d'activités agricoles (culture et pâturage bovin), une drainant l'aquifère des colluvions, une correspondant aux eaux d'un réseau d'assainissement unitaire, une issue d'un point de rejet de ruissellement urbain et une correspondant à du ruissellement de surface avec une composition biogéochimique proche de celle des eaux de pluie. Chaque source a été prélevée entre 4 et 5 fois afin de prendre en compte la variabilité saisonnière de la composition des sources. En parallèle, des points de mélange ont été définis au droit des stations du Mercier et du Ratier. L'eau a été prélevée dans les cours d'eau par temps sec (26 prélèvements manuels durant la période 2017-2019) et lors de 6 événements hydrologiques contrastés. Les concentrations en composés majeurs et en métaux dissous, les caractéristiques de la matière organique dissoute et les paramètres microbiens ont été analysés pour l'ensemble des échantillons de source et de mélange. A partir des résultats analytiques obtenus, un modèle de mélange a été appliqué selon une approche Bayésienne afin de décomposer le débit total et d'estimer les contributions des sources identifiées.

Le modèle hydrologique distribué J2000P a été préalablement calé sur la simulation des débits aux exutoires du Mercier et du Ratier avec des performances satisfaisantes. En parallèle un module de décomposition spatiale de l'écoulement a été développé dans J2000P, permettant de tracer l'origine spatiale de l'eau en tout

point du réseau hydrographique et à chaque pas de temps. Les écoulements simulés par J2000P ont été associés aux sources identifiées précédemment afin de décomposer le débit simulé selon ces sources.

Les résultats simulés par J2000P ont été comparés aux résultats obtenus par le modèle de mélange pour les périodes correspondant aux 26 prélèvements par temps sec ainsi que pour les 6 événements hydrologiques prélevés. Les résultats sont distingués selon les périodes hautes eaux ou de basses eaux pour les périodes de temps sec, et selon les trois types d'événements hydrologiques prélevés.

3 Résultats et discussion

La Figure 1 montre la comparaison des contributions estimées par les deux modèles lors des 6 événements hydrologiques étudiés. Cette comparaison montre des contributions globalement cohérentes pour les petits événements hivernaux, à l'exception de la contribution du réseau d'assainissement qui reste sous-estimée par le modèle J2000P. Les contributions majoritaires pour les événements orageux estivaux sont les ruissellements de surface et urbain pour les deux modèles. Les contributions estimées par le modèle de mélange montrent que les sols secs favorisent le ruissellement, en particulier sur les prairies. Cependant, cette contribution importante des prairies n'est pas simulée par J2000P. Enfin la comparaison pour les événements majeurs montre des contributions très différentes entre les deux modèles, avec une surestimation importante de la contribution du réseau d'assainissement par J2000P. Ce contraste peut s'expliquer par une différence dans la nature des volumes tracés par les deux modèles. La totalité des volumes simulés en sortie du déversoir d'orage sont tracés en tant que « Réseau d'assainissement » par J2000P tandis que le modèle de mélange ne trace que la fraction correspondant aux eaux usées ; les eaux de débordement correspondant en réalité à un mélange d'eaux usées, d'eaux de ruissellement urbain et d'eaux pluviales.

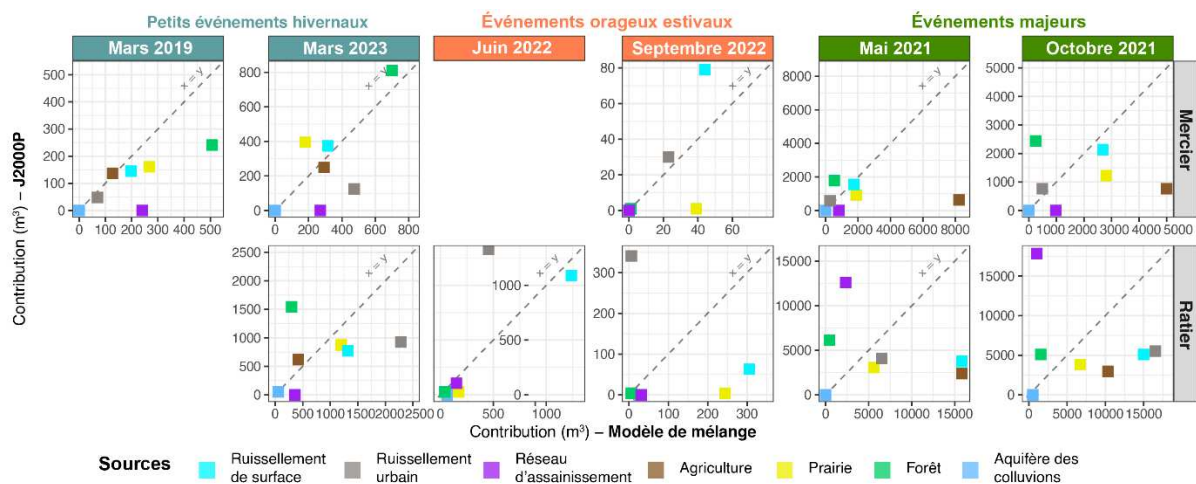


Figure 1. Comparaison des contributions des sources estimées par le modèle de mélange biogéochimique et simulées par le modèle hydrologique J2000P pour les 6 événements hydrologiques prélevés.

4 Conclusions et perspectives

La comparaison des résultats simulés par le modèle hydrologique distribué J2000P avec les résultats d'un modèle de mélange biogéochimique a permis de mettre en évidence les principales faiblesses de J2000P ainsi que d'établir des recommandations pour l'amélioration du modèle hydrologique. Ce travail montre l'intérêt de s'intéresser aux contributions spatiales pour l'évaluation complète d'un modèle hydrologique distribué et que ce dernier ne donne effectivement pas forcément « les bonnes réponses pour les bonnes raisons » [3]. L'utilisation des données biogéochimiques présente un réel intérêt pour évaluer les résultats de décomposition spatiale du débit à l'exutoire de petits sous-bassins versants selon les caractéristiques géologiques et d'occupation du sol du bassin.

Remerciements

Nos remerciements vont au Laboratoire de Chimie des Milieux Aquatiques (INRAE – Riverly) pour les analyses physico-chimiques, à Mickaël Lagouy pour les prélèvements sur le terrain, à tous les participants du projet ANR CHYPSTER (ANR-21-CE34-0013) et AERMC-ZABR IDESOC, ainsi qu'à l'école universitaire H2O'Lyon pour le co-financement de la thèse dans le cadre de laquelle ce travail a été effectué.

Références

- [1] Beven K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 18-36. doi : 10.1016/j.jhydrol.2005.07.007
- [2] Jacobson C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92, 1438-1448. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.01.018

- [3] Kirchner J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42, W03S04. doi:10.1029/2005WR004362.
- [4] Labbas M. (2015). Modélisation hydrologique de bassins versants périurbains et influence de l'occupation du sol et de la gestion des eaux pluviales : Application au bassin de l'Yzeron (130km²). PhD thesis, Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes, France, 388 p. NNT : 2015GREAU006.
- [5] Ladouche B., Probst A., Viville D., Idir S., Baqué D., Loubet M., Probst J.-L. & Bariac T. (2001). Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology*, 242, 255-274. doi: 10.1016/S0022-1694(00)00391-7.

Comparaison de deux approches de métamodélisation pour la calibration robuste d'un modèle hydrologique de transfert de pesticides

K. Radišić^{a,b}, C. Lauvernet^a, A. Vidard^b

^aINRAE, RiverLy, 69625, Villeurbanne, France

^bUniv. Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, LJK, 38000 Grenoble, France

Mots-clés: calibration, métamodélisation, chaos polynomial, processus gaussiens, hydrologie, transfert de pesticides

1 Introduction

L'utilisation de pesticides est un enjeu majeur pour l'agriculture durable et la qualité de l'eau. Il est donc important de disposer des connaissances et des outils pour estimer au mieux les risques liés à leur utilisation et proposer des actions correctives adaptées. Le modèle PESHMELBA (Pesticides et hydrologie : modélisation à l'échelle du bassin versant, [1]) simule les processus impliqués dans les transferts d'eau et de pesticides à l'échelle du bassin versant, afin de comparer différents scénarios de gestion des paysages et leur impact sur la qualité de l'eau. Il prend en compte différentes propriétés du bassin versant, la variabilité spatiale du sol, les types de végétation et les propriétés des pesticides. Le modèle comporte donc de nombreux paramètres d'entrée qui doivent être calibrés. En outre, il a été observé que les sensibilités aux paramètres d'entrée du modèle dépendent du forçage externe. Ainsi, l'étalonnage de PESHMELBA devrait prendre en compte explicitement la dépendance aux forçages externes (tels que les précipitations et les dates d'application des pesticides). Cependant, une telle calibration robuste du modèle reste coûteuse en termes de calcul, en raison du coût élevé des simulations.

2 Matériel et méthodes

Une solution est de produire un modèle réduit peu coûteux (également appelé métamodèle) pour l'étalonnage robuste du modèle PESHMELBA. Pour ce faire, deux approches sont comparées.

2.1 *Chaos polynomial stochastique*

La première approche est la métamodélisation par chaos polynomial. Toutefois, une approche classique ne suffit pas, par la présence de l'incertitude dans le forçage. Ainsi, une approche de métamodélisation par le chaos polynomial stochastique est employée [2]. Cette approche s'avère plus compliquée de par l'interaction des forçages et les paramètres, impliquant une non-linéarité des coefficients des polynômes, Figure 1.

2.2 *Processus gaussiens*

La seconde approche est l'optimisation bayésienne, qui consiste à évaluer un métamodèle de processus gaussien sur un nombre réduit de simulations du modèle d'origine. Des nouvelles simulations sont ensuite ajoutées de manière séquentielle pour satisfaire certains critères (tels que la minimisation de l'espérance [3] ou du regret relatif [4]).

Les deux approches sont ensuite comparées sur l'erreur introduite par le métamodèle, sur le coût de simulation et sur la qualité de la calibration obtenue.

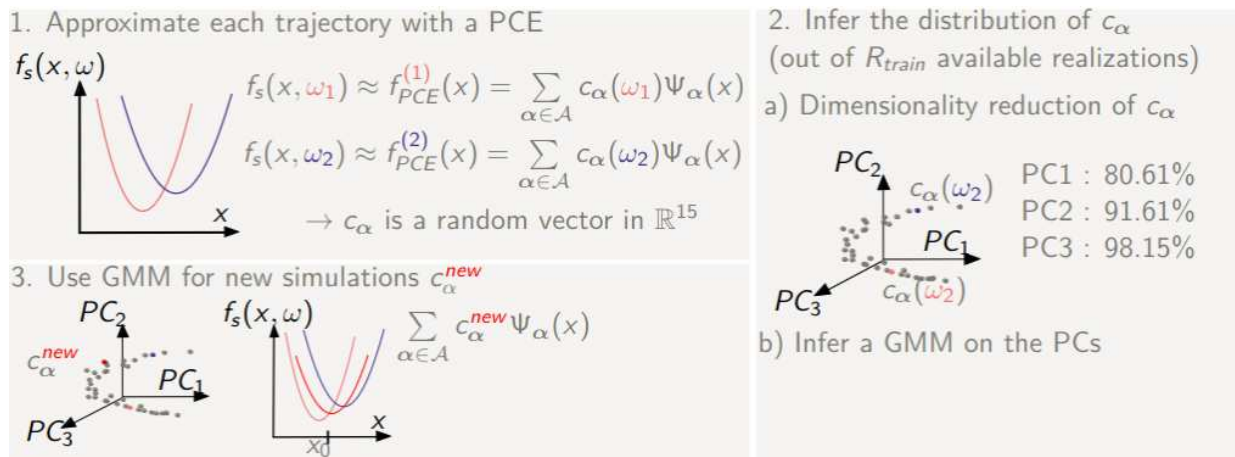


Figure 1 : Illustration de l'approche par polynômes de chaos stochastique

Références

- [1] E. Rouzies, C. Lauvernet, C. Barachet, T. Morel, F. Branger, I. Braud, and N. Carlier. From agricultural catchment to management scenarios: A modular tool to assess effects of landscape features on water and pesticide behavior. *Science of The Total Environment*, 671:1144–1160, June 2019. ISSN 00489697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.060
- [2] N. Lüthen, S. Marelli, and B. Sudret. A spectral surrogate model for stochastic simulators computed from trajectory samples. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 406:115875, Mar. 2023. ISSN 00457825. doi: 10.1016/j.cma.2022.115875.
- [3] M. R. El Amri, C. Helbert, O. Lepreux, M. M. Zuniga, C. Prieur, and D. Sinoquet. Data-driven stochastic inversion via functional quantization. *Statistics and Computing*, 30(3):525–541, May 2020. ISSN 0960-3174, 1573-1375. doi: 10.1007/s11222-019-09888-8.
- [4] V. Trappler, E. Arnaud, A. Vidard, and L. Debreu. Robust calibration of numerical models based on relative regret. *Journal of Computational Physics*, 426:109952, Feb. 2021. ISSN 00219991. doi: 10.1016/j.jcp.2020.109952.

Une étape vers la détection des poches d'eau intra-glaciaires, le cas de Tete Rousse (Massif du Mt. Blanc) revisité.

O. Ozenda¹, J. Bonnet^{1,2}, A. Gilbert¹ et O. Gagliardini¹

¹: *Univ. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France, CNRS.*

²: *ONF - service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Isère, 9 quai Créqui, 38 000 Grenoble, France*

Mots clef : Poches d'eau, risque glaciaire, régime thermique des glaciers, modélisation

1 Introduction

Les poches d'eau intra-glaciaires représentent un enjeu difficile pour la prévention des risques. En effet, celles-ci sont difficiles à observer avant leur rupture, alors que, cette rupture peut conduire à d'importants aléas naturels aux conséquences potentiellement importantes en terme de risques. En outre, [1], [2] et [3] ont montré que la formation de ces poches d'eau peut s'expliquer par un régime polythermal caractéristique, incluant une partie haute tempérée et un front froid. La description du régime thermique des glaciers par des observations directes étant délicate, l'utilisation de simulations numériques de l'état thermique des glaciers est une solution efficace pour déterminer à l'échelle d'un massif et de manière exhaustive les conditions favorables à la formation des poches d'eau.

L'objectif de ce travail est de conduire ces simulations.

2 Méthodes et résultats

Nous utilisons un modèle et des méthodes numériques décrites dans [4], [5] and [6], c'est à dire une résolution par éléments finis d'un problème de type Navier-Stokes incompressible à surface libre couplé avec un modèle thermique intégrant la percolation de l'eau de fonte de surface ainsi que son regel dans le névé. Nous proposons un modèle tridimensionnel du cas du glacier de Tête Rousse. En effet, une poche d'eau intra-glaciaire y a été observée et un large jeu de mesures de terrain y a été réalisé, laissant apparaître quelques caractéristiques spécifiques, telles que des vitesses de surface faibles ainsi qu'une zone de glace tempérée dans la partie haute du glacier bloquée par un front froid comme on peut le voir sur la figure 1. Les différents paramètres du modèle sont choisis pour obtenir une géométrie conforme aux observations (bilan de masse cumulé, épaisseur de névé et profils de surface libre). La structure thermique calculée est ensuite comparée à des mesures effectuées entre 2010 et 2023. Dans la perspective de la conception d'un outil de prévision à large échelle fondé sur des topographies de lits rocheux et des données climatiques, nous proposons aussi d'utiliser un modèle bidimensionnel. Celui-ci permet d'identifier des configurations synthétiques pouvant présenter des poches d'eau avec un temps de calcul réduit par rapport au modèle tridimensionnel. Nous présenterons différents cas en

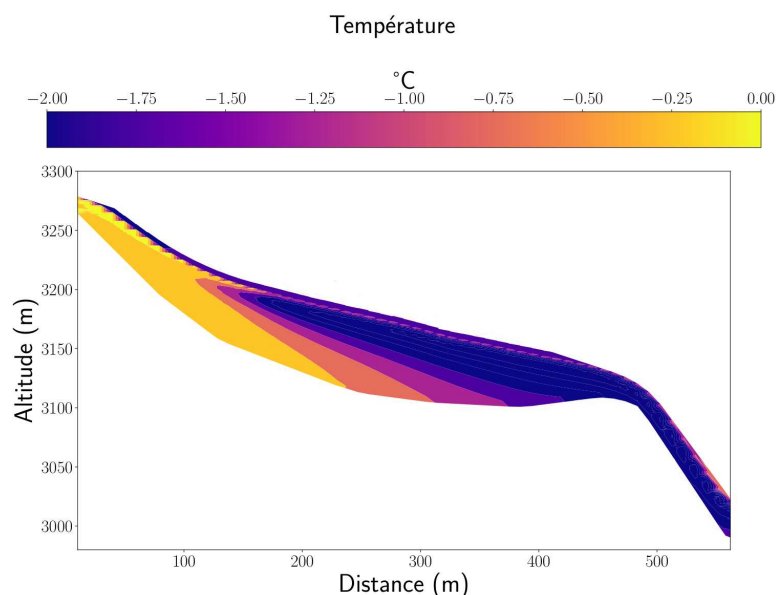


FIGURE 1 – Simulation du glacier de Tête Rousse en septembre 2021, température de la glace en coupe.

faisant varier des variables qui caractérisent la situation des glaciers, telles que la pente, l'altitude et l'exposition, ainsi que la répartition spatiale de l'accumulation de neige qui a un impact important sur la structure thermique des glaciers.

Références

- [1] Vincent C. *et al*, 2010, *Origin of the outburst flood from Glacier de Tête Rousse in 1892 (Mont Blanc area, France)*. J. Glacio., Vol. 56, pages 688–698.
- [2] Vincent C. *et al*, 2012, *Detection of a subglacial lake in Glacier de Tête Rousse (Mont Blanc area, France)*. J. Glacio., Vol. 58, pages 866–878.
- [3] Gilbert A. *et al*, 2012, *The influence of snow cover thickness on the thermal regime of Tête Rousse Glacier (Mont Blanc range, 3200 m asl) : Consequences for outburst flood hazards and glacier response to climate change*. J. Geophy. Res., vol. 117, num. F4.
- [4] Gilbert *et al*, 2014, *3D thermal regime model suitable for cold accumulation zones of polythermal glaciers*. J. Geophy. Res., vol. 119, pages 1876–1893.
- [5] Gilbert *et al*, 2015, *Assessment of thermal change in cold avalanching glaciers in relation to climate warming*. Geophy. Res. Lett., vol 42, pages 6382–6390.
- [6] Gilbert *et al*, 2020, *The influence of water percolation through crevasses on the thermal regime of a Himalayan mountain glacier*. Cryosphere, vol. 14, pages 1273–1288.

Disponibilité de la ressource en eau actuelle et future dans le bassin versant de la Sanaga: cas des sous bassins de Mbakaou et Bamendjing

V.B. Ebodé

International Joint Laboratory DYCOFAC, IRGM-UY1-IRD, Yaounde BP 1857, Cameroon

Mots-clés: Sanaga, SWAT, modèles climatiques régionaux

1 Introduction

Pour anticiper les catastrophes (sécheresse, inondations...) occasionnées par les forçages environnementaux et réduire leurs impacts sur son économie fragile, l'Afrique subsaharienne a non besoin d'une bonne connaissance de la disponibilité de la ressource en eau actuelle, mais aussi des prévisions hydroclimatiques fiables. L'objectif de cette étude est de quantifier la disponibilité de la ressource en eau dans deux sous bassins versants de le Sanaga (Mbakaou et Bamendjing) (Figure 1) et de prévoir son évolution sur deux périodes futures (proche: 2024-2035 et moyen: 2036-2050).

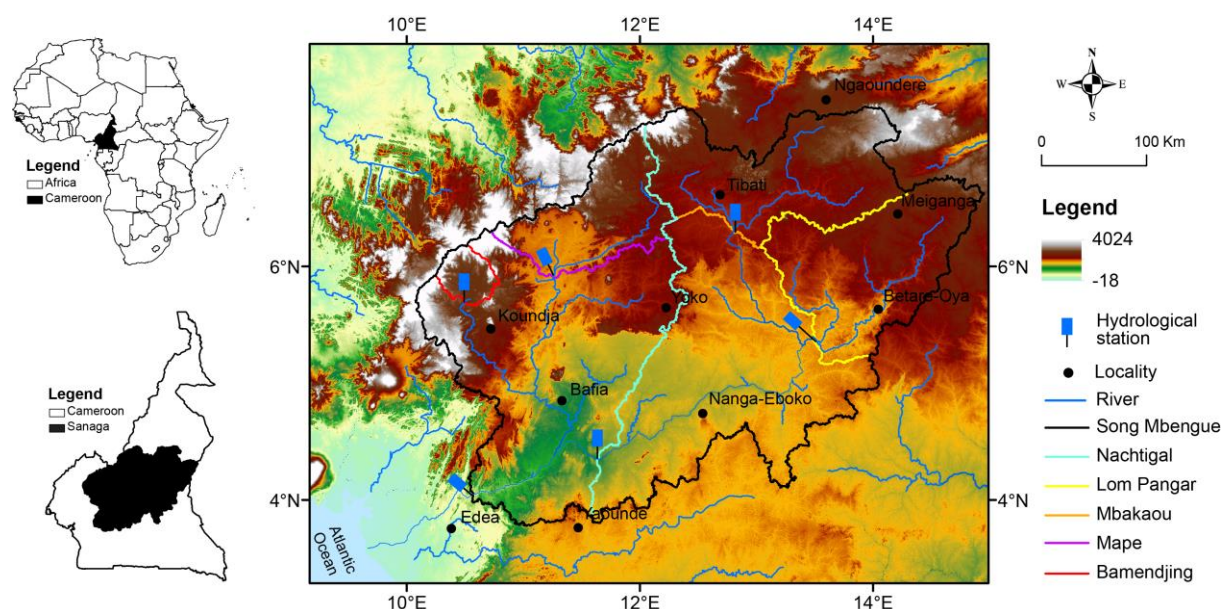


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Sanaga et de ses deux sous bassins étudiés. Source : Ebodé (2022)

2 Matériel et méthodes

Dans cette étude, la disponibilité des ressources en eau a été évaluée sur la période 2002-2019, à partir du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et de certaines données météorologiques et spatiales de référence disponibles pour la région (Merra2, Landsat, etc.). Des prévisions de son évolution ont ensuite été réalisées avec le même outil (SWAT) sur deux périodes futures (proche 2024-2035 et moyenne : 2036-205) à partir des données de quatre (04) modèles climatiques régionaux (MCR) (CCCma, HIRHAM5, RCA4 et REMO) et les données futures d'occupation et d'utilisation sol simulées à l'aide de la procédure CA-Markov. Pour séparer l'impact de la variabilité climatique (VC) et des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol sur les futures ressources en eau, deux scénarios d'évolution (expérimentations) ont été établis : (1) l'impact de la CV, en associant les données climatiques futures avec les données d'occupation et d'utilisation du sol de la période historique ; (2) l'impact des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol, en combinant les futures cartes d'occupation et d'utilisation du sol avec les données climatiques de la période historique.

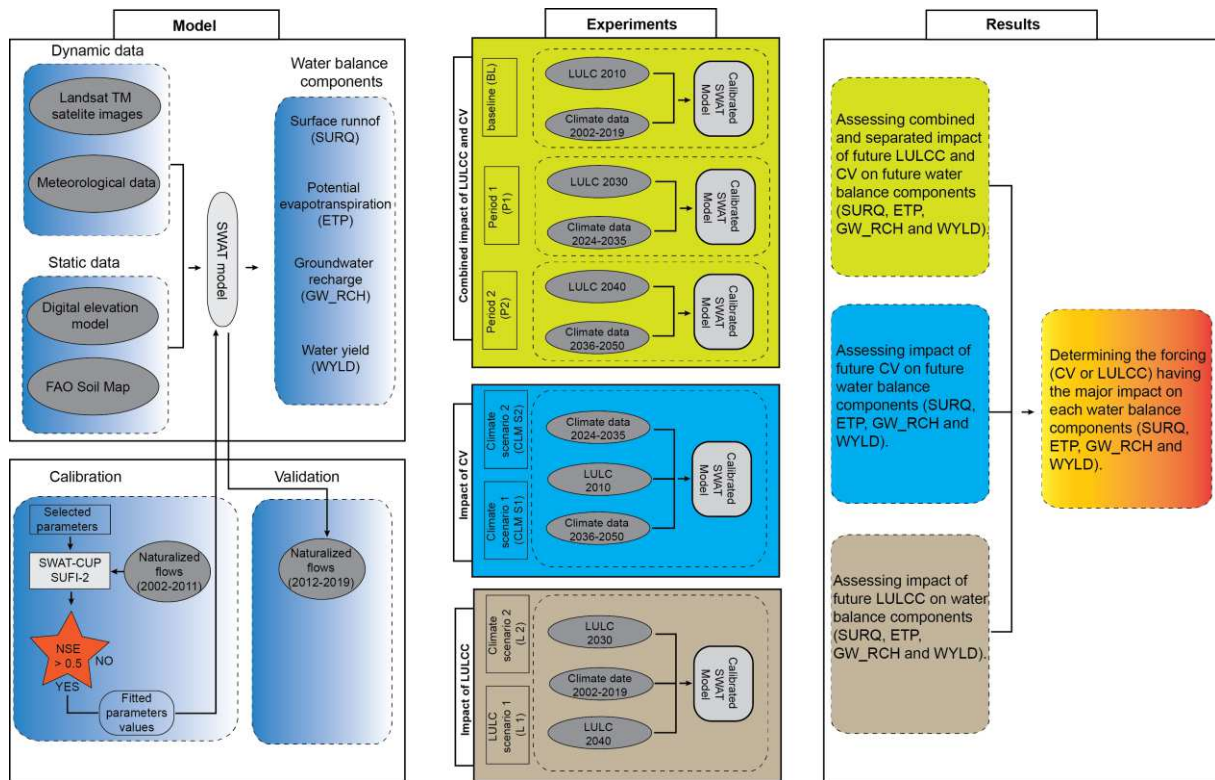


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'étude. CLM: climat ; L: mode d'occupation et d'utilisation du sol ; P: période.

3 Résultats

Les performances de ce modèle sont satisfaisantes en calibration et en validation sur les deux bassins. Cela se traduit par un R^2 , NSE et KGE supérieurs à 0.68. Des biais $\pm 10\%$ attestent aussi de cette bonne performance. Dans les deux bassins investigués, l'infiltration (GW_RCH), Le débit (FLOWS), Le rendement en eau (WYLD) et la charge sédimentaire (SED) sont plus importants dans la zone médiane. Inversement, le ruissellement est faible dans cette partie des bassins. L'évapotranspiration paraît plus importante à l'Est des bassins. Deux modèles (CCCMA et REMO) prévoient une baisse des ressources en eau dans ces bassins, et deux autres (HIRHAM5 et RCA4) prévoient l'inverse. Cependant, sur la base d'une étude statistique menée sur la période historique (2001-2005), le modèle REMO semble le plus fiable. Il prévoit sur les deux bassins une baisse des précipitations et des écoulements qui n'excèdent pas respectivement -19% et -31% , quels que soient le scénario d'émission (RCP4.5 ou RCP8.5) et la période future considérés (2024-2035 ou 2036-2050). La VC est le seul forçage dont l'impact sera visible dans la dynamique des écoulements futurs, compte tenu des changements insignifiants prévus dans l'évolution des modes d'occupation et d'utilisation du sol. Les résultats de cette étude pourraient contribuer à l'amélioration de la gestion de la ressource en eau dans les bassins étudiés et dans la région.

Référence (s)

Ebodé, V.B. 2022. Impact of rainfall variability and land-use changes on river discharge in Sanaga catchment (forest-savannah transition zone in Central Africa), *Hydrology Research*, 53 (7), 1017. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.046>

Jusqu'à quel point un modèle global de surface continental peut-il décrire une dynamique hydrologique locale ? Une tentative avec ORCHIDEE sur une parcelle agricole drainée du Plateau de Saclay

P. Maugis^a, C. Bacour^a

^aLaboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, 91 190 Gif-sur-Yvette

Mots-clés: modèle de surface continentale, hydrologie du sol, infiltration, mesures de terrain, assimilation de données

1 Introduction

Les modèles globaux de surfaces continentales doivent représenter dans des mailles pluri-kilométriques la réponse intégrée des différents écosystèmes qu'elles englobent, tandis que ces modèles suivent des équations dites "à base physique" correspondant pour certaines d'entre elles à des processus locaux qui en assoient la légitimité. C'est le cas, par exemple et dans cette étude, du modèle ORCHIDEE, qui modélise les cycles bio-géo-chimiques au sein du modèle de climat de l'IPSL [1] où les interactions sol-eau-plantes reposent, pour le volet hydrologique, sur l'équation de Richards et sont couplés aux cycles du carbone et de l'activité végétale. En outre, la paramétrisation du modèle recourt extensivement au calage sur des observations *in fine* basée sur des mesures locales (< 1 ha) voire ponctuelles pour l'humidité du sol et l'infiltration. Or, les processus dans le sol sont hautement hétérogènes et présentent souvent des spécificités locales. L'objet de ce travail est d'évaluer, dans un contexte particulier, le potentiel du modèle et de sa paramétrisation aux processus hydriques réels du terrain.

2 Matériel et méthodes

2.1 La plateforme expérimentale ASSETS

Le site choisi est une parcelle agricole expérimentale de grande culture, d'environ 1 ha, drainée et opérée par l'INRAE [2]. L'instrumentation comprend une station météorologique, l'estimation du flux à l'exutoire du collecteur de drainage, un suivi vertical à l'inter-drain de la température, de l'humidité du sol et de la piézométrie ($\Delta t = 15$ mn). Le sol est composé de loess superficiels d'épaisseur variable (~ 2 m), relativement perméables, reposant sur une couche décimétrique d'argiles à meulière légèrement drainante. Cette formation de couverture est relativement homogène, quoique d'épaisseur variable. L'illuviation a rendu les horizons 60–100 cm moins perméables au point de générer une déconnexion importante des fluctuations hydriques rapides entre les horizons profonds et superficiels, sans toutefois empêcher une drainance lente. Les drains vers 1 m de profondeur, séparés de 12 m, ressuint le sol en quelques jours.

2.2 Le modèle global de surface continental ORCHIDEE et son implémentation numérique

ORCHIDEE résout séparément, sur chaque maille élémentaire indépendante, les équations classiques de conservation de l'énergie et de l'eau, en domaine vertical 1D sans échanges latéraux et en se fondant sur l'équation de Richards en milieu homogène et les lois phénoménologiques de Mualem et de Van Genuchten pour les transferts en zone non saturée. La précipitation est appliquée en surface et la condition aux limites inférieures est alternativement une charge ou une fraction imposée du flux de drainage libre (correspondant à un gradient de charge unitaire). Les données de forçage atmosphérique combinent les observations sur site, et celles de la zone atelier du SIRTÀ à quelques kilomètres sur le plateau. Les simulations sont annuelles et calendaires, effectuées en deux fois sur les années 2018 et 2019 de façon à capturer les deux saisons agricoles d'intérêt, en scrutant les Types Fonctionnels de Plante CROPC3 (2018, blé) et CROPC4 (2019, maïs). Les dates de levée, de sénescence et de récolte sont imposées. Les deux années sont simulées 10 fois en continu pour construire les conditions initiales.

2.3 Paramétrisation et assimilation

Une première simulation est conduite essentiellement avec les valeurs standard des paramètres, telles qu'utilisées par défaut dans les simulations globales. Quelques paramètres hydrodynamiques ou liés à l'activité végétale sont ensuite corrigés selon les conditions pédologiques locales et des mesures *in vitro*. Les

variables observées sont les saturations hydriques du sol (%), l'évapo-transpiration et les flux de drainance en limite inférieure. La calibration a été menée à l'aide de la plateforme ORCHIDAS [3].

3 Résultats et discussion

La dynamique réelle du milieu montre une forte déconnexion entre les niveaux superficiels et ceux situés sous les horizons illuviés. La partie réactive et sollicitée par les plantes est essentiellement limitée aux 40-60 premiers centimètres. En-dessous, les fluctuations sont plutôt saisonnières voire annuelles (Figure 1). Le modèle avec les paramètres corrigés (avant assimilation) échoue à représenter ce comportement, conséquence de l'hypothèse d'homogénéité verticale, qu'aucun ajustement paramétrique ne peut compenser. Ainsi, les niveaux inférieurs se désaturent trop vite et drainent les niveaux supérieurs, résultant à la fois en une surestimation de la drainance, une baisse chronique des débits et une perte de leur réactivité avec la pluie. Paradoxalement, les résultats sont un peu meilleurs avec les paramètres standards sur la dynamique hydrométrique, mais sous-estiment radicalement les flux drainés (non représentés).

L'assimilation n'apporte que des modifications marginales aux paramètres *a priori* sans amélioration notable des résultats et ce sur de larges gammes de valeur. Une source d'erreur majeure inexplorable par les paramètres retenus est à rechercher dans les erreurs structurelles de description des processus dominants, comme les flux latéraux dus au drainage agricole, une condition à la limite inférieure soumises à des processus externes (drainance à travers la formation sous-jacente) et la barrière hydrologique constituée par les horizons illuviés sous le sol agricole. Ceci conduit à des erreurs irréductibles sur la quantité d'eau disponible pour les plantes via leur système racinaire et, *in fine*, une détérioration est à attendre sur les autres cycles biogéochimiques et hydrographiques.

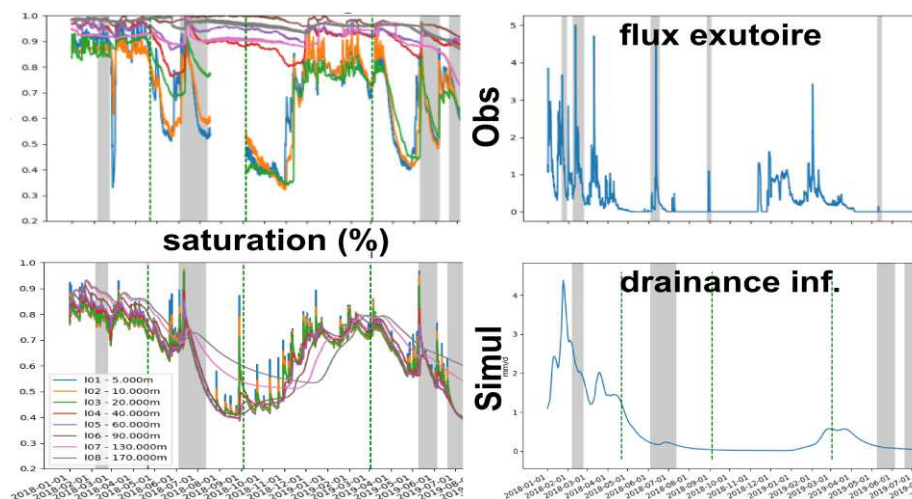


Figure **Erreur ! Pas de séquence spécifié.** : Observation (haut) et simulation (bas) de la saturation hydrique et du flux sortant de la colonne de sol (haut : de drainage en sortie de parcelle, bas : pas la limite inférieure)

4 Conclusion

Cette étude montre, sur un cas spécifique local, que les erreurs structurelles de représentation par le modèle global de la dynamique hydrique dans le sol empêchent de reproduire des caractéristiques marquée de l'hydrologie avec des conséquences potentiellement fortes sur la simulation des variables globales produites qui en dépendent directement (évapo-transpiration, débit des fleuves) ou agissent sur d'autres compartiments (chaleur sensible, cycle du carbone, productivité végétale, ...). Réciproquement, ces résultats interrogent la représentativité de mesures ponctuelles pour caler les paramètres du modèle global.

Références

- [1] Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I. C., 2005, *A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system*, Glob. Biogeochem. Cy. 19, GB1015, <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.
- [2] Chalhoub M., Gabrielle B., Tournebize J., Chaumont C., Maugis P., Girardin C., Montagne C., Baveye P.C., Garnier P., 2020, *Direct measurement of selected soil services in a drained agricultural field: Methodology development and case study in Saclay (France)*, Ecosystem Services, 42, p101088.
- [3] Peylin, P., Bacour, C., MacBean et al, *A new stepwise carbon cycle data assimilation system using multiple data streams to constrain the simulated land surface carbon cycle*, 2016, *Geoscientific Model Development*, 9, p3321–3346. <https://orchidas.lscce.ipsl.fr>.

A. Rivière^a, J. Marçais^b, S. Kuppel^c, S. Weill^d et les modélisatrices d'OZCAR

^a*Mines Paris - PSL*

^b*Inrae, Lyon*

^c*GET, Toulouse*

^d*ENGESS, Strasbourg*

Mots-clés: zone critique, modélisation, observatoire

Dans le champ des géosciences, la notion de zone critique tend à se normaliser. Elle est l'épiderme de la Terre comprise entre le sommet de la canopée et la base des roches qui permet la vie terrestre de se développer et de se maintenir. C'est également la zone où se concentrent les flux, stocks et processus contemporains à l'espèce humaine ; critique car siège des interdépendances matérielles de nos sociétés et en retour drastiquement impactée par l'activité humaine. Au sein de la communauté OZCAR, le constat a été fait que chaque observatoire en France possède ses propres modèles, initialement développé pour répondre à des questions scientifiques, basées sur des objectifs spécifiques aux gestionnaires du territoire étudié. Ces nombreux modèles sont justifiés par la diversité des contextes climatiques, géologiques, hydrodynamique et des usages anthropiques des observatoires ainsi que par l'histoire des différents instituts de recherche qui y travaillent.

Ces modèles scientifiques n'ont pas été construits comme des outils multidisciplinaires et multi-échelles temporelles et spatiales. C'est pourquoi, certaines questions scientifiques liées aux changements globaux en cours (anthropiques et climatiques) ne peuvent pas être complètement abordées par ces modèles du fait de l'interdépendance des processus mis en jeu. Notre zone critique est en effet le résultat d'une intégration de processus de temps long (e.g. érosion, altération, dépôts, circulation souterraines) qui conditionnent les dynamiques plus court terme (e.g. débit des rivières, export de solutés, bioclogging, ...). Pour investiguer ces questions scientifiques qui dépassent les cadres disciplinaires, se posent les questions suivantes : devons-nous diminuer le nombre de modèles pour réallouer nos ressources à des modèles interdisciplinaires et/ou intégratifs ? Devons-nous développer de nouveaux codes de modélisation, ou coupler ces modèles de façon directe ? Quelle complexité choisir en fonction des échelles de modélisation ? Comment intégrer le vivant et l'évolution de nos sociétés dans nos modélisations ? On présentera ici les premières étapes de cette réflexion, passant notamment par une recension des modèles utilisés au sein d'OZCAR, pour ouvrir la discussion au sein de la communauté.

A modèle, modèle et demi... réflexion participative

I. Charpentier^a, R. Barbier^b, Jens Gustedt^a

^aLaboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie, CNRS&Unistra, 67000 Strasbourg

^bLaboratoire Sociétés, Acteurs, Gouvernement en Europe, ENGEEES, 67000 Strasbourg

Mots-clés: Modélisation, Données, Inondation, Science Post-Normale

1 Introduction

La gestion de l'environnement et des risques est une activité intensive en savoirs. Elle mobilise en particulier des savoirs techniques qu'on peut qualifier d'ordinaires, comme des inventaires naturalistes ou des études de risque inondation, élaborés à partir de méthodes globalement éprouvées [1]. Si d'autres méthodes existent, par exemple l'hydrogéomorphologie, la modélisation s'est imposée comme point de passage obligé pour établir les cartes d'inondation des plans de prévention du risque inondation [1], allant à l'encontre parfois des représentations et des intérêts des acteurs. Comment évaluer la robustesse d'une modélisation dont les résultats sont aussi sensibles ? Comment établir la confiance dans ses résultats ?

On abordera ces questions essentielles de manière originale, à partir d'une expérimentation qui sera proposée au public lors de l'intervention.

2 Matériel et méthodes

Notre objectif étant de conduire une « expérience post-normale » avec l'assistance, nous limitons volontairement les informations divulguées dans ce résumé. Plutôt que de présenter les données, nous préférons proposer un pitch.

2.1 Pitch

Au milieu des années 1930, un réseau d'étangs est complété pour produire des inondations défensives dans la vallée de la Sarre en cas d'attaque allemande. Le plan avait été établi en 1927 par Mr Pariset, ingénieur des Ponts et Chaussées, comme révélé par Mr Marque, instituteur et docteur en histoire qui en a retracé l'histoire. En juin 40, la vallée est effectivement inondée, et cela est imputé à l'activation des étangs. Depuis lors, cette description est reprise un peu partout. Mais ne serait-ce pas dû en fait à la météo pluvieuse de ce mois de juin 1940 ?

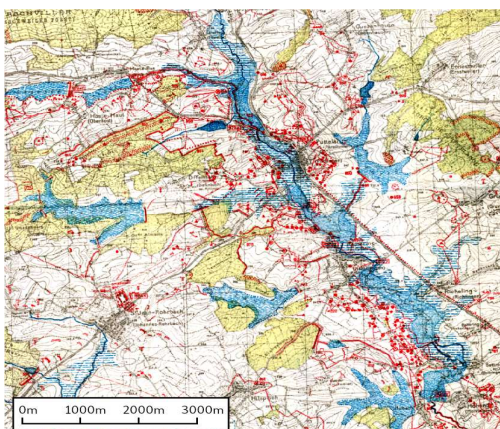


Figure 1 : La carte [2].

Une carte découverte récemment renseigne sur les inondations de juin 1940. Sera-t-elle en mesure remettre en question le mythe d'une inondation provoquée ? Rejoignez-nous pour élucider ce mystère.

2.2 Modélisation

Pour trancher entre les deux hypothèses (inondation planifiée VS effet de la pluviométrie), nous avons testé plusieurs stratégies de modélisation. Elles convergent vers un résultat identique mais reposent sur des choix et jeux de données spécifiques. L'échange qui suivra portera sur leurs mérites respectifs et les déterminants de la préférence des participants pour l'une ou l'autre.

Nous invitons les lecteurs intéressés à venir sans avoir consulté la bibliographie.

Références

- [1] Barbier R., Charpentier I. 2022. La délégation épistémique et son pilotage, *Revue d'Anthropologie des connaissances*, 16-3.
- [2] Armee-Oberkommando 1 .1940. Durchbruchsschlacht der 1.armee (bataille décisive de la 1ère armée), Stabsbildmeldung Nr. 16 vom 1. bis 25.6.1940.
- [3] Hariri, S. 2021. Modélisation des inondations historiques de la Sarre. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.

Présentations posters

Mercredi 19 juin 2024

n°	Titre	Présentatrice / Présentateur
1	Analyse du risque aux inondations dans le bassin versant de Tongo bassa (Douala, Cameroun) à partir du modèle de rapport de fréquence	Ebodé Valentin Brice
2	Evolution conjointe de l'irrigation, des ressources en eau et du climat entre 1950 et 2100	Arboleda-Obando Pedro F.
3	Estimation 3D des propriétés hydrodynamiques d'un milieu poreux à partir de descriptions lithologiques et d'essais de pompage	Cotinet Rémy
4	Avancées pour la représentation des manteaux neigeux de toundra dans les modèles	Fourteau Kévin
5	Modélisation des émissions de CO2 et de N2O des sols dans les systèmes sylvopastoraux sahéliens : de l'échelle locale à l'échelle régionale	Agbohessou Yélognissé
6	Modélisation des transferts verticaux dans la zone non saturée sous HYDRUS 1D : détermination de la recharge vers les eaux souterraines Application aux alluvions du site du CEA Cadarache - France	Andriatahiana Salohy Nantenaina
7	Evolution potentielle des apports futurs dans le barrage hydro-électrique de Fayé (Sud-ouest, Côte d'Ivoire) dans un contexte de changements climatiques : utilisation de l'algorithme d'apprentissage automatique Random Forest	Akaffou Franck Hervé (présenté par B. Koffi)
8	Application de hec-res sim pour la gestion du barrage hydroélectrique de Kossou en Côte d'Ivoire	Coulibaly Wawogninlin Brice (présenté par B. Koffi)
9	Modélisation de l'écoulement d'eau en milieux poreux hétérogènes avec des réseaux de neurones artificiels contraints par la physique.	Lehmann F
10	Modélisation par réseaux de neurones des feux de biomasse à l'échelle globale	Rougier Hugo
11	The added value of stable isotopes to model runoff generation and ecohydrological partitioning in west Africa	Chavez-Espinoza Diego
12	Où, quand et comment les simulations issues de modèles hydrologiques conceptuels sont-elles biaisées ?	Strohmenger Laurent
13	Integrated hydrological modeling of an Agro-forestry system in Senegal using ParFlow-CLM	Cohard Jean-Martial
14	Modélisation des transferts d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère : application au bassin versant du Strengbach	De Leest Mathilde

Présentations posters

Mercredi 19 juin 2024

n°	Titre	Présentatrice / Présentateur
15	Modélisation éco-hydrologique en zones arides : étude de l'impact de la densité racinaire sur le cycle de l'eau dans la région sahélienne	Rapp-Henry Lucie
16	Modélisation des Sphaignes dans ISBA	Garisoain Raphael
17	Modélisation d'un agro-écosystème phréatophyte sahélien à phénologie inversée dans ORCHIDEE	Gaglo Espoir
18	Exploration de l'impact du drainage agricole en fonction des propriétés de l'aquifère à l'aide du modèle hydrologique large-échelle CWatM	Coche Alexandre
19	Couplage surface-atmosphère : Cas d'étude 1D pour son évaluation dans CNRM-CM6-1	Bernard Emilie
20	Analyse de sensibilité d'un modèle hydrogéophysique couplé par les polynômes du chaos (PCE) et indices de Sobol	Gru Guillaume
21	Transferts thermiques et hydrauliques au sein de l'hyporhéos : cas d'un cours d'eau de tête de bassin versant en milieu forestier	Larance Samuel

Analyse du risque aux inondations dans le bassin versant de Tongo bassa (Douala, Cameroun) à partir du modèle de rapport de fréquence

V.B. Ebodé

International Joint Laboratory DYCOFAC, IRGM-UY1-IRD, Yaounde BP 1857, Cameroon

Mots-clés: Tongo Bassa, modèle du rapport de fréquence, inondations

1 Introduction

Les inondations constituent un problème majeur pour les habitants de la ville de Douala en général, et ceux du bassin versant du Tongo bassa en particulier (Ebodé et al., 2024). Face à cette situation, il importe aux pouvoirs publics de mettre en place des mesures d'atténuation de la vulnérabilité des populations face à ces catastrophes. Le présent article vise à dresser une carte des zones à risque d'inondations dans le bassin versant du Tongo bassa (Figure 1) au moyen du modèle du rapport de fréquence (FR).

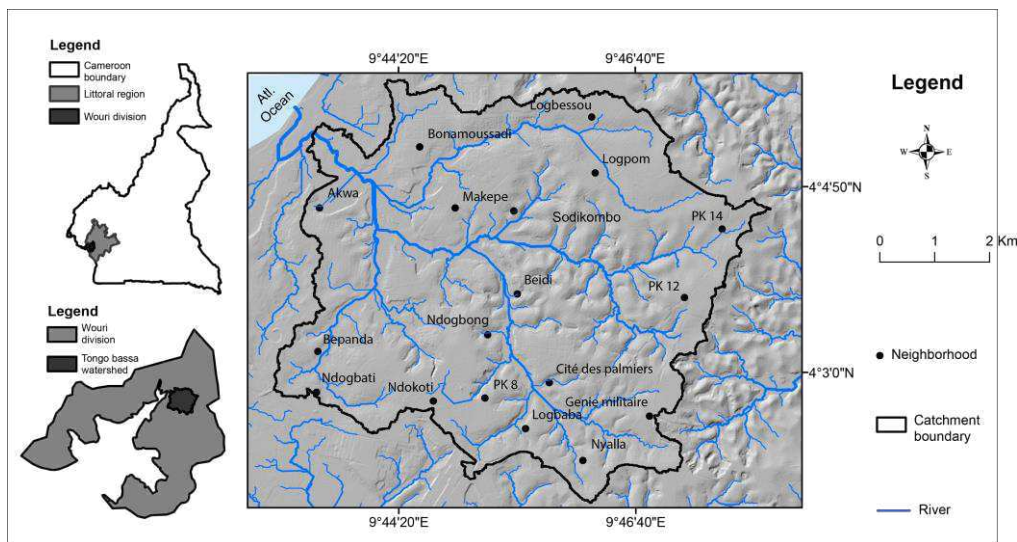


Figure 1 : Localisation du bassin versant du Tongo bassa. Source : Ebodé et al. (2024)

2 Matériel et méthodes

Au rang des données utilisées dans le cadre de cette étude, figurent une image satellitaire Sentinel II, un modèle numérique de terrain (données LIDAR), la carte des sols de la FAO et des points d'inondations historiques (Figure 2). Ces données ont permis d'obtenir six (06) variables indépendantes (Modes d'occupation et d'utilisation du sol, altitudes, pentes, distance des cours d'eau, densités de drainage et types de sols) qui ont été croisées par la suite pour générer une carte des zones à risque d'inondation du bassin investigué. Ces différentes variables sont considérées par certains auteurs (Ebodé et al., 2024) comme étant des facteurs principaux de l'occurrence des inondations dans une région donnée, puisqu'elles influent sur le ruissellement et l'infiltration des eaux de pluies.

La cartographie des zones à risques d'inondations a été faite au moyen du modèle du rapport de fréquence (FR). Ce modèle établit la relation entre l'occurrence des inondations et diverses variables reconnues comme étant à l'origine des inondations. Les valeurs des indices du rapport de fréquence sont calculées suivant la formule :

$$FSI = \sum FR \quad (\text{Equation 1})$$

Où FSI et FR sont respectivement l'indice d'occurrence des inondations (Flood Susceptibility Index) et le rapport de fréquence (Frequency Ratio) pour chaque facteur/variable.

Le rapport de fréquence (FR) est le rapport de la zone inondée à la zone d'étude totale qui délimite la zone inondée de la zone non inondée (Ebodé, 2022). Il se calcule suivant la formule :

$$FR = (E/F)/(M/L) \quad (\text{Equation 2})$$

Où E est le nombre d'inondations pour chaque facteur/variable ; F est le nombre total d'inondations ; M est la superficie de chaque facteur ; L est la superficie totale de la zone d'étude.

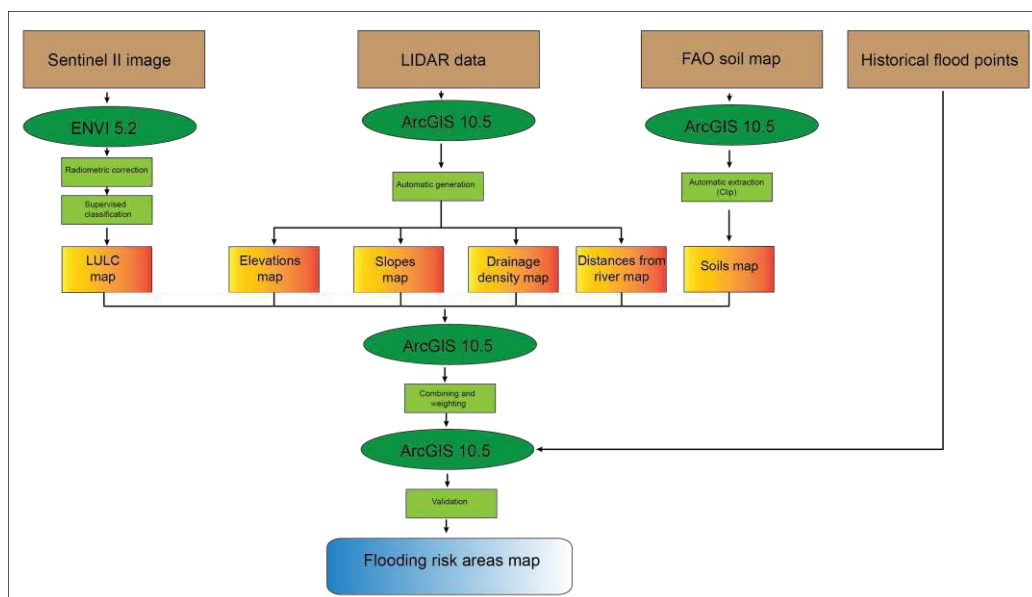


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'étude. Source : Ebodé et al. (2024).

3 Résultats

La carte réalisée montre que 1.41 %, 8.88 %, 28.51 %, 33.86 % et 27.33 % de la superficie du bassin sont respectivement délimités en classes de vulnérabilité aux inondations très faible, faible, moyenne, fort et très fort. Les zones à fort et à très fort risque d'inondation (celles où les inondations sont le plus susceptible de se produire) occupent plus de la moitié du bassin (61.19%). Ces espaces se caractérisent par une imperméabilisation importante, des altitudes faibles, des pentes faibles, une proximité importante des cours d'eau et des sols argileux. La plupart des maisons du bassin (66.92%) sont situées sur des espaces concernées par ces deux niveaux d'exposition (élevé et très élevé). Avec des taux de réussite et de précision des prédictions respectifs de 89 % et 96.78 %, une certaine confiance mérite d'être accordée la carte des zones à risque d'inondation réalisée. Les résultats de cette étude pourraient servir d'outils d'aide à la décision dans le cadre des différents aménagement entrepris par les pouvoirs publics, en vue de lutter contre les inondations dans ce bassin.

Référence (s)

Ebodé, V.B. 2022. Hydrological variability and flood risk in a forest watershed undergoing accelerated urbanization, *Water Supply*, 27(12): 8778. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.398>

Ebodé, VB., Onguéné, R., Braun, JJ. 2024. Flood susceptibility analysis in the Tongo bassa watershed through the Frequency Ratio Model. *Hydrology Research*. <https://doi.org/10.2166/nh.2024.152>

Evolution conjointe de l'irrigation, des ressources en eau et du climat entre 1950 et 2100

Pedro ARBOLEDA-OBANDO, Agnès DUCHARNE

“Laboratoire METIS (UMR 7619), IPSL, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris.

Mots-clés : Irrigation, cycle de l'eau, changement climatique, ressources en eau

1 Introduction

L'irrigation, l'une des principales activités humaines de gestion du paysage, joue un rôle central dans le lien entre l'eau, l'alimentation et l'énergie, ce qui explique l'augmentation très importante de la superficie irriguée au cours du XXe siècle [1]. Les activités d'irrigation augmentent directement le flux d'évapotranspiration, et sont soutenues par l'eau prélevée dans des réservoirs naturels tels que les aquifères, les rivières et les lacs. En outre, les modifications de la surface terrestre induites par l'irrigation génèrent des rétroactions atmosphériques, notamment des changements dans le régime des précipitations, un refroidissement de la température de l'air et des changements dans les variables énergétiques [2]. Bien que les scénarios futurs prévoient une augmentation, ou au moins une stagnation, des zones irriguées, dans un contexte de changement climatique, les implications de l'irrigation pour la gestion des ressources en eau et pour certaines variables climatiques clés ne sont pas claires.

2 Matériel et méthodes

Dans le cadre du projet BLUEGEM (Soils CRA 2020, Belmont Forum), et afin de pouvoir évaluer l'évolution conjointe de l'irrigation, des ressources en eau et des variables climatiques, nous utilisons un schéma d'irrigation récemment évalué dans ORCHIDEE [3], la composante surface terrestre du modèle climatique IPSL. Ce schéma estime la demande en eau à partir d'un déficit d'humidité du sol, et limite l'approvisionnement en eau au volume des réservoirs naturels (eaux souterraines et rivières), en tenant compte de la facilité d'accès (c'est-à-dire de l'existence d'infrastructures) et de certaines contraintes environnementales pour la des écosystèmes. La surface irriguée et la carte des infrastructures par source d'eau sont prescrites ; dans le cas de la surface irriguée, la prescription est faite pour chaque année. Nous avons effectué deux simulations transitoires et couplées surface-atmosphère à l'échelle mondiale, l'une sans irrigation et l'autre avec le système d'irrigation activé. Les deux simulations couvrent la période 1950-2100, et nous utilisons le scénario SSP5-RCP8.5 après 2015 (celui avec les émissions les plus élevées), de sorte que nous avons un signal climatique fort sur la période future.

3 Résultats préliminaires et perspectives

Les résultats préliminaires à l'échelle mondiale montrent que la superficie irriguée prescrite augmente, de même que le taux d'irrigation. L'augmentation de l'irrigation est probablement due à une plus grande surface irriguée et à un climat plus chaud. Les activités d'irrigation contrecarrent la tendance à l'augmentation du stockage des eaux souterraines due au changement climatique, tout en complexifiant les tendances en matière de stockage dans les cours d'eau (une approximation du débit) dans les zones irriguées. D'autre part, l'ET augmentera plus rapidement en raison du changement climatique et de l'irrigation. Nous étendrons notre analyse à d'autres variables liées au bilan d'eau et d'énergie. Notre analyse tentera de définir les principaux facteurs (liés à l'hydrologie ou au climat) qui expliquent les changements dans les taux d'irrigation et les effets connexes sur les flux d'évapotranspiration. Ces résultats pourraient aider à comprendre les implications futures de l'irrigation sur la gestion des ressources en eau, à la fois dans les zones irriguées et dans les zones non irriguées, par le biais de rétroactions entre la terre et l'atmosphère pour ces dernières. Bien que nous montrions des résultats à l'échelle mondiale, nous nous concentrerons sur certaines conclusions pour l'Europe occidentale.

Références

- [1] S. Siebert, M. Kummu, M. Porkka, P. Döll, N. Ramankutty, and B. R. Scanlon, “A global data set of the extent of irrigated land from 1900 to 2005,” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 19, no. 3, pp. 1521–1545, Mar. 2015.
- [2] Z. Yin *et al.*, “Improvement of the Irrigation Scheme in the ORCHIDEE Land Surface Model and Impacts of Irrigation on Regional Water Budgets Over China,” *J. Adv. Model. Earth Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–20, Apr. 2020.
- [3] P. F. Arboleda-Obando, A. Ducharne, Z. Yin, and P. Ciais, “Validation of a new global irrigation scheme in the ORCHIDEE land surface model,” *Geosci. Model Dev.*, vol. Preprint, 2024.

Estimation 3D des propriétés hydrodynamiques d'un milieu poreux à partir de descriptions lithologiques et d'essais de pompage

R. Cotinet^{a,b}, D. Rambourg^b, B. Belfort^b, Ph. Ackerer^b

^aAssociation pour la protection de la nappe phréatique de la plaine d'Alsace, Site du Biopôle, 28 rue de Herrlisheim, 68000 Colmar
^bInstitut Terre et Environnement de Strasbourg UMR7063, Université de Strasbourg 5 rue René Descartes 67084 Strasbourg Cédex

Mots-clés : perméabilité, porosité, répartition de la taille des grains, milieu équivalent, Monte Carlo, forêt aléatoire, krigeage 3D.

1 Introduction

L'estimation des propriétés hydrodynamiques des milieux poreux est déterminante pour lutter efficacement contre des pollutions diffuses affectant les forages d'eau potable. Dans ce contexte, les gestionnaires de captages et les pouvoirs publics se trouvent face à trois questions fondamentales : (1) Quand la pollution sera-t-elle détectée ? (2) À quel niveau de concentration ? (3) Durant combien de temps ? (Cf. Figure 1). L'objectif de cette thèse est de développer une méthode permettant de déduire les principaux paramètres hydrodynamiques (perméabilité à saturation, courbes de rétention et porosité efficace et tortuosité) des terrains concernés par l'alimentation du captage à partir des informations cartographiques et des données ponctuelles disponibles à plusieurs échelles.

2 Matériel et méthodes

La méthode consiste à attribuer des valeurs de perméabilité aux descriptions lithologiques issues des logs de forage à partir de résultats d'essais de pompages standardisés.

2.1 Standardisation des Transmissivités équivalentes horizontales

La standardisation a pour but de convertir les débits spécifiques (Specific Capacity - Sc) en Transmissivité équivalente des strates interceptées par les sondages. Afin de tenir compte de l'effet de la pénétration partielle des forages dans l'aquifère testé, le Sc est corrigé (Sc') grâce à l'équation (1) à l'aide de Lw la longueur des crépines, b_a l'épaisseur de l'aquifère, et r_w le rayon du forage. La conversion peut se faire en substituant la transmissivité T à une valeur proche de Sc', jusqu'à faire converger les deux termes l'équation Theis [1] (2) réécrite par [2]. Cette formule, nécessite de renseigner la durée du pompage - t_p, une hypothèse sur l'emmagasinement S. Ce qui n'est quasiment jamais le cas lorsque le Sc est fourni seul. Pour cette raison, [2] propose de substituer ces deux paramètres par l'équation (3). Ce terme est relativement dépendant de la gamme de valeur de Sc (figure 1).

$$Sc' = \frac{Sc}{\left[1 + 7 \left(\frac{r_w}{2L_w}\right)^{1/2} \cos\left(\frac{\pi L_w}{2b_a}\right)\right]} \quad (1)$$

$$Sc' = \frac{4\pi T}{\left[\ln\left(\frac{2.25Tt_p}{r_w^2 S}\right)\right]} \quad (2)$$

$$C' = \frac{t_p}{r_w^2 S} \quad (3)$$

La calibration réalisée conduit à attribuer des valeurs de perméabilité intrinsèque (k) pour 6 classes granulométriques (Galet – Ga, Gravier - Gr, Sables indifférenciés ou grossiers - Sb, Sables fins- Sbf, Limons ou lèss indifférenciés – L et les Argiles ou les Marnes – A) et des proportions (ω₁, ω₂, ω₃, ω₄, ω₅) de chaque fraction dans l'ordre d'apparition dans la description. Le tableau 1, montre comment sont calculés les poids en fonction du nombre de descriptions de l'horizon lithologique.

Nb de pole	Pole 1	Pole 2	Pole 3	Pole 4	Pole 5
1	ω ₁ +ω ₂ + ω ₃ +ω ₄ +ω ₅	-	-	-	-
2	ω ₁ +ω ₂ + ω ₃	ω ₄ +ω ₅	-	-	-
3	ω ₁ +ω ₂	ω ₃ +ω ₄	ω ₅	-	-
4	ω ₁ +ω ₂	ω ₃	ω ₄	ω ₅	-
5	ω ₁	ω ₂	ω ₃	ω ₄	ω ₅

Tableau 1 : calcul des poids en fonction de leur ordre d'apparition et du nombre de pôles décrits dans un horizon lithologique traversé par le sondage.

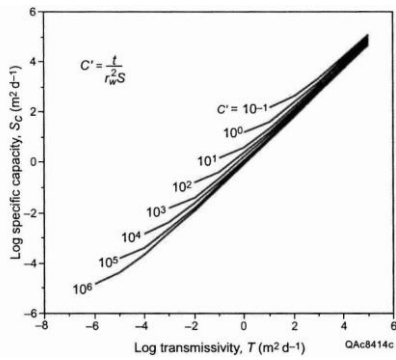


Figure 1 : Sensibilité du paramètre C' , en fonction des valeurs de S_c et des valeurs de T , avec l'hypothèse que $0.1 < r_w < 0.45$ m, que $0.00001 < S < 0.2$ et que $1h < t_p < 48h$ d'après [2].

Procédure de calibration des perméabilités et des proportions granulométriques

1. Tirages des k gammes génériques par exemple [3]
2. Tirages des ω dans les gammes observées sur les sondages les mieux renseignés
 - a. Entre le min et le max
 - b. (Selon une distribution Normale)
3. Pour chaque sondage calcul de la T_{litho} avec l'équation (4)
4. Pour chaque couple T_{ep} et T_{litho} , on calcul des erreurs quadratiques => $Erreur^2$
5. Sommes des erreurs => $SErreur^2$

On répète n fois les étapes 1 à 5.

6. On garde les $p\%$ meilleurs $Erreur^2$
7. Parmi les $p\%$ $Erreur^2$, on garde les $p\%$ des meilleurs $SErreur^2$
8. On sélectionne pour chaque sondage
 - a. Les intervalles plus fréquentes k_{freq} et ω_{freq} de largeur respective 0.1 ordre de grandeur et de 5%.
 - b. Les valeurs ω_{freq} et ω_{best} qui ont donné les meilleurs $Erreur^2$.

Figure 2 : Schéma de la procédure de calibration des perméabilités et des proportions granulométriques

2.2 Calibration

La procédure de calibration (Figure 2) est réalisée par tirages aléatoires dans les gammes génériques de la littérature [3] pour les perméabilités de chaque classe granulométrique. Les tirages des proportions ω_{1-5} sont effectués à partir des gammes quantifiées dans les couches de forages à partir des caractéristiques statistiques de chaque pôle (moyenne, écart-type, minimum et maximum). L'estimation des Transmissivité T_{litho} est basée sur la somme des moyennes géométriques pondérées de chaque couche saturée interceptée par le sondage équation (4).

$$T_{litho} = \sum_{i=1}^n e_i 10^{\left(\frac{\sum_{p=1}^5 \omega_p \log_{10}(k_p)}{\sum_{p=1}^5 \omega_p} \right)} \quad (4)$$

2.3 Spatialisation des perméabilités par classe et de leurs proportions

Après les procédures de tri et de sélection (Figure 2), les jeux de paramètres k_{freq} et k_{best} sont spatialisés au moyen de forêts aléatoires avec pour variables, les coordonnées X, Y et Z des centroïdes de chaque couche, l'âge géologique relatif et le type de dépôt indiqué par la carte géologique 50 000ème du secteur, des indicateurs géomorphologiques (caractéristique selon [4] et orientation des pentes, appliquées à la topographie de surface et du substratum). Ces indicateurs ont été calculés avec le package MultiscaleDTM [5] sur des MNT de surface et du substratum de 20x20 m de résolution. Les calculs ont été appliqués à l'échelle de 1020x1020 m.

Les jeux de paramètres ω_{freq} et ω_{best} seront spatialisés par simulations conditionnelles (co-krigeage 3D) avec deux niveaux de contraintes : la répartition des ω devra respecter les prédictions des simulations pluri gaussiennes (PGS) et la somme des pôles devra être égale à 100%. Les PGS prédiront dans notre cas la présence ou l'absence de la classe granulométrique. Elles seront réalisées sur chaque classe granulométrique individuellement. Enfin, les perméabilités seront calculées avec l'équation (4) et les porosités le seront avec une équation reliant la porosité à la perméabilité et à la taille de grains dans [6]. Ces valeurs seront ensuite introduites dans un modèle d'écoulement et de transport pour être évaluées à partir de chroniques de charge hydraulique et des concentrations en nitrates.

Références

- [1] Theis C.V. 1963. Estimating the transmissivity of water-table aquifer from the specific capacity of a well, in U.S Geological Survey Water-supply Paper, 1536-I p 332-336.
- [2] Mace R. 2001. *Estimating Transmissivity Using Specific-Capacity Data*. Bureau of Economic Geology Texas. p.53.
- [3] Freeze A. Cherry J. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 624 p.
- [4] Wood J. 1996. *The geomorphological characterisation of digital elevation models [PhD thesis]*, University of Leicester.
- [5] Illich A., Misiuk B., Lecours V., Murawski S. 2023. *MultiscaleDTM: An open-source R package for multiscale geomorphometric analysis*, 1164-1204. Transactions in GIS, Wiley.
- [6] Hommel J., Coltman E., Class. H. 2018. *Porosity-Permeability Relations for Evolving Pore Space : A Review with a Focus on (Bio-)geochemically Altered Porous Media*, 589-629. Transp Porous Med.

Avancées pour la représentation des manteaux neigeux de tundra dans les modèles

Kévin Fourteau^a, Laurent Arnaud^b, Lisa Bouvet^a, Julien Brondex^b, Neige Calonne^a, Oscar Dick^a, Basile de Fleurian^a, Mathieu Fructus^a, Pascal Hagenmuller^a, Daniel Kramer^{c,d}, Julien Méloche^{c,d}, Alexandre Langlois^{c,d}, Yves Lejeune^a, Jacques Roulle^a, Louis Védrine^a, Vincent Vionnet^e, Marie Dumont^a

^aUniv. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France

^bUniv. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France

^cCentre d'Applications et de Recherche en Télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, J1K 2R1, Canada

^dCentre d'études Nordiques, Université Laval, Québec, G1V 0A6, Canada

^eMeteorological Research Division, Environment and Climate Change Canada, Dorval, Québec, Canada

Mots-clés: neige, arctique, tundra

1 Introduction

Le manteau neigeux de tundra recouvre d'importantes surfaces continentales et ce jusqu'à dix mois par an. Par son albédo élevé et sa forte isolation thermique, il joue un rôle important pour le bilan d'énergie Terrestre ^[1] et pour le régime thermique du pergélisol arctique ^[2]. De plus, sa saisonnalité contrôle le cycle hydrologique aux hautes latitudes ^[3] et sa structure a un impact sur la faune locale ^[4]. Pourtant, les modèles détaillés de manteau neigeux, conçus pour simuler la structure interne et les propriétés physiques des manteaux neigeux, ne parviennent pas à représenter la neige de tundra ^[5]. Pour surmonter ces limitations, nous présentons des travaux récents en vue de l'implémentation d'une représentation physique de la neige de tundra dans les modèles détaillés de manteau neigeux. Il s'agit notamment d'une campagne hivernale menée dans l'Arctique canadien pour l'observation détaillée de la structure d'un manteau neigeux de tundra, de sa formation et de son évolution dans des conditions climatiques arctiques. Nous présentons également des travaux sur l'implémentation numérique des processus physiques qui gouvernent le manteau neigeux de tundra dans un nouveau modèle de neige détaillé, en mettant l'accent sur la représentation des flux de vapeur d'eau ^[6], responsables de la dédensification de la couche basale du manteau.

Références

- [1] Flanner, M., Shell, K., Barlage, M. *et al*: Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nature Geosci*, 4, 151-155, <https://doi.org/10.1038/ngeo1062>, 2011
- [2] Way, RG, Lewkowicz, AG: Environmental controls on ground temperature and permafrost in Labrador, northeast Canada, *Permafrost. Periglac. Process*, 29, 73-85, <https://doi.org/10.1002/ppp.1972>, 2018
- [3] Krogh, S. A., and Pomeroy, J. W.: Impact of Future Climate and Vegetation on the Hydrology of an Arctic Headwater Basin at the Tundra-Taiga Transition, *J. Hydrometeorol.*, 20(2), 197-215, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0187.1>, 2019
- [4] Forbes, B.C., Kumpula, T., Meschtyb, N., Laptander, R., Macias-Fauria, M., Zetterberg, P., Verdonen, M., Skarin, A., Kim, K., Boisvert, L.N. Stroeve, J.C. , and Bartsch, A.: Sea ice, rain-on-snow and tundra reindeer nomadism in Arctic Russia, *Bio. Lett.*, 12(11), 20160466, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2016.0466>, 2016
- [5] Barrere, M., Domine, F., Decharme, B., Morin, S., Vionnet, V., and Lafaysse, M.: Evaluating the performance of coupled snow-soil models in SURFEXv8 to simulate the permafrost thermal regime

at a high Arctic site, *Geosci. Model Dev.*, 10, 3461-3479, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3461-2017>, 2017

[6] Brondex, J., Fourteau, K., Dumont, M., Hagenmuller, P., Calonne, N., Tuzet, F., and Löwe, H.: A finite-element framework to explore the numerical solution of the coupled problem of heat conduction, water vapor diffusion and settlement in dry snow (IvoriFEM v0.1.0), *Geosci. Model Dev.*, 16, 7075-7106, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-7075-2023>, 2023.

Modélisation des émissions de CO₂ et de N₂O des sols dans les systèmes sylvopastoraux sahéliens : de l'échelle locale à l'échelle régionale

Y. Agbohessou^{a,b,c}, C. Delon^d, M. Grippa^e, E. Mougin^e, T. Tagesson^{f,g}, D. Ngom^a, E. K. Gaglo^{a,c}, S. Ba^{a,c}, O. Ndiaye^{b,h}, O. Roupsard^{c,i,j}

^aUniversité Cheikh Anta Diop, Dakar, Senegal

^bInstitut Sénégalais de Recherches Agricoles, Dakar, Senegal

^cLMI IESOL, Centre IRD-ISRA de Bel Air, Dakar, Senegal

^dLaboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse, UPS-UT3 / CNRS / IRD, Toulouse France

^eGéosciences Environnement Toulouse, Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, Toulouse, France

^fDepartment of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

^gDepartment of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Sölvegatan 12, S-223 62, Lund, Sweden

^hCentre de Recherche Zootechniques de Dahra, Institut Sénégalais de Recherche Agricoles, Dakar, Senegal

ⁱCIRAD, UMR Eco&Sols, Dakar, Senegal

^jEco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France

Contact: velognissefredi.agbohessou@ucad.edu.sn

Mots-clés: modélisation, émissions de CO₂ et de N₂O, systèmes sylvopastoraux

1 Introduction

Les systèmes sylvopastoraux, en particulier dans les pays sahéliens, contribuent à l'adaptation au changement climatique, fournissent de la nourriture et soutiennent les moyens de subsistance de millions de personnes. Cependant, ils sont vulnérables aux changements climatiques et d'utilisation des terres liés à la pression anthropique. L'étendue et l'ampleur des impacts potentiels des pratiques agricoles sur les flux de gaz à effet de serre (GES) sont mal compris, notamment dans les écosystèmes semi-arides. La modélisation est un outil qui peut fournir des informations sur les processus sous-jacents ainsi que sur la variabilité temporelle et spatiale des flux de GES dans ces écosystèmes.

2 Matériel et méthodes

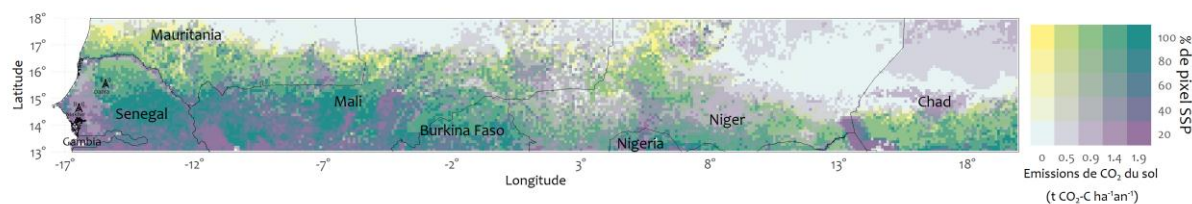
Nous avons utilisé le modèle STEP (Sahelian Transpiration Evaporation and Productivity) développé pour les savanes herbacées sahéliennes, couplé avec GENDEC (le modèle GENeral DEComposition) et un modèle d'émission de N₂O pour simuler les flux de GES à Dahra, un système sylvopastoral situé dans le nord-ouest du Sénégal [1]. En utilisant les paramétrisations 1D développées à l'échelle locale (à Dahra), nous avons étendu l'application du modèle STEP-GENDEC-N₂O à l'échelle du Sahel afin d'étudier les dynamiques spatiales et temporelles des émissions de GES du sol dans les systèmes sylvopastoraux sahéliens de 2012 à 2022 [2].

3 Résultats

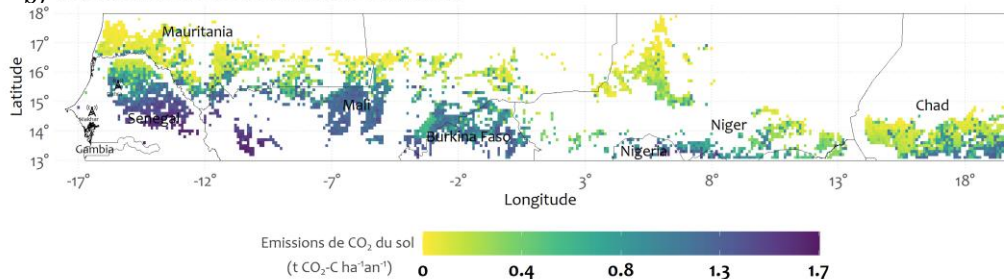
De bonnes corrélations ont été trouvées entre les résultats du modèle et les données in situ mesurées sur le site de Dahra pour l'humidité du sol, l'évapotranspiration, la productivité primaire brute, la biomasse herbacée, la respiration de l'écosystème, ainsi que les teneurs en N et en C du sol. Nos résultats à l'échelle régionale montrent qu'au cours de la dernière décennie (2012-2022), il y a eu une distribution spatiale hétérogène des émissions de CO₂ et de N₂O du sol dans les systèmes sylvopastoraux sahéliens (Fig. 1). Sur la période 2012-2022, les émissions régionales estimées de CO₂ et de N₂O provenant des sols des systèmes sylvopastoraux à travers le Sahel étaient de $58,79 \pm 4,83$ Tg CO₂-C an⁻¹ (1 Tg = 10¹² g) et $21,59 \pm 3,91$ Gg N₂O-N an⁻¹ (1 Gg = 10⁹ g), respectivement. Ces valeurs sont généralement inférieures aux estimations rapportées pour les zones tropicales et les terres cultivées.

Emissions de CO₂ du sol

a) Moyenne sur la période 2012-2022: tous les pixels

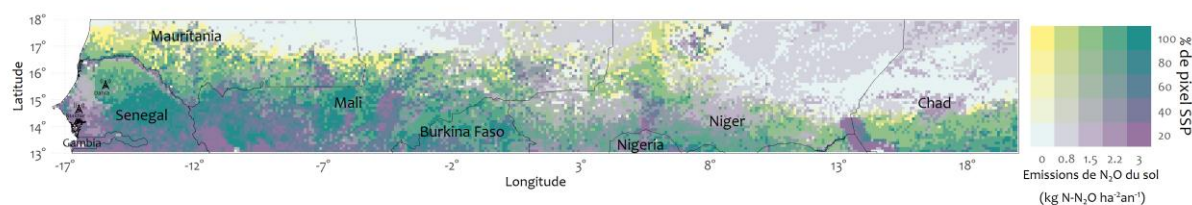


b) Moyenne sur la période 2012-2022: pixels SSP uniquement



Emissions de N₂O du sol

c) Moyenne sur la période 2012-2022: tous les pixels



d) Moyenne sur la période 2012-2022: pixels SSP uniquement

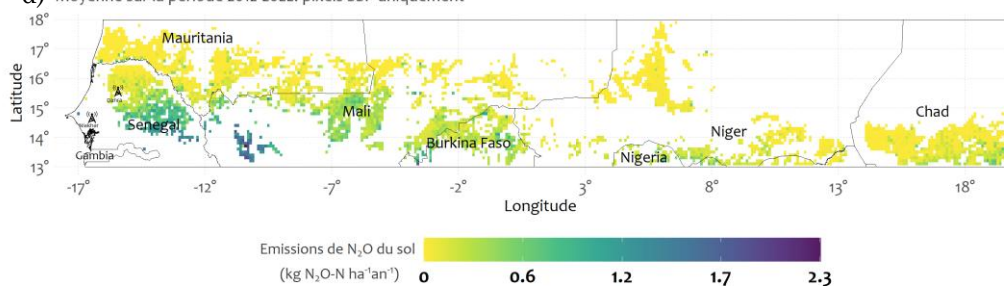


Figure 1 : Répartition régionale des émissions de CO₂ et de N₂O du sol simulées dans les systèmes sylvopastoraux (SSP) sahéliens. (a) et (c) : Les cartes bivariées affichent à la fois les sorties du modèle et la répartition des SSP dans le domaine de simulation. (b) et (d) : Cartes affichant les résultats du modèle uniquement sur les zones dominées par les SSP sahéliens (>80%).

Références

- [1] Agbohessou, Y., Delon, C., Mougou, E., Grippa, M., Tagesson, T., Diedhiou, M., Ba, S., Ngom, D., Vezy, R., Ndiaye, O., Assouma, M.H., Diawara, M., Roupsard, O., 2023. To what extent are greenhouse-gas emissions offset by trees in a Sahelian silvopastoral system? *Agricultural and Forest Meteorology*, 343, 109780. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109780>
- [2] Agbohessou, Y., Delon, C., Grippa, M., Mougou, E., Ngom, D., Ndiaye, O., Salgado, P., Roupsard, O., 2023. Modelling CO₂ and N₂O emissions from soils in silvopastoral systems of the West-African Sahelian band. Major review in *Biogeosciences*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2452>

Modélisation des transferts verticaux dans la zone non saturée sous HYDRUS 1D :
détermination de la recharge vers les eaux souterraines
Application aux alluvions du site du CEA Cadarache – France

Salohy N. ANDRIATAHIANA, 3^e année de doctorat

Sous la Direction de : Jean-Martial COHARD (UGA) – Directeur de thèse | Jean-Pierre VANDERVAERE (UGA) – Co-directeur de thèse | Nathalie COURTOIS (CEA) – Encadrante

Mots-clés : CEA Cadarache, zone non saturée, recharge, fosse pédologique, HYDRUS-1D

1. Introduction

La recharge est l'un des paramètres essentiels pour un modèle hydrogéologique. Il est souvent difficile de déterminer, parmi une grande variété de techniques, laquelle est susceptible de fournir des estimations fiables de la recharge [1]. Dans le cadre de cette étude, une approche par modélisation a été choisie, s'appuyant sur des données mesurées in situ.

2. Matériels et méthodes

Nous avons sélectionné le modèle HYDRUS-1D. C'est l'un des modèles numériques les plus avancés et les plus populaires dans le domaine de la physique des sols [2]. Le choix de ce modèle repose sur sa performance et sa robustesse pour résoudre numériquement l'équation de Richards [3], qui régit l'écoulement d'eau dans la ZNS [4]. Dans cette étude, nous avons utilisé particulièrement le module Phydus, un package Python open source pour créer, optimiser et visualiser le modèle HYDRUS-1D [5].

Afin d'étudier spécifiquement la ZNS et d'estimer la recharge sur le site du CEA Cadarache, une fosse pédologique a été instrumentée jusqu'à 1,5 mètres de profondeur à plusieurs niveaux (15, 30, 45, 60, 80, 100 et 150 cm) avec des sondes de teneur en eau et des tensiomètres, qui mesurent respectivement la teneur en eau volumique et le potentiel matriciel du sol. Ces grandeurs physiques seront utilisées pour déterminer les paramètres hydrodynamiques du sol, en particulier ceux du van Genuchten Mualem [6], [7].

La mesure de ces paramètres hydrodynamiques caractérisant le sol nous permet de construire les courbes de rétention hydrique et de conductivité hydraulique, qui alimentent ensuite notre modèle 1D.

Le modèle a été calibré et validé en utilisant les mesures de teneurs en eau in situ. Comme suggéré par Chen et *al.*, (2022), trois indicateurs classiques d'erreur ont été sélectionnés (RMSE, MAE, MSE) pour évaluer la précision du modèle, facilitant ainsi la comparaison entre les données simulées et observées.

Au cours des processus de calibration et de validation, les valeurs de RMSE, MAE et MSE étaient respectivement de : 0,007 à 0,02 cm³/cm³ ; 0,005 à 0,02 cm³/cm³ et 5× 10⁻⁵ à 7 × 10⁻⁴ cm³/cm³, toutes profondeurs confondues. Par la suite, le modèle a été utilisé pour simuler l'écoulement vertical à travers un sol d'une profondeur de 2 mètres pendant une période de 8 ans (2015-2023), en prenant en compte les conditions météorologiques locales réelles. Le flux simulé à travers la surface située à 2m de profondeur, condition à la limite inférieure, peut être considéré comme la recharge potentielle des eaux souterraines.

3. Résultats

La précipitation moyenne interannuelle sur le site d'étude entre 2015 et 2023 est de 616 +/- 185 mm. La recharge annuelle simulée pour ces 8 dernières années varie entre 72 et 305 mm/an (Figure1), avec une moyenne interannuelle de 150 +/- 78 mm/an. Ces apports en eau, qui contribuent à la recharge, représentent en moyenne 23% +/- 6% des précipitations annuelles mesurées.

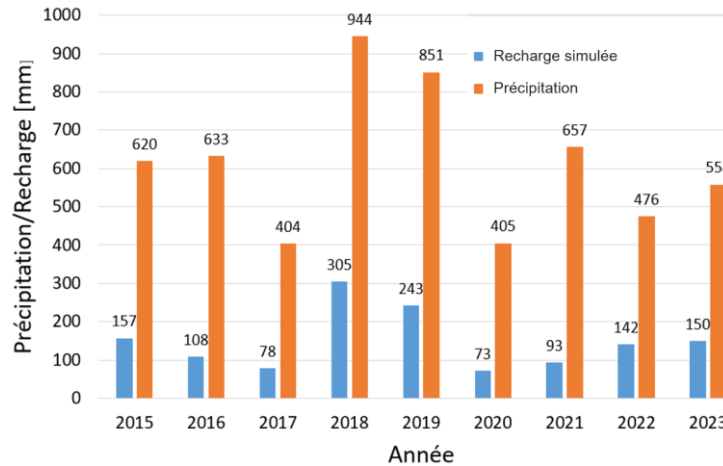


Figure 1. Comparaison de la recharge simulée sous HYDRUS-1D et les précipitations entre 2015 et 2023

BIBLIOGRAPHIE

- [1] B. R. Scanlon, R. W. Healy, et P. G. Cook, « Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge », *Hydrogeology Journal*, vol. 10, n° 1, p. 18-39, févr. 2002, doi: 10.1007/s10040-001-0176-2.
- [2] D. E. Radcliffe et J. Simunek, *Soil physics with HYDRUS: modeling and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis, 2010.
- [3] L. A. Richards, « Capillary conduction of liquids through porous mediums », *Physics*, vol. 1, n° 5, p. 318-333, nov. 1931, doi: 10.1063/1.1745010.
- [4] J. Šimunek, D. Rassam, D. Mallants, et M. Th. van Genuchten, *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media: Tutorial, Version 1.00*. in CSIRO Land and Water. Australia, 2012.
- [5] R. Collenteur, M. Vremec, et G. Brunetti, « Interfacing FORTAN Code with Python: an example for the Hydrus-1D model », *pico*, other, mars 2020. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-15377.
- [6] Y. Mualem, « A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media », *Water Resour. Res.*, vol. 12, n° 3, Art. n° 3, juin 1976, doi: 10.1029/WR012i003p00513.
- [7] M. Th. van Genuchten, « A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, n° 5, Art. n° 5, sept. 1980, doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- [8] S. Chen *et al.*, « Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review », *Geoderma*, vol. 409, p. 115567, mars 2022, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115567.

Evolution potentielle des apports futurs dans le barrage hydro-électrique de Fayé (Sud-ouest, Côte d'Ivoire) dans un contexte de changements climatiques : utilisation de l'algorithme d'apprentissage automatique Random Forest

F. H. Akaffou^a, B. Koffi^b, K. L. Kouassi^a

^a Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé

^b Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny

Mots-clés: Random Forest, CMIP6, Côte d'Ivoire

1 Introduction

Les barrages hydroélectriques jouent un rôle majeur dans la production d'énergie dans de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, tels que la Côte d'Ivoire. Malheureusement, les cours d'eau qui alimentent ces barrages sont menacés par les effets des Changements Climatiques (CC). Ainsi, pour une meilleure planification de l'exploitation des barrages hydro-électriques, il est nécessaire d'évaluer les impacts potentiels des CC sur les débits futurs particulièrement dans les petits bassins. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui a pour objectif d'évaluer les impacts des CC sur les débits entrant dans le barrage hydro-électrique de Fayé en utilisant l'algorithme Random Forest (RF).

2 Matériel et méthodes

Les biais dans les données de pluies et de températures mensuelles issues de treize modèles climatiques CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) sous trois scénarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5) ont été ajustés en utilisant la méthode de changement de delta [1]. La moyenne multi-modèles (EnsMean) a été calculée en faisant la moyenne arithmétique. Ensuite, ces données (modèles de pluies et températures et la moyenne multi-modèles) ont été utilisées comme prédicteurs dans le modèle RF [2,3]. 80% des données ont été utilisées pour l'entraînement et 20% pour la validation. Les taux de variation des débits entrants ont été calculés dans le court (2025-2049), moyen (2050-2074) et long terme (2075-2099) par rapport à la période de référence (1990-2014) en utilisant (1).

$$Variation_{apport} = \frac{X_{DC} - X_{OBS}}{X_{OBS}} \times 100 \quad (1)$$

3 Résultats et discussion

Les résultats annoncent une hausse des débits futurs (Figure 1) malgré la baisse des précipitations, ce qui pourrait être dû à l'occupation du sol. Pour la moyenne multi-modèles, la hausse prédite peut atteindre 16%, 23% et 10% respectivement sous les scénarii SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5 au cours des trois périodes de projection. Les variations les plus importantes sont enregistrées sous le scénario SSP2-4.5, tandis que les plus faibles sont enregistrées sous le scénario SSP5-8.5.

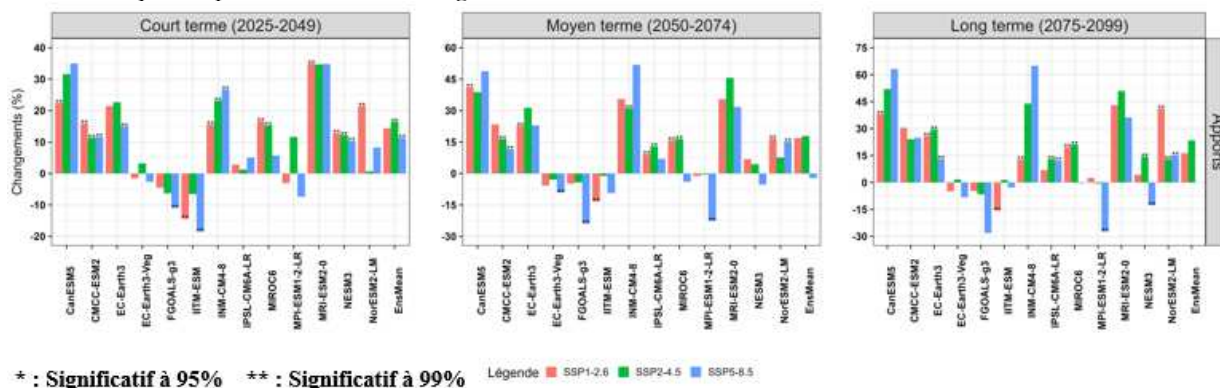


Figure 1 : taux de variation des apports futurs à l'échelle annuelle.

4 Conclusion

Le modèle Random Forest s'est montré performant pour la simulation des apports dans le barrage hydroélectrique de Fayé. Cette étude pourrait aider le gestionnaire du barrage hydroélectrique de Faye à mieux planifier l'exploitation du barrage en tenant compte des changements potentiels des apports dus aux CC.

Références

- [1] Navarro-Racines C., Tarapues J., Thornton P., Jarvis A., Ramirez-Villegas J. 2020. High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments, *Scientific Data*, 7, 1–15.
- [2] Ho L.T.T., Dubus L., Felice M.D., Troccoli A. 2020. Reconstruction of Multidecadal Country-Aggregated Hydro Power Generation in Europe Based on a Random Forest Model, *Energies*, 13, 1–17.
- [3] Obahoundje S., Diedhiou A., Dubus L., Alamou E.A., Amoussou E., Akpoti K., Ofose E.A. 2022. Modeling climate change impact on inflow and hydropower generation of Nangbeto dam in West Africa using multi-model CORDEX ensemble and ensemble machine learning, *Applied Energy*, 325, 1–13.

Application de hec-res sim pour la gestion du barrage hydroélectrique de Kossou en Côte d'Ivoire.

W.B. Coulibaly^a, Z.A. Kouadio^a, B. Koffi^b, L.K. Kouakou^a

^aLaboratoire des sciences et des Technologies de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé –BP 150 Daloa(Côte d'Ivoire)

^bInstitut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INPHB) – Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

*Correspondance : coulibaly.w.brice@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-4877-8412>

Résumé

Les outils de modélisation et de simulation jouent un rôle crucial dans la gestion des barrages en permettant aux gestionnaires de mieux comprendre les systèmes hydrologiques complexes, d'anticiper les tendances futures et d'évaluer les impacts potentiels de différentes stratégies de gestion. Ces outils facilitent la prise de décisions éclairées et la formulation de politiques et de plans d'action efficaces pour relever les défis actuels et futurs liés à la gestion des ressources en eau dans un contexte de changements climatiques. En intégrant les données climatiques et hydrologiques actuelles aux modèles de simulation, les décideurs peuvent concevoir des politiques de gestion plus résilientes et durables, contribuant ainsi à garantir une utilisation équitable et efficace des ressources en eau pour les générations futures. Dans cette étude, une application holistique de HEC Res Sim a été présentée. Sa pertinence, ses capacités et son adéquation pour la prévision des niveaux d'eau, des volumes turbinés ainsi que de la production d'un barrage hydroélectrique ont été examinées. Les données utilisées pour mener à bien cette étude sont les caractéristiques du barrage de Kossou ainsi que des données historiques sur les apports du lac, les niveaux d'eau, les volumes turbinés, les données de production d'énergie et les températures. Le modèle a été calibré et validé principalement à l'aide de la règle de lâcher et de la règle de courbe de guidage de puissance. Les résultats ont démontré que le modèle HEC Res Sim a produit des résultats satisfaisants, avec des valeurs élevées du coefficient Kling-Gupta (KGE) supérieure à 0.5, renforçant ainsi sa fiabilité pour la conception de politiques de gestion plus résilientes et durables. Ces résultats contribuent à garantir une utilisation équitable et efficace des ressources en eau pour les générations futures.

Mots-clés : Fonction de Lâchers, Courbe de guidage de puissance, Niveau d'eau, Volume turbiné, HEC ResSim, Barrage hydroélectrique de Kossou.

Modélisation de l'écoulement d'eau en milieux poreux hétérogènes avec des réseaux de neurones artificiels contraints par la physique.

François Lehmann^a, Marwan Fahs^a, Ali Alhubail^b et Hussein Hoteit^b

^aInstitut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg, CNRS, ENGEEES, Strasbourg, France

^bPhysical Science and Engineering Division, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia

Mots-clés : modélisation, Darcy, réseaux de neurones, PINNs

Résumé :

La construction de modèle à l'aide de réseaux de neurones artificiels informés (contraints) par la physique (Physics-Informed Neural Networks ou PINNs) est une approche simple et innovante qui combine l'apprentissage automatique et des équations physiques pour résoudre des problèmes complexes en sciences et ingénierie. Cette méthode a probablement été présentée pour la première fois par Lagaris [2] en 2000. Avec le développement spectaculaire des nouveaux outils d'apprentissage automatique, la méthode a été reprise et développée par Berg et Nyström [1] et par Raissi [4] en 2019. Cette méthode peut être particulièrement utile pour la modélisation des écoulements en milieux poreux hétérogènes, où les processus physiques sont complexes et les données expérimentales parfois limitées. Les PINNs fonctionnent en intégrant les lois de la physique dans la structure de la fonction objectif (« loss function »). Le réseau de neurones est entraîné pour minimiser la fonction objectif (l'équation différentielle), ainsi que les conditions initiales et aux limites du domaine d'étude. Dans le cas des écoulements en milieux poreux hétérogènes, cette approche permet d'obtenir des prédictions précises de la distribution des pressions et du champ de vitesses, même si les données sont absentes, rares ou bruitées.

Cependant, l'application des PINNs aux écoulements en milieux poreux hétérogènes présente plusieurs difficultés. L'une des principales est l'hétérogénéité du milieu poreux, qui peut rendre l'apprentissage difficile et entraîner des erreurs de prédiction. L'objectif de ce travail est d'élaborer une mise en œuvre précise des PINNs pour modéliser l'écoulement des fluides dans des milieux poreux hétérogènes. La mise en œuvre proposée s'inspire de la formulation mixte de l'équation de conservation de la masse couplée à la loi de Darcy. L'idée est de séparer l'équation de conservation de la masse et la loi de Darcy [3]. La séparation des deux équations (continuité et loi de Darcy) permet d'exprimer le terme correspondant à l'équation différentielle dans la fonction objectif sans être obligé d'évaluer les dérivées spatiales de la conductivité hydraulique. Quels que soient le type et le niveau d'hétérogénéité du champ de conductivité hydraulique, cette approche fournit une différenciation automatique plus précise pour le calcul du champ de vitesses. Les expériences numériques montrent que la structure globale du réseau de neurones basée sur différents réseaux, un réseau pour le champ de pression et deux autres pour chaque composante du champ de vitesses fournit la plus grande précision.

Références :

- [1] Berg J. and Nyström K. 2018. A unified deep artificial neural network approach to partial differential equations in complex geometries. *Neurocomputing* (317)28–41.
- [2] Lagaris I. E., Likas A. C., Papageorgiou D. G. 2000. Neural-Network Methods for Boundary Value Problems with Irregular Boundaries, *IEEE Transactions on neural networks*, 11(5)1041-1049.
- [3] Lehmann F., Fahs M., Alhubail A., Hoteit H. 2023. A mixed pressure-velocity formulation to model flow in heterogeneous porous media with physics-informed neural networks, *Adv. in Water Res.*
- [4] Raissi, M., Perdikaris, P., Karniadakis, G.E., 2019. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics* 378, 686–707.

Modélisation par réseaux de neurones des feux de biomasse à l'échelle globale

ROUGIER Hugo, DECHARME Bertrand, MALLET Marc

Centre Nationale de Recherche en Météorologie, Université de Toulouse

Les feux de biomasse sont très fréquents à l'échelle de la planète où $\sim 400\text{Mha}$ ($4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$) brûlent chaque année. Rien qu'en France, environ 5000 feux de forêts ont lieu chaque été. Ces feux de biomasse sont la principale forme de perturbation des écosystèmes terrestres. Ils sont étroitement liés au climat, aux cycles de l'eau et du carbone, et aux activités humaines (*Li and Lawrence 2017*).

Aujourd'hui les modèles climatiques¹ dit du « système Terre² » simulent ces feux de biomasse grâce à des schémas numériques empiriques implémentés dans leur modèle de surface continentale. Au sein du modèle de climat du CNRM, les feux de biomasse sont modélisés par le modèle de surface continentale ISBA (*Decharme et al. 2019 ; Delire et al. 2020*) en utilisant un schéma statistique très simple qui ne prend en compte que les aspects climatiques et biophysiques comme précurseurs de l'occurrence des feux.

Notre étude vise par conséquent à améliorer ce schéma à l'aide de technique de "machine learning" dont l'usage est justifié par l'existence d'observations satellitales de superficie brûlée via MODIS et de réanalyses météorologiques à haute résolution spatiale et temporelle comme ERA5. Dans un premier temps nous avons émulé ces données MODIS grâce à divers précurseurs utilisés dans un réseau de neurones que nous décrivons ici.

Nous avons pu constater que l'utilisation de ce réseau de neurone de type "Long-Short Term Memory" permet une modélisation plus réaliste des surfaces brûlées MODIS que ce que le schéma ISBA est capable de simuler avec sa représentation empirique. La même comparaison sera réalisée avec le modèle de surface américain CLM qui possède une modélisation plus détaillée des feux de biomasse (*Lawrence et al. 2019*) tout en restant assez empirique. Des progrès, que nous discuterons, seront encore nécessaires pour améliorer l'entraînement du réseau avant que ce dernier ne soit introduit dans le schéma ISBA.

Référence :

Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J., Alias, A., ... Voldoire, A. (2019). Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(5), 1207–1252. <https://doi.org/10.1029/2018MS001545>

Sepp Hochreiter, Jürgen Schmidhuber; Long Short-Term Memory. *Neural Comput* 1997; 9 (8): 1735–1780. doi: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

Lawrence, David & Rosie, Fisher & Koven, Charles & Oleson, Keith & Swenson, Sean & Bonan, Gordon & Collier, Nathan & Ghimire, Bardan & Kampenhout, Leo & Kennedy, Daniel & Kluzek, Erik & Lawrence, Peter & Li, Fang & Li, Hongyi & Lombardozzi, Danica & Riley, William & Sacks, William & Shi, Mingjie & Vertenstein, Mariana & Zeng, Xubin. (2019). The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 11. <https://doi.org/10.1029/2018MS001583>.

Li, F., Zeng, X. D., and Levis, S.: A process-based fire parameterization of intermediate complexity in a Dynamic Global Vegetation Model, *Biogeosciences*, 9, 2761–2780, <https://doi.org/10.5194/bg-9-2761-2012>, 2012.

1 Modèle numérique composé de 4 composantes bien distinctes : atmosphère, surfaces continentales, océan & glace de mer

2 Modèle de climat dans lequel on rajoute des processus biophysique et biogéochimique dans chaque composante.

THE ADDED VALUE OF STABLE ISOTOPES TO MODEL RUNOFF GENERATION AND ECOHYDROLOGICAL PARTITIONING IN WEST AFRICA

Diego Chavez-Espinoza ¹, Christine Vallet-Coulomb ¹, Sylvain Kuppel ², Christophe Peugeot ³, Basile Hector ⁴, Jean-Martial Cohard ⁴, David Au Yang ¹, Alexandre Zappelli ¹, Theodore Ouani ⁵, Simon Afouda ⁵, Maxime Wubda ⁶

(1) Aix-Marseille Univ., CNRS - IRD - INRAE – CEREGE, Technopôle de l'Arbois-Méditerranée, Aix-en-Provence, France

(2) Géosciences Environnement Toulouse, University of Toulouse, CNRS - IRD - UPS - CNES

(3) HydroSciences Montpellier (IRD, CNRS, Univ. Montpellier, IMT Mines Alès), Montpellier, France

(4) Institut des Géosciences de l'Environnement (Univ. Grenoble-Alpes, CNRS, IRD), Grenoble, France

(5) Observatoire AMMA-CATCH, Institut de Recherche pour le Développement, Cotonou, Bénin

(6) Université Joseph Ki Zerbo (UFR-SVT/DST), Ouagadougou, Burkina Faso

In the Sudanian region of West Africa, the sub-humid climate is strongly influenced by seasonal and interannual rainfall variability associated with the occurrence of the West African monsoon seasonal cycle. While rivers flow intermittently with a dry season that lasts at least six months and annual river floods of highly variable intensity, several studies along the soil-plant-river-atmosphere continuum in this region have highlighted the important role of vegetation water uptake in shaping regional water pathways. Plants may control recharge through root water uptake in the vadose zone, but also by tapping groundwater year-round, therefore impacting groundwater-fed river regimes as well. Understanding the complex hydrological mechanisms of such systems and their response to climatic and environmental drivers remains a significant knowledge gap. We address this scientific question in the upper Ouémé basin, covering 10,000 km² in northern Benin. The area is monitored by the AMMA-CATCH critical zone observatory (www.amma-catch.org), which maintains long-term hydroclimatic data records at several locations, including precipitation, streamflow, soil moisture, piezometric levels and leaf area index. Additionally, isotopic monitoring of precipitation and river water has been conducted since 2018. At this scale where hillslope dynamics combine with larger-scale organization of water pathways, we deployed a process-based, spatially-distributed model (here with a 1-km² resolution) over the 2018-2021 period. In this modeling approach, the local energy balance directly depends on vegetation foliar dynamics (forced by leaf area index) and shapes water partitioning in the critical zone, while vertical and lateral water routing also tracks stable isotopic signatures (²H, ¹⁸O). By constraining the model with different combination of the aforementioned datasets, we applied an automatic calibration procedure with multi-objective cost functions to identify best-performing model configurations. This approach seeks to identify the various trade-off between process- and scale-specific information content used in these “calibration scenarios”, and specifically the added value of isotopic information to better capture the origin and pathways of water simulated in plant, stream, and groundwater. First results show encouraging performances regarding channel dynamics, for both discharge and isotopic signature. Further calibration is ongoing to obtain a better representation of groundwater depth and relevant output fluxes in this region such as evapotranspiration.

Où, quand et comment les simulations issues de modèles hydrologiques conceptuels sont-elles biaisées ?

L. Strohmenger^a, G. Bruno^a, D. Duethmann^a

Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries, Berlin, 12587, Germany

Mots-clés: Hydrological modelling, climate change, bias

1 Introduction

Les modèles hydrologiques sont régulièrement mobilisés dans le cadre d'étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Ces modèles sont configurés et évalués sur la base de séries de débits observés dans l'objectif de reproduire au mieux le fonctionnement hydrologique d'un ou plusieurs bassins versants. Les modèles ainsi configurés sont ensuite utilisés pour simuler le débit des cours d'eau à partir de scénarios de changement climatique, avec l'hypothèse de la stationnarité des processus hydrologiques, et donc de la paramétrisation dans le temps.

Or, la performance des modèles hydrologiques dans un contexte de changement climatique est questionnée par de nombreuses études [1], [2], [3], [4], dont les causes ne sont pour l'heure pas clairement identifiées. Elles pourraient être en lien avec des évolutions d'occupation du sol, de végétation, d'activité anthropiques, ou des conditions climatiques [5]. Il paraît donc nécessaire d'étudier plus en détails où, quand, et comment les modèles hydrologiques produisent des simulations de débit biaisées.

Les objectifs de cette étude sont (1) d'évaluer la proportion et l'intensité des biais observés sur les débits simulés, (2) d'analyser les dynamiques temporelles la distribution spatiales des biais de simulation, et (3) d'identifier les conditions (climatiques, végétation, occupation du sol) susceptibles de mener à des simulations de débit biaisées.

2 Matériel et méthodes

Nous avons utilisé les données journalières de débit, précipitation, température et évapotranspiration (formulation de Penman–Monteith) pour simuler les débits d'un large échantillon de 875 bassins versant situés en France et en Allemagne (334 et 541 bassins versants, respectivement). Ces bassins versant ont été sélectionnés pour représenter une hydrologie naturelle (superficie < 1000 km²).

Deux modèles hydrologiques conceptuels (GR4J et HBV) ont été calés sur une période de 10 ans, entre 1982 et 1991, après un période d'initialisation d'une année, pour produire des séries de débits simulés jusqu'en 2016. Les biais relatifs ($\text{débit simulé} - \text{débit observé} / \text{débit observé}$) ont été calculés sur la base des débits annuels (année hydrologique de Novembre à Octobre), puis les bassins versant ont été classés selon les dynamiques temporelles des biais annuels affichés (augmentation/diminution faible, modérée, forte) par une classification ascendante hiérarchique. Enfin, les corrélations entre différents descripteurs statiques et indicateurs annuels (topographiques, climatiques, hydrologique, occupation du sol) ont été étudiées.

3 Résultats

Les résultats montrent que les débits simulés sur une période récente affichent des biais importants (40 % du débit annuel) pour 22 % des bassins versants (190/875). Les biais sont modérés (20 % du débit annuel) pour 54 % (476) des bassins versant. Des biais plus faibles (<10% du débit annuel) sont observés pour 23 % (209) bassins versant (Figure 1). Une surestimation plus importante des débits simulés est observées entre 1990 et 2005, tandis qu'une sous-estimation plus importante est observée après 2005 (Figure 1).

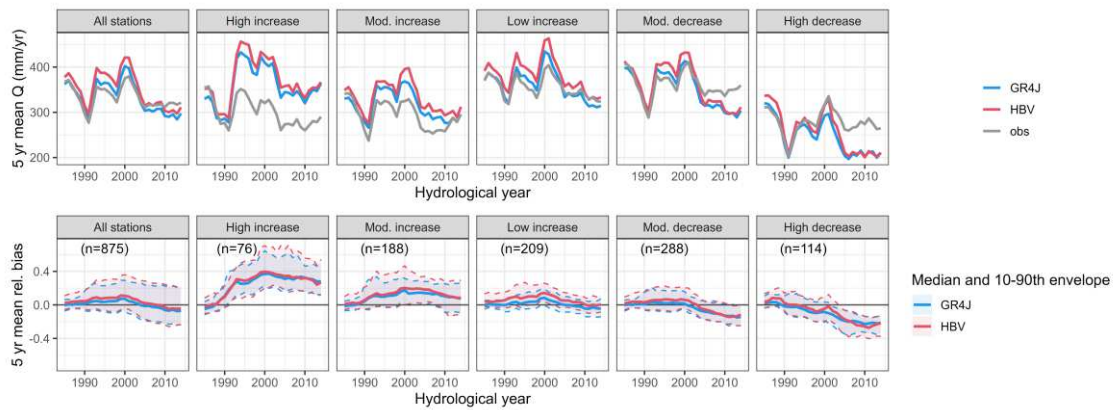


Figure 1 : évolution temporelle des débits et biais relatifs mesurés entre débits simulés (GR4J et HBV) et observés pour toutes les stations et pour chacune des catégories identifiées.

La distribution spatiale des biais relatifs montre que les bassins versants présentant une forte sous-estimation du débit sont principalement situés dans le sud de l'Allemagne, alors que les fortes surestimations de débits sont plus fréquemment observées dans le sud de la France et le nord-est de l'Allemagne. Les biais faibles sont plus fréquemment observés dans l'ouest et le sud-est de l'Allemagne (Figure 2).

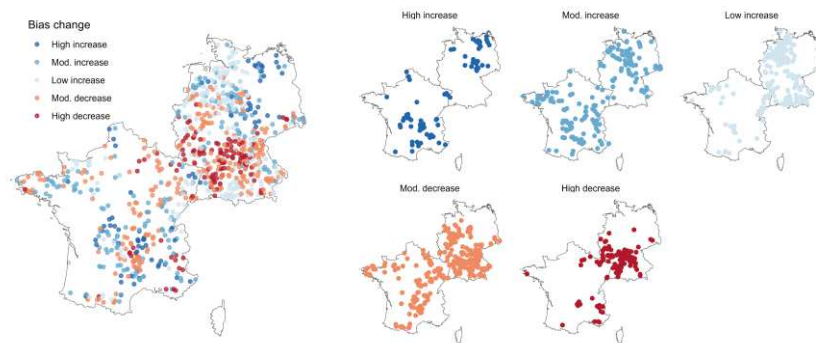


Figure 2 : Distribution spatiale des catégories de biais relatifs entre débits simulés et observés identifiés.

L'analyse des distributions de descripteurs statiques des bassins versant de permet pas d'identifier clairement les bassins versants susceptibles d'être affectés par un biais. On peut cependant relever que les bassins versants dont l'indice d'aridité est élevé, et les précipitations, débits annuels, et coefficient de ruissellement faibles sont plus souvent associés à des biais relatifs importants (sur- et sous-estimations).

Les corrélations entre indicateurs annuels et biais relatifs sont plus importantes pour les changements d'indicateurs climatiques (Précipitation totale, fréquence de pluie intense, durée de période avec ou sans précipitations), qu'avec les indicateurs d'occupation du sol (couvert forestier, agricole, urbain) ou d'activité de la végétation (durée, début et fin de saison de croissance, indice foliaire).

4 Conclusion

Cette étude attire l'attention sur les points de vigilance liés à l'utilisation de débits simulés dans un cadre prédictif, notamment dans un contexte de changement climatique. Il en ressort que des biais importants peuvent affecter les débits simulés, remettant en question la stationnarité des processus, et par conséquent des modèles hydrologiques. En effet, le fonctionnement hydrologique des bassins versants, probablement en réponse à des changements de régimes climatiques, n'est actuellement pas reproduite par les modèles, bien que nécessaire pour réduire l'incertitude des prévisions de la ressource en eau.

5 Références

- [1] D. Duethmann, G. Blöschl, and J. Parajka, 'Why does a conceptual hydrological model fail to correctly predict discharge changes in response to climate change?', *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 24, no. 7, pp. 3493–3511, 2020.
- [2] R. Merz, J. Parajka, and G. Blöschl, 'Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses', *Water Resour. Res.*, vol. 47, no. 2, 2011.
- [3] G. Thirel, V. Andréassian, and C. Perrin, 'On the need to test hydrological models under changing conditions', *Hydrol. Sci. J.*, vol. 60, no. 7–8, pp. 1165–1173, 2015.
- [4] J. Vaze, D. Post, F. Chiew, J.-M. Perraud, N. Viney, and J. Teng, 'Climate non-stationarity—validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies', *J. Hydrol.*, vol. 394, no. 3–4, pp. 447–457, 2010.
- [5] C. M. Stephens, U. Lall, F. Johnson, and L. A. Marshall, 'Landscape changes and their hydrologic effects: Interactions and feedbacks across scales', *Earth-Sci. Rev.*, vol. 212, p. 103466, 2021.

Integrated hydrological modeling of an Agro-forestry system in Senegal using ParFlow-CLM

J-M. Cohard^a, E. Bermudez^a, L. Rapp-Henri^a, O. Roupsard^b

^a*Institut des geosciences et Environnement, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, INRAE – 38000 Grenoble*

^b*Eco et Sol, CIRAD, Dakar*

Mots-clés: integrated hydrological modeling, Sahel, nature based solution, adaptation

1 Abstract

In the Sahel, agroforestry practices are a well shared adaptation solution to deal with high temperature and water scarcity. It consists of protecting cereal or peanut crops by dispersed trees, specifically *Faidherbia albida* which lose their leaves during the crop growth period. The trees shade the crops, and uplift water from deep water resources which benefit to the understory. This contribution is a first step towards a hydrological modelling of a agroforestry system located in Senegal by using Parflow-CLM at 10m resolution. Individual tree has been distributed with a regular distribution along a 500 m transect. Local observations from the AMMA-CATCH observatory Niakhar's site allow to parameterize the underground and the vegetation, to force the model with a 5-years climate time series and evaluate the model outputs, specifically evapotranspiration and soil moisture dynamic. A specific attention has been carried on the root distribution also thanks to in-situ data. The results show a good behavior of the model for both soil moisture and evapotranspiration. Domain average evapotranspiration model output compare well with eddy-covariance data at 20m. A sensitivity analysis shows that one tree every 30m give the best model performance. These results need to be consolidated to better represent the water table dynamic that has been forced in the presented work.



Niakhar site in Senegal.

Modélisation des transferts d'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère : application au bassin versant du Strengbach

M. De Leest^a, S. Weill^a, D. Bonal^b, O. Corvia^a, P. Ackerer^a, N. Lesparre^a, M. Cuntz^b, B. Belfort^a

^a Université de Strasbourg, CNRS, ENGEEES, Institut Terre et Environnement de Strasbourg, UMR 7063, 5 rue René Descartes, Strasbourg F-67084, France

^b Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, Nancy, France

Mots-clés: continuum sol – plante – atmosphère ; flux de sève ; modélisation mécaniste ; bassin versant du Strengbach

Introduction

La zone critique (ZC), fine pellicule la plus externe de notre planète, est le lieu des interactions entre l'atmosphère, l'hydrosphère, le couvert nival, les sols, les roches et les écosystèmes. Il est reconnu qu'elle est largement affectée par le changement climatique et les questions liées à la gestion des ressources en eau intéressent et concernent désormais tout le monde : les utilisateurs, les gestionnaires, les décideurs politiques et les scientifiques (?). Pour comprendre l'impact du changement climatique sur les ressources en eau, il est important de comprendre, de décrire afin de modéliser les phénomènes associés au fonctionnement de la ZC. Une manifestation notable du changement climatique en zone tempérée est l'augmentation de la récurrence et de l'amplitude des sécheresses au cours des dix dernières années. Elles se caractérisent par une augmentation de la température et une évolution du régime des précipitations [1], entraînant une diminution de la disponibilité en eau des sols et une perturbation du fonctionnement des écosystèmes [2].

Environ 25 à 40 % des précipitations tombant sur les continents sont transpirées par la végétation, ce qui fait de la transpiration des écosystèmes un flux dominant du cycle de l'eau terrestre. Cependant, la mesure de la transpiration au niveau de l'écosystème est particulièrement délicate. L'utilisation de modèles pour estimer l'évapotranspiration est très répandue, avec la formule de Penman-Montheith par exemple, mais l'évapotranspiration réelle, liée aux conditions météorologiques, aux ressources disponibles et à la régulation stomatique, est assez complexe à modéliser en raison des interactions entre les différents compartiments concernés. De plus, ces approches de modélisation sont souvent difficiles à calibrer en raison du manque de données.

La présente étude vise tout d'abord à décrire le dispositif expérimental et les données acquises sur le bassin versant du Strengbach afin de mieux caractériser et comprendre la réponse de la végétation. Un second objectif consiste à paramétrer le modèle mécaniste SoVegI (Soil Vegetation Interaction model) pour simuler les transferts hydriques au sein du continuum sol-plante-atmosphère.

Matériel et méthodes

Le site expérimental du Strengbach

Le bassin versant du Strengbach est un observatoire forestier de moyenne montagne suivi depuis 1986 pour caractériser la quantité et la chimie de l'eau provenant des précipitations, des eaux de ruissellement, des solutions de sol, de l'écoulement du cours d'eau principal et des sources (<https://ohge.unistra.fr>) [3]. Si la question du dépérissement des forêts et de son lien possible avec les pluies acides a motivé les premières observations, la vulnérabilité des forêts due au changement climatique est devenue une préoccupation majeure, partagée à l'échelle internationale [2].

En 2022 et 2023, deux campagnes de flux de sève (FS) ont été réalisées sur ce site pour évaluer la transpiration des arbres constituant 90% du couvert (dont 20% de feuillus – hêtres – et 80% d'épicéas) ; 4 parcelles ont été équipées (cf. figure 1) selon la méthode de dissipation thermique d'A. Granier [4] (cf. figure 2). En parallèle, le compartiment sol fait l'objet d'un suivi du potentiel matriciel, de l'humidité et de la température en plusieurs profondeurs sur 2 des parcelles, l'une d'épicéas et l'autre de hêtres. Les données météorologiques standards (précipitations, vitesse du vent, rayonnement global, humidité et température) sont également disponibles.



Figure 1 : localisation des parcelles suivies par FS (source :Geoportail) (bulles oranges = épicéas ; rouge = hêtres ; bleu = parcelle mixte)



Figure 2 : capteurs de flux de sève de sève

Le modèle SoVegI

SoVegI représente les transferts hydriques dans le sol, le système hydraulique de l'arbre et la canopée. Le sol et l'arbre sont décrits comme des milieux poreux variablement saturés et modélisés avec l'équation de Richards en s'appuyant sur les relations fonctionnelles de Mualem-van Genuchten pour décrire les relations entre conductivité, teneur en eau et pression hydrique dans le sol, tandis qu'au sein de l'arbre des relations hydrodynamiques spécifiques aux plantes (courbes de perte de conductivité) sont adoptées. Les échanges d'eau entre le sol et le système racinaire sont fonction de la différence de pression entre ces deux compartiments. Un modèle de transfert radiatif distinguant les parties ensoleillées et ombragées de la canopée permet de représenter simplement l'absorption de la lumière par la végétation. Un modèle couplé de bilan d'énergie, d'assimilation photosynthétique et de conductance stomatique permet de déterminer les différents flux énergétiques échangés avec l'atmosphère. A partir de données météorologiques et des paramètres liés à la physique des sols et à la physiologie de la plante, SoVegI est donc capable de simuler les flux d'eau et d'énergie dans le continuum.

Résultats

Les résultats expérimentaux obtenus démontrent, notamment pour l'année 2022, une régulation stomatique significative pendant les conditions de sécheresse caractérisée par une diminution importante de la réserve utile en eau du sol (cf. figure 3). La communication proposée montrera comment le modèle SoVegI parvient à simuler les flux d'eau dans le continuum sol – plante - atmosphère.

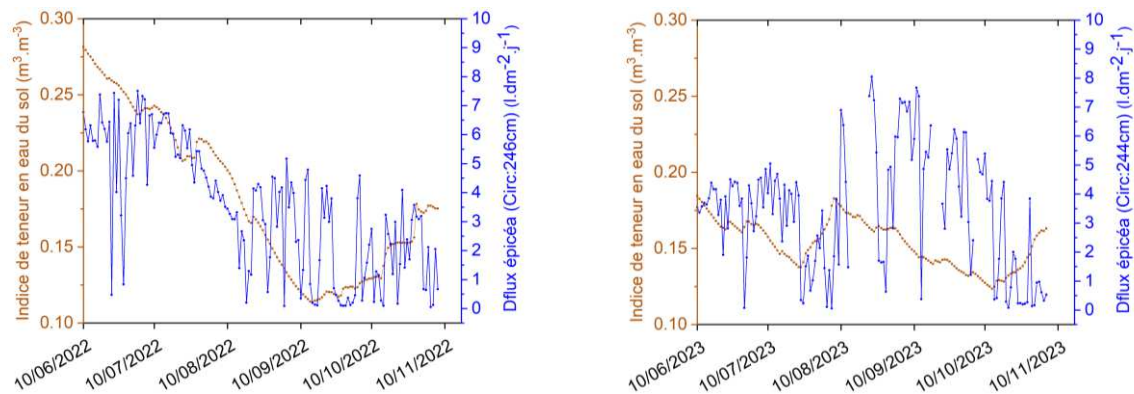


Figure 3 : évolution des densités de flux de sève d'un d'épicéa et de l'indice de teneur en eau du sol [5] en 2022 et 2023

Références

- [1] Strohmenger, L., Ackerer, P., Belfort, B., & Pierret, M. C. (2022). Local and seasonal climate change and its influence on the hydrological cycle in a mountainous forested catchment. *Journal of Hydrology*, 610, 127914.
- [2] Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., ... & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management*, 259(4), 660-684.
- [3] Pierret, M. C., Cotel, S., Ackerer, P., Beaulieu, E., Benarioumlil, S., Boucher, M., ... & Probst, A. (2018). The Strengbach catchment: A multidisciplinary environmental sentry for 30 years. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-17.
- [4] Granier, A., Biron, P., Bréda, N., Pontailleur, J. Y., & Saugier, B. (1996). Transpiration of trees and forest stands: Short and long - term monitoring using sapflow methods. *Global Change Biology*, 2(3), 265-274.
- [5] Bonal, D., Bosc, A., Ponton, S., GORET, J. Y., Burban, B., Gross, P., ... & Granier, A. (2008). Impact of severe dry season on net ecosystem exchange in the Neotropical rainforest of French Guiana. *Global Change Biology*, 14(8), 1917-1933.

Modélisation éco-hydrologique en zones arides : Étude de l'impact de la densité racinaire sur le cycle de l'eau dans la région sahélienne

Lucie RAPP-HENRY¹, Jean-Martial COHARD², Mahamadi TABSOBA³, Basile HECTOR², Jérôme DEMARTY⁴, Laura CONDON⁵

1. Institut des Géosciences de l'environnement, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble

2. Institut des Géosciences de l'environnement, Univ. Grenoble Alpes, IRD, Grenoble

3. Univ. d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (INE), Cotonou, Benin

4. HydroSciences Montpellier, Montpellier

5. University of Arizona, Arizona, Etats-Unis

Densité racinaire, Parflow-CLM, zones arides, Sahel, Niger, interaction sol-plante

Entre 1970 et 1990, d'intenses sécheresses ont dégradé les sols et la végétation de la région sahélienne. Malgré une reprise des précipitations, les sols ont perdu en capacité d'infiltration, augmentant la désertification et la fréquence des crues dévastatrices. Pour lutter contre ce phénomène, des stratégies agricoles ont été coordonnées comme la mise en place de banquettes ou de demi-lunes pour retenir l'eau ruisselée, favoriser l'infiltration, l'installation de végétaux et leur croissance. Ces pratiques nécessitent encore une évaluation critique et une optimisation.

Pour étudier ces pratiques agro-écologiques, on simule les interactions entre l'hydrologie de surface et la végétation grâce au modèle couplé ParFlow-CLM. Les premières simulations des sols sahéliens encroûtés, nous ont amenés à proposer une nouvelle paramétrisation de la distribution racinaire pour limiter la ponction racinaire dans les premiers centimètres de sol et mieux représenter les observations en terme de distribution racinaire et de la dynamique de l'évapotranspiration à l'échelle événementielle et saisonnière. En accord avec la littérature, la nouvelle fonction permet d'adapter la profondeur du maximum de racines et la concentration des racines autour de ce maximum.

Dans cette étude, on compare l'impact de la fonction de densité racinaire initiale et de la fonction proposée sur un cas d'étude Sahélien au Niger documenté par l'observatoire AMMA-CATCH. Une étude de sensibilité aux paramètres de cette fonction permet d'identifier les jeux de paramètre qui reproduisent la dynamique de l'ETR, en particulier pendant la période de senescence. Les distributions racinaires présentant un maximum de racine à 10 cm de profondeur, avec un exposant à 0.6 sont celles qui obtiennent les meilleures scores. La paramétrisation proposée permet ainsi plus de liberté pour adapter la végétation au profondeur où l'eau est disponible et éventuellement pendant les différentes phases de croissance de la plante.

Cette modification permet finalement de trouver une paramétrisation pour laquelle on a une meilleure représentation de la transpiration, de l'évapotranspiration globale et des humidités dans le sol, et donc une meilleure représentation de l'écosystème étudié. Un LAI dynamique viendra par la suite compléter cette modification du schéma de végétation. On introduira ensuite les aménagements agricoles et on pourra étudier l'impact de leur dimensionnement.

Modélisation des Sphaignes dans ISBA

R.Garisoain^{a,b}, L.Gandois^b, C.Delire^a, B.Decharme^a

^aCentre de recherche sur la biodiversité et l'environnement - 118 route de Narbonne
31062 Toulouse.

^bCentre national de recherche météorologique, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057
Toulouse.

Mots-clés: Modélisation, Cycle du carbone, Sphaignes, Tourbière, Sécheresse.

Peu de modèles de surfaces continentales se sont attachés à décrire de manière précise le fonctionnement de la végétation des tourbières et notamment des sphaignes (où les plantes non vasculaires) à la fois du point de vue de la biophysique et de la biogéochimie. La physique du sol reçoit souvent davantage d'attention que les processus biophysiques liés à la végétation (photosynthèse, respiration, biomasse foliaire, évapotranspiration). Dans de nombreux modèles, les sphaignes sont d'ailleurs assimilées à des herbacées de type C3 ajustées et paramétrisées à la marge au détriment du développement de nouveaux PFT. Or l'intégration de ces développements dans les modèles de système terre (ESM) permet une meilleure compréhension des interactions entre les tourbières, le climat et le cycle du carbone à l'échelle globale [1]. Malgré ces avancées, la modélisation précise des sphaignes reste un défi, nécessitant des ajustements continus et une validation rigoureuse avec des données de terrain [2].

Nous présentons aujourd'hui l'implémentation d'un nouveau PFT « sphaigne » dans ISBA. Les processus spécifiques aux sphaignes ont été introduits dans le modèle, tels que la dépendance de la photosynthèse et de l'évaporation au contenu en eau des sphaignes [3,4]. La validation a été effectuée en comparant les résultats du modèle avec des observations de terrain, notamment en ce qui concerne les flux de photosynthèse, de respiration de l'écosystème, le LAI et la hauteur de nappe d'eau. Les résultats obtenus ont montré une corrélation satisfaisante entre les simulations du modèle et les observations de terrain, bien que des différences aient été observées, notamment lors de périodes de sécheresse. Enfin cette étude explore l'application du modèle sur la tourbière de Bernadouze, en utilisant des données météorologiques issues de la réanalyse S2M afin de simuler le bilan de carbone de la tourbière sur une période de 64 ans (1959-2022). L'analyse des tendances à long terme a permis de mettre en évidence des changements dans la dynamique d'accumulation de carbone sur la tourbière de Bernadouze au cours des dernières décennies, notamment en réponse aux variations climatiques et aux épisodes de sécheresse.

En conclusion, l'implémentation du nouveau PFT sphaignes dans le modèle ISBA représente une avancée dans la modélisation des écosystèmes de tourbières, offrant une meilleure compréhension de leur fonctionnement et de leur réponse aux changements environnementaux.

Références

- [1] Chaudhary N, Westermann S, Lamba S, Shurpali N, Sannel ABK, Schurgers G, Miller PA, Smith B (2020) Modelling past and future peatland carbon dynamics across the pan-Arctic. *Global Change Biology* 26(7) :4119-4133, DOI 10.1111/gcb.1509
- [2] Shi X, Ricciuto DM, Thornton PE, Xu X, Yuan F, Norby RJ, Walker AP, Warren JM, Mao J, Hanson PJ, Meng L, Weston D, Griffiths NA (2021) Extending a land-surface model with Sphagnum moss to simulate responses of a northern temperate bog to whole ecosystem warming and elevated CO₂. *Biogeosciences* 18(2) :467-486, DOI 10.5194/bg-18-467-202
- [3] Williams TG, Flanagan LB (1998) Measuring and modelling environmental influences on photosynthetic gas exchange in Sphagnum and Pleurozium. *Plant, Cell & Environment* 21(6) :555-564, DOI 10.1046/j.1365-3040.1998.00292.x
- [4] Gong J, Roulet N, Frohling S, Peltola H, Laine AM, Kokkonen N, Tuittila ES (2020) Modelling the habitat preference of two key Sphagnum species in a poor fen as controlled by capitulum water content. *Biogeosciences* 17(22) :5693-5719, DOI 10.5194/bg-17-5693-202

Modélisation d'un agro-écosystème phréatophyte sahélien à phénologie inversée dans ORCHIDEE

E. Gaglo^{a,b}, A. Valade Aude^f, E. Chaste^f, S. Luyssaert^h, F. Do^{b,g}, G. Le Maire^f, S. Sow^{b,c,d}, M. Diedhiou^{a,d}, D. Diongue^{a,i}, Y. Agbohessou^{a,b}, C. Jourdan^f, N. Vandewalle^e, D. Ngom^a, O. Roupsard^{b,e,f}

^aUniversité Cheikh Anta DIOP, Dakar, Senegal

^bLMI IESOL, IRD, ISRA, Bel Air, Dakar, Senegal

^cUniversité Gaston Berger, Saint-Louis, Senegal

^dCentre National de Recherches Forestières, ISRA, Dakar, Senegal

^eCIRAD, UMR Eco&Sols, Dakar, Senegal

^fEco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, IRD, Montpellier, France

^gIRD, UMR Eco & Sols, U. Montpellier, IRD, CIRAD, INRAE, Montpellier, France

^hA-LIFE, Vrije Universiteit Amsterdam, Amsterdam, Netherlands

ⁱFaculty of Bioscience Engineering, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium

^jInstitute for Water Research, Rhodes University, South Africa

Mots-clés : Sahel, système agroforestier, *Faidherbia albida*, ORCHIDEE

1 Introduction

Le Sahel est une région semi-aride caractérisée par des systèmes agroforestiers comprenant des arbres et des arbustes sans fermeture de la canopée, ainsi que par des cultures et des herbacées dont le fonctionnement dépend fortement des précipitations. Considérées comme un point chaud du couplage terre-atmosphère [1], [2], [3], les régions du Sahel jouent un rôle majeur dans la variabilité du cycle du carbone mondial, et la compréhension de leur fonctionnement est cruciale dans un monde de plus en plus aride où les zones semi-arides deviendront plus prévalentes [4]. Malgré cette importance pour la modélisation climatique mondiale, les modèles de surface terrestre (LSM) peinent à rendre compte de la dynamique du carbone dans les zones arides [5], [6], [7], [8].

Cette faible performance des LSMs pour les écosystèmes à canopée ouverte du Sahel est principalement due à la complexité de ces écosystèmes, particulièrement dans les systèmes agroforestiers phréatophytes tels que *Faidherbia albida* (FA). Ces arbres sont connus pour développer leur feuillage pendant la saison sèche plutôt que pendant la saison des pluies, ce qui les rend bénéfiques pour les populations. Cette phénologie inversée est hypothétisée comme une réponse à la dynamique de la nappe phréatique observée environ 5 mois après le début de la saison des pluies. Dans cette étude, l'impact de l'absence de représentation des arbres phréatophytes dans le LSM ORCHIDEE sur le cycle du carbone simulé a été évaluée, et une configuration spécifique a été développée pour reproduire les flux de carbone, d'eau et d'énergie dans les parcs de FA.

2 Matériel et méthodes

Nous avons d'abord comparé les simulations à haute résolution de la productivité primaire brute (GPP) de la version standard du LSM ORCHIDEE exécutée dans le cadre du projet ESA-HiResLCC¹, avec les mesures de site de tour de flux au Sénégal (*Faidherbia flux*²), tout en évaluant l'amplitude et la synchronisation des variations de flux de carbone. Ensuite, une configuration du modèle a été développée en utilisant 3 années de données de calibration (2018-2020), en : (i) forçant la teneur en humidité du sol des couches profondes entre 4m et 7m pour correspondre à la dynamique observée de la nappe phréatique, (ii) spécifiant la profondeur des racines des arbres et la localisation des couches d'où l'absorption d'eau des racines des arbres est effectuée (à partir de 4 m), (iii) calibrant l'allométrie des arbres en utilisant les dimensions des arbres observées, (iv) modifiant les fonctions de déclenchement de la phénologie des cultures et des arbres, (v) calibrant l'efficacité photosynthétique des arbres en utilisant les paramètres photosynthétiques observés V_{max} et J_{max} à 25°C. Le modèle calibré résultant a été évalué sur 2 années d'observations de mesure de flux d'eau, d'énergie et de carbone (2021-2022).

L'analyse des simulations à haute résolution du modèle standard a montré une sous-estimation significative de la GPP de l'écosystème pendant la saison sèche en 2018. La synchronisation de la phénologie des arbres dans le modèle avec l'occurrence des précipitations était confirmée, étant donné que la phénologie des arbres dans le modèle est principalement influencée par les précipitations. Pendant la saison sèche, la GPP

¹ <https://climate.esa.int/en/projects/high-resolution-land-cover/>

² "Faidherbia-flux": <https://lped.info/wikiObsSN/?Faidherbia-Flux>

simulée était de 0,53 tC ha⁻¹ an⁻¹, soit un écart de 91% par rapport aux observations de 5,8 tC ha⁻¹ an⁻¹. En revanche, pendant la saison des pluies et la croissance des cultures, la GPP simulée a été de 8,07 tC ha⁻¹ an⁻¹, comparativement à 7 tC ha⁻¹ an⁻¹ pour les mesures.

La version modifiée du modèle ORCHIDEE intégrant les arbres phréatophytes a pu reproduire la synchronisation et l'amplitude de la phénologie des arbres, confirmé par la série temporelle de l'indice de surface foliaire des arbres sur 3 ans (RMSE_{laître} = 0,07, RMSE_{laicrop} = 0,1). Le modèle a estimé le diamètre et la hauteur des arbres à 0,25 m et 8,97 m, respectivement. Ces résultats correspondent favorablement aux mesures effectuées sur 12 arbres entourant le site, dont les diamètres variaient entre 0,35 m et 7 m et les hauteurs entre 8,6 m et 13,85 m. De plus, la biomasse aérienne simulée était de 0,087 tC de matière sèche, légèrement supérieure au 0,082 tC de matière sèche mesurée. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) de la GPP pendant la saison sèche était de 1,3 gC. m⁻².j⁻¹, alors qu'elle atteignait 3,28 gC. m⁻².j⁻¹ pendant la saison des pluies, sur la période 2018-2020.

Ces résultats démontrent la nécessité d'inclure la dynamique des eaux souterraines pour mieux représenter la dynamique de la végétation des écosystèmes semi-arides. Les résultats de cette étude peuvent servir de base pour entreprendre des développements spécifiques aux processus des agrosystèmes sahéliens dans ORCHIDEE afin de mieux prédire la vulnérabilité des zones sèches du Sahel face au changement climatique et l'avenir des écosystèmes dans les zones arides en expansion.

Références

- [1] R. Yuan, F. Li, and R. Ye, "Global diagnosis of land-atmosphere coupling based on water isotopes," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 21319, Dec. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48694-1.
- [2] A. M. Mwanthi *et al.*, "Representation of land-atmosphere coupling processes over Africa in coupled model intercomparison project Phase 6," *Clim. Dyn.*, Mar. 2023, doi: 10.1007/s00382-023-06710-0.
- [3] P. M. M. Soares, J. A. M. Careto, R. M. Cardoso, K. Goergen, and R. M. Trigo, "Land-Atmosphere Coupling Regimes in a Future Climate in Africa: From Model Evaluation to Projections Based on CORDEX-Africa," *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 124, no. 21, pp. 11118–11142, 2019, doi: 10.1029/2018JD029473.
- [4] J. Huang, M. Ji, Y. Xie, S. Wang, Y. He, and J. Ran, "Global semi-arid climate change over last 60 years," *Clim. Dyn.*, vol. 46, no. 3, pp. 1131–1150, Feb. 2016, doi: 10.1007/s00382-015-2636-8.
- [5] D. Fawcett *et al.*, "Assessing Model Predictions of Carbon Dynamics in Global Drylands," *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.790200>.
- [6] N. MacBean *et al.*, "Dynamic global vegetation models underestimate net CO2 flux mean and inter-annual variability in dryland ecosystems," *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 9, p. 094023, Aug. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/ac1a38.
- [7] S. Piao *et al.*, "Socioeconomic and Environmental Changes in Global Drylands," in *Dryland Social-Ecological Systems in Changing Environments*, B. Fu and M. Stafford-Smith, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 161–201. doi: 10.1007/978-981-99-9375-8_6.
- [8] L. Teckentrup *et al.*, "Assessing the representation of the Australian carbon cycle in global vegetation models," *Biogeosciences*, vol. 18, no. 20, pp. 5639–5668, Oct. 2021, doi: 10.5194/bg-18-5639-2021.

Exploration de l'impact du drainage agricole en fonction des propriétés de l'aquifère à l'aide du modèle hydrologique large-échelle CWatM

A. Coche^a, L. Guillaumot^b, L. Longuevergne^a, J-R. De Dreuzya^a, L. Aquilina^a

^aUniv Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France

^bWater, Environment, Processes and Analyses Division, BRGM – French Geological Survey, Orléans, France

Mots-clés: drainage agricole, nappe phréatique, débit d'étiage, modélisation

1 Introduction

Le drainage de parcelles cultivées, qui consiste à créer des conditions d'écoulement préférentiel afin d'assécher le sol et d'abaisser le toit de la nappe phréatique, a été utilisé dans de nombreuses régions du monde. En France, sous l'effet du développement de l'agriculture productiviste à partir des années 1950, la pratique du drainage agricole s'est généralisée, avec un pic de déploiement autour de 1985 [1]. Ce drainage moderne prend la forme d'un réseau de drains perforés enterrés dans le sol et connecté *in fine*, via des conduits (collecteurs) et des fossés, aux cours d'eau. Principalement destiné à des sols présentant un défaut d'infiltration, ce drainage a parfois été appliqué de manière indifférenciée. Dans le bassin rennais, la part de SAU drainée peut atteindre 45% et dépasse couramment 10% [2].

L'impact du drainage sur la régression des zones humides est étudié de longue date [3], de même que l'impact immédiat et local du drainage agricole sur les débits de crue des rivières [4, 5]. En particulier, l'articulation de deux processus antagonistes (i. l'accélération de l'écoulement dans le sol par les drains ; ii. la diminution du ruissellement de surface par la désaturation du sol) a engendré une littérature relativement riche et approfondie [4, 6]. Ces travaux rappellent que les effets du drainage dépendent étroitement de la conductivité du sol. En comparaison, l'impact à long terme et à l'échelle du bassin versant du drainage sur le niveau de la nappe phréatique, qui peut ensuite se répercuter sur le débit d'étiage, a été relativement peu étudié, en particulier d'un point de vue quantitatif. Pourtant, dans un contexte de pression accrue sur la ressource en eau en été du fait du réchauffement climatique, la question de savoir à quel point le drainage altère le rôle de la nappe phréatique est légitime. Tandis que la neutralisation de certains drains est déjà mise en place par exemple dans des projets de restauration de zones humides, la question des éventuels bénéfices ou co-bénéfices du drainage sur le cycle de l'eau est soulevée aujourd'hui par Eau du Bassin Rennais et Rennes Métropole.

2 Matériel et méthodes

2.1 Modèle

Pour étudier l'impact du drainage agricole sur la nappe phréatique et ses répercussions sur l'ensemble du cycle de l'eau, le modèle large-échelle de la ressource en eau CWatM a été utilisé [7]. Ce modèle intègre l'ensemble des processus généraux environnementaux et anthropiques affectant l'hydrologie de surface et l'hydrologie souterraine, permettant ainsi de modéliser la dynamique spatio-temporelle de nombreuses variables comme le niveau de la nappe, le débit des rivières, l'infiltration, la recharge, le ruissellement, l'humidité du sol ou encore le stress hydrique. Par ailleurs, CWatM est un modèle couplant processus de surface et processus souterrains et qui nécessite comme seuls flux d'entrée les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, les autres flux étant calculés par le modèle (évapotranspiration réelle, ruissellement de surface, infiltration dans le sol, recharge de la nappe, remontées de nappe, échanges rivières-nappe, etc.), ce qui nous a permis d'explorer les potentielles rétroactions entre les flux drainés et les autres flux hydrologiques.

2.2 Système modélisé et exploration des paramètres physiques du milieu souterrain

Afin d'appréhender de manière généraliste l'impact du drainage agricole sur la nappe, une exploration des principaux paramètres hydrologiques de l'aquifère a été réalisée, en considérant des épaisseurs de 5 m à 50 m, des porosités efficaces de 0.1 % à 10 %, et des conductivités hydrauliques de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s à $1.1 \cdot 10^{-4}$ m.

Les autres paramètres du système, comme les paramètres climatiques, géographiques ou pédologiques, ont été basés sur la tête du bassin-versant du Meu jusqu'à Pont-Perrin, utilisé ici comme système de référence.

2.3 Implémentation du drainage

Le processus de drainage agricole n'étant pas implémenté nativement dans CWatM, nous avons développé une manière explicite de le représenter en adaptant deux processus existants. Le processus du débit de base (alimentation des cours d'eau par la nappe) a été utilisé pour représenter le drainage des remontées de nappe (drainage « ascendant »), tandis que le processus de percolation latérale à travers le sol (alimentation des cours d'eau par le sol) a été utilisé pour représenter le drainage des précipitations s'infiltrant dans le sol (drainage « descendant »). Ces deux processus opèrent dans CWatM au niveau de l'interface sol-aquifère, qui se situe en moyenne à 1 m de profondeur sur le territoire pris comme référence (bassin rennais), dans le même ordre de grandeur que la profondeur habituelle des drains [1]. Il a par ailleurs été considéré que la moitié des flux ascendants et descendants était soumise au drainage, et que le drainage était appliqué sur l'ensemble du bassin versant. Cette implémentation simplifiée ne permet pas l'étude fine du drainage à l'échelle locale mais est suffisante pour comparer la modulation de l'impact du drainage par les propriétés de l'aquifère à l'échelle du bassin versant.

3 Résultats

L'exploration systématique a permis de quantifier la façon dont l'impact du drainage sur la nappe et le cycle de l'eau était modulé par les propriétés de l'aquifère, en termes d'amplitude, de temporalité et d'expression des processus à l'œuvre. La comparaison des simulations avec drainage et sans drainage montre que l'impact du drainage sur le débit estival peut être positif ou négatif en fonction des propriétés de l'aquifère, en premier lieu la transmissivité (Fig. 1). Cet effet est d'autant plus visible lorsqu'on regarde l'impact relatif du drainage (impact du drainage sur le débit estival exprimé en % du débit sans drainage). Plus généralement, l'impact absolu du drainage peut être non-monotone et peut varier d'un facteur 5 en fonction des propriétés de l'aquifère. Un parallèle est proposé entre les rôles du sol et de l'aquifère dans l'impact du drainage.

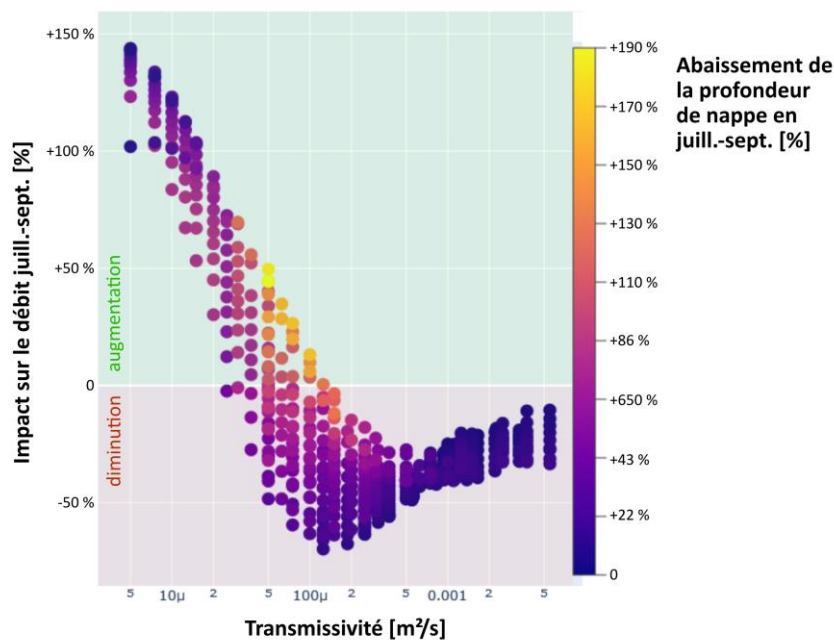


Fig. 1 : Impact relatif du drainage sur le débit estival (juillet-septembre) et sur le niveau de nappe.

Références

- [1] Vincent, B. 2020. Principes techniques et chiffres du drainage agricole. De la tuyautique à l'hydro-diplomatie, *Sciences Eaux & Territoires*, 32, 8-15 [https://doi.org/10.3917/set.032.0008]
- [2] AGRESTE. 2010. Agricultural Census. Ministry of Agriculture, Food and Forestry, France.
- [3] Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., & Vondracek, B. 2009. Effects of Agricultural Drainage on Aquatic Ecosystems: A Review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(11), 909–1001 [https://doi.org/10.1080/10643380801977966]
- [4] Whiteley, H. R. 1979. Hydrologic implications of land drainage, *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 4(2), 12–19 [https://doi.org/10.4296/cwrj0402012]
- [5] Robinson M. 1990. *Impacts of improved land drainage on river flows*, 223 p. Institute of Hydrology, Grande Bretagne.
- [6] Sloan B. P., Basu N. B., Mantilla R. 2016. Hydrologic impacts of subsurface drainage at the field scale: Climate, landscape and anthropogenic controls, *Agricultural Water Management*, 165, 1-10 [https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.008]
- [7] Burek, P., Satoh, Y., Kahil, T., Tang, T., Greve, P., Smilovic, M., Guillaumot L., Zhao F. & Wada, Y. 2020. Development of the Community Water Model (CWatM v1. 04) - a high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3267–3298 [https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020]

Couplage surface-atmosphère : Cas d'étude 1D pour son évaluation dans CNRM-CM6-1

E. Bernard^a, R. Roehrig^a, B. Decharme^a, F. Couvreux^a, F. Lohou^b, M. Lothon^b

^aCentre National de Recherches Météorologiques, Toulouse

^bLaboratoire d'aérodynamique, Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse

Mots-clés: couplage surface-atmosphère, modèle unicolonne, simulations LES, configuration CNRM-CM6-1

1 Introduction

La surface terrestre, par sa topographie, sa couverture végétale (végétation haute ou basse, sol nu) et ses caractéristiques météorologiques ou d'usage (humidité du sol, température), a un impact sur l'atmosphère à des échelles de temps très variées [1] : cycle diurne de la convection et des nuages, circulations à méso-échelle ou ondes planétaires. Les processus de la surface terrestre ont également une influence sur l'occurrence ou l'intensité des événements extrêmes (par exemple, les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations). Une représentation précise des échanges entre la surface et l'atmosphère est donc essentielle dans les modèles globaux [2], que ce soit pour les applications météorologiques ou climatiques. Si les paramétrisations des processus atmosphériques et des surfaces continentales ont longtemps été développées de manière indépendante, elles sont plus fréquemment menées de façon couplée dans des configurations unicolonnes qui facilitent l'analyse des processus et la comparaison aux observations. Cela a émergé du besoin d'intégrer les rétroactions entre surface et atmosphère pour améliorer la compréhension des processus et les performances des modèles.

Toutefois, il y a peu de cas d'étude proposés pour ce type d'analyse, qui plus est à l'échelle journalière, étant donné que de nombreuses études couplées sont réalisées à l'échelle saisonnière ou annuelle. C'est l'objectif des présents travaux que de palier ce manque.

2 Matériel et méthodes

Partant de la campagne BLLAST de juin 2011, des travaux de modélisation réalisés à la suite de la campagne [3] et des observations collectées sur plusieurs sites dans la région de Lannemezan [4], nous développons quatre configurations de modèle unicolonne couplant surface et atmosphère pour la journée de ciel clair du 20 juin 2011.

Le cadre de modélisation (conditions physiographiques, initialisation, forçage) sera donc décrit et appliqué à la version unicolonne du modèle CNRM-CM6-1 couplant la composante atmosphérique ARPEGE-Climat [5] au module de surface SURFEX [6]. Chaque configuration diffère des autres par le type de couvert, supposé à ce stade homogène spatialement : une prairie, un champ de blé, un champ de maïs et une forêt de pins. Du fait de la non-fermeture du bilan de surface dans les observations, cette comparaison exige l'utilisation d'une correction. Le choix s'est porté sur une méthode préservant le rapport de Bowen mesuré [8].

Ce cadre de modélisation est aussi appliqué au modèle Méso-NH [7] en configuration LES, couplé à SURFEX. Les simulations obtenues fournissent une référence cohérente pour l'évaluation de la couche limite dans CNRM-CM6-1, en particulier de sa sensibilité aux propriétés de surface.

3 Résultats

Les résultats des simulations à la fois 1D et LES sont comparés aux observations BLLAST, notamment en termes de représentation des flux turbulents à la surface (Figure 1). Nous pouvons constater que les flux de surface sont très bien représentés par le modèle ARPEGE 1D, tout comme le modèle Méso-NH 3D sur le couvert prairie illustré ici. Cette comparaison ainsi que celle des autres couverts confirme la bonne représentativité des configurations développées pour la création des quatre cas d'étude.

Le couplage surface-atmosphère est ensuite évalué en comparant l'état de l'atmosphère des configurations unicolonnes à celui modélisé en LES. Les résultats de simulation indiquent que le couplage surface-atmosphère actuel est tout à fait cohérent, avec des hauteurs de couche limite ainsi que des valeurs des variables de couche de mélange (température, humidité, vitesse de vent) très proches de la référence.

Ajouté à cela, une comparaison inter-couverts permet d'identifier les propriétés de la surface ayant un impact majeur sur le couplage surface-atmosphère.

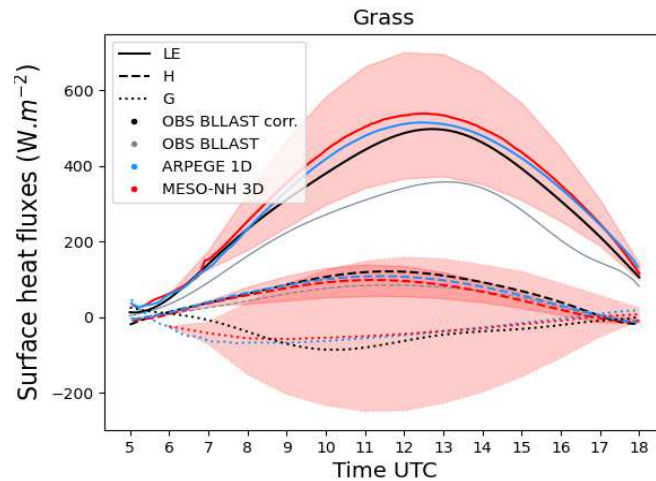


Figure 1 : Flux de chaleur latent, sensible et dans le sol pour le 20 juin 2011 sur le couvert prairie, simulés avec ARPEGE 1D (bleu) et la moyenne spatiale de MésO-NH 3D (rouge) comparés aux observations (corrégées en noir et non corrégées en gris). L'enveloppe rouge inclue 95% des valeurs de la simulation 3D MésO-NH.

4 Conclusion

Ce travail décrit la création de cas d'étude 1D afin qu'ils permettent d'évaluer d'autres configurations de modèles couplés. Les résultats d'évaluation des flux de surface modélisés valide la méthodologie utilisée pour créer les cas d'étude 1D.

La comparaison de l'état de l'atmosphère pour les configurations unicolonne aux résultats des simulations LES confirme la bonne représentativité du couplage surface-atmosphère simulé et met en avant les avantages des configurations unicolonne couplées, économes en temps de calcul tout en intégrant la majorité des processus atmosphériques présents dans le modèle global (sauf l'advection). L'analyse intégrée des couverts représentés permet de montrer l'impact respectifs de plusieurs processus de surface sur la modélisation de l'atmosphère dans la configuration CNRM-CM6-1 et rappelle la dépendance forte entre la surface et l'atmosphère.

Dans la réalité, la surface est généralement très hétérogène à l'échelle d'une maille de modèle de prévision du temps ou de climat. Le cadre 1D/LES sera par conséquent prochainement étendu à des surfaces hétérogènes en termes de propriétés physiographiques, afin de revisiter la représentation du couplage surface-atmosphère.

Références

- [1] Jach L., Schwitalla T., Branch O., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V. 2022. Sensitivity of land-atmosphere coupling strength to changing atmospheric temperature and moisture over Europe. *Earth System Dynamics*, 13(1), 109–132.
- [2] Santanello Jr J., Dirmeyer P., Ferguson C., Findell K., Tawfik A., Berg M., Gentine P., Guillod B., Van Heerwaarden C. et Al. 2018. Land-atmosphere interactions: The LoCo perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(6), 1253–12728.
- [3] Darbieu C., Lohou F., Lohon M., Vilà-Guerau de Arellano J., Couvreux F., Durand P., Pino D., Patton E., Nilsson E., Blay-Carreras E., Gioli B. 2015. Turbulence vertical structure of the boundary layer during the afternoon transition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(17), 10071–10086.
- [4] Lohon M., Lohou F., Pino D., Couvreux F., Pardyjak E., Reuder J., Vilà-Guerau de Arellano J., Durand P., Hartogensis O., Legain D., Augustin P., Gioli B., Lenschow D., et al. 2014. The BLLAST field experiment: Boundary-Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(20), 10931–10960.
- [5] Rochrig R., Beau I., Saint-Martin D., Alias A., Decharme B., Guérémy J.-F., Voldoire A., Abdel-Latif A., Bazile E., Belamari S., et al. 2020. The cnrm global atmosphere model arpege-climat 6.3: Description and evaluation. *Journal of advances in Modeling Earth Systems*, 12(7).
- [6] Masson V., Le Moigne P., Martin E., Faroux S., Alias A., Alkama R., Belamari S., Barbu A., Boone A., Bouyssel F., et al. 2013. The SURFEX v7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6(4), 929–960.
- [7] Lac C., Chaboureaud J.-P., Masson V., Pinty J.-P., Tulet P., Escobar J., Leriche M., Barthe C., Aouizerats B., Augros C., et al. 2018. Overview of the meso-nh model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11(5), 1929–1969.
- [8] Barr A., King K., Gillespie T., den Hartog G., and Neumann H. 1994. comparison of Bowen ratio and eddy correlation sensible and latent heat flux measurements above deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 71, 21–41.

Analyse de sensibilité d'un modèle hydrogéophysique couplé par les polynômes du chaos (PCE) et indices de Sobol

G. Gru^a, N. Lesparre^a, P. Ackerer^a, B. Belfort^a, J.F. Girard^a

^a Institut Terre et Environnement de Strasbourg, Université de Strasbourg/EOST/ENGEES, CNRS UMR 7063, 5 rue Descartes, Strasbourg F-67084, France

Mots-clés: hydrogéophysique, résonance magnétique protonique, analyse de sensibilité, PCE, indices de Sobol

1 Introduction

La ressource en eau en montagne est primordiale à la fois pour les écosystèmes locaux et pour un certain nombre d'activités anthropiques [1]. Le dérèglement climatique pourrait avoir un impact négatif sur la ressource en eau disponible. Il est impératif de réduire les incertitudes sur les prédictions d'évolution de cette dernière. L'objectif du travail présenté est d'utiliser des mesures géophysiques pour apporter une information sur le stock d'eau contenu dans la sub-surface. Nous avons développé une approche de modélisation hydrogéophysique couplée : un modèle d'infiltration 1D basé sur l'équation de Richards est couplé avec un modèle géophysique d'estimation de signaux RMP à partir de distributions de teneur en eau. Nous analysons la sensibilité de ce modèle couplé grâce à des modèles de substitution basés sur le développement en polynômes du chaos (PCE), ces modèles de substitutions nous permettent de calculer directement les indices de sensibilité de Sobol.

2 Matériel et méthodes

2.1 Description du site d'étude et de l'expérience RMP

Le lieu d'étude sur lequel les données utilisées ont été récoltées est le bassin-versant expérimental du Strengbach (carte du bassin-versant avec les stations de mesures : **Figure 1**). Ce site de 80 ha est localisé dans le massif vosgien entre 800 et 1100 mètres d'altitude. L'exutoire du bassin-versant est situé à l'Est au niveau de la station de suivi du débit sur la limite du bassin-versant. Ce bassin-versant expérimental est le site d'étude de l'Observatoire Hydro-Géochimique de l'Environnement (OHGE). Des données météorologiques, hydrologiques et géochimiques y sont acquises depuis 1986. Cet observatoire étudie les modifications à long-terme des écosystèmes dues à des perturbations naturelles ou anthropiques [2].

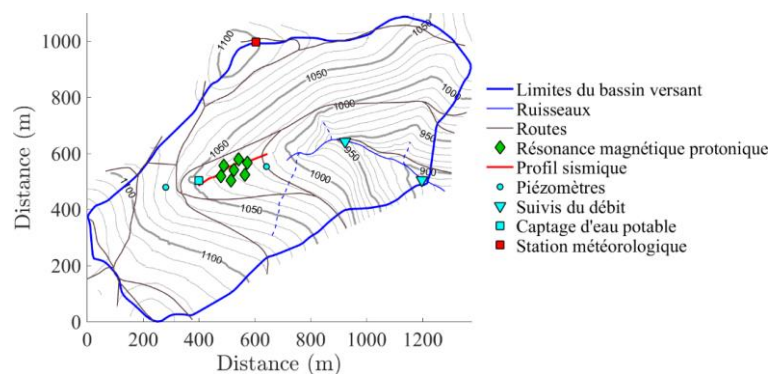


Figure 1 : Carte du bassin versant du Strengbach et localisation des stations de mesures.

La méthode géophysique utilisée est la résonance magnétique protonique. Le principe de la méthode est de créer un champ électromagnétique qui excite les dipôles magnétiques des protons contenus dans les molécules d'eau du sous-sol. Lorsque le champ électromagnétique perturbateur est coupé, les protons émettent un champ électromagnétique de relaxation mesuré par une antenne en surface. L'intensité du courant induit dans l'antenne en surface est proportionnelle au nombre de protons entrés en résonance et donc à la teneur en eau

dans le sol. Cette méthode a la particularité d'être l'une des seules méthodes géophysiques directement sensible à la teneur en eau. L'expérience analysée ici est le suivi temporel d'un événement de fonte de neige sur le bassin-versant du Strengbach durant l'hiver 2020/2021.

2.2 Modèle hydrogéophysique couplé

Le modèle hydrologique utilisé dans cette étude est basé sur l'équation de Richards qui régit les écoulements en milieu poreux non-saturé. Nous utilisons les modèles de Van-Genuchten et Mualem pour obtenir la forme fermée de l'équation de Richards. Afin d'utiliser le jeu de données de l'expérience décrite ci-dessus, nous avons couplé ce modèle avec un modèle d'estimation de signaux RMP à partir de distributions de teneur en eau. Un logigramme de fonctionnement du modèle hydrogéophysique couplé est présenté en **figure 2**.

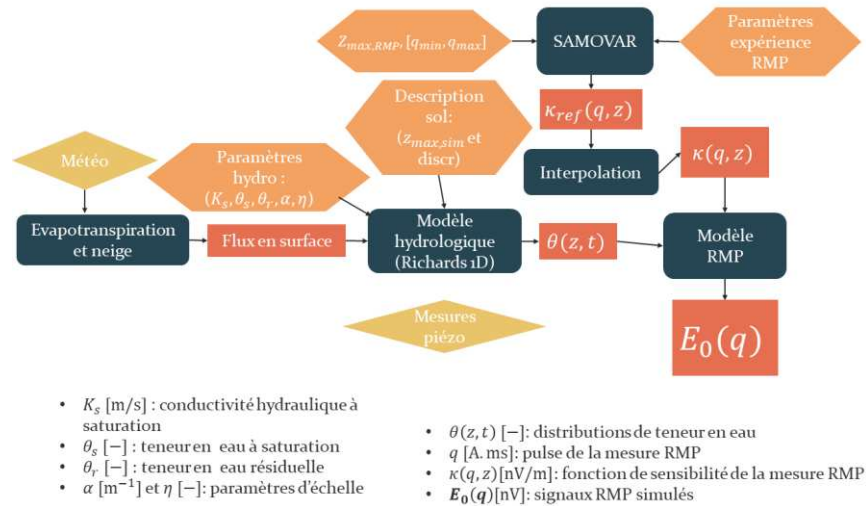


Figure 2 : Logigramme de fonctionnement du modèle hydrogéophysique couplé.

2.3 Analyse de sensibilité du modèle

Nous avons effectué une analyse de sensibilité du modèle aux paramètres hydrologiques. Pour ce faire, nous avons fait appel à des modèles de substitutions basés sur le développement en polynômes du chaos (PCE). Les coefficients des polynômes du chaos permettent d'obtenir analytiquement les indices de sensibilité de Sobol des paramètres [3]. L'outil UQ[py]Lab [4] a été utilisé pour le calcul des PCE et des indices de Sobol. Cette étude nous fournit des informations d'une grande valeur dans la perspective d'estimation des paramètres du modèle hydrologique sur notre cas d'étude. En effet, la sensibilité du modèle à ces derniers nous permet de déterminer l'éventuelle identifiabilité des paramètres dans un contexte d'assimilation de données.

Références

- [1] Viviroli D., Archer D. R., Buytaert W., Fowler H. J., Greenwood G. B., Hamlet A. F. et al. & Woods R. (2011) – Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 471-504.
- [2] Pierret M. C., Cotel S., Ackerer P., Beaulieu E., Benarioumlil S., Boucher M., et al., & Probst A. (2018) – The Strengbach catchment: A multidisciplinary environmental sentry for 30 years. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 1-17.
- [3] Sudret B. (2008). Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability engineering & system safety*, 93(7), 964-979.
- [4] Lataniotis C., Marelli S., & Sudret B. (2021). Uncertainty quantification in the cloud with UQCloud. In *4th International Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering (UNCECOMP 2021)* (pp. U-18990). ETH Zurich, Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification.

Transferts thermiques et hydrauliques au sein de l'hyporhéos : cas d'un cours d'eau de tête de bassin versant en milieu forestier

S.Larance^a, P.Bois^a, A. Rivière^c

^aENGEES - ICUBE UMR 7357- 67000 Strasbourg

^cMINE Paris Tech, Département Géoscience-77305 Fontainebleau

Mots-clés : hyporhéos, température, rivière, modèle mécanistique

Introduction

La température des cours d'eau est un indicateur crucial en ce qui concerne la santé des écosystèmes aquatiques. En effet elle influence nombre de processus comme la répartition des espèces aquatiques le long du cours d'eau, les réactions chimiques et biochimiques ou encore la reproduction (Olden et Naiman 2010). Ainsi le suivi de la température d'un cours d'eau permet d'apporter des éléments de réponse à la question de l'état global des cours d'eau. La température de ces derniers dépend de nombreux facteurs, qui se répartissent en trois catégories (Dugdale et al. 2017). La première regroupe tous les facteurs hydrologiques ou climatiques, qui contrôlent les taux de réchauffement ou de refroidissement du cours d'eau. Parmi eux la température de l'air, le rayonnement électromagnétique (courtes et longues longueur d'onde), les phénomènes d'advection, la pluie, etc. Les deuxième et troisième catégories regroupent les facteurs tels que les caractéristiques des bassins versants, l'hydrogéologie et l'hydromorphologie du milieu.

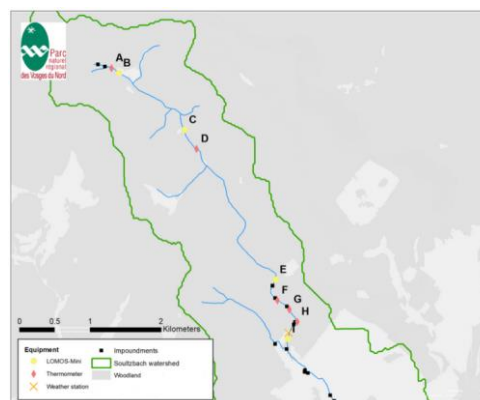
Plusieurs types de modèles numériques peuvent être utilisés afin de simuler l'évolution de la température au sein des cours d'eau. L'étude porte ici sur les modèles mécanistiques, notamment car ils permettent de simuler plusieurs scénarios (entre autres rejets industriels, changement de pratiques sylvicoles) qui entraînent une variation de la configuration du cours d'eau, contrairement aux modèles de régression ou stochastiques ([2] Cassie, 2006).

Afin de modéliser au mieux les températures au sein d'un cours d'eau avec une approche mécanistique, il est nécessaire de quantifier correctement les flux d'énergie entrants et sortants du cours d'eau. Or les transferts hyporhéiques ne sont que partiellement compris (Ouellet et al. 2020), alors que leur implication dans le bilan thermique des petits cours d'eau est comparativement plus importante que **pour** les grands cours d'eau (Caissie et Kurylyk 2014). Ainsi l'étude vise à quantifier les flux hyporhéiques d'un cours d'eau d'ordre de Strahler 3, puis à comparer ces flux énergétiques aux autres flux impactant l'équilibre thermique du cours d'eau.

1 Matériel et méthodes

1.1 Présentation du site d'étude

Le cours d'eau du Soultzbach se situe au Nord-Est de la France, au Nord de l'Alsace, dans le périmètre du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord. Le cours d'eau voit ses berges alterner entre forêt et prairies.



Le Soultzbach abrite plusieurs ouvrages de rétention d'eau. Il s'étend sur une distance de 11 km. Cependant dans le cadre de l'étude seuls les 6,5 premiers kilomètres seront pris en compte. Le cours d'eau est instrumenté avec une station météo, plusieurs thermomètres ainsi que des Lomos-Mini (couple de capteurs pression/température [5] Cucchi et al 2017) permettant de sonder l'hyporhéos du cours d'eau jusqu'à 40cm de profondeur. Ce sont notamment les données des Lomos-Mini qui permettront au modèle numérique de réaliser des simulations.

1.2 Modèle numérique

Afin de modéliser les transferts thermiques au sein de l'hyporhéos, un modèle mécanistique prenant en compte la profondeur, certaines caractéristiques physiques du milieu, ainsi les mesures chronologiques de température et pression, est utilisé ([6] Cucchi et al 2023). Il repose sur le couplage des équations physiques suivantes :

L'équation de diffusion thermique en milieu poreux :

$$\rho_m c_m \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\rho_w c_w \vec{q} \cdot \vec{\nabla} \theta + \lambda_m \Delta \theta \quad (1)$$

La loi de darcy

$$\vec{q} = \frac{-k \rho_w g}{\mu_w} \vec{\nabla} H \quad (2)$$

Menant à l'équation couplée suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa_e \Delta \theta + \alpha_e \vec{\nabla} H \cdot \vec{\nabla} \theta \quad (3)$$

Avec

$$\kappa_e = \frac{\lambda_m}{n \rho_w c_w + (1-n) \rho_s c_s} \quad (4) \quad \text{et} \quad \alpha_e = \frac{\rho_w c_w}{n \rho_w c_w + (1-n) \rho_s c_s} \frac{k \rho_w g}{\mu_w} \quad (5)$$

Variable	Nom	Unité
ρ_m	Densité eau+sédiments	kgm^{-3}
c_m	Capacité thermique eau+sédiments	$Jkg^{-1}C^{-1}$
λ_m	Conductivité thermique eau+sédiments	$Wm^{-1}C^{-1}$
ρ_w	Densité de l'eau	kgm^{-3}
c_w	Capacité thermique de l'eau	$Jkg^{-1}C^{-1}$
θ	Température	C
\vec{q}	Flux de Darcy	ms^{-1}
κ	Perméabilité intrinsèque	m^2
μ_w	Viscosité dynamique de l'eau	Kgs^{-1}
ρ_s	Densité sédimentaire	
c_s	Capacité thermique spécifique sédimentaire	$Jkg^{-1}C^{-1}$
\vec{g}	Pesanteur	ms^{-2}
n	Porosité	---

Tableau **Erreur ! Pas de séquence spécifié.** : Variables et unités

Ne connaissant pas les valeurs de tous les paramètres physiques de l'hyporhéos, comme par exemple, la porosité n , la densité sédimentaire ρ_s ou encore la perméabilité intrinsèque κ , une approche inverse est réalisée par le modèle, afin de déterminer ces valeurs. Les premiers résultats indiquent des régimes de température significativement différents entre les points et profondeurs de mesure ; la modélisation en cours permettra de quantifier les échanges énergétiques avec l'hyporhéos. Ainsi, l'objectif est de proposer des éléments de réponse à la hiérarchisation effective des échanges énergétiques dans les cours d'eau de tête de bassin versant.

Références

[**Erreur ! Pas de séquence spécifié.**] Dugdale S., Hannah D., Malcolm I. 2017. River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions, *Earth-Science*.

[Erreur ! Pas de séquence spécifiée.] Caissie D. 2006. Thermal regime of rivers : a review, *Freshwater Biology*.

[Erreur ! Pas de séquence spécifiée.] Ouellet V., St-Hilaire A., Dugdale S., Hannah d., Krause S., Proux-Ouellet S. 2020. River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems. *Science of the Total Environment*.

[4] Caisie D., Kurylyk B., St-Hilaire A., El-Jabi N., MacQuarrie K. 2014. Streambed temperature dynamics and corresponding heat fluxes in small streams experiencing seasonal ice cover. *Journal of Hydrology*.

[5] Cucchi K., Rivière A., Baudin A., Berrhouma A., Durand V., Rejiba F., Rubin Y., Flipo N. 2017. LOMOS-mini: A coupled system quantifying transient water and heat exchanges in streambeds, page numbers. *Journal of Hydrology*.

[6] Cucchi K., Flipo N., Rivière A., Rubin Y. 2023. Estimating Hydrothermal Properties and High-Frequency Fluxes from Geophysical Measurements in the Hyporheic Zone. *Frontiers in water*.

Olden, J. D., & Naiman, R. J. (2010). Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55(1), 86-107.

Présentations posters

Jeudi 20 juin 2024

n°	Titre	Présentatrice / Présentateur
1	Evaluation de la sédimentation et de la capacité de piégeage d'un barrage à l'aide de la théorie des bassins de décantation : Cas d'un petit réservoir en Afrique de l'Ouest	Koffi Bérenger
2	Modélisation de l'évolution des ressources hydrologiques et végétales au Sahel agropastoral sous contrainte climatique et anthropique	Collet Léna
3	Estimation de prélèvements aquifères non-renouvelables au cours du 21ème siècle à l'aide d'un ensemble CMIP6	Costantini Maya
4	Analyse de l'impact des pratiques de gestion durable des terres sur les ressources en eau en zone Sahélienne : Approche intégrée avec ParFlow-CLM	Hector Basile
5	Application d'un modèle hydrologique distribué basé sur les processus à un bassin versant rural méditerranéen en intégrant l'activité humaine	Hachgenei Nico
6	Critical zone modelling for alpine catchments: challenges regarding spatialization and snow representation	Reverdy Alix
7	Mise à l'échelle des processus hydrologiques pour les modèles de surface continentale, de la modélisation 3D intégrée au modèle de réservoir : Application au bassin du Little Washita.	Mouche Emmanuel
8	Enhancing the internal hydrological consistency of a process-based solute-transport model through simultaneous calibration of streamflow and stream concentrations	Salmon-Monviola Jordy
9	Traçage géochimique des sources de sédiments à l'échelle du bassin versant de la Saône : atouts et limites de l'échantillonnage intégratif des matières en suspensions	Claveau Maeva
10	Le bassin de l'Ogooué : approche numérique pour estimer les variations de flux de carbone organique induites par des modifications climatiques - méthodologie & résultats préliminaires	Flouriou Aurelie
11	Modélisation de l'assèchement dans des réseaux de rivières intermittents par couplage d'un modèle hydrologique spatialisé avec un algorithme de Random Forest	Mimeau Louise
12	Les modèles hydrogéologiques régionaux permettent-ils de simuler les zones humides et l'intermittence des rivières ? Exemple avec la plateforme AQUI-FR.	Guillaumot Luca
13	Modélisation des transferts d'énergie et d'eau à l'interface Surface-Atmosphère dans les forêts méditerranéenne en zone karstique	Raynaud--Schell Brune
14	Disponibilité des ressources en eau actuelles et futures en Afrique Centrale Equatoriale, cas du bassin versant forestier du Nyong au Cameroun	Ebodé Valentin Brice
15	Disponibilité de la ressource en eau actuelle et future dans un bassin versant forestier en voie d'urbanisation accélérée : le cas de la Mefou	Ebodé Valentin Brice

Présentations posters

Jeudi 20 juin 2024

n°	Titre	Présentatrice / Présentateur
16	Contribution de la fonte glaciaire au débit du Rhône avec le modèle hydrologique J2000	Champagne Olivier
17	Projections de l'étendue des zones humides mondiales en réponse au changement climatique.	Hardouin Lucas
18	Calibration et évaluation multi-objectifs du modèle ORCHIDEE sur la France à haute résolution	Huang Peng
19	Enhancements in Large-Scale Hydraulic Flow Modeling	Parisot Martin
20	Comparaison des équations de propagation de débit en rivière dans le modèle CTRIP	Peronnet Emma



Evaluation de la sédimentation et de la capacité de piégeage d'un barrage à l'aide de la théorie des bassins de décantation : Cas d'un petit réservoir en Afrique de l'Ouest

Bérenger KOFFI¹, Kouakou Koffi Eugène¹, Kouadio Kouamé Jean Olivier², Wawogninlin Brice Coulibaly³, Franck Hervé Akaffou³, Kouassi Amani Michel¹, Kouakou Lazare Kouassi³

¹Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB), Ecole des Mines et Géologie (ESMG), Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

²Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement et de l'Energie Solaire (LASMES)

³Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire, Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Environnement (LSTE)

*Correspondance : koffiberen@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4835-2975>

Résumé

En Côte d'Ivoire, de nombreux réservoirs construits dans le but d'améliorer l'approvisionnement en eau sont actuellement hors service en raison de l'accumulation de limon et de l'eutrophisation. Cette étude originale propose des modèles innovants qui permettent de comprendre le rythme d'envasement d'un barrage à l'aide de la théorie des bassins de décantation. Les données de débit, vitesse de chute de matières en suspension, vitesse d'écoulement, de niveau d'eau, le nombre de Péclet, le nombre de Strickler et les caractéristiques du réservoir de la retenue d'eau de la rivière Lobo ont été utilisés pour implémenter le modèle mathématique hydrosédimentaire. Les résultats de l'analyse montrent que la capacité de piégeage du réservoir dépend de la vitesse de chute, de la vitesse critique, du paramètre de forme l/r et du nombre Pecllet (P_e). On observe une bonne synchronisation entre les modèles utilisés dans le cas d'une vitesse de chute constante (CV-NT, CV-CM, CV-Teeter (1986)), variable (VV-NT, VV-CM) et celui proposé par Teeter (1986) (CV-Teeter(1986), VV-Teeter(1986)). Cette bonne synchronisation avec le modèle proposé par Teeter (1986), montre une fiabilité des solutions analytiques des modèles proposés dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, les résultats montrent que pour un nombre de Péclet (P_{cr}^e) supérieurs à 4, les valeurs numériques du nombre de Péclet sortent du domaine de validité de la solution de Teeter (1986). En effet, pour ces valeurs de Péclet supérieurs à 4, la courbe de la solution de Teeter (1986) sort du domaine de validité des modèles pour une vitesse de chute constante et variable. Cette invalidité des valeurs numériques du nombre de Péclet est fortement observée durant les périodes sèches. Par ailleurs, les différents scénarios de simulation montrent que la retenue d'eau de la rivière Lobo subit un envasement annuel compris entre 48,5 et 67,8 mm/an.

Mots-clés : Matières en suspension, Vitesse de chute, Modélisation, Sédimentation, Rivière Lobo, Côte d'Ivoire

Modélisation de l'évolution des ressources hydrologiques et végétales au Sahel agropastoral sous contrainte climatique et anthropique

L. Collet¹, J. Demarty¹, J. Etchanchu¹, C. Ollivier¹, I. Maïnassara¹, N. Farhani¹, B. Raynaud-Schell¹, N. Chahinian¹

¹HSM, Univ. Montpellier, CNRS, IMT, IRD, Montpellier, France

Mots-clés: écohydrologie, modélisation de surface, changement globaux, Sahel, ressources

Le Sahel est une région semi-aride où la majorité de la population dépend de l'agriculture vivrière. Cette région est considérée comme un « hotspot » du changement climatique avec un réchauffement attendu de 3 à 4°C d'ici 2100. En effet, les projections climatiques montrent que les périodes de sécheresse devraient s'allonger et que les précipitations extrêmes seraient plus fréquentes, ce qui impactera en retour les ressources hydrologiques et végétales. Cette étude vise à évaluer les impacts de ces changements sur un écosystème agro-pastoral sahélien typique, dominé par les cultures de mil et la savane arbustive, dans le sud-ouest du Niger. Pour cela, des scénarios climatiques sont construits à partir d'un ensemble d'observations climatiques locales et de projections climatiques extraits de modèles globaux (CMIP6) sur la région sahélienne. Ces scénarios sont ensuite utilisés comme forçage climatique pour un modèle de type SVAT (transfert sol-végétation-atmosphère). Le modèle utilisé est le modèle SiSPAT qui fait référence au Sahel sur sa capacité à simuler les flux d'eau et d'énergie à la surface. Les résultats témoignent : i) de la grande sensibilité des bilans énergétiques et hydriques aux changements de température et d'humidité ; ii) la compensation partielle qui existe entre les effets du changement de la température et de l'humidité sur l'évapotranspiration. En effet, une augmentation de la température durant la saison des pluies entraîne une hausse de l'évapotranspiration, contrairement à l'augmentation de l'humidité. Par ailleurs, le bilan d'eau est principalement influencé par la modification du régime des précipitations, notamment le ruissellement qui répond très fortement à l'intensification des précipitations, augmentant le risque d'inondation. Enfin, il est montré que l'intensification des pluies augmente également le drainage et stockage de l'eau dans le sol, ce qui pourrait induire dans le futur un cycle de végétation plus long. Cet effet sera étudié prochainement en utilisant une modélisation écohydrologique qui simule les développements saisonniers de la végétation. Il est également envisagé de développer des scénarios d'évolution des pratiques anthropiques afin d'évaluer d'éventuelles stratégies adaptées pour la gestion future de l'eau et des cultures.

Estimation de prélèvements aquifères non-renouvelables au cours du 21ème siècle à l'aide d'un ensemble CMIP6.

M. Costantini^a, B. Decharme^a, J. Colin^a

^aCentre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France

Mots-clés: Aquifères, Modèles de Climat, Prélèvements

La ressource mondiale en eau représente la totalité l'eau douce continentale exploitable par l'être humain. Elle est stockée en très grande majorité dans les aquifères et ces derniers représentent environ un tiers des prélèvements humains [1]. La recharge est l'indicateur le plus important pour répondre aux questions de "renouvelabilité" de la ressource en eau des aquifère. En effet, connaître la dynamique de la recharge d'un aquifère permet d'estimer les quantités d'eau qu'il est possible de lui soustraire sans entraîner un épuisement irréversible de sa réserve sur le long terme [2, 3]. Dans certaines régions, la ressource aquifère est mise à rude épreuve par le changement climatique et les prélèvements pour l'irrigation, faisant peser des risques de pénuries d'eau et d'insécurité alimentaire. Dans ce contexte, il est important de pouvoir anticiper l'évolution des aquifères afin de mettre en place des mesures permettant d'en assurer une utilisation pérenne [4, 5, 6].

Dans cette étude, nous réalisons une estimation des prélèvements aquifères non-renouvelables présents et futurs à échelle globale en soustrayant des *projections de prélèvements en eau pour l'irrigation provenant de modèles hydrologiques globaux et d'observations* [7, 8], à des projections de recharge fournies par un ensemble de 22 modèles globaux de climat ayant participé à l'exercice CMIP6. Les projections couvrent la période 1970-2100 et suivent trois des derniers scénarios de concentrations de gaz à effet de serre analysés dans le sixième rapport du GIEC. Les résultats montrent des prélèvements aquifères non-renouvelables dans plusieurs régions du monde. Ces régions sont généralement caractérisées par des climats humides couplés à une forte irrigation due à une agriculture intense, ou par des climats arides/semi-arides avec des taux de prélèvements aquifères élevés pour compenser le manque d'eau en surface. Ces résultats sont ensuite mis en perspective avec des cartes actuelles de production agricole. Cette analyse met en évidence que les régions présentant les plus forts taux de prélèvements non-renouvelables sont celles qui fournissent la grande majorité de la production agricole mondiale.

Références

- [1] Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F. T., Siebert, S., Eicker, A., Rodell, M., Strassberg, G., Scanlon, B. R.. 2012. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal of Geodynamics*. 59–60. 143–156.
- [2] Döll, P., Fiedler, K.. 2008. Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*. 12(3). 863–885.
- [3] Wada, Y.. 2016. Impacts of Groundwater Pumping on Regional and Global Water Resources: Natural and Human-Induced Impacts.
- [4] de Graaf, I. E. M., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H., Bierkens, M. F. P. 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*. 574(7776). 90–94.

- [5] Wu, W.-Y., Lo, M., Wada, Y., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., Yeh, P. J., Ducharme, A., Yang, Z.-L.. 2020. Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*. 11. 1–9.
- [6] Shamsudduha, M., Taylor, R. G. 2020. *Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation*. *Earth System Dynamics*. 11. 755–774.
- [7] Huang, Z., Hejazi, M., Li, X., Tang, Q., Vernon, C., Leng, G., Liu, Y. 2018. Reconstruction of global gridded monthly sectoral water withdrawals for 1971-2010 and analysis of their spatiotemporal patterns. *Hydrology and Earth System Sciences*. 22. 2117–2133.
- [8] Khan, Z., Thompson, I., Vernon, C. R., Graham, N. T., Wild, T. B., Chen, M.. 2023. Global monthly sectoral water use for 2010-2100 at 0.5° resolution across alternative futures. *Scientific Data*. 10(1). 201.

Analyse de l'impact des pratiques de gestion durable des terres sur les ressources en eau en zone Sahélienne : Approche intégrée avec ParFlow-CLM

Mahamadi Tabsoba^{1,2}, Basile Hector¹, Jean-Martial Cohard¹, Jean-Pierre Vandervaere¹, Emmanuel Lawin², Lucie Rapp¹, Aghali Ingatan³, Moussa Malam Abdou⁴

¹ Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, INRAE, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France

² Univ. d'Abomey-Calavi, Institut National de l'Eau (INE), Cotonou, Benin

³ Univ. Abdou Moumouni de Niamey, Niger

⁴ Univ. André-Salifou de Zinder, Niger

Dans les années 1970, la région sahélienne a connu des sécheresses intenses exacerbées par des changements simultanés des états de surface, entraînant une grave dégradation des sols et des écosystèmes. Ces changements ont perturbé le cycle de l'eau, entraînant plus d'écoulements de surface et une concentration rapide de l'eau dans les ravines temporaires, aggravant les inondations dans plusieurs villes. Pour faire face à ces défis, des techniques de conservation des eaux et des sols, comme les banquettes, demi-lunes, sont mises en place pour freiner le ruissellement sur les plateaux, favoriser l'infiltration et la croissance de la végétation. L'impact de ces pratiques est bien documenté sur les écoulements de surface mais qu'en est-il de la recharge des eaux souterraines?

L'objectif de ce travail est de quantifier l'impact de ces aménagements sur les ressources souterraines et de surface. Un modèle intégré de l'ensemble de la zone critique (ParFlow-CLM) capable de prendre en compte les interactions surface-souterrain est mobilisé sur une zone documentée par l'observatoire AMMA-CATCH au Sud-Ouest Niger. L'estimation des paramètres physiques du modèle a bénéficié d'une étude préalable réalisée avec un modèle similaire (SiSPAT), illustrant l'intérêt du déploiement de ces modèles à base physique permettant de capitaliser sur nos connaissances des milieux. Après avoir évalué la capacité du modèle à reproduire l'évapotranspiration, variable clé du cycle hydrologique, ainsi que les autres processus (infiltration, écoulements hortonien) sur des parcelles bien documentées, le modèle a été déployé sur le petit bassin versant de Tondi Kiboro disposant de mesures de coefficients d'écoulement en fonction de la densité d'aménagements (de type banquettes). Une analyse de sensibilité focalisée sur la représentation du coefficient d'écoulement avant la mise en œuvre des banquettes, a été menée avec un modèle de versant en 2D, permettant de préciser le rôle prépondérant des croûtes et du sol sous-jacent sur la production des écoulements.

Cette expérience virtuelle constitue une première étape vers l'intégration des banquettes dans le modèle afin de quantifier leurs impacts sur les termes du bilan d'eau à grande échelle.

Application d'un modèle hydrologique distribué basé sur les processus à un bassin versant rural méditerranéen en intégrant l'activité humaine

Nico Hachgenei^a, Flora Branger^a, Guillaume Nord^b, Inès Creti^c

^aINRAE, UR Riverly – 5 rue de la Doua, CS 20244, 69625 Villeurbanne CEDEX, France

^bUniv. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, IRD, Grenoble INP, IGE, CS 40700, 38 058 Grenoble Cedex 9, France

^cLaboratoire Pacte (UMR 5194), UGA – 38040 Grenoble cedex 9, France

Mots-clés: Climat méditerranéen, Changement climatique, Ressources en eau, Impact humain, Agriculture extensive, Contaminants

Résumé

Le climat méditerranéen se caractérise par un été sec et des précipitations intenses et fréquentes en automne. Ces caractéristiques pourraient s'intensifier dans le cadre du changement climatique, et ainsi impacter directement l'homme via une exposition accrue aux risques (inondations, sécheresses) d'une part, et impulser des changements d'occupation des sols d'autre part. Des étés plus longs et plus secs entraîneront une réduction des ressources en eau dans le bassin versant et en même temps une augmentation de la demande en eau, principalement pour l'agriculture (irrigation et élevage). L'intensification des événements extrêmes peut également entraîner un risque accru de transfert de contaminants à partir de sources agricoles diffuses.

Nous utilisons J2000P, un modèle hydrologique distribué basé sur les processus, sur un bassin versant rural méditerranéen de 42 km² marqué par une agriculture principalement extensive et diversifiée (élevage, vigne, cultures). Nous tenons compte de l'impact humain (extraction d'eau potable et d'eau brute à destination agricole ; rejet d'eaux usées) dans le modèle. Les observations du débit des cours d'eau à trois endroits du bassin versant permettent une calibration robuste du modèle. Un modèle géochimique de mélange permettra de valider les contributions simulées des différentes parties du bassin versant au débit du cours d'eau à l'exutoire.

Ce modèle servira de base pour prendre en compte des scénarios futurs de changement de climat et d'occupation des sols pour prédire les trajectoires possibles du cycle hydrologique à l'horizon 2050. Cette étude fait partie d'un projet sur le transfert de contaminants provenant de sources urbaines et de sources agricoles diffuses (CHYPSTER, ANR-21-CE34-0013). Les crues jouant un rôle crucial dans le transfert des contaminants agricoles provenant de sources diffuses, un soin particulier est apporté à la représentation des crues dans les conditions actuelles et futures.

Critical zone modelling for alpine catchments: challenges regarding spatialization and snow representation

Alix Reverdy¹, Aniket Gupta², Matthieu Le Lay³, Jean-Martial Cohard¹, Didier Voisin¹ and Matthieu Lafaysse⁴

- ¹IGE, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France
- ²University of Arizona, Tucson, USA
- ³EDF-DTG, Saint-Martin-Le-Vinoux, France
- ⁴CEN, Météo France, Saint-Martin-D'Hères, France

The current operational hydrological modelling of mountainous catchments mostly relies on conceptual and semi-distributed models, which are calibrated based on historical discharge measurements. As a consequence, despite their good performance in seasonal river runoff prediction, they often fail to project the impact of climate change on the hydrological cycle over decades. This is due to a limited representation of physical processes and their inability to simulate water and nutrient paths and their modification.

In this regard, we propose to apply the critical zone hydrology model ParFlow-CLM to a pair of headwater catchments in the French Alps, close to the Lautaret Pass. A first modelling of a small (0.16 km², 1950-2250 m.a.s.l.) catchment highlighted the need to spatialize solid precipitation, incoming shortwave radiation, wind speeds and subsurface properties, due to topographical effects and underground heterogeneity. Our setup showed promising results with good correlation when compared to the observed discharge ($KGE_{np} = 0.91$), consistent evapotranspiration compared to local Eddy-Covariance measurements and realistic snow disappearance patterns. On the other side, it pointed out the need for a better representation of snow aging processes. We evaluate the relative performance of CLM5 compared to the currently used CLM3.5 in doing so, using the ESM-SnowMIP framework, along with Crocus and MORDOR snow schemes as complementary references.

Moving to a bigger connected watershed, covering a wider altitude range (6 km², 1950-3050 m.a.s.l.), brings new challenges regarding meteorological altitude gradients and topographic influence, more complex subsurface structures and vegetation distribution. We propose different strategies to tackle these complexities while requiring parsimonious field data collection, involving drone and satellite remote sensing and geomorphological mapping. This will pave the way toward a functional critical zone modelling for a mid-elevation alpine catchment, which will allow the reanalysis and projection of hydrological conditions with minimum calibration.

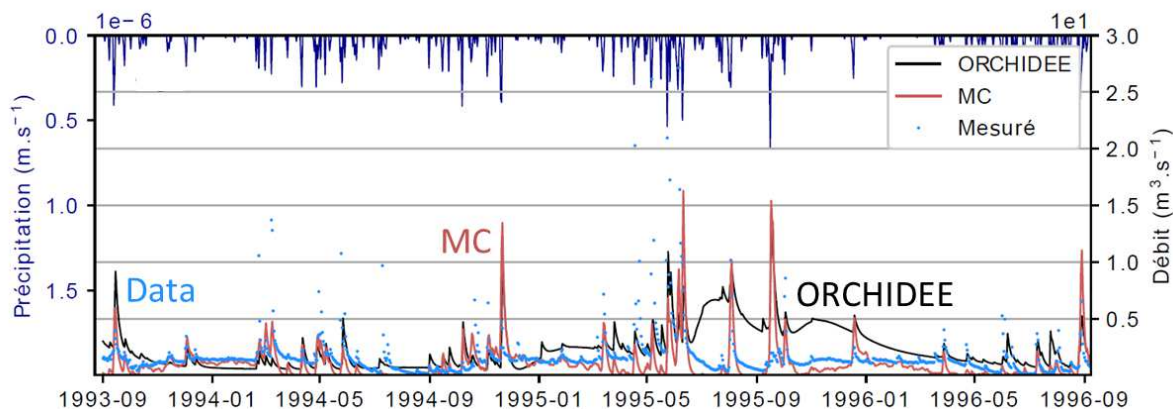
Mise à l'échelle des processus hydrologiques pour les modèles de surface continentale, de la modélisation 3D intégrée au modèle de réservoir : Application au bassin du Little Washita.

Fanny Picoulat, Emmanuel Mouche, Claude Mügler

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, UMR 8212, C.E. de Saclay, Orme des Merisiers, 91191 Gif sur Yvette

Mots-clés: hydrologie ; modèle ; surface continentale; changement d'échelle

Nous nous intéressons ici aux modèles de surface continentale de type colonne, développés pour les modèles de climat, et plus particulièrement au modèle ORCHIDEE qui est du type colonne à réservoirs. Dans ce modèle, la résolution horizontale est de l'ordre de la centaine de kilomètres et la représentation de l'hydrologie continentale est simplifiée : les écoulements latéraux sont conceptualisés au travers de réservoirs, et leur influence sur la distribution spatiale de la teneur en eau des sols est négligée. De telles simplifications introduisent des biais sur le calcul du flux évapotranspiratoire, ainsi que du débit en rivière. Au sein de la communauté scientifique, un consensus est observé sur le besoin d'améliorer la représentation de l'hydrologie dans ces modèles. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est de mettre en œuvre une démarche de mise à l'échelle des processus hydrologiques de type « bottom-up », allant de la modélisation 3D intégrée au modèle de réservoirs. Appliquée au bassin du Little Washita (Oklahoma, USA), cette démarche s'articule en trois étapes de réduction de dimensionnalité [1]. En premier lieu, une simulation 3D de référence est conduite sur vingt années à l'aide d'un code intégré à base physique. Le modèle 3D est ensuite réduit à un modèle 2D de versant équivalent. Une troisième étape consiste en la réduction, au moyen d'hypothèses simplificatrices, du modèle 2D à un modèle conceptuel de réservoirs. Enfin, une simulation de colonne 1D est conduite à l'aide d'ORCHIDEE. La comparaison entre les résultats du modèle conceptuel issu de la démarche de mise à l'échelle et les résultats des calculs ORCHIDEE permet de dégager des pistes d'amélioration des modèles de surface continentale de type colonne.



Little Washita, 1993-1996. Comparaison des débits expérimentaux et simulés par ORCHIDEE et le modèle conceptuel (MC).

[1] Picoulat, F., Mouche, E., & Mügler, C. (2022). Upscaling hydrological processes for Land Surface Models with a two - hydrologic - variable model: application to the Little Washita Watershed. *Water Resources Research*, 58(9), e2021WR030997.

J. Salmon-Monviola^a, O. Fovet^a, M. Hrachowitz^b

^a UMR SAS, INRAE, Institut Agro, Rennes, France

^b Department of Water Management, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Stevinweg 1, 2628CN Delft, Netherlands

Keywords: Hydrological models, Internal consistency, Multi-objective calibration

1 Introduction

L'amélioration de la cohérence des modèles hydrologiques, c'est-à-dire leur capacité à reproduire la dynamique observée du système, est nécessaire pour accroître leur pouvoir prédictif. Etant donné que l'utilisation des données de débit pour la calibration est nécessaire mais pas suffisante pour contraindre les modèles et garantir leur cohérence, d'autres stratégies doivent être envisagées, en particulier l'utilisation de sources de données supplémentaires. L'objectif de cette étude est de tester si la calibration simultanée des concentrations, en carbone organique dissous (COD) et en nitrate (NO_3^-), avec le débit améliore la cohérence hydrologique d'un modèle parcimonieux de transport de solutés.

2 Matériel et méthodes

Une approche multi-objectifs et multi-variables a été utilisée pour évaluer le modèle dans un bassin versant agricole (Kervidy-Naizin, Ouest France).

2.1 Le site d'étude

Le bassin versant de Kervidy-Naizin est situé dans l'ouest de la France (Fig. 1a) et fait partie de l'Observatoire AgrHyS [1]. Il s'agit d'un bassin versant agricole de 4,82 km², drainé par un cours d'eau intermittent du second ordre de Strahler. Kervidy-Naizin est représentatif des zones d'agriculture intensive qui présentent un excès d'azote réactif en raison de l'application d'effluents d'élevage et d'engrais inorganiques au-delà des besoins des cultures. Dans ce paysage, la majeure partie du COD et de NO_3^- s'accumulent dans les sols des zones ripariennes et dans les eaux souterraines, respectivement [2,3].

2.2 Le modèle hydrochimique

Un modèle parcimonieux de transport de soluté semi-distribué a été utilisé. Les processus sont représentés par des équations linéaires ou non linéaires qui relient les flux entre les réservoirs modélisés (Fig. 1b).

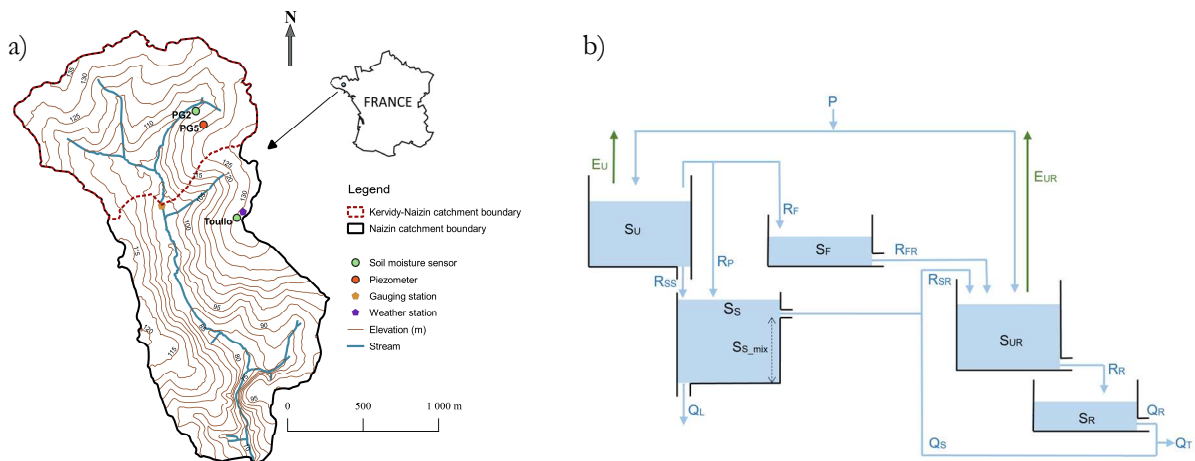


Figure 1 : a) Bassin versant de Kervidy-Naizin et b) Structure du modèle conceptuel

Les apports d'azote aux niveaux des réservoirs S_U et S_{UR} sont les excédents quotidiens d'azote ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{day}$). Les transformations biologiques de NO_3^- , soit par dénitrification dans la zone riparienne, soit par consommation dans le cours d'eau par les producteurs primaires, ont été simulés en considérant une quantité d'abattement constante de NO_3^- ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{day}$) dans le réservoir S_R .

La conceptualisation des processus biogéochimiques utilisés pour simuler la dynamique du COD, similaire à celle de Birkel [4], est basée sur un bilan de masse production-perte et sur le transport vers le cours d'eau. La production journalière de COD, dans les réservoirs S_U et S_{UR} , augmente en fonction de la température et de la teneur en eau du sol.

2.3 Calibration et évaluation du modèle

Quatre scénarios de calibration multi-objectifs, basés sur des algorithmes évolutionnaires, ont été mis en œuvre : 1) seules les données sur le débit sont utilisées pour la calibration ; 2) les données sur le débit et la concentration de COD dans la rivière sont utilisées simultanément pour la calibration ; 3) les données sur le débit et la concentration de NO_3^- dans la rivière sont utilisées pour la calibration ; 4) les données sur le débit et les concentrations (COD et NO_3^-) dans la rivière sont utilisées pour la calibration. Dans l'étape d'évaluation, pour chaque scénario, les mesures observées de la teneur en eau du sol et du niveau de la nappe ont été utilisées comme données indépendantes pour vérifier la cohérence interne du modèle calibré.

3 Résultats

Nos résultats ont montré que l'utilisation des concentrations journalières de COD et de NO_3^- dans la rivière avec les données de débit pendant la calibration n'a pas amélioré la capacité du modèle à prédire le débit pour les périodes de calibration ou d'évaluation (Fig. 2). Cependant, la cohérence interne du modèle a été améliorée pour la simulation des faibles débits, le niveau de la nappe et l'humidité des sols en amont du bassin versant, mais pas pour la simulation de l'humidité des sols dans la zone riparienne. L'incertitude des paramètres diminue lorsque le modèle est calibré à l'aide des concentrations de solutés, sauf pour le paramètre de vidange du réservoir représentant la nappe [5].

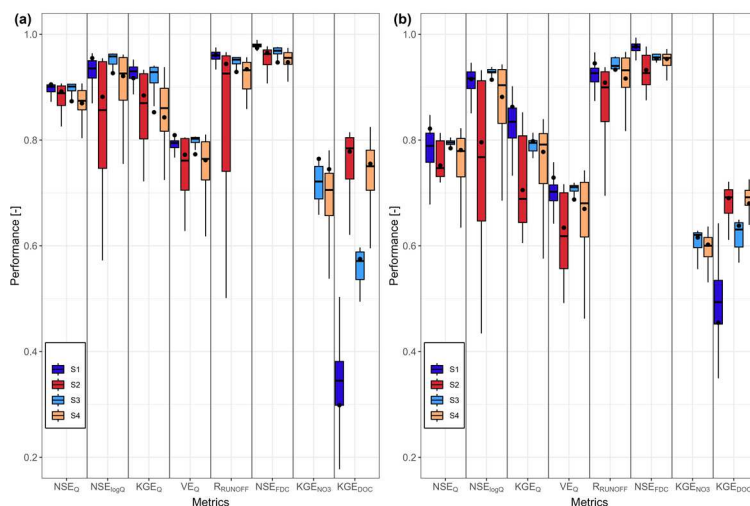


Figure 2 : Boxplot des signatures hydrologiques, du COD et NO_3^- selon quatre scénarios : S1 (Hydro seulement), S2 (Hydro + COD), S3 (Hydro + NO_3^-) et S4 (Hydro + COD + NO_3^-) pour a) la période de calibration et b) la période d'évaluation.

4 Conclusion

Cette étude montre l'intérêt d'utiliser des sources de données multiples en plus des débits pour la calibration, en particulier les concentrations de COD et de NO_3^- , afin de contraindre les modèles hydrologiques à mieux représenter les quantités et les flux d'eau dans le bassin versant. Avec la disponibilité croissante de données sur les solutés provenant de la surveillance des bassins versants, cette approche apporte un moyen d'améliorer la cohérence interne des modèles hydrologiques, ce qui permet ensuite de les utiliser de manière plus fiable lors de l'évaluation de scénarios.

5 Références

- [1] Fovet, O., Humbert, G., Dupas, R., Gascuel-Oudoux et al.: Seasonal variability of stream water quality response to storm events captured using high-frequency and multi-parameter data, *Journal of Hydrology*, 559, 282–293, 2018.
- [2] Aubert, A. H., Gascuel-Oudoux, C., Gruau, et al.: Solute transport dynamics in small, shallow groundwater-dominated agricultural catchments: insights from a high-frequency, multisolute 10 yr long monitoring study, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1379–1391, 2013.
- [3] Strohmenger, L., Fovet, O., Hrachowitz, M., Salmon-Monviola, J., and Gascuel-Oudoux, C.: Is a simple model based on two mixing reservoirs able to reproduce the intra-annual dynamics of DOC and NO_3^- stream concentrations in an agricultural headwater catchment?, *Science of The Total Environment*, 794, 148715, 2021.
- [4] Birkel, C., Soulsby, C., and Tetzlaff, D.: Integrating parsimonious models of hydrological connectivity and soil biogeochemistry to simulate stream DOC dynamics, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 119, 1030–1047, 2014.
- [5] Salmon-Monviola, J., Fovet, O., and Hrachowitz, M.: Improving the internal hydrological consistency of a process-based solute-transport model by simultaneous calibration of streamflow and stream concentrations, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2023-292>, in review, 2024.

Traçage géochimique des sources de sédiments à l'échelle du bassin versant de la Saône : atouts et limites de l'échantillonnage intégratif des matières en suspensions

Maeva Claveau¹, Matthieu Masson¹, Loïc Richard¹ et Aymeric Dabrin¹

¹ INRAE, UR RiverLy, 5 Rue de la Doua CS 20244, Villeurbanne F-69625, France

Résumé poster – 5èmes Journées de Modélisation des Surfaces Continentales, 19-20 juin 2024, Strasbourg

Les modélisations prospectives des transferts hydrologiques et de matières en suspension (MES) sont des approches essentielles pour prédire l'évolution des dynamiques sédimentaires des systèmes aquatiques dans un contexte de changement global. De récentes études modélisant les scénarios plausibles de changement à l'échelle du bassin-versant du Rhône envisagent une augmentation des flux hydriques et de particules de l'un de ses affluents principaux, la Saône. Bien que ces particules soient indispensables aux écosystèmes aquatiques en contrôlant le transport de nutriments, d'éléments essentiels et de matière organique, elles représentent aussi un vecteur de contaminants. Afin d'identifier les principales sources de polluants particulaires à l'échelle du bassin-versant de la Saône, il est essentiel de connaître l'origine des MES. À cette fin, les approches de « fingerprinting » consistent à identifier des empreintes géochimiques (traceurs) dans des MES/sédiments, prélevés au niveau des sources potentielles (principaux affluents des rivières), pour identifier leurs contributions relatives à l'exutoire du bassin-versant, en s'appuyant sur un modèle de mélange. Même si ces approches ont connu un développement significatif au cours des quatre dernières décennies, de nombreuses étapes de cette procédure sont encore à améliorer (Evrard et al., 2022). Parmi ces étapes, l'utilisation de traceurs conservatifs (stabilité spatio-temporelle des concentrations) est une condition fondamentale, avant de les intégrer dans les modèles de mélange (Chaloux-Clergue et al., 2024). Récemment, une approche analytique permettant d'utiliser les traceurs dans la fraction non-réactive des MES a été proposée pour tenter de s'affranchir de cette non conservativité des traceurs (Bégorre, 2021). L'étape d'échantillonnage des MES (Centrifugation, Pièges à particules : PAP, Filtration et/ou Décantation) représente une étape critique dans les approches de fingerprinting. Les PAP, sont un mode d'échantillonnage pertinent, car ils permettent d'obtenir un échantillon intégratif sur la période échantillonnée (une semaine à un mois, typiquement), en quantité suffisante pour l'analyse des différents traceurs ciblés (> 5 g de poids sec) et peuvent être aisément déployés à une très large échelle spatiale. Cependant, ils ne peuvent garantir le caractère conservatif des traceurs du fait de la mise en place de potentiels mécanismes de dégradation des particules à l'intérieur du piège (Dabrin et al., 2023).

En vue d'améliorer les approches de fingerprinting à l'échelle d'un grand cours d'eau, trois principaux enjeux liés à l'échantillonnage par PAP et aux biais de conservativité des traceurs associés: est-il possible d'identifier et de quantifier les processus de dégradation présents dans le piège lors de la phase d'échantillonnage intégrative des MES ? Est-ce que la méthode de traçage basée sur la phase non-réactive permet de s'affranchir de la non conservativité de certains traceurs lors de cet échantillonnage ? Dans quelles mesures cette méthode permet-elle d'utiliser les pièges à particules tout en validant la représentativité du modèle de mélange appliqué aux grands systèmes fluviaux tels que le bassin de la Saône ?

Afin de répondre à ces questions, une stratégie expérimentale est en cours d'élaboration dans le cadre de ma thèse (nov. 2023 - oct. 2026). Cette stratégie, s'appuie sur la mise en place d'expérimentations en conditions contrôlées de laboratoire visant à suivre la dynamique temporelle (extractions séquentielles) des concentrations en métaux dans les différentes phases porteuses. L'étude de ces cinétiques de dégradation a pour objectif d'identifier et de quantifier les processus responsables du caractère non conservatif des MES collectées dans le piège. En parallèle, la mise en place de campagnes d'échantillonnage des MES de la Saône à Lyon et de ses principaux affluents, en utilisant les PAP et les traceurs de cette fraction non réactive, alimenteront un modèle de traçage géochimique pour estimer les contributions relatives des sources de sédiments à l'échelle du bassin-versant de la Saône. Ce suivi d'au moins un an permettra également de prendre en considération différents facteurs tels que la teneur en matière organique, la saisonnalité ou les conditions hydrologiques, afin d'identifier les facteurs qui influencent la réactivité des traceurs. Enfin, ce poster présente les résultats et interprétations de données de MES prélevées par différents types de pièges et par une technique manuelle (état de référence) au niveau d'un des affluents de la Saône (Ardières), afin de mettre en lumière les facteurs environnementaux responsables du biais lié à l'échantillonnage par piège. Ces approches permettront de comprendre les mécanismes responsables du biais potentiel des traceurs dans les MES prélevées par PAP, pour ensuite évaluer la robustesse de la méthode de traçage basée sur la phase réfractaire, en vue de tracer l'origine des MES à l'échelle d'un système fluvial comme de la Saône, et proposer une méthode généralisable à d'autres systèmes fluviaux.

Mots clés : Traçage géochimique, modèle de mélange, matières en suspension, métaux, conservativité, Saône, matière organique

Le bassin de l'Ogooué : approche numérique pour estimer les variations de flux de carbone organique induites par des modifications climatiques - méthodologie & résultats préliminaires

A. Flouriou^a, B. Chauveau^a, D. Granjeon^a, E. Bemer^a, D. Sebag^a, S. Bogning^{b,c}, F., Frappart^d, J.-J. Braun^{e,f,g}

^aIFPEN – IFP Energies nouvelles, Rueil-Malmaison, France

^bTASL – Technology and Applied Sciences Laboratory, Université de Douala, Cameroun

^cLEGOS – Laboratoire d'études en Géophysique et océanographie spatiale, Université de Toulouse (CNES/CNRS/IRD/UPS), Toulouse, France

^dISPA, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, Villenave d'Ornon, France

^eGET – Géosciences Environnement Toulouse (CNRS/IRD/UPS/CES), Toulouse, France

^fLMI DYCOFAC IRD – Laboratoire Mixte International Dynamique des écosystèmes continentaux d'Afrique Centrale en contexte de changements globaux, Université de Yaoundé 1-IRGM, BP 1857, Cameroun

^gAgence Nationale des Parc Nationaux, BP 20379 Libreville, Gabon

^hCENAREST, Quartier Gros Bouquet, Libreville, Gabon

Mots-clés : carbone, Ogooué, modélisation, numérique

Dans le cadre du projet Vulcar-Fate (Global change impact on VULnerable CARbon reservoirs: carbon sequestration and emissions in soils and waters From the Arctic To the Equator) piloté par l'IRD, nous nous intéressons à la modélisation des surfaces continentales, afin de comprendre les écoulements d'eau et le transport du carbone dans l'hydrosystème tropical humide du bassin de l'Ogooué (~ 224,000 km²) localisé en zone intertropicale (Gabon) dans un contexte de modifications climatiques et anthropiques.

L'approche de modélisation numérique mise en place avec le calculateur ArcaDES développé par IFPEN permet de décrire les flux d'eau, de sédiments et de matière organique à l'échelle du bassin, sur des durées pluri-décennales. Les variations climatiques saisonnières sont prises en compte pour simuler l'écoulement de l'eau en surface et dans la nappe phréatique, la dynamique forestière et les caractéristiques du sol. La charge sédimentaire et organique (particulaire et dissoute) dans les cours d'eau est contrôlée par les régimes d'érosion et de lessivage des sols, et de transport et dépôt des sédiments.

L'étude du bassin-versant de l'Ogooué s'appuie sur différents types de données : (1) des données satellitaires calibrées par des mesures au sol à haute fréquence concernant les données météorologiques (précipitations), (2) des données issues de stations hydrologiques et de campagnes d'échantillonnage (chroniques de débits, hauteur d'eau), (3) des historiques d'images satellites (Landsat) traitées pour identifier l'évolution de l'occupation du sol, (4) des données géochimiques concernant la matière organique dissoute. L'intégration des données pertinentes sur des échelles de résolution très différentes permet d'intégrer de multiples disciplines (physique, géologie, hydrologie, télédétection, statistiques...) et ainsi de mieux calibrer les modélisations.

L'approche de modélisation numérique proposée, dont on présente les premiers résultats, a pour ambition d'étudier sur les 30-100 prochaines années l'évolution du bilan hydrique et du couvert végétal, et ainsi des flux de carbone, à l'échelle du bassin de l'Ogooué en fonction de scénarios d'évolutions climatiques (intensification des sécheresses ou des événements pluvieux extrêmes, hausse des températures...) et anthropiques (modification de l'occupation des sols et potentielle déforestation ou artificialisation, augmentation démographique).

Modélisation de l'assèchement dans des réseaux de rivières intermittents par couplage d'un modèle hydrologique spatialisé avec un algorithme de Random Forest

L. Mimeau^a, A. Künne^b, A. Devers^a, F. Branger^a, S. Kralisch^b, C. Lauvernet^a, J.-P. Vidal^a

^aUR RiverLy, INRAE, Villeurbanne, France

^bInstitute of Geography, Friedrich Schiller University Jena, Jena, Germany

Mots-clés: intermittence, changement climatique, Random Forest, modèle hydrologique spatialisé

Le modèle hydrologique J2000 permet de simuler les débits et un ensemble de variables hydrologiques de manière spatialisée dans les bassins versants. Cependant, ce modèle n'intègre pas l'ensemble des processus permettant de simuler un assèchement complet du lit de la rivière. Pour pouvoir étudier l'évolution de l'intermittence sous changement climatique dans 6 réseaux de rivières intermittents européens, le modèle hydrologique J2000 a été couplé avec un modèle de classification Random Forest (RF) entraîné avec des données observées d'intermittence. A partir de variables hydrologiques simulées par J2000, le modèle RF simule l'état d'écoulement (en écoulement ou à sec) pour chaque tronçon de rivière au pas de temps journalier.

Ce poster questionne la capacité du modèle couplé J2000-RF reposant sur un algorithme d'IA à représenter les états d'assèchement des rivières et de prédire des évolutions futures.

Un premier résultat porte sur la sensibilité du modèle aux différentes sources de données d'entraînement (mesures de débits, pièges à photos, sciences participatives, images satellites, expertise locale). Cette analyse de sensibilité montre une variabilité importante de la dynamique saisonnière d'assèchement simulée selon le type de données d'entraînement et montre l'intérêt de combiner les différentes sources de données pour réduire l'incertitude.

Un deuxième résultat porte sur la capacité du modèle à extrapoler des états d'écoulement en dehors de sa période d'entraînement, sous des scénarios de changement climatique. En particulier, on s'intéresse à la possibilité de simuler des transitions d'un régime d'écoulement pérenne vers un régime intermittent dans les tronçons de rivières. Les résultats montrent que le modèle parvient à simuler ce type de points de bascule. Les simulations réalisées avec le scénario SSP5-8.5 montrent une diminution de la proportion de rivières avec écoulement pérenne de 5 à 38 % à l'horizon 2071-2100 dans les 6 sites d'études.

Les modèles hydrogéologiques régionaux permettent-ils de simuler les zones humides et l'intermittence des rivières ?

Exemple avec la plateforme Aquif-FR.

L. Guillaumot^a, S. Munier^b, P. Le Moigne^b, R. Abhervéc, J-P. Vergnes^a, A. Jeantet^b, P. Audigane^a, F. Habets^d

^aWater, Environment, Processes and Analyses Division, BRGM – French Geological Survey, Orléans, France

^bCNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France

^cCentre for Hydrology and Geothermics (CHYN), Université de Neuchâtel, Neuchâtel, Switzerland

^dEcole Normale Supérieure, Institut Pierre Simon Laplace, CNRS, 75005 Paris, France

Mots-clés: modélisation, hydrogéologie, interactions nappe-rivière, intermittence, zones humides

1 Introduction

La protection des rivières et zones humides est essentielle et se doit d'inclure les eaux souterraines étant donné leur importante contribution [1]. De par leur inertie, les aquifères restituent l'eau stockée durant la saison humide de façon diffuse dans le temps et conditionnent la présence d'eau dans les rivières tout au long de l'année. Chaque été en France, une partie du réseau hydrographique s'assèche [2] car n'étant plus supportée ni par le ruissellement ni par les aquifères. Les déficits pluviométriques ainsi que les prélèvements abaissent les niveaux de nappe et par conséquent impactent les eaux de surface [3,4].

Quantifier ces impacts reste difficile en particulier au niveau des cours d'eau en tête de bassin. De manière générale, l'évaluation de la contribution des aquifères dans le temps et l'espace se heurte à la complexité des milieux et au manque de données d'observation. Cette étude évalue la contribution des eaux souterraines aux rivières et zones humides à partir de modèles hydrogéologiques régionaux. Les apports de nappe simulés sont évalués à partir de jeux de données originaux : la localisation des cours d'eau et des zones humides, et l'intermittence des rivières. Ainsi, cette étude explore la relation entre la présence d'eau en surface et la variabilité des niveaux de nappe [5].

2 Matériel et méthodes

2.1 La plateforme de modélisation hydrogéologique Aquif-FR

La plateforme Aquif-FR [6] couvre environ 1/3 de la France hexagonale et la moitié des aquifères français. Aquif-FR vise à estimer et prévoir de façon saisonnière l'état des aquifères via les niveaux de nappe afin d'aider à la prise de décision à l'échelle régionale. Aquif-FR est une chaîne de modélisation (Figure 1) constituée des données météo-rogiques SAFRAN, du modèle de surface SURFEX et de modèles hydrogéologiques régionaux MARTHE et EAUDYSSEE.

Ces modèles hydrogéologiques simulent les niveaux de nappe ainsi que les apports de nappe à la surface via les rivières ou par débordement. Les modèles ont des résolutions spatiales différentes en fonction de la superficie des régions considérées, avec un maillage plus fin autour des rivières. Ainsi, la résolution la plus fine pour chaque modèle hydrogéologique varie de 100 m à 1 km. Les modèles hydrogéologiques ont préalablement été calibrés sur les niveaux de nappe enregistrés dans les piézomètres, et sur les débits de rivière pour certains modèles. Les prélèvements souterrains sont pris en compte à partir de données incomplètes (données annuelles sur quelques années).

2.2 Comparaison entre les apports de nappe simulés et les observations des eaux de surface

La comparaison entre les apports de nappe simulés (1958 – 2022) et les observations de surface repose sur trois jeux de données (Figure 2). Premièrement, la carte du réseau de rivière fournit la localisation des cours d'eau français (BD TOPO). Ainsi, la localisation des cours d'eau est comparée à celle des apports de

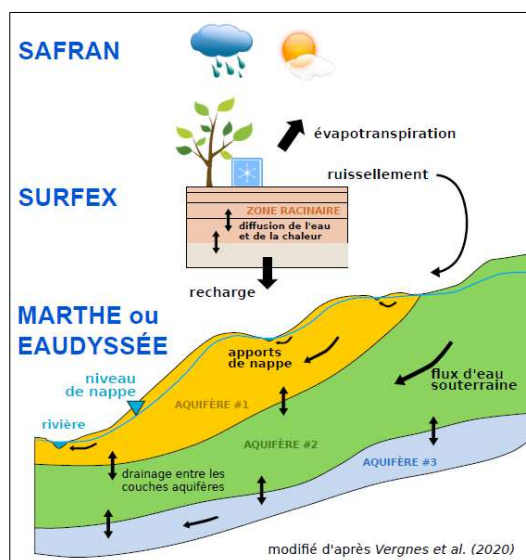


Figure 1 : Schéma de la plateforme Aquif-FR.

nappe. Deuxièmement, les zones RAMSAR et Natura 2000 permettent d'identifier des zones humides d'intérêt, suffisamment grandes et bien délimitées pour être comparées aux zones d'apport de nappe. Troisièmement, le réseau ONDE (Observatoire National Des Etiages) fournit un indicateur de l'intermittence des rivières six mois par an depuis 2011. Le domaine Aqui-FR couvre 1219 stations ONDE permettant ainsi de comparer l'intermittence des rivières avec les variations temporelles des apports de nappe en amont des stations. Pour ce faire, il a été défini pour chaque station un seuil sur le flux d'apport de nappe correspondant au flux en dessous duquel la rivière est à sec.

3 Résultats

La localisation des apports de nappe est cohérente avec les cours d'eau (Figure 2). Les zones humides sélectionnées coïncident elles aussi avec des apports de nappe importants (200 – 1000 mm/an). Ces apports perdurent pendant la saison sèche (5 – 60 mm/mois) et excèdent les pluies efficaces au droit des zones humides soulignant une convergence des flux souterrains. Les comparaisons entre les variations temporelles des apports souterrains (Figure 2) et l'intermittence des cours d'eau sont assez hétérogènes d'une station à l'autre. Environ 30% des stations ONDE montrent des scores de comparaison satisfaisants.

Finalement, ces travaux ouvrent la voie à la prévision de l'état des cours d'eau et zones humides à partir de modèles hydrogéologiques régionaux. Cependant, la résolution spatiale de certains modèles (> 1 km) limite cet exercice de comparaison. Il semble aussi nécessaire d'affiner le réseau de rivière dans les modèles. Enfin, il apparaît crucial de disposer des données de prélèvements qui impactent de façon non-négligeable les apports de nappe.

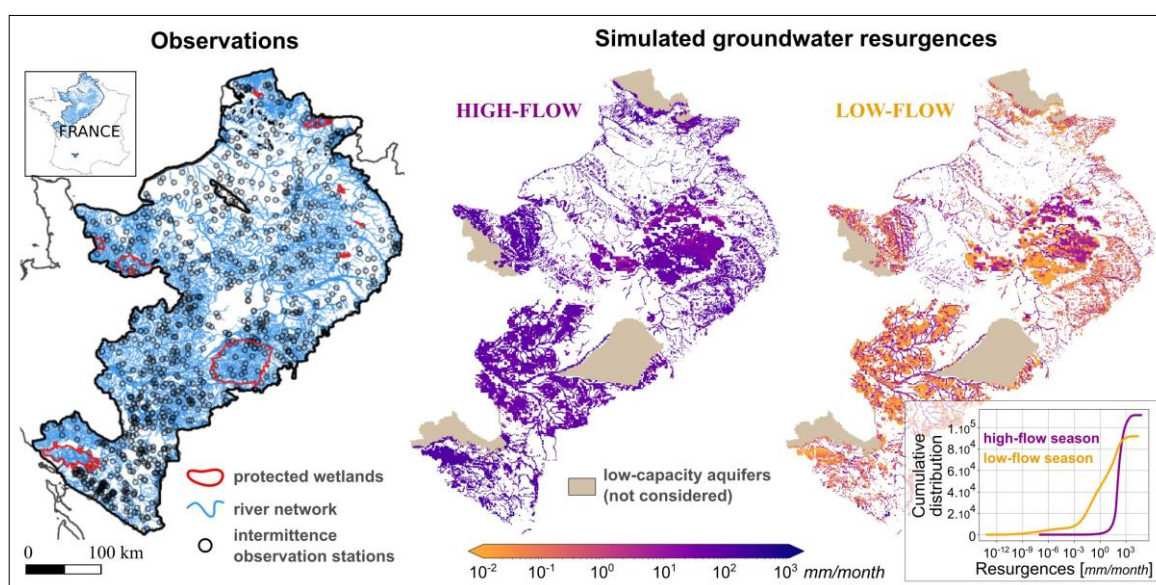


Figure 2 : (A gauche) Les observations de surface utilisées pour évaluer les apports de nappe : le réseau de rivières de la BD TOPO, les zones humides RAMSAR-NATURA 2000, les stations ONDE. (Au milieu et à droite) Les apports de nappes simulés (max. et min.).

Références

- [1] Scanlon, B. R. *et al.* 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future, *Nat. Rev. Earth Environ.* 2023, **4**, 1–15.
- [2] Sauquet, E., Beaufort, A., Sarremejane, R. & Thirel, G. 2021. Predicting flow intermittence in France under climate change, *Hydrol. Sci. J.*, **66**, 2046–2059.
- [3] Guillaumot, L. *et al.* 2022. Coupling a large-scale hydrological model (CWatM v1.1) with a high-resolution groundwater flow model (MODFLOW 6) to assess the impact of irrigation at regional scale, *Geosci. Model Dev.*, **15**, 7099–7120.
- [4] de Graaf, I. E. M., Gleeson, T., (Rens) van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H. & Bierkens, M. F. P. 2019. Environmental flow limits to global groundwater pumping, *Nature*, **574**, 90–94.
- [5] Abhervé, R., Roques, C., Gauvain, A., Longuevergne, L. & Louaisil, S. 2023. Calibration of groundwater seepage against the spatial distribution of the stream network to assess catchment-scale hydraulic properties, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **27**, 3221–3239.
- [6] Vergnes, J. P. *et al.* 2020. The AquiFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: Evaluation over a 60-year period, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **24**, 633–654.

Modélisation des transferts d'énergie et d'eau à l'interface Surface-Atmosphère dans les forêts méditerranéenne en zone karstique

Brune Raynaud--Schell¹, Jérôme Demarty¹, Jordi Etchanchu¹, Chloé Ollivier¹, Jean Kempf², Jean-Marc Limousin², Olivier Marloie³, Albert Olioso³, Jean-Marc Ourcival², Guillaume Simioni³, Véronique Leonardi¹

- ¹Hydrosociences Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, IMT, Montpellier, France
- ²Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Université de Montpellier, Université Paul Valéry-Montpellier 3, CNRS, IRD, Montpellier, France
- ³Ecologie des Forêts Méditerranéennes (URFM), INRAE, Avignon, France

Mots-clés: karst; forêt; climat; sécheresse; modélisation; énergie; hydrologie; évapotranspiration; stress hydrique

1 Introduction

Les sécheresses représentent un facteur de vulnérabilité important au maintien des écosystèmes méditerranéens, et plus particulièrement ceux de type forestier, qui sont majoritaires en milieu karstique. Or, sous les effets des changements globaux, ces milieux sont exposés à des épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents et intenses. De récentes études écophysiologicals et isotopiques ont montré que les racines des arbres étaient capables de s'alimenter assez profondément dans l'épikarst, pour soutenir la transpiration lors des périodes de stress hydrique. Cependant la quantification des stocks et des dynamiques temporelles n'y est pas encore totalement bien établie. Cela nécessite de développer des modélisations adaptées à la complexité du milieu dans le but d'en améliorer la connaissance, à la fois de la recharge des aquifères et du fonctionnement hydrique des forêts.

Les travaux menés dans cette étude vont dans cette direction. Ils s'attachent à proposer, mettre en place et éprouver une modélisation des échanges d'énergie et d'eau à l'interface sol-végétation-atmosphère de type SVAT, adaptée aux milieux forestiers méditerranéens en zone karstique. L'objectif de modélisation est double : i) simuler conjointement les processus d'infiltration diffuse dans le sol (i.e. partie superficielle de la zone racinaire) et d'infiltration rapide dans le réseau de fractures karstiques (i.e. partie profonde de la zone racinaire) ; ii) simuler les processus transpiratoires et d'extraction de l'eau dans toute la zone racinaire. Pour cela, une adaptation du modèle SiSPAT a été développée, puis déployée pour la première fois sur les sites forestiers du réseau ICOS : Font-Blanche (Bouches-du-Rhône, P.I. URFM) et Puéchabon (Hérault, P.I. CEFÉ). Les résultats témoignent du potentiel de la nouvelle version, et de la nécessité de représenter à la fois les écoulements diffus et préférentiels, pour correctement restituer les flux d'énergie et d'eau dans le continuum SVA. Il a été aussi démontré que les infiltrations préférentielles permettent de constituer au long de l'année des réserves d'eau en profondeur qui soutiennent la transpiration du couvert végétal pendant les périodes de stress hydrique. Ce processus affecte aussi de façon significative les composantes de ruissellement et de drainage du bilan hydrologique.

2 Matériel et méthodes

Ce travail s'appuie sur les données des sites de mesures en forêt du réseau ICOS en région méditerranéenne française : Font-Blanche (INRAE Avignon) et Puéchabon (CEFE Montpellier). [3] et [4]

Modélisation à partir du modèle SVAT SiSPAT [1], le but de l'étude est d'adapter le modèle et d'étalonner pour un milieu de forêt en zone karstique.

Nouvelle version du modèle adapté aux karst, présentée aux JMSC 2022 par Demarty et Etchanchu. [2]

Références

[1] Braud, I., A. C. Dantas-Antonino, M. Vauclin, J. L. Thony, et P. Ruelle. « A Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer Model (SiSPAT) Development and Field Verification ». *Journal of Hydrology, Atmospheric and Hydrological Processes at the Soil-Vegetation-Atmosphere Interface*, 166, n° 3 (1 avril 1995): 213-50. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)05085-C](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)05085-C).

[2] Demarty, Jérôme, Jordi Etchanchu, A. Dezetter, Nanée Chahinian, Isabelle Braud, Axel Flinck, I. Mainassara, Chloé Ollivier, Marine Rousseau, et Bernard Cappelaere. « Problématique de modélisation écohydrologique en région méditerranéenne karstique ». Grenoble, 2022. <https://hal.inrae.fr/hal-03899426>.

[3] « Site atelier de Font-Blanche ». <http://www.gip-ecofofor.org/f-ore-t/fontBlanche.php>.

[4] « Site expérimental de Puéchabon ». <https://puechabon.cefe.cnrs.fr/spip.php?article1>.

Disponibilité des ressources en eau actuelles et futures en Afrique Centrale Equatoriale, cas du bassin versant forestier du Nyong au Cameroun

V.B. Ebodé

International Joint Laboratory DYCOFAC, IRGM-UY1-IRD, Yaounde BP 1857, Cameroon

Mots-clés: Nyong, SWAT, modèles climatiques régionaux

1 Introduction

Pour anticiper les catastrophes (sécheresse, inondations...) occasionnées par les forçages environnementaux et réduire leurs impacts sur son économie fragile, l'Afrique subsaharienne a non besoin d'une bonne connaissance de la disponibilité de la ressource en eau actuelle, mais aussi des prévisions hydroclimatiques fiables. L'objectif de cette étude est de quantifier la disponibilité de la ressource en eau dans le bassin du Nyong, prévoir son évolution future (2024-2050) et séparer l'impact de la variabilité climatique (VC) et des changements des modes d'occupation et d'utilisation dans cette évolution. Pour cela, le modèle SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a été utilisé.

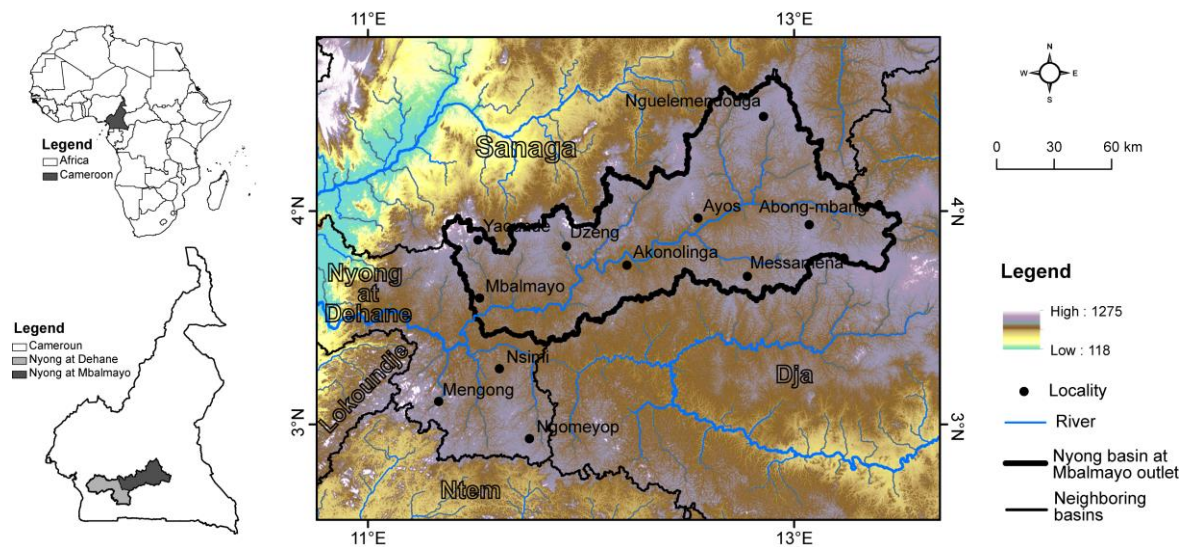


Figure 1 : Localisation du bassin versant du Nyong à Mbalmayo. Source : Ebodé et al. (2024)

2 Matériel et méthodes

Dans cette étude, la disponibilité des ressources en eau a été évaluée sur la période 2002-2019, à partir du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et de certaines données météorologiques et spatiales de référence disponibles pour la région (Merra2, Landsat, etc.). Des prévisions de son évolution ont ensuite été réalisées avec le même outil (SWAT) sur la période 2024-2050, à partir des données de quatre (04) modèles climatiques régionaux (MCR) (CCCma, HIRHAM5, RCA4 et REMO) et les données futures d'occupation et d'utilisation sol simulées à l'aide de la procédure CA-Markov. Pour séparer l'impact de la variabilité climatique (VC) et des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol sur les futures ressources en eau, deux scénarios d'évolution (expérimentations) ont été établis : (1) l'impact de la CV, en associant les données climatiques futures avec les données d'occupation et d'utilisation du sol de la période historique ; (2) l'impact des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol, en combinant les futures cartes d'occupation et d'utilisation du sol avec les données climatiques de la période historique.

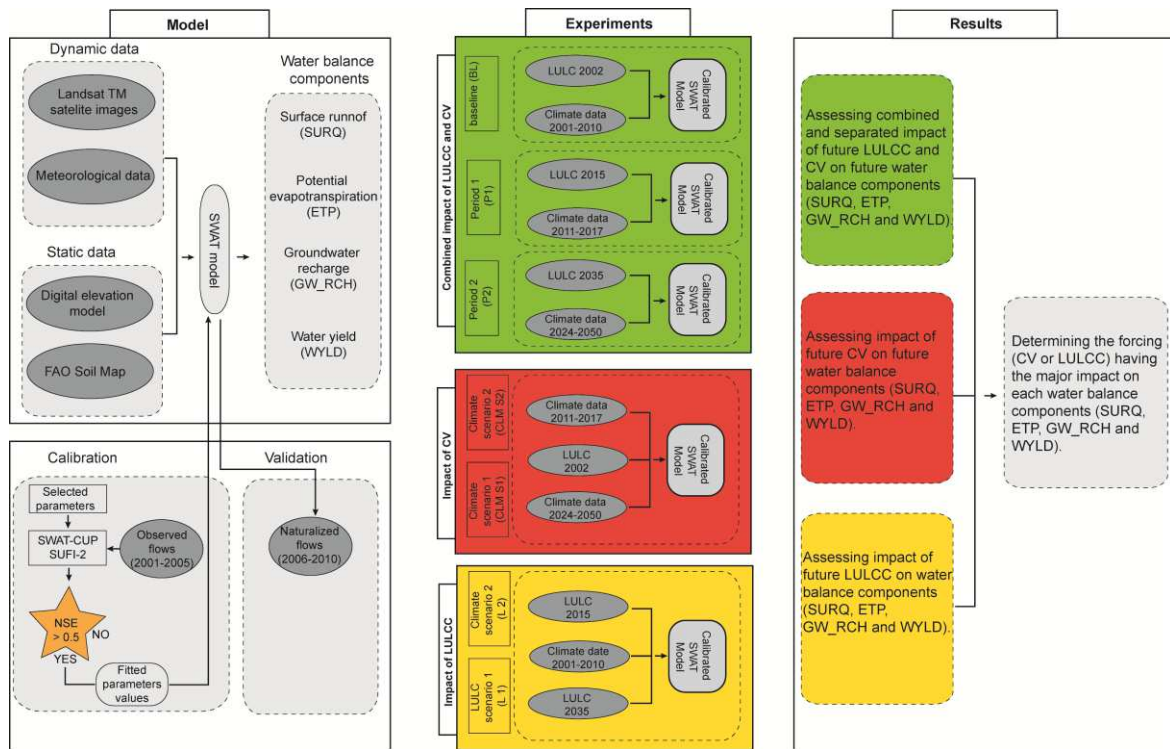


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'étude. CLM: climat ; L: mode d'occupation et d'utilisation du sol ; P: période.

3 Résultats

Les performances de ce modèle sont satisfaisantes en calibration et en validation. Cela se traduit par un R^2 , NSE et KGE supérieurs à 0.64. Des biais inférieurs à -14% attestent aussi de cette bonne performance. Dans le bassin investigué, l'infiltration (GW_RCH), l'évapotranspiration (ETP), le ruissellement (SURQ) et le rendement en eau (WYLD) sont plus importants à l'Est du bassin, probablement du fait des pluies plus abondantes de cette partie. Le débit (FLOWS) et la charge sédimentaire (SED) sont plus importants dans la zone médiane et au Sud-Ouest du bassin, certainement à cause du relief de cette partie qui correspond au fond de vallée. Deux modèles (CCCMA et REMO) prévoient une baisse des ressources en eau dans ce bassin, et deux autres (HIRHAM5 et RCA4) prévoient l'inverse. Cependant, sur la base d'une étude statistique menée sur la période historique (2001-2005), le modèle CCCma semble le plus fiable. Il prévoit sur les deux bassins une baisse des précipitations et des écoulements qui n'excèdent pas respectivement -19% et -18% , quels que soient le scénario d'émission (RCP4.5 ou RCP8.5). La VC est le seul forçage dont l'impact est visible dans la dynamique des écoulements actuels et futurs, compte tenu des changements modestes actuels et futurs observés dans l'évolution des modes d'occupation et d'utilisation du sol. Les résultats de cette étude pourraient contribuer à l'amélioration de la gestion de la ressource en eau dans le bassin étudié et dans la région.

Référence (s)

Ebodé, VB., Ngono, J.Y., Dzana, J.G., Amougou, J.A., Batha, A., Boyomo, T., Ndjela Mbeih, G. 2024. Availability of the current and future water resources in Equatorial Central Africa, case of the Nyong forest catchment in Cameroon, *Environmental Monitoring and Assessment*, 196 (298). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12471-y>

Disponibilité de la ressource en eau actuelle et future dans un bassin versant forestier en voie d'urbanisation accélérée : le cas de la Mefou

V.B. Ebodé

International Joint Laboratory DYCOFAC, IRGM-UY1-IRD, Yaounde BP 1857, Cameroon

Mots-clés: Mefou, SWAT, urbanisation

1 Introduction

Pour anticiper les catastrophes (sécheresse, inondations...) occasionnées par les forçages environnementaux et réduire leurs impacts sur son économie fragile, l'Afrique subsaharienne a non besoin d'une bonne connaissance de la disponibilité de la ressource en eau actuelle, mais aussi des prévisions hydroclimatiques fiables. L'objectif de cette étude est d'évaluer la disponibilité de la ressource en eau actuelle et son évolution future dans un bassin versant forestier en voie d'urbanisation accélérée (Mefou) (Figure 1), mais aussi de séparer l'impact respectif des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol et de la variabilité climatique (VC) sur l'évolution de cette ressource.

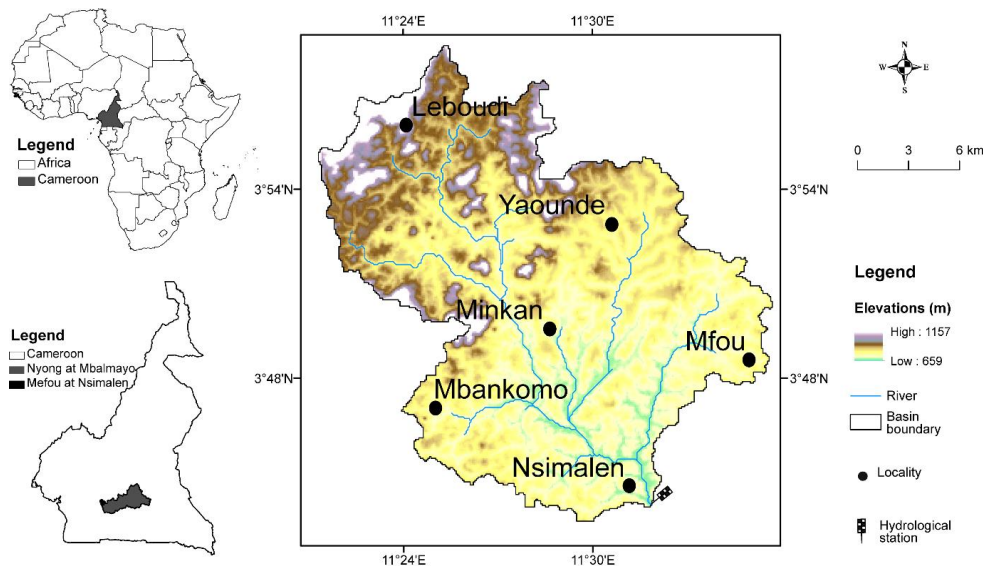


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Mefou à Nsimalen.

2 Matériel et méthodes

Dans cette étude, la disponibilité des ressources en eau a été évaluée sur la période 2002-2019, à partir du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool) et de certaines données météorologiques et spatiales de référence disponibles pour la région (Merra2, Landsat, etc.). Des prévisions de son évolution ont ensuite été réalisées avec le même outil (SWAT) sur deux périodes futures (proche 2024-2035 et moyenne : 2036-205) à partir des données de quatre (04) modèles climatiques régionaux (MCR) (CCCma, HIRHAM5, RCA4 et REMO) et les données futures d'occupation et d'utilisation sol simulées à l'aide de la procédure CA-Markov. Pour séparer l'impact de la VC et des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol sur les futures ressources en eau, deux scénarios d'évolution (expérimentations) ont été établis : (1) l'impact de la CV, en associant les données climatiques futures avec les données d'occupation et d'utilisation du sol de la période historique ; (2) l'impact des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol, en combinant les futures cartes d'occupation et d'utilisation du sol avec les données climatiques de la période historique.

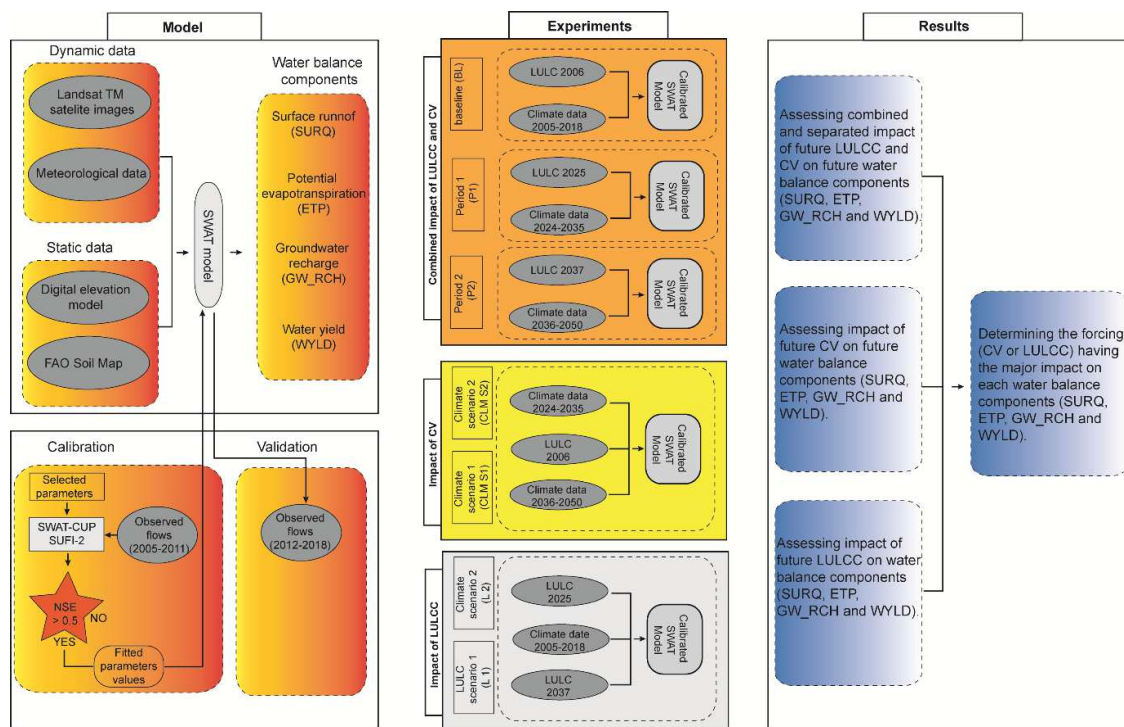


Figure 2 : Schéma conceptuel de l'étude (Ebodé et al., 2024). CLM: climat ; L: mode d'occupation et d'utilisation du sol ; P: période.

3 Résultats

Les performances de ce modèle sont satisfaisantes en calibration et en validation. Cela se traduit par un R^2 et un NSE supérieurs à 0.64. Des biais inférieurs à -7.9% attestent aussi de cette bonne performance. Le modèle RCA4 est cependant celui pour lequel les prévisions semblent être les plus fiables. Une étude statistique menée sur la période historique (2001-2005) a démontré que les débits simulés à partir des données de ce modèle sont plus proches des débits observés. Cette relation statistique se matérialise par un R^2 et un NSE supérieurs 0.56. Concernant les modes d'occupation et d'utilisation du sol, il est prévu que leurs changements futurs soient importants (augmentation des espaces ruisselants et diminution des forêts et des plans d'eau). Ces changements auront un impact significatif sur les écoulements. Ils seront à l'origine de leur augmentation, y compris en cas de diminution modérée des précipitations comme le prévoient les modèles RCA4 et REMO. L'impact des changements des modes d'occupation et d'utilisation du sol sera prépondérant dans la variabilité des écoulements futurs, si les précipitations évoluent suivant les prévisions du modèle le plus fiable (RCA4). Les scores de l'impact de ce forçage sur les variables du bilan hydrologique le prouvent suffisamment. Ils sont supérieurs à ceux de l'impact de la VC pour toutes les variables, excepté l'évapotranspiration potentielle. Les résultats de cette étude pourraient contribuer à l'amélioration de la gestion de la ressource en eau dans les bassins étudiés et dans la région.

Référence (s)

Ebodé, VB., Ngonjo, J.Y., Boyomo, T. 2024. Water resources availability in the Mefou basin, Cameroon: under current and future climate and land use and land cover, *Sustainable Water Resources Management*, 10 (78). <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01055-w>

Contribution de la fonte glaciaire au débit du Rhône avec le modèle hydrologique J2000

O. Champagne^a, A. Lemoine^b, I. Gouttevin^c, S. Cauvy Fraunié^a, T. Condom^d, F. Branger^a

^aINRAE, UR RiverLy, Centre de Lyon-Villeurbanne, France

^bArtelia, Grenoble, France

^cCentre d'Etudes de la Neige, CNRM, Saint-Martin-d'Hères, France

^dIGE, Université Grenoble Alpes, Saint-Martin-d'Hères, France

Mots-clés: Bassin du Rhône, Glaciers, Modèle hydrologique J2000

1 Introduction

Après une année 2022 marquée par une sécheresse multi-saisonnière remarquable, les ressources en eau sont au centre du débat public. Les situations de stress hydrologique risquent d'empirer dans un contexte d'augmentation des températures et d'intensification du cycle hydrologique. Les zones de montagne sont affectées par des problématiques uniques liées à la présence saisonnière de neige, à la fonte des glaciers et au dégel du permafrost. Le bassin du Rhône est fortement lié à ces problématiques, tant les processus à l'œuvre en zone de montagne ont un impact sur les acteurs situés à l'aval. Dans ce contexte, comprendre l'évolution de la contribution de la neige et de la glace au débit du bassin Rhône est crucial. Le but de ces travaux est d'investiguer la contribution glaciaire aux débits passés et futures de différents sous-bassins du Rhône.

La validation du modèle menée sur les différentes têtes de bassins englacées et l'évolution de la contribution de la neige et de la glace au débit seront présentées. Les résultats préliminaires sur la contribution de la fonte de la glace sur les débits en projection future seront aussi montrés. Ce travail contribue à l'avancée des connaissances sur le diagnostic et les projections de la ressource en eau dans un bassin versant majeur.

2 Matériel et méthodes

Le modèle J2000-Rhône est un modèle hydrologique distribué permettant de simuler les débits sur tout le bassin du Rhône [1], [2]. Un module permettant de prendre en compte l'évolution de surface glaciaire dans la simulation de la fonte de la glace a été récemment introduit dans J2000-Rhône [3].

Dans cette étude les données météorologiques SAFRAN ont été utilisées dans J2000-Rhône pour simuler les processus hydrologiques du bassin du Rhône sur la période historique 1989-2022. Les processus hydrologiques ont aussi été projeté sur le future en forçant J2000 avec les données issues de Explore 2.

Les données de surfaces des glaciers ont été estimées par le modèle statistique ALPGM sur la période historique en utilisant les données SAFRAN et sur la période future grâce à Explore 2 [3].

Références

- [Erreur ! Pas de séquence spécifié.] P. Krause, 2001. Das Hydrologische Modellsystem J2000 – Beschreibung und Anwendung in Groen Flugebieten (The Hydrological Modelling System J2000–Documentation and Application in Large River Basins). Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, 29
- [Erreur ! Pas de séquence spécifié.] F. Branger, I. Gouttevin, F. Tilmant, T. Cipriani, C. Barachet, et al.. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône. [Rapport de recherche] irstea. 2016, pp.116.
- [Erreur ! Pas de séquence spécifié.] J. Bolibar. (2020). ALPGM (ALpine Parameterized Glacier Model) v1.1. In The Cryosphere (v1.1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3609136>

Projections de l'étendue des zones humides mondiales en réponse au changement climatique.

Lucas Hardouin¹, Bertrand Decharme¹, Jeanne Colin¹, Christine Delire¹

¹ Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Université de Toulouse, CNRS, Météo-France, Toulouse, France

Mots-clés: Zones Humides, Tourbières, Hydrologie, Cycle du Carbone, Changement Climatique

1 Introduction

Les zones humides sont des milieux où l'eau est présente près de la surface du sol. Cette caractéristique leur permet d'abriter une grande biodiversité et en font des composantes essentielles du système terre [1]. En effet, les zones humides jouent un rôle important dans le cycle hydrologique, sont des lieux d'échanges d'énergie et d'eau avec l'atmosphère, et sont impliqués dans les cycles globaux de l'azote et du carbone. En particulier, les zones humides sont la première source naturelle de méthane, un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le CO₂ [2].

L'étendue des zones humides globales a subi d'importantes pertes durant la période historique, principalement dues aux activités humaines, en particulier en Europe, en Amérique du Nord, en Chine et en Asie du Sud-Est [3]. En raison de l'éloignement géographique et de leur difficulté d'accès pour les empires coloniaux, le nord du Canada et la Sibérie restent relativement préservés. Au contraire, les zones humides des forêts tropicales d'Amérique du Sud et d'Afrique centrale sont désormais également menacées.

La trajectoire future des zones humides devrait être influencée non seulement par les actions humaines directes, mais aussi par le changement climatique. Nous présentons ici notre évaluation du changement induit par le climat sur l'étendue des zones humides globales. Nous discuterons également de l'évolution des principaux complexes de zones humides tropicales et boréales.

Nous utilisons une approche basée sur TOPMODEL [4,5,6], un modèle hydrologique de topographie. Ce modèle est utilisé pour calculer la distribution des zones humides, à partir de projections du contenu en eau liquide du sol. Ces données sont issues de 14 modèles ayant participé à la phase 6 du Projet d'inter-comparaison des modèles couplés (CMIP6).

Notre analyse révèle une diminution de l'étendue des zones humides en Méditerranée, en Amérique centrale et dans le nord de l'Amérique du Sud avec une bonne concordance entre les modèles. Notamment, nous trouvons une baisse de 28 % à long terme (fin du siècle) dans l'ouest du bassin amazonien, selon le scénario SSP370 (forçage radiatif élevé). À l'inverse, l'Afrique centrale et occidentale présente une augmentation de l'étendue des zones humides, avec un bon accord entre les modèles, à l'exception notable du bassin du Congo. Néanmoins, la majeure partie de la zone étudiée (80%) présente des résultats incertains, en raison de projections de changements contradictoires entre les modèles.

En particulier, nous montrons qu'il existe une incertitude significative entre les modèles CMIP6 concernant la teneur en eau liquide du sol dans les hautes latitudes, en raison de la représentation du pergélisol et de son dégel.

En nous concentrant sur les 10 modèles qui semblent le mieux représenter le dégel du pergélisol, nous constatons une faible diminution de la superficie globale (< 5 %), mais une grande diversité spatiale entre les régions avec des tendances à la baisse et à l'augmentation. Nous obtenons un bien meilleur accord entre les modèles dans les régions boréales, et des pertes moyennes de 13 % à long terme au-delà de 50°N.

Selon ces 10 modèles, les grandes zones humides des basses-terres de la baie de Hudson subissent une diminution de 21 %, et les basses-terres de Sibérie occidentale une diminution de 15 % à la fin du siècle, toujours selon le scénario SSP370. Ces régions comprennent une forte densité de tourbières, des zones humides qui ont accumulé de grandes quantités de carbone organique, et qui sont directement menacées par ces changements.

Références

- [1] Gardner, R. C., & Finlayson, C. (2018, October). Global wetland outlook: state of the world's wetlands and their services to people. In *Ramsar convention secretariat* (pp. 2020-5).
- [2] Saunoy, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., ... & Zhuang, Q. (2019). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data Discussions, 2019*, 1-136.
- [3] Fluet-Chouinard, E., Stocker, B. D., Zhang, Z., Malhotra, A., Melton, J. R., Poulter, B., ... & McIntyre, P. B. (2023). Extensive global wetland loss over the past three centuries. *Nature, 614*(7947), 281-286.
- [4] Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal, 24*(1), 43-69.
- [5] Saulnier, G. M., & Datin, R. (2004). Analytical solution to a bias in the TOPMODEL framework balance. *Hydrological Processes, 18*(7), 1195-1218.
- [6] Decharme, B., Douville, H., Boone, A., Habets, F., & Noilhan, J. (2006). Impact of an exponential profile of saturated hydraulic conductivity within the ISBA LSM: simulations over the Rhône basin. *Journal of Hydrometeorology, 7*(1), 61-80.

Calibration et évaluation multi-objectifs du modèle ORCHIDEE sur la France à haute résolution

P. Huang^a, A. Ducharne^a, L. Rinchioso^a, J. Polcher^b, L. Baratgin^b, V. Bastrikov^c, E. Sauquet^d

^aSorbonne Université/CNRS/EPHE, METIS-IPSL, Paris, France

^bCNRS/Sorbonne Université/École Polytechnique, LMD-IPSL, Palaiseau, France

^cScience Partners, Paris, France

^dINRAE, UR RiverLy, Villeurbanne, France

Mots-clés: ORCHIDEE, calibration et évaluation multi-objectifs, haute résolution

1 Introduction

Nous présentons ici une stratégie pour obtenir une simulation hydrologique réaliste sur la France avec le modèle ORCHIDEE. Le modèle est forcé par la réanalyse atmosphérique Safran à une résolution de 8 km et au pas de temps horaire de 1959 à 2020, et par un MNT à haute résolution (environ 1,3 km en France). Chaque maille Safran est décomposée en un graphe d'unités de transfert hydrologique (HTU) basé sur le MNT à haute résolution afin de mieux décrire les mouvements latéraux de l'eau. En particulier, il est possible de localiser avec précision 3507 stations parmi les 4081 stations d'HydroPortail (filtrées pour drainer une zone amont de plus de 64 km²). Une calibration manuelle est effectuée en modifiant certains paramètres d'ORCHIDEE afin de réduire les biais du bilan hydrique simulé par rapport aux produits d'évapotranspiration (les jeux de données GLEAM et FLUXCOM) et aux débits observés d'HydroPortail.

2 Résultats

La simulation finalement retenue est évaluée de manière approfondie à l'aide d'indicateurs classiques de qualité d'ajustement, complétés par une analyse des tendances sur 1785 stations (filtrées pour avoir des observations sur au moins 8 années entières). Par exemple, le biais médian de l'évapotranspiration est de -0,5 % par rapport à GLEAM (-4,3 % par rapport à FLUXCOM), le biais médian du débit est de 6,3 % et le KGE médian du débit transformé (racine carrée) est de 0,59. Les contrastes spatiaux et les tendances temporelles du débit en France sont bien représentés (Figure 1): le signe de la tendance est correctement simulé par ORCHIDEE pour 76,4% des stations, et la significativité pour 62,7% des stations. Malgré des performances insuffisantes dans certaines régions spécifiques (les Alpes et le bassin sédimentaire de la Seine), cette étude offre une vue d'ensemble historique approfondie des ressources en eau et une configuration robuste pour l'analyse de l'impact du changement climatique à l'échelle de la France.

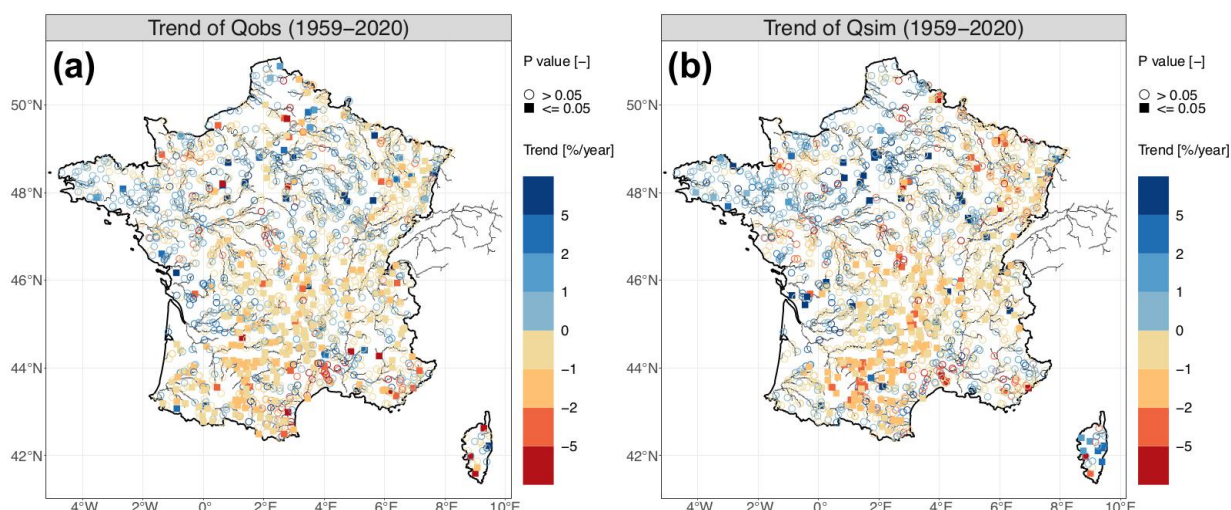


Figure 1 : Distribution spatiale de la tendance du débit observé (a) et de la tendance du débit simulé (b) pour les 1785 stations de 1959 à 2020.

Enhancements in Large-Scale Hydraulic Flow Modeling

M. Carreau^a, M. Parisot^a

^aTeam CARDAMOM, Inria Bordeaux Sud-Ouest, 200 Avenue de la vieille tour, 33405 Talence cedex, France
(manon.carreau@inria.fr, martin.parisot@inria.fr)

Mots-clés: Confined aquifer; Unconfined aquifer; Congested flow; Groundwater/surface water exchanges; Non-hydrostatic flow

Ce travail est consacré à l'introduction de progrès dans la modélisation hydraulique à l'échelle du bassin versant. Dans un premier temps, nous introduisons un modèle amélioré qui établit une connexion transparente entre les aquifères confinés et non confinés [2]. Ce raffinement nécessite la prise en compte de la pression au plafond de l'aquifère captif. Nos analyses révèlent que la variable la plus appropriée pour ce modèle est la pression au niveau du substratum. De cette valeur de pression, nous déduisons à la fois l'élévation de la nappe phréatique dans l'aquifère libre et la pression au plafond de l'aquifère captif.

Par la suite, nous présentons une hiérarchie de modèles qui intègrent la pression hydrodynamique dans le régime de Dupuit-Forchheimer [3]. Ce nouveau modèle présente une meilleure applicabilité, en particulier dans les scénarios caractérisés par des vitesses verticales non négligeables, comme lors des processus de drainage ou d'injection.

Enfin, nous présentons un modèle unifié capable d'englober à la fois les écoulements de surface et de subsurface, ainsi que leurs interactions complexes [1]. En l'absence de l'un de ces milieux, le modèle revient au modèle conventionnel des eaux peu profondes ou au modèle de Dupuit-Forchheimer. Il convient de mentionner que la formulation actuelle n'intègre pas la dynamique de la zone vadose, ce qui rend le modèle moins apte à simuler les processus d'infiltration. Cependant, il fait preuve d'une précision remarquable dans la représentation des phénomènes de résurgence.

Cette recherche a été soutenue par le projet GeoFun ANR-19-CE46-0010.

Références

- [1] M. Carreau, M. Parisot, *A unified modeling of underground-surface hydraulic processes with vertical-integrated approach*, (submitted).
- [2] E. Godlewski, M. Parisot, J. Sainte-Marie and F. Wahl, *Congested shallow water model: roof modeling in free surface flow*, ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2018.
- [3] M. Parisot, *Derivation of a hierarchy hydrodynamic models in the Dupuit-Forchheimer regime*, (submitted).

Comparaison des équations de propagation de débit en rivière dans le modèle CTRIP

Emma Peronnet¹, Bertrand Decharme¹, Simon Munier¹

¹ CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, Toulouse, France.

Mots-clés

Modèle de routage en rivières, Equations de Saint Venant

Résumé

Les modèles de routage en rivières sont des outils importants pour documenter, anticiper et prévoir la dynamique des écoulements en rivière, et appréhender l'évolution de la ressource en eau en contexte de changement climatique. La performance de ces modèles peut évoluer via divers leviers : résoudre des processus physiques plus complexes, les résoudre à des échelles plus fines, améliorer la paramétrisation du modèle, la représentation du réseau hydrographique, la précision des forçages, etc. Notre travail étudie l'apport d'équations physiques plus ou moins complexes sur les performances du modèle de routage CTRIP.

CTRIP (CNRM version of the Total Runoff Integrated Pathways) est le modèle de routage de l'eau en rivières développé au CNRM de Météo France. Il convertit le runoff simulé par le modèle de surface ISBA (Interaction Sol Biosphère Atmosphère) en débit de rivières (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1092>). Il est utilisé pour de nombreuses applications hydrologiques à moyenne et grande échelle. Il est notamment la composante hydrologique des modèles de climat du CNRM, où il se charge du transfert horizontal de l'eau sur les surfaces continentales. Il permet de fermer le bilan d'eau à l'échelle du globe, et décrit les principaux processus du cycle continental de l'eau. En particulier, il décrit la propagation de l'eau dans le réseau de rivières.

Aujourd'hui, CTRIP simule la propagation des débits en rivière en utilisant une approximation cinématique des équations de Saint Venant en régime uniforme. Seule l'équation de conservation de la masse est utilisée, et la vitesse est déduite de l'équation de Manning. La rivière est considérée comme un réservoir dont le débit est linéairement relié à la masse [2]. Ce schéma actuel très simple

est adapté pour de basses résolutions, mais atteint ses limites si on veut gagner en résolution. Aller à plus haute résolution permettrait de mieux résoudre les phénomènes dynamiques et de prendre en compte des processus de petite échelle. Cela donnerait accès à une meilleure représentation du réseau hydrographique, et pourrait permettre un gain de qualité des produits hydrologiques du CNRM. Notre étude vise donc à faire évoluer la représentation simpliste de la propagation des débits en rivière dans CTRIP vers une approche plus complexe.

Dans nos travaux, différentes approximations des équations de Saint-Venant seront testées : équation cinématique en régime non uniforme [6], équation inertielle [1], équation diffusive [4], et équation dynamique. Plusieurs méthodes numériques sont aussi testées pour les résoudre : Euler, Crank-Nicholson, Gauss-Seidel. Ces tests sont effectués dans CTRIP à une résolution de $1/12^\circ$ (≈ 8 km aux moyennes latitudes) en mode offline [5] sur le bassin de l'Adour puis, pour certains, à l'échelle de la France. CTRIP sera forcé par des ruissellements totaux provenant de la chaîne hydrométéorologique SIM2 [3]. Les différentes versions du modèle seront comparées à un réseau dense d'observations in-situ des débits.

References

- [1] P. D. Bates, M. S. Horritt, and T. J. Fewtrell. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of hydrology*, 387(1-2):33–45, 2010.
- [2] B. Decharme, R. Alkama, H. Douville, M. Becker, and A. Cazenave. Global evaluation of the isba-trip continental hydrological system. part ii: Uncertainties in river routing simulation related to flow velocity and groundwater storage. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3):601–617, 2010.
- [3] P. Le Moigne, F. Besson, E. Martin, J. Boé, A. Boone, B. Decharme, P. Etchevers, S. Faroux, F. Habets, M. Lafaysse, et al. The latest improvements with surfex v8. 0 of the safran–isba–modcou hydrometeorological model for france. *Geoscientific Model Development*, 13(9):3925–3946, 2020.
- [4] R. Moussa and C. Bocquillon. Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology*, 186(1-4):1–30, 1996.
- [5] S. Munier and B. Decharme. River network and hydro-geomorphological parameters at 1/12 resolution for global hydrological and climate studies. *Earth System Science Data*, 2022.
- [6] D. Yamazaki, S. Kanae, H. Kim, and T. Oki. A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model. *Water Resources Research*, 47(4), 2011.

Journées de Modélisation des Surfaces Continentalles 2024

19-20 juin 2024

Strasbourg

France