

Les données spatiales au service du suivi des ressources en eau

Use of spatial data for water resources monitoring

Yoann Aubert^{1*}, Thomas Legay¹, Julien Verdonck¹, Damien Brunel¹, et Stéphane Delichere¹

¹BRL Ingénierie, 1105 av. Pierre Mendès France, 30001 Nîmes, France

Résumé. Les données satellitaires peuvent enrichir le suivi des ressources en eau, quels que soient les objectifs de ce suivi (gestion stratégique des ressources en eau, gestion des ouvrages, prévision des crues et étiages...). Ces données présentent l'avantage de couvrir à pas-de-temps régulier le monde entier, y compris des territoires difficiles d'accès. L'usage de ces données soulève plusieurs questions : comment évaluer leur qualité ? Comment les corriger ? Quelle pertinence au regard des données au sol dont on dispose ? Comment les utiliser pour optimiser le réseau de mesures hydrologiques ? À travers plusieurs projets et avec des partenaires scientifiques et industriels variés (IRD, CNES, CLS, CNRS, CENEAU...) BRL Ingénierie contribue à évaluer et à valoriser l'usage des données satellitaires pour la gestion des ressources en eau à l'échelle d'un bassin-versant (e.g. l'Amazonie) ou d'un territoire (l'Ouganda). L'objectif est de délivrer des indicateurs hydrologiques issus de l'association de modèles hydrologiques, de données *in-situ* et de données satellitaires, intégrés en temps réel dans un système d'information sur l'eau. Cet article présente les possibilités et les limites actuelles de l'utilisation des données satellitaires afin d'optimiser le suivi des ressources en eau.

Abstract. Satellites data can be used for the purpose of water resources management, whatever the objectives pursued (strategical management of water resources, management of hydraulic infrastructures, flood and low flow forecasting...). Satellites data do have the advantage to cover the whole world at regularly time-step, including difficult to access territories. The use of satellite data raises some questions: How to assess their quality? How to correct them? What level of confidence can be placed in those data with respect to in situ data? How can we make the best use of them to optimize the hydrological monitoring network? Through several projects and with a variety of scientific and industrial partners (IRD, CNES, CLS, CNRS, CENEAU...), BRL Engineering contributes to assess and to valorise the use

* Corresponding author: yoann.aubert@brl.fr

of satellites data for water resources management at the scale of a catchment (the Amazon catchment for example) or a territory (Uganda). The objective is to deliver hydrological indicators based on combinations of hydrological models, in-situ data and satellite data, integrated in real time into a water information system. This article presents the current possibilities and limitations of using satellite data to optimize the monitoring of water resources.

1 Introduction

La gestion des ressources en eau (gestion stratégique des ressources en eau, gestion des ouvrages, prévision des crues et étiages ...) nécessite l'utilisation de données hydrométriques et météorologiques. Ces données proviennent principalement de stations in situ. La localisation des stations hydrométriques sur un réseau hydrographique conditionne donc la connaissance des écoulements. Ces écoulements peuvent parfois être estimés par la connaissance des pluies, qui dépend de la localisation de stations météorologiques sur le bassin versant. Malgré les efforts mis en œuvre dans la mise en place et le maintien d'un réseau de stations (hydrométrique ou météorologique), les gestionnaires des ressources en eau font face à de nombreux problèmes :

- L'emplacement des stations n'est pas optimal,
- Le nombre de stations fonctionnelles est insuffisant,
- Les données ne sont pas disponibles sur une période suffisamment longue,
- La qualité des données n'est pas satisfaisante.

Par conséquent, les données hydrométriques sont souvent insuffisantes et sont mêmes en diminution [1]. Elles ne permettent pas de caractériser correctement les débits en des points clés d'un réseau hydrographique.

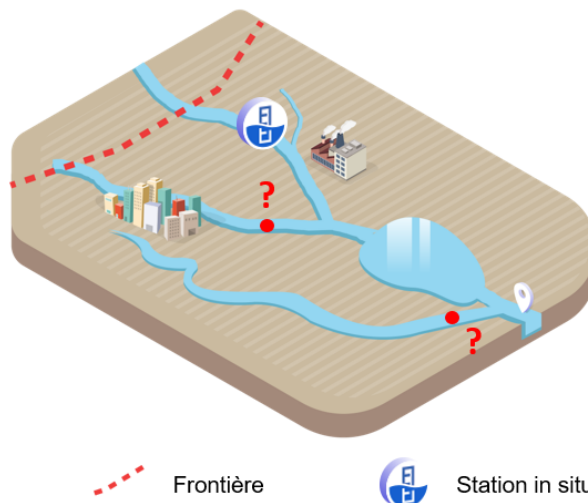


Fig. 1. Schéma d'un réseau hydrographique équipé avec une station hydrométrique. Le débit est connu au droit de la station installée sur le cours d'eau majeur. L'absence de station ne permet pas de connaître le débit sur les autres cours d'eau.

Quant aux données météorologiques, elles sont parfois soit trop peu nombreuses, à la fois historiquement et spatialement, soit difficilement accessibles [2, 3].

Depuis les deux dernières décennies, les données provenant du spatial, permettent de compléter en partie les données hydrométriques et météorologiques *in situ*. Deux domaines d'application du spatial sont particulièrement importants pour l'hydrologie :

- L'altimétrie spatiale : les satellites équipés d'altimètre sont couramment employés pour mesurer la hauteur des plans et d'eau des cours d'eau du globe (Geosat, Topex/Poseïdon, Jason 2 et 3, Sentinel 3A et 3B, SWOT à venir, etc.) [4],
- La météorologie spatiale : différents centres de recherche s'emploient à intégrer l'information satellitaire, à produire des données spatialisées (pluie, ETP, température) puis à les comparer entre elles avec les données au sol [5].

Ce potentiel d'utilisation des données spatiales est particulièrement intéressant pour les grands bassins versants de la planète tels que le Nil, le Congo, le Mékong, etc.

En parallèle, le domaine de l'hydrologie est en pleine expansion et développe de nombreux outils d'analyse, de traitement géostatistique et de modélisation. Ces outils peuvent être utilisés afin de générer des informations à des résolutions spatiales (pixel de 1 km² à plusieurs centaines de km²) et temporelles (de 30 minutes au mensuel) variables même à des endroits sans mesures *in situ*.

Le couplage de données spatiales avec les données *in situ* et différents outils hydrologiques pourrait permettre de répondre en partie au problème d'instrumentation. C'est dans ce cadre que BRL Ingénierie réalise deux projets dont le but est de construire les outils de demain et de valoriser les données spatiales :

- Le projet SmartBasin se concentre sur le réseau hydrographique de l'Ouganda ; il est financé par la Direction Générale du Trésor Public (France) et piloté par BRL Ingénierie.
- Le projet HydroSim a pour objet d'étudier le bassin versant de l'Amazonie ; il est financé par la région Occitanie (France) et piloté par CLS* (France).

Cet article présente uniquement les résultats de HYDROSIM car ceux de SmartBasin sont en cours de finalisation.

2 Objectifs et méthode

2.1 Objectifs

Les satellites équipés d'un altimètre peuvent mesurer la hauteur d'un cours d'eau. Comme tout satellite, ils sont caractérisés par :

- Leur orbite ; la trajectoire du satellite autour de la Terre est fixe.
- Leur fréquence de passage au-dessus d'un même point ; selon le satellite, elle varie de quelques jours (7 jours) à plus d'un mois.

* <https://www.cls.fr/>

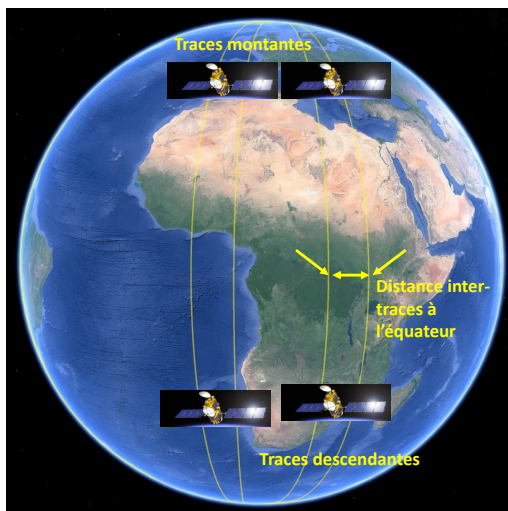


Fig. 2. Trajectoire d'un satellite autour du globe. Notions de traces et d'inter-traces.

La trace au sol d'un satellite correspond à la projection de son orbite sur la surface de la Terre.

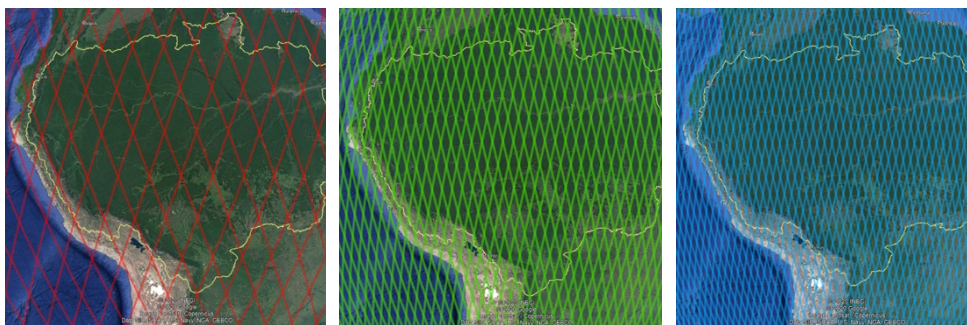


Fig. 3. De gauche à droite : Traces au sol des missions satellites Jason (décembre 2001 – janvier/février 2009) et Jason 2 (juin 2008 – juillet 2017) pour lesquelles des mesures sont disponibles tous les 10 jours ; traces au sol de Sentinel 3A (depuis mars 2016) pour lesquelles des mesures sont disponibles tous les 28 jours ; traces au sol de la mission Envisat (2002 -2012) pour lesquelles des mesures sont disponibles tous les 35 jours.

L'objectif principal des projets SmartBasin et HydroSim est de montrer comment les données spatiales (notamment les données de pluie et d'altimétrie) peuvent permettre de renforcer la connaissance des débits le long d'un réseau hydrographique. En particulier, alors que la donnée altimétrique spatiale isolée semble peu exploitable, son couplage avec des données in situ et des modèles hydrologiques vient enrichir la connaissance sur la ressource en eau.

2.2 Méthode

La méthode utilisée dans les deux projets a suivi les étapes suivantes :

- Identification des stations virtuelles d'intérêt.

Sur la zone d'étude, cette étape vise à identifier les sites où les satellites équipés d'altimètre mesurent correctement la hauteur d'eau du réseau hydrographique.

- Identification des stations virtuelles,
- Correction des données issues de l'altimétrie spatiale,
- Évaluation des données altimétriques.
- Modélisation d'une chronique de débit au droit des stations virtuelles,
Cette étape vise à modéliser le débit et la hauteur d'eau au droit des stations virtuelles. Les données altimétriques viennent ensuite conforter les hauteurs d'eau modélisées.
 - Collecte et analyse de données hydrométriques et météorologiques,
 - Calage de modèles pluie-débit au droit des stations hydrométriques,
 - Régionalisation des paramètres des modèles pluie-débit afin de modéliser une chronique de débit au droit des stations virtuelles,
 - Comparaison des débits modélisés avec les données de l'altimétrie spatiale.
- Développement d'un Système d'Information sur l'Eau pour le bénéficiaire,
Cette étape sert à fournir, en temps réel, des données hydrométriques, des alertes sur le dépassement / sous passage de seuils statistiques et la quantification des masses d'eau sur l'ensemble du bassin versant de l'Amazonie pour l'Agencia Nacional del Aguas (Agence nationale de l'eau au Brésil).
 - Bancarisation des données historiques (limnigrammes, hydrogrammes),
 - Modélisation hydrologique en temps réel,
 - Alertes de dépassement de seuil à la fois en crue et en étiage.

Pour rappel, seuls les résultats du projet HydroSim sont présentés dans cet article.

3 Résultats

3.1 Méthode de construction des chroniques de hauteur d'eau avec des stations virtuelles

3.1.1 Identification des stations virtuelles

Les stations virtuelles (SV) se situent à l'intersection entre la trace au sol d'un satellite et d'une rivière. Dans le cadre du projet HydroSim, les stations virtuelles utilisées sur le bassin de l'Amazonie sont celles identifiées dans la base de données HydroWeb (<http://www.legos.obs-mip.fr/fr/soa/hydrologie/hydroweb/>) développées par le CNES/LEGOS (France).

HydroWeb met à disposition les données de 981 stations virtuelles réparties entre 3 missions satellites : 97 stations virtuelles pour les missions satellites Jason et Jason 2, 143 stations virtuelles pour Sentinel-3A et 741 stations virtuelles pour Envisat.

3.1.2 Correction des données issues de l'altimétrie spatiale

Les informations fournies par les satellites ne peuvent pas être utilisées telles quelles. Des corrections et vérifications doivent d'abord être appliquées afin que la hauteur d'eau mesurée soit pertinente. Nous présentons ci-après certaines de ces corrections.

Nombre de mesures

Toutes les missions altimétriques mesurent la hauteur d'eau « au nadir » (verticalement sous le satellite). Au passage d'un cours d'eau suffisamment large, un satellite réalise plusieurs mesures successives.

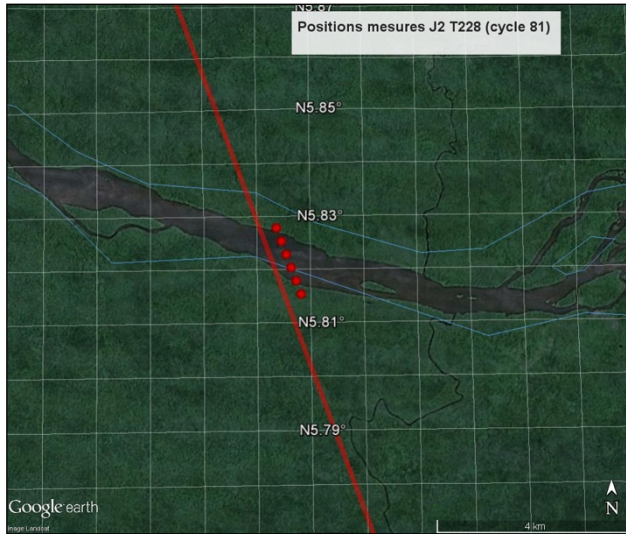


Fig. 4. Positions des mesures individuelles lors d'un passage du satellite JASON 2 au-dessus d'un cours d'eau. Le satellite effectue 6 mesures.

La mesure de la hauteur d'eau par altimétrie spatiale est plus robuste pour des cours d'eau suffisamment large. Un moyen de sélectionner des stations virtuelles mesurant la hauteur de tels cours d'eau consiste à appliquer un premier filtre sur le nombre de mesure.

Ce premier filtre consiste à supprimer une information satellite lorsqu'elle fournit un nombre trop faible de mesures pour chaque passage du satellite au-dessus du cours d'eau. Par exemple, si un satellite effectue moins de 6 mesures sur un cours d'eau, cela peut signifier que le cours d'eau n'est pas suffisamment large. Cette station virtuelle, ne sera pas retenue.

Dérive du satellite

La trace au sol théorique d'un satellite ne correspond pas exactement aux positions effectives des différentes mesures. En effet, les satellites dévient régulièrement de leur trace. Sur le plan longitudinal, cette déviation peut atteindre 2 km.

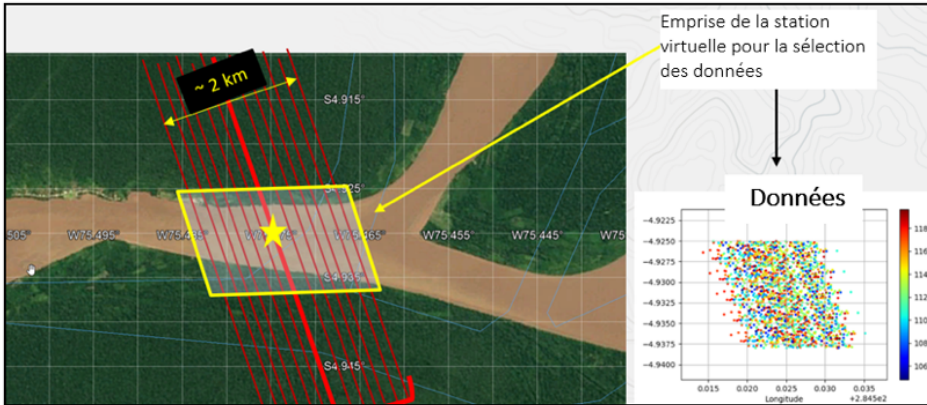


Fig. 5. Représentation de la trace au sol d'un satellite, de la déviation longitudinale de ce satellite par rapport à sa trace au sol théorique. Les mesures de hauteur d'eau sont effectuées sur une zone d'environ 2 km de large. Cette figure correspond à la station virtuelle.

Un second filtre consiste à supprimer une information satellite lorsque la dérive du satellite est trop importante par rapport à sa trace théorique au sol. Ainsi, les mesures situées à plus de 500 m de la trace théorique ne sont pas retenues. Cela évite d'utiliser des mesures de hauteurs d'eau sur une partie du cours d'eau où les écoulements seraient très différents de ceux au droit de la trace au sol théorique.

Analyse de l'écho radar

La mesure d'altimétrie spatiale du satellite est un écho radar dont la forme varie selon la nature du plan d'eau mesuré, l'état de ce plan d'eau (houle), la présence de berges à proximité, etc. La traduction d'un écho-radar en une information de hauteur d'eau se fait par le biais d'algorithmes spécifiques à chaque type d'écho-radar.

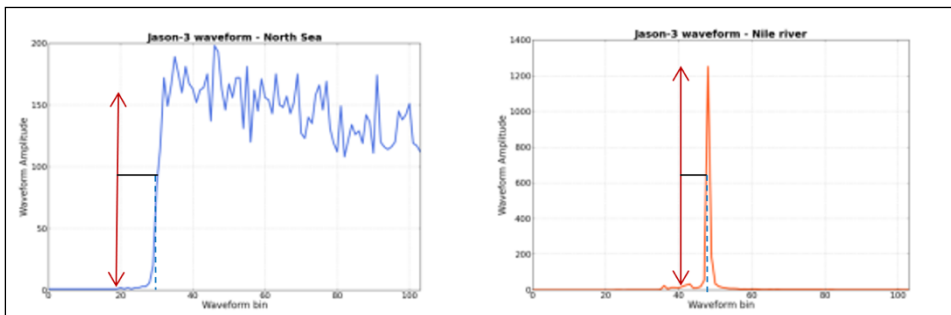


Fig. 6. Échos radar conventionnels obtenu pour un océan (à gauche) ou une rivière (à droite).

Une troisième correction consiste à supprimer une information satellite lorsque l'écho radar donne des informations jugées aberrantes qui ne sont pas représentatives de cours d'eau. Enfin, il est possible d'adapter l'algorithme qui traduit l'écho radar en hauteur d'eau en fonction du type d'écho radar propre à chaque station virtuelle, notamment afin de supprimer une partie du signal souvent brouillé par les berges par exemple.

3.2 Modélisation d'une chronique de débit au droit de stations virtuelles

3.2.1 Collecte et analyse de données hydrométriques et météorologiques

Pluviométrie

Dans le cadre du projet HYDROSIM, les données de plus de 1 200 stations pluviométriques ont été récupérées de différents pays (Brésil, Pérou, Bolivie), et de différentes sources (IRD*, SENAMHI Pérou** et OMM***).

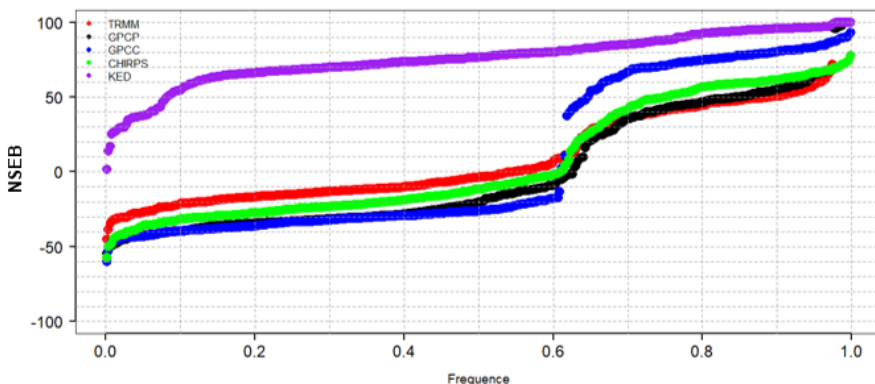
Les observations sur la période 1980-2017 ont été privilégiées ainsi que les stations pluviométriques disposant de plus de 10 ans de données. Toutes ces données ont été critiquées à l'aide de l'outil KRITIKOR (logiciel développé par EDF-DTG****). Les tests suivants ont été réalisés en regroupant les stations sur une région météorologique homogène : détection de valeurs aberrantes, test d'homogénéité d'Alexanderson [6] et test de rupture des courbes de Philippe Bois. Finalement, seulement 413 pluviométriques ont été retenues comme pertinentes sur le bassin de l'Amazon.

Ce nombre de stations est relativement faible (environ 1 station pour 17 000 km²) et ne permet pas d'avoir une bonne connaissance de la répartition spatiale de la pluie.

C'est la raison pour laquelle les pluies spatialisées de bases de données météorologiques issues des satellites, comme TRMM [7], GPM [8], GPCP [9], GPCC [10] et CHIRPS [11], ont été téléchargées et mises en format raster.

Pour privilégier une base de données plutôt qu'une autre, des comparaisons ont été faites avec les stations pluviométriques retenues. Pour cela, des outils spécifiques ont été développés : extraction de la donnée au pixel où se situe la station pluviométrique et comparaison des performances avec les critères Nash-Sutcliffe (NSE) [12] et NSE borné (NSEB) [13] pour plusieurs pas de temps : journalier, décadaire et mensuel.

Par exemple, la figure suivante permet de comparer la fréquence du critère NSEB de comparaison des 413 stations pluviométriques retenues sur le bassin de l'Amazonie avec les pluies spatialisées des bases de données météorologiques issues des satellites : celles qui présentent les meilleures performances se situent au-dessus des autres.



* IRD : Institut de Recherche pour le Développement (<https://www.ird.fr/>)

** SENAMHI Pérou : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (<http://www.senamhi.gob.bo/>)

*** OMM : Organisation Météorologique Mondiale (<https://public.wmo.int/fr>)

**** EDF-DTG : Electricité De France – Division Technique Générale (<https://www.nuclearvalley.com/annuaire/edf-dtg-centre-dingenierie/>)

Fig. 7. Distribution de fréquence du critère NSEB de comparaison des 413 stations pluviométriques retenues sur le bassin de l’Amazone avec les pluies spatialisées des bases de données météorologiques issues des satellites, pas de temps journalier, projet HYDROSIM.

La Fig. 7 montre que 50 % des stations ont des valeurs de NSEB inférieures à -10 % avec les bases de données TRMM, GPCP, GPCC et CHIRPS et que seulement 20 % ont des critères NSEB supérieures à 50 %.

L’analyse de ces résultats a montré qu’une augmentation du pas de temps (ex : passage du journalier au décadaire) induit une meilleure corrélation, ce qui peut témoigner d’un problème d’horodatage.

Ainsi, pour améliorer les grilles de pluie mondiale, il a fallu « débiaiser » les pluies satellites à l’aide de techniques géostatistiques tel que le krigeage avec dérives externes (KED) [14] : les dérives externes étant les données satellitaires.

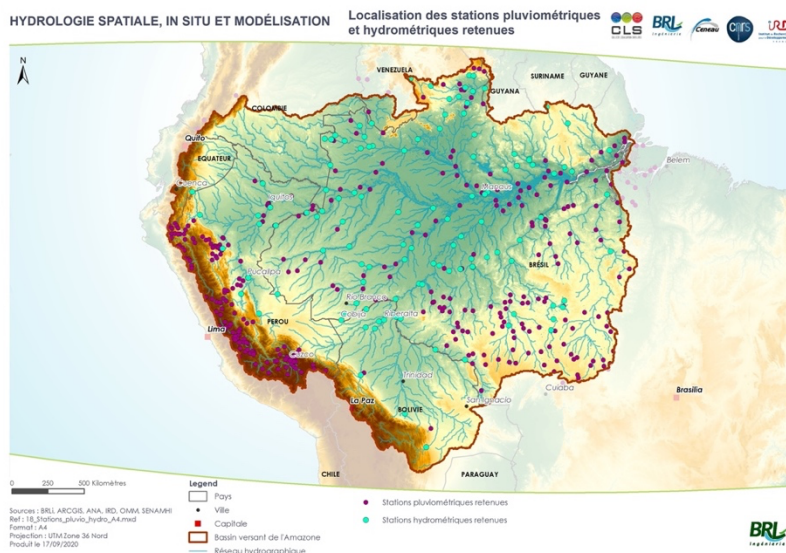
Les résultats KED montrent un gain de performance par rapport aux autres produits. Cette base de données sera utilisée pour caler les modèles pluie-débit pour le projet HYDROSIM.

Évapotranspiration et température

Concernant les données d’évapotranspiration, les données du Climate Research Unit (2018) ont été utilisées [15]. Enfin, pour intégrer dans la modélisation le module neige le gradient de température pour les têtes de bassin de l’Amazone, les données MODIS* - 11 (Terra et Aqua) de température ont été utilisées.

Débits

Sur le bassin de l’Amazone, les chroniques de débits observés proviennent de l’IRD et de leur base de données HYBAM. Toutes les stations ont été analysées et critiquées. Les chroniques de débit ont été analysées visuellement pour voir si elles n’étaient pas influencées par un barrage ou détartées. Ensuite, seules ont été conservées les stations qui disposaient au moins de 5 ans d’observations (pour le calage du modèle hydrologique).



* <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>

Fig. 8. Emplacement des stations météorologiques et hydrométriques du projet HYDROSIM.

Un outil spécifique d'analyse et de comparaison amont-aval, KRITHYDRO, a été développé sous R et interfacé sous SHINY. Au final, 119 stations hydrométriques ont été retenues sur le bassin de l'Amazonie.

3.2.2 Calage de modèles pluie-débit au droit des stations hydrométriques

La modélisation pluie-débit s'appuie sur le package AirGR de l'INRAE** [16-17] dont les modèles pluie-débit sont de la famille de modèles hydrologiques du Génie Rural [18].

Les modèles suivants ont été systématiquement utilisés : GR4J [19], GR5J [20] et GR6J [21] avec comme critère d'optimisation KGE [22].

Pour les bassins de tête de l'Amazonie, situés dans la cordillère des Andes, le module CemaNeige [23-24] a été activé avec un gradient de température moyen de $-0.3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. CemaNeige est un module d'accumulation / fonte de neige basé sur le principe des degrés-jours : l'accumulation / fonte de la neige est exprimée en fonction de l'écart entre la température du jour et une température de base.

Différents tests ont été menés pour choisir la meilleure combinaison entre les modèles, les pluies et le module neige.

3.2.3 Régionalisation des paramètres du modèle pluie-débit

Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux ont permis de classifier les méthodes de régionalisation des modèles pluie-débit [21] ou [25]. Trois approches ont été testées :

- Approche géographique. Pour le calcul de la distance géographique, il a été utilisé celle qui tient compte d'une pondération entre le centroïde et l'exutoire du bassin [26]. Les 5 bassins versants les plus proches sont retenus. Dans le cadre du bassin de l'Amazonie, il a été introduit une règle supplémentaire concernant la taille des bassins versants. Les bassins donneurs sont exclus quand le ratio de superficie dépasse plus de 4 fois la taille du bassin cible. Les moyennes des 5 valeurs des paramètres de calage des modèles pluie-débit sont ensuite calculées. Cette technique se nomme Parameter Averaging [27].
- Approche physique. Les caractéristiques physiographiques analysées pour tous les bassins versants (donneurs et cibles) sont les suivantes : pluie moyenne annuelle, ETP moyenne annuelle, température moyenne annuelle, longueur du réseau hydrographique le plus long, pente moyenne pondérée (données du SRTM*), déphasage Pluie-ETP, altitude moyenne, occupation du sol (données MODIS-MOTA-LandCoverType**), superficie, capacité de rétention en eau (données AWC*** du guide de la FAO). Ces variables sont toutes issues de base de données mondiales (donc analyse reproductible partout dans le monde). Une distance euclidienne est calculée entre les descripteurs normalisés. Comme pour l'approche géographique, il est retenu les 5 bassins qui ont les caractéristiques « physiques » les plus proches et on calcule de la même manière les paramètres de calage des modèles pluie-débit.

** <https://webgr.inrae.fr/logiciels/airgr>

* <http://srtm.csi.cgiar.org/>

** <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>

*** https://swat.tamu.edu/media/69365/ch22_input_sol.pdf

- Approche par Machine Learning. Pour la classification et la prédiction des paramètres des bassins versants non jaugés, le package R Random Forest (RF) [28] a été utilisé afin de trouver des bassins versants aux caractéristiques physiques similaires. Il a été conservé les mêmes variables physiographiques que pour l’approche physique et la même approche décrite dans l’article scientifique [29] des références.

Pour mettre en avant une des trois méthodes de régionalisation, la technique du calage – validation « *Leave-one-out cross validation* » a été utilisée [26]. Compte tenu du nombre relativement faible de stations hydrométriques, cette approche a été considérée comme la plus objective (au lieu par exemple des approches calage / validation sur différents échantillons).

Pour le bassin de l’Amazone, les pluies KED par rapport aux pluies TRMM n’amènent pas un gain important dans la modélisation. Il a été favorisé des grilles de pluies qui soient les plus proches des postes au sol : les pluies KED. Les résultats du modèle GR5J sont meilleurs que GR4J. L’ajout d’un paramètre supplémentaire de calage avec GR6J n’entraîne pas une augmentation importante des performances, voire entraîne une baisse pour certains bassins versants. Le modèle GR6J sera ensuite écarté. Avec les pluies KED, la moyenne des critères de NSE des 119 bassins versants est de 75 % avec le modèle GR5. Le module neige peut être négligé sur la plupart des bassins versants de tête. Les deux méthodes de régionalisation qui ressortent, après les procédures de calage-validation, sont l’approche physique et l’approche par Machine Learning.

3.2.4 Comparaison des débits modélisés avec les données de l’altimétrie spatiale

Sur le bassin de l’Amazone, plus de 981 stations virtuelles ont été étudiées. La figure dessous montre les répartitions spatiales des coefficients de corrélation R^2 entre la hauteur d’eau satellite et le débit modélisé sur le bassin de l’Amazone.

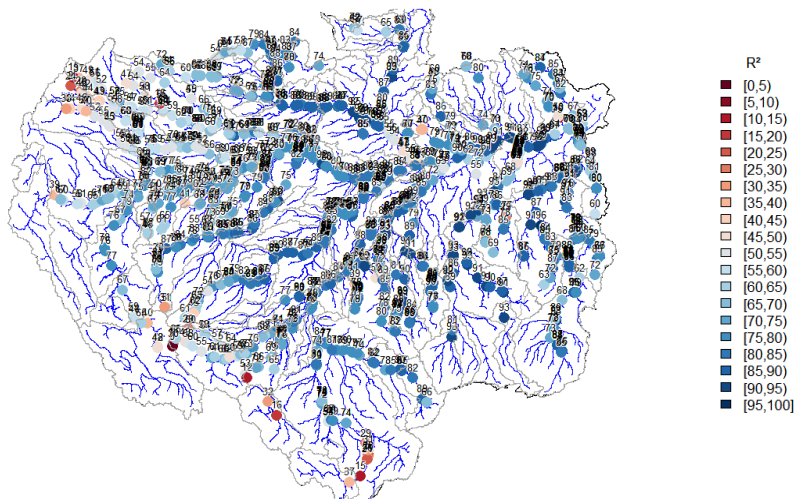


Fig. 9. Répartition spatiale des coefficients de corrélation R^2 (hauteur d’eau satellite – débits modélisés) sur le bassin de l’Amazone.

Les coefficients de corrélations sont assez bons sur le bassin de l’Amazone, compte tenu de l’ensemble des hypothèses et incertitudes. En moyenne, il est de 75 % calculé sur 981 stations virtuelles.

Les coefficients de corrélations les plus faibles sont en majorité en tête de bassin versant : cela peut s'expliquer par les faibles largeurs des cours d'eau où les hauteurs d'eau sont les plus difficiles à estimer.

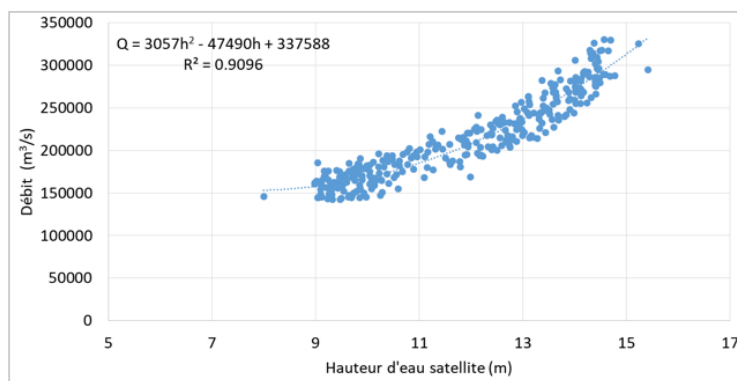


Fig. 10. Corrélation entre les débits modélisés et les hauteurs d'eau satellites – Station amz-amz-0139-01 (S= 4 696 804 km²).

La Figure 10 montre un exemple de corrélation entre la hauteur d'eau mesurée par le satellite et le débit régional du modèle GR. Cette bonne correspondance hauteur d'eau – débit permettrait de construire une courbe de tarage.

4 Système d'Information sur l'Eau (SIE)

Ce projet a permis d'évaluer la ressource en eau sur le fleuve Amazone et ses affluents. Ce paragraphe indique comment ces données produites peuvent / pourront être utilisées par les autorités locales. Les questions sous-jacentes sont :

- Comment faire correspondre les attentes du bénéficiaire avec les données / résultats produits dans le cadre du projet HYDROSIM ?
- Comment mettre en œuvre des modèles hydrologiques en temps réel ?

Pour répondre en partie à ces besoins, BRLi a développé un Système d'Information sur l'Eau (SIE). WIMES* est l'acronyme de Water Information Management Ecosystem & Services.

Cette plateforme permet :

- L'intégration de données de plusieurs formats ;
- La bancarisation de données, la collecte et la critique en temps réel ;
- La modélisation hydrologique en temps réel pour la prévision des crues et des étiages (chaîne de modèles GR) ;
- La modélisation hydraulique.

Les modèles hydrologiques ont été transférés dans WIMES. A l'aide des données de pluie en temps réel IMERG, les modèles hydrologiques fournissent une information hydrologique journalière.

Des réunions avec le bénéficiaire ont permis d'identifier ses besoins en termes de données et d'informations hydrologiques (indicateurs statistiques, seuils, etc.). Ces indicateurs sur

* <https://brli.brl.fr/20-wimes-une-gamme-complete-de-services-pour-l-eau-et-l-environnement-37.html>

l'état hydrologique du fleuve et des rivières du bassin de l'Amazone ont été intégrés dans WIMES (d'autres le seront aussi ultérieurement). Pour l'instant, ce sont :

- Lames d'eau de pluie Global Précipitation Measurement (GPM) ;
- Pluie de bassin versant avec la donnée GPM ;
- Débit dans les cours d'eau au droit des stations in situ et virtuelles à l'aide de la modélisation hydrologique ;
- Alertes : dépassement des seuils de débits de crue ;
- Alertes : sous passage des seuils de débits d'étiage ;
- Quantification des masses d'eau ;
- Quantification et propagation sédimentaire ;
- Récupération des données de hauteur d'eau satellites.

Cette plateforme fournira ces indicateurs hydrologiques au bénéficiaire (ANA) comme le montre la figure 11. Ces indicateurs serviront ensuite à l'aide de prise de décision.

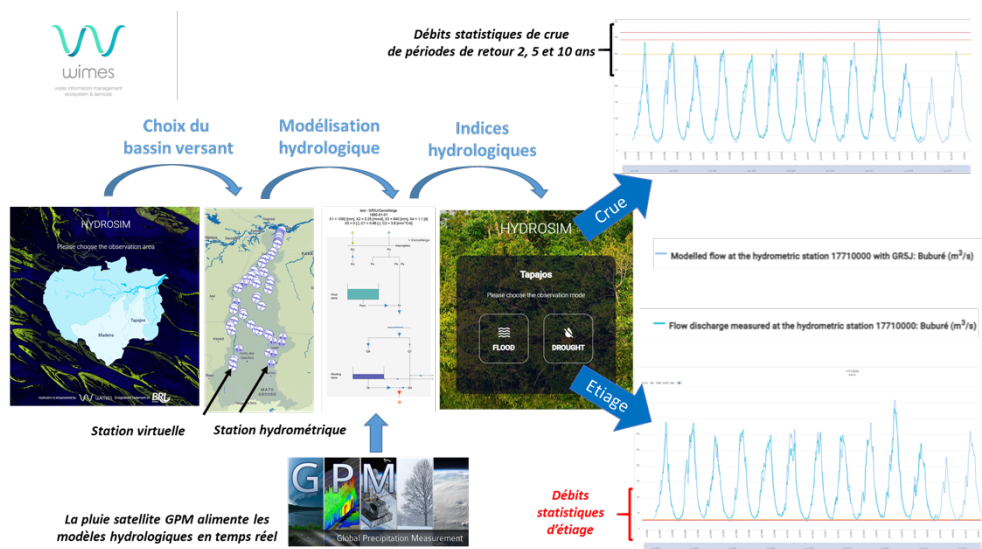


Fig. 11. Mise à disposition de la plateforme WIMES au bénéficiaire ANA.

5 Conclusions et perspectives

Les données satellitaires ont l'avantage de couvrir la terre entière et fournissent des informations météorologique (pluie, température, ETP) et altimétrique régulières et homogènes (mêmes méthodes de mesure) sur des régions avec peu ou pas de mesures in situ. Le projet HydroSim confirme l'intérêt de ces informations, en particulier de l'altimétrie spatiale, pour le suivi des ressources en eau continentales.

Cependant, la technologie spatiale ne peut être utilisée seule et doit être couplée à des mesures in situ et à des outils de modélisation. En particulier, la technologie spatiale est complexe d'utilisation ; la traduction des données spatiales en hauteur d'eau n'est pas automatique et ne peut se faire correctement sans corrélation avec des données *in situ*.

Le projet HydroSim envisage dans un futur proche d'utiliser systématiquement les données d'altimétrie spatiales pour confirmer les résultats de modélisations hydrologiques en temps réel en de nombreux points du réseau. Ils pourront, dans quelques mois, utiliser des informations satellitaires supplémentaires suite au lancement de la mission Surface Water

Ocean Topography (SWOT[®]) avec une résolution temporelle et spatiale beaucoup plus précise que les précédents satellites.

Les outils d'analyse produits dans le cadre de ces deux projets seront probablement utilisés par les hydrologues de demain.

Remerciements

Les résultats que BRLi présentent dans cet article sont issus d'un travail de plusieurs partenaires : CENEAU, CLS, CNES, CNRS, DG-Trésor, IRD et Région Occitanie. Sans eux, nous n'aurions pas pu aller au bout de cette démarche.

Références

1. J. C. Vörösmarty, A. Askew, W. Grabs, R. G. Barry, C. Birkett, P. D. B. Goodison, A. Hall, R. Jenne, L. Kitaev, J. Landwehr, M. Keeler, G. Leavesley, J. Schaake, K. Strzepek, S. S. Sundarvel, K. Takeuchi, F. Webster, Global water data: A newly endangered species, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **82** (5):54–58 (2001)
2. T. Lebel, J.D. Taupin, N. D'Amato, Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel, 1. General rainfall conditions and climatology, *J. Hydrol.* **189**, 74–96 (1997)
3. J. Li, A. Heap, Spatial Interpolation Methods: A Review for Environmental Scientists (2008)
4. A. Paris, Utilisation conjointe de données d'altimétrie satellitaire et de modélisation pour le calcul des débits distribués dans le bassin amazonien, *Hydrologie, Université Paul Sabatier - Toulouse III* (2015)
5. F. Satge, D. D. Defrance, B. Sultan, M-P. Bonnet, F. Seyler, N. Rouché, F. Pierron, J. E. Paturel, Evaluation of 23 gridded precipitation datasets across West Africa, *Journal of Hydrology* (2019)
6. H. Alexandersson, A homogeneity test applied to precipitation data. *J. Climatol.* **6**, 661–675 (1986)
7. G. J. Huffman, R. F. Adler, D. T. Bolvin, E. J. Nelkin, The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA), *Satell. Rainfall Appl. Surf. Hydrol.* 3–22 (2010)
8. G. Huffman, D. Bolvin, D. Braithwaite, K. Hsu, R. Joyce, C. Kidd, E. J. Nelkin, S. Sorroshian, J. Tan, P. Xie, Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) (2018)
9. G. Huffman, J. R. F. Adler, M. M. Morrissey, S. Curtis, R. Joyce, B. McGavock, J. Susskind, Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations, *J. Hydrometeorol.*, **2**, 36-50 (2001)
10. U. Schneider, Becker, A. Finger, GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle, *Theor Appl Climatol* **115**, 15–40 (2014)
11. C. Funk, A. Verdin, J. Michaelsen, P. Peterson, P. Pedreros, G. Husak, 2015, A global satellite-assisted precipitation climatology, *Earth Syst. Sci. Data* **7**, 275–287 (2015)

* <https://swot.jpl.nasa.gov/>

12. J. E. Nash, J. V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models, Part ia discussion of principles, *Journal of hydrology*, **10(3)**, 282–290 (1970)
13. T. Mathevet, C. Michel, V. Andréassian, C. Perrin, C. A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins, *IAHS-AISH Publication*. **307**, 211-219 (2006)
14. S. Baillargeon, S. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations (2005)
15. I. Harris, T.J. Osborn, P. Jones, D. Lister, Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset, *Sci Data* **7**, 109 (2020)
16. L. Coron, G. Thirel, O. Delaigue, C. Perrin, V. Andréassian, The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R Package, *Environmental Modelling and Software*, **94**, 166–171 (2017)
17. L. Coron, O. Delaigue, G. Thirel, C. Perrin, C. Michel, airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling, R package version X.X.X.X.
18. C. Michel, Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle à un paramètre ? *La Houille Blanche* **1**, 39–44 (1983)
19. C. Perrin, C. Michel, V. Andréassian, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology* **279**, 275–289 (2003)
20. N. Le Moine, N. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Ph.D. thesis (2008)
21. C. Poncelet, Du bassin au paramètre : jusqu'ou peut-on régionaliser un modèle hydrologique conceptuel ? *Hydrologie*, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (2016)
22. V. K. Gupta, S. Sorooshian, The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models, *Journal of Hydrology* **81**, 57–77 (1985)
23. A. Valéry, V. Andréassian, C. Perrin, 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 – Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments, *Journal of Hydrology*, **517(0)**, 1166-1175 (2014)
24. A. Valéry, V. Andréassian, C. Perrin, 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments, *Journal of Hydrology*, **517(0)** (2014)
25. J. Odry, Prédétermination des débits de crues extrêmes en sites non jaugés, Régionalisation de la méthode par simulation SHYREG, Sciences de l'environnement, Doctorat géosciences de l'environnement, Aix-Marseille Université (2017)
26. L. Lebecherel, Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique, Ph.D. thesis, AgroParisTech, Paris (2015)
27. L. Oudin, V. Andréassian, C. Perrin, C. Michel, N. Le Moine, Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments, A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resources Research* **44** (2008)
28. L. Breiman, Random Forests, *Mach, Learn*, **45**, 5–32 (2001)
29. M. Saadi, L. Oudin, P. Ribstein, Random Forest Ability in Regionalizing Hourly Hydrological Model Parameters, *Water*, **11**, 1540 (2019)