

Sujet de thèse

Apport de la télédétection pour l'optimisation d'un modèle hydrologique semi-distribué

Résumé du sujet de thèse : Ce projet de thèse vise à améliorer la modélisation hydrologique en exploitant des données de télédétection variées (enneigement, humidité du sol, évapotranspiration, etc.). Les modèles hydrologiques, souvent optimisés uniquement par comparaison à des débits, présentent des limites de cohérence interne et de transférabilité. Les données de télédétection peuvent renforcer la robustesse et la fiabilité des simulations, notamment dans les bassins non jaugés. La thèse utilisera les modèles GR (via les outils libres airGR, airGRiwrn), déjà éprouvés à grande échelle en France. Nous faisons l'hypothèse qu'il existe une correspondance entre certaines données de télédétection et variables de modèle, et ainsi que l'on peut obtenir une amélioration des simulations grâce à leur utilisation lors de l'optimisation des paramètres du modèle hydrologique. Le travail se déroulera en plusieurs étapes : revue des données, évaluation des correspondances entre données de télédétection et variables du modèle, optimisation mono- et multi-variables, applications en semi-distribué et enfin réalisation de projections hydroclimatiques. Les analyses couvriront un grand nombre de bassins français, sous conditions d'hydrologie naturelle.

Informations diverses :

Le doctorant ou la doctorante sera hébergé.e au CESBIO (Toulouse).

L'encadrement sera réalisé par Guillaume Thirel (INRAE/CESBIO) et Simon Gascoin (CNRS/CESBIO).

Début de thèse envisagé : octobre 2026.

Un demi-financement est d'ores et déjà acquis. L'autre moitié du financement fera l'objet du dépôt d'une candidature de la part du candidat et de la candidate auprès de l'appel d'offre du CNES (<https://recrutement.cnes.fr/fr/annonces>). Lien direct vers le sujet : <https://recrutement.cnes.fr/fr/annonce/4115001-26-006-contribution-of-remote-sensing-to-hydrological-modeling-optimization-31400-toulouse>. L'appel à candidature est ouvert jusqu'au 13 mars 2026 inclus (00h00).

Il est recommandé de prendre contact avec Guillaume Thirel (guillaume.thirel@inrae.fr) avant de déposer un dossier.

Profil recherché :

Parcours école d'ingénieur.es ou Master 2 recherche dans les domaines suivants :

- Hydrologie, Sciences de la Terre, Sciences environnementales, Modélisation numérique

Compétences requises :

- Programmation, Modélisation, Analyse de données, Connaissance du cycle de l'eau, Rédaction de rapports, Anglais (lecture et rédaction), Travail en équipe, Sciences environnementales

Compétences appréciées :

- Modélisation hydrologique, Télédétection, Utilisation de larges jeux de données

Enjeux scientifiques et socio-économiques auxquels répond le projet

Comme l'a encore montré le projet Explore2 récemment (Sauquet et al., 2025), la distribution spatiale et temporelle des ressources en eau est grandement affectée par le changement climatique. Ce projet a aussi mis en avant la contribution forte des modèles hydrologiques à l'incertitude totale des projections hydrologiques pour les étiages et modérée pour les débits moyens annuels (Evin et al., 2025). Or, ces modèles constituent des outils importants pour la recherche et la gestion de l'eau, où ils sont utilisés pour la planification des ressources en eau, l'évaluation des impacts du changement climatique, la prévision des crues et sécheresses. Si, traditionnellement, les paramètres des modèles hydrologiques sont optimisés en comparaison à des séries temporelles de débits seules (e.g. Thirel et al., 2025), la multiplication de sources de données alternatives ouvre de nombreuses perspectives. Wagner et al. (2025) ont par exemple publié une revue des données disponibles et proposé des pistes de bonne utilisation de ces données. Ainsi, un éventail assez large des diverses composantes du cycle de l'eau est désormais accessible via les données de télédétection, comme l'enneigement, l'humidité du sol, ou l'évapotranspiration, même si la qualité et la disponibilité des données varie selon la variable d'intérêt et les conditions climatiques ou géologiques.

Pour cette thèse, nous proposons d'explorer l'utilisation de données de télédétection de sources multiples à des fins de diagnostic de la modélisation hydrologique, et de son amélioration via leur utilisation pour l'optimisation des paramètres d'un modèle hydrologique GR semi-distribué. Nous réaliserons des analyses multi-variables/multi-données et à une échelle large, sur de nombreux bassins de France métropolitaine, afin de dégager des conclusions qui ne soient pas spécifiques à une source de données ou un bassin versant. Par ailleurs, on cherchera à assurer une cohérence accrue entre les différents flux et variables internes de ce modèle et évaluerons l'apport à la robustesse du modèle hydrologique. Nous travaillerons dans le cadre d'une hydrologie « naturelle », c'est-à-dire peu influencée par des actions anthropiques.

Etat de l'art scientifique

L'évaluation et l'optimisation des paramètres des modèles hydrologiques reposent principalement sur des données mesurées relatives au débit des cours d'eau (Beven, 2011). Cependant, de nombreuses études ont montré qu'un modèle performant pour le débit des cours d'eau ne se traduit pas nécessairement par des simulations fiables des stocks ou des flux hydrologiques au-delà du débit des cours d'eau (Bouaziz et al., 2021). Par conséquent, l'évaluation et l'optimisation multivariées sont un moyen d'améliorer la cohérence des processus et de réduire l'incertitude des paramètres. La cohérence des processus est particulièrement importante si les modèles sont destinés à la compréhension des processus ou à réaliser des projections hydroclimatiques. De plus, dans les régions et les périodes où le manque de mesures du débit des cours d'eau rend difficile l'application des modèles (problématique du non jaugé), d'autres variables hydrologiques peuvent être utilisées pour l'évaluation et l'optimisation des modèles.

Ces dernières années, un nombre croissant de données concernant les variables hydrologiques sont devenues disponibles, notamment issues de la télédétection (Lettenmaier et al., 2015). Bien que les avantages de l'évaluation et de l'optimisation multivariées soient bien connus, de nombreuses

études s'appuient encore sur une optimisation visant une variable unique, le débit. Si certaines variables issues de données de télédétection ont su prouver leur apport pour l'hydrologie, d'autres variables demeurent moins valorisables. Nous en faisons un tour d'horizon non exhaustif ci-dessous, en partie en nous basant sur Wagner et al. (2025) et nos expériences personnelles :

- Fraction de couvert neigeux : c'est une variable largement utilisée (cf Riboust et al., 2019), notamment celle issue des capteurs MODIS, en raison de son archive (plus de 20 ans), de sa bonne résolution (500 m), et de son pas de temps quotidien. Elle ne renseigne pas sur la quantité de neige et est dégradée en cas de nuages ;
- Quantité de neige (hauteur ou équivalent en eau du manteau neigeux) : la résolution de ces données est plus faible, et l'incertitude sur ces données est encore considérable, rendant leur utilisation difficile ;
- Humidité du sol : les satellites renseignant l'humidité du sol sont nombreux (SMOS, ASCAT, AMSR...), et la plupart ont une fréquence de passage journalière ou presque. L'enjeu est plutôt de réussir à identifier dans les modèles la variable correspondant à la mesure, qui le plus souvent correspond aux premiers cm de sol. La faible résolution de ces données peut aussi représenter un problème ;
- Contenu en eau total (capteur GRACE) : la résolution spatiale de ces données est grossière, la fréquence de passage mensuelle, mais l'archive est longue (depuis 2002), permettant l'analyse de variations interannuelles du stock d'eau à grande échelle ;
- Evapotranspiration : les capteurs utilisés sont nombreux (MODIS, GLEAM) et anciens (2000 pour MODIS, 1980 pour GLEAM), avec des fréquences allant de 1 à 8 j, mais aussi des biais parfois importants ou une information inexistante en cas de nuages. Les produits proposés peuvent être dérivés de données thermiques ou d'un modèle de bilan en eau. Des données issues de la mission TRISHNA pilotée par le CESBIO et lancée en 2027 devraient bientôt être disponibles ;
- Hauteurs d'eau : le satellite SWOT (cf outil HydroWeb) fournit des données altimétriques environ une fois par mois. En raison des caractéristiques du capteur (il faut disposer d'une certaine largeur du cours d'eau), et de l'incapacité de la plupart des modèles à simuler les hauteurs d'eau, l'utilisation de ces données n'est pas commune pour la communauté hydrologique en France. Un intérêt de SWOT peut aussi résider dans sa capacité à mesurer des hauteurs de lacs, comme en témoignent les efforts actuels de cartographie du CNES.

Les opportunités liées aux données de télédétection sont donc nombreuses. La thèse de Riboust (2018) a montré l'apport du couvert neigeux MODIS pour optimiser un modèle GR et son modèle de neige CemaNeige en utilisant conjointement débits et couvert neigeux. Le modèle était plus performant sur des périodes indépendantes du fait d'une meilleure cohérence des flux. De plus, Bouaziz et al. (2021) avaient comparé les variables internes de plusieurs modèles hydrologiques à divers produits de télédétection d'enneigement, d'humidité du sol et d'évapotranspiration, montrant une forte diversité de performance des variables internes des modèles hydrologiques malgré une performance en débit proche. Le modèle GR faisait partie des modèles se comportant le mieux. Récemment, Hsu et al. (2025) ont amélioré la cohérence des flux de GR en utilisant des données d'évapotranspiration à des fins d'optimisation des paramètres.

Matériel nécessaire

La thèse se basera sur la famille de modèles hydrologiques GR fournis en accès libre dans le package R airGR (Coron et al., 2017), qui propose aussi un algorithme d'optimisation. Ces modèles, à l'origine disponibles à l'échelle du bassin versant, sont aussi applicables de manière semi-distribuée, c'est-à-dire en découpant les bassins versants en sous-bassins versants selon la topographie et le réseau hydrographique (de Lavenne et al., 2019). Des outils permettant d'appliquer aisément les modèles GR de manière semi-distribuée, sont désormais disponibles en accès libre (package R airGRiwr, Dorchie et al., 2024). Les données hydrologiques (HydroPortail) et météorologiques (SAFRAN) nécessaires sont libres. Le modèle GR semi-distribué a été mis en œuvre avec succès lors d'Explore2 sur 3700 stations en France dont 3100 non jaugées en utilisant airGRiwr pour produire 72 projections climatiques sur 130 années chacune, ainsi que plusieurs optimisations, le tout sur un simple PC de bureau.

Les données de télédétection potentiellement mobilisables sont multiples. Dans le cadre de cette thèse l'objectif n'est pas de développer de nouveaux produits mais de capitaliser sur des produits ou des méthodes opérationnelles afin (1) de se focaliser sur les travaux de modélisation et (2) d'aboutir à une approche transposable hors de la recherche académique. La thèse s'appuiera sur une revue de l'état de l'art et l'expérience des scientifiques du CESBIO pour sélectionner les sources de données pertinentes. En particulier, les produits pré-identifiés sont : surface enneigée (MODIS), humidité du sol à haute résolution, évapotranspiration réelle (MODSPA), stock d'eau total du sol à basse résolution (GRACE), carte d'occupation des sols (OSO), surfaces irriguées.

Programme de recherches

Nous procéderons par étapes de difficulté incrémentale, afin de pouvoir démêler les apports des différentes analyses.

1. **Revue de littérature** des différents produits de télédétection mobilisables et des différentes utilisations qui ont pu en être faites pour l'optimisation de paramètres de modèles hydrologiques ;
2. Sous-question de recherche : Quelles **correspondances entre variables de modèle hydrologique et données de télédétection** ? Ces correspondances sont-elles corrélées à des conditions climatiques, hydrologiques, géologiques ou de couverture de sol ? Pour cela, utilisation de critères de performances et de signatures hydrologiques, se focalisant à la fois sur les données brutes et sur des anomalies ou patrons spatiaux ; indication de produits candidats ;
3. Sous-question de recherche : **Comment utiliser les données de télédétection pour optimiser les paramètres d'un modèle hydrologique non spatialisé et améliorer sa transférabilité temporelle** ? Optimisation en utilisant une seule donnée de télédétection dans un premier temps en plus du débit ; questionnements sur la manière d'optimiser (multi-critère, i.e. critère mettant un certain poids sur le débit et le reste sur les données de télédétection ; ou multi-objectif, i.e. avec un front de Pareto) ; choix du critère d'optimisation (critère numérique classique, signature...) ; quantification de l'apport sur la transférabilité temporelle grâce à du split-sample test (Klemes, 1986) ;
4. Sous-question de recherche : **Comment utiliser les données de télédétection pour optimiser les paramètres d'un modèle hydrologique semi-distribué et améliorer sa transférabilité spatiale** ? Comme ci-dessus, mais à une échelle semi-distribuée et sur du multi-données (l'un puis l'autre puis les 2) ;

5. Sous-question de recherche : **Quelle conséquence de l'utilisation de données de télédétection sur les évolutions liées au changement climatique ?** Si le temps le permet, utiliser les projections climatiques Explore2 (ou des projections plus récentes si disponibles) pour comparer l'impact de ces modèles « améliorés » sur les débits et les variables analysées.

Références bibliographiques

- Beven, K. J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons, 2011.
- Bouaziz, L. J. E., et al.: Behind the scenes of streamflow model performance, *HESS*, 25, 1069–1095, <https://doi.org/10.5194/hess-25-1069-2021>, 2021.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package, *EM&S*, 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>, 2017.
- de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., et al.: A regularization approach to improve the sequential calibration of a semi-distributed hydrological model. *WRR*, 55 (11): 8821–8839. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>, 2019.
- Dorchies, D., Delaigue, O. and Thirel, G. (2024). airGRiwrn: Modeling of Integrated Water Resources Management based on airGR. R package version 0.7.0, <https://doi.org/10.57745/XKN6NC>.
- Evin, G., et al. Uncertainty sources in a large ensemble of hydrological projections: Regional Climate Models and Internal Variability matter, *EGUsphere [preprint]*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2727>, 2025.
- Hsu, S. C., de Lavenne, A., et al. (2025). Extra constraint on actual evaporation in a semi-distributed conceptual model to improve model physical realism. *HSJ*, 70(7), 1143–1156. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2468846>
- Klemes, V. Operational testing of hydrological simulation models. *HSJ*, 31(1), 13–24. [10.1080/02626668609491024](https://doi.org/10.1080/02626668609491024), 1986.
- Lettenmaier, D. P., D. Alsdorf, J. Dozier, G. J. Huffman, M. Pan, and E. F. Wood. “Inroads of Remote Sensing Into Hydrologic Science During the WRR Era.” *WRR* 51, 9: 7309–7342. <https://doi.org/10.1002/2015WR017616>, 2015.
- Riboust, P., Thirel, G., Le Moine, N., Ribstein, P.: Revisiting a simple degree-day model for integrating satellite data: implementation of SWE-SCA hystereses. *JHH*. <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0004>, 67, 1, 70–81, 2019.
- Sauquet, E. et al. A large transient multi-scenario multi-model ensemble of future streamflow and groundwater projections in France, *EGUsphere [preprint]*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1788>, 2025.
- Thirel, G., Santos, L., Delaigue, O., Perrin, C.: On the use of streamflow transformations for hydrological model calibration, *HESS*, 28, 4837–4860, <https://doi.org/10.5194/hess-28-4837-2024>, 2024.
- Wagner, P.D., Duethmann, D., Kiesel, J., et al., The Unexploited Treasures of Hydrological Observations Beyond Streamflow for Catchment Modeling. *WIREs Water*, 12: e70018. <https://doi.org/10.1002/wat2.70018>, 2025.