



HAL
open science

Mise au point et test d'une méthodologie pour calculer les débits à partir de mesures satellitaires altimétriques sur le Congo et l'Oubangui

Pierre-Olivier Malaterre, Hind Oubanas, Igor Gejadze, David Dorchies, Felix Billaud

► To cite this version:

Pierre-Olivier Malaterre, Hind Oubanas, Igor Gejadze, David Dorchies, Felix Billaud. Mise au point et test d'une méthodologie pour calculer les débits à partir de mesures satellitaires altimétriques sur le Congo et l'Oubangui. 1, inrae; Umr G-Eau, 361 rue Jean François Breton, 34090 Montpellier. 2019. hal-04889053

HAL Id: hal-04889053

<https://hal.science/hal-04889053v1>

Submitted on 2 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Compte rendu de l'Action D.6.12

Version Finale

Date : 26/02/2019

"Mise au point et test d'une méthodologie pour calculer les débits à partir de mesures satellitaires altimétriques sur le Congo et l'Oubangui"

Pierre-Olivier Malaterre
Hind Oubanas, Igor Gejadze
Felix Billaud, David Dorchies

Irstea, UMR G-eau
Montpellier, France



"Mayi eninganaka pamba te"

*Proverbe en lingala signifiant "l'eau ne bouge pas sans raison"
(Il y a souvent une cause cachée derrière un évènement)*

Table des matières

1	Cadre général de la convention.....	5
1.1	Objectif.....	5
1.2	Phases.....	5
1.3	Livrables.....	5
2	Introduction.....	7
2.1	Méthode basée sur des courbes de tarages construites à partir de données in-situ.....	8
2.2	Méthode basée sur des courbes de tarages construites à partir de modèles hydrologiques (ex: MGB).....	11
2.3	Méthode basée sur des courbes de tarages construites à partir de modèles hydrauliques (ex: SIC).....	12
3	Etat des lieux, données disponibles (Livrable #1)	16
3.1	Congo.....	16
3.1.1	Données hydrologiques.....	16
3.1.2	Données géométriques	21
3.1.3	Données altimétriques	28
3.1.4	Données de stations in-situ	36
3.2	Oubangui	38
3.2.1	Données hydrologiques.....	39
3.2.2	Données géométriques	41
3.2.3	Données altimétriques	44
3.2.4	Données de stations in-situ	48
4	Algorithme et Résultats (Livrable #2).....	51
4.1	Congo.....	61
4.2	Oubangui	66
5	Comparaison des résultats avec données in-situ (Livrable #3).....	70
5.1	Congo.....	70
5.1.1	Mesures ADCP	70
5.1.2	Vitesses de propagation	74
5.2	Oubangui	77
6	Méthode de calcul et première version de l'outil (Livrable #4)	79
6.1	Congo.....	79
6.2	Oubangui	83
7	Recommandations et perspectives (Livrable #5)	86

7.1	Possibilités d'améliorations de l'algorithme et possibilités de développement de l'outil....	86
7.2	Pistes pour l'ajout de nouvelles stations virtuelles, liées à d'autres missions satellitaires altimétriques classiques (en lien avec le LEGOS et CLS).....	88
7.3	Analyse des trajectoires (traces) de la future mission SWOT sur les zones étudiées (fréquence temporelle, couverture géographique)	88
7.4	Disponibilité de nouvelles bathymétries (projets CRuHM, PANAVAL)	88
8	Conclusion	88

1 Cadre général de la convention

1.1 Objectif

La finalité de ce projet est le développement et le test d'une chaîne de traitement originale des données satellitaires altimétriques permettant de calculer les débits transitant dans le fleuve Congo et la rivière Oubangui. Pour la partie fleuve Congo, la zone retenue couvre les 1809 km à l'amont de Kinshasa (Pool de Malebo), soit un peu plus que les 1700 km prévus initialement. Pour la partie rivière Oubangui, la partie concernée couvre les 1160 km situés à l'amont de sa confluence (lieu-dit de Djoundou pour être plus précis) avec le Congo, soit un peu plus que les 1076 km prévus initialement. Ce projet contribuera à fournir des données hydrologiques et hydrauliques en vue de produire, par la suite, des services opérationnels répondant aux besoins des usagers (y compris à travers les données spatiales), conformément à l'article 8 de l'Additif à l'Accord créant la CICOS.

1.2 Phases

Comme indiqué dans la convention, le travail est organisé en plusieurs phases (on reprend ici les termes de la convention initiale) :

- Rassembler les données nécessaires disponibles sur la zone étudiée ;
- Tester l'algorithme de débit « Irstea », soit séparément sur Oubangui puis Congo, soit simultanément sur le système ramifié Congo + Oubangui ; Reconstituer simultanément Qamont, Zb (cotes du fond) et Ks (Coefficient de Strickler), ou uniquement Qamont et Zb, suivant les propriétés d'observabilité ;
- Améliorer l'algorithme sur des aspects non encore testés : Réseau ramifié (Oubangui + Congo), chenal avec des îles et des parties en tresse, apports ponctuels des affluents, données altimétriques multi-mission ;
- Analyser les résultats ;
- Fournir au Secrétariat Général de la CICOS une méthode - et, si pertinent, une maquette de l'outil - basée sur l'algorithme, pour calculer le débit à partir de données d'altimétrie spatiale, en précisant les incertitudes ;

1.3 Livrables

Les 5 livrables à fournir constitueront les 5 chapitres principaux de ce document de synthèse. Conformément aux termes de la convention leur contenu est le suivant (on reprend ici les termes de la convention initiale) :

1. Un état des lieux complet de la situation concernant les Stations Virtuelles (a priori environ 68 sur le Congo et 28 sur l'Oubangui) et la période retenue : a priori mi 2008 - mi 2010 (Envisat & Jason 2), ou 2013-2014 (SARAL, Jason 2), ou fin 2016 - mi 2017 (Sentinelle 3A, Jason 2 décalé, Jason 3, SARAL, mais ces données ne sont pas encore traitées - à valider avec le LEGOS). Les incertitudes pour les diverses stations virtuelles seront également déterminées (à priori de l'ordre de 30 à 60 cm). La bathymétrie simplifiée trapézoïdale équivalente ainsi que les coefficients de frottement initiaux

seront également détaillés. Ces résultats donneront lieu à un livrable #1 sous la forme d'un rapport d'état des lieux ;

2. Rapport décrivant les résultats des tests de l'algorithme sur les données précédemment détaillées (livrable #2) ;
3. Une comparaison des résultats obtenus précédemment avec les données in-situ existantes pour la période analysée sera effectuée ; (livrable #3, optionnel)
4. Une méthode de calcul exploitable par le Secrétariat Général de la CICOS pour obtenir le débit à partir d'une donnée d'altimétrie spatiale, ainsi qu'une première version d'outil (livrable #4)
5. Des recommandations seront faites sur les suites possibles à cette étude (livrable #5)
 - a) Possibilités d'améliorations de l'algorithme et possibilités de développement de l'outil,
 - b) Pistes pour l'ajout de nouvelles stations virtuelles, liées à d'autres missions satellitaires altimétriques classiques (en lien avec le LEGOS et CLS),
 - c) Analyse des trajectoires (traces) de la future mission SWOT sur les zones étudiées (fréquence temporelle, couverture géographique),
 - d) Disponibilité de nouvelles bathymétries (projets CRuHM, PANAV).

2 Introduction

Le but de cette action D.6.12 est de développer et tester une méthode pour calculer des débits Q des fleuves à partir d'informations de cotes Z de l'eau mesurées à partir de satellites. Les satellites considérés sont les satellites d'altimétrie existant (Envisat, Saral, Jason, Sentinel par exemple), ainsi que le satellite de la future mission SWOT (lancement prévu pour fin 2021). Un certain nombre de méthodes permettent de calculer des débits à partir de cotes. Nous pouvons les rassembler en 3 groupes, avec leurs avantages et inconvénients.

Ces 3 groupes de méthodes font intervenir à un moment donné une courbe de tarage $Q(Z)$, soit comme but ultime, soit comme une étape intermédiaire de l'algorithme. Cela provient de l'observation ancienne que le débit Q est en général une fonction croissante, bi-univoque de la cote Z . Cette fonction peut souvent être approximée par une fonction polynomiale de degré 2, ou par une fonction puissance. En fait cela n'est pas toujours le cas, par exemple du fait des phénomènes d'hystérésis, qui font que le débit Q dépend non seulement de la cote Z mais également de la pente locale de l'eau dZ/dx . En effet, pour une même cote Z , en montée ($dQ/dt > 0$) ou descente de crue ($dQ/dt < 0$), on n'obtiendra pas le même débit Q (le débit sera plus faible en descente qu'en montée de crue). Cette pente locale dZ/dx est rarement connue, et les méthodes basées sur des courbes de tarage négligent donc généralement ce phénomène d'hystérésis. Les stations in-situ sont généralement choisies à des endroits où ces phénomènes d'hystérésis sont faibles, c'est-à-dire où les influences aval sont négligeables. Mais, avec l'altimétrie spatiale, les emplacements des stations virtuelles (SV) ne sont pas choisis, mais dépendent des trajectoires des satellites optimisées pour une couverture spatiale et une répétitivité temporelle choisie en fonction des objectifs de la mission. Le satellite SWOT fournira ces pentes locales et les algorithmes de débit pourront donc intégrer ces effets. Mais les missions actuelles ou récentes (Envisat, Saral, Jason, Sentinel, etc.) ne les fournissent pas car la mesure altimétrique est faite uniquement en 1 point (plus ou moins gros suivant la résolution, de l'ordre de 3 km de diamètre pour Jason) sous le satellite (nadir) lors de son passage au-dessus de la Station Virtuelle. Il est donc intéressant d'analyser les emplacements de ces stations virtuelles qui sont plus ou moins sujettes à ces phénomènes d'hystérésis. La méthode 3, du fait de la création d'un modèle hydraulique comme produit dérivé de la méthode permet de faire cette analyse, contrairement aux méthodes 1 et 2. C'est ce que nous présenterons au chapitre 7.1.

En plus des phénomènes d'hystérésis évoqués ci-dessus, les méthodes basées sur des courbes de tarage sont mises en difficulté dans les autres cas de relation Z - Q non univoque, comme par exemple en cas d'influence du vent ou de conditions aval variables (seuil mobile, écluse, barrage, usine hydroélectrique, affluent important générant une courbe de remous, etc.). Par ailleurs, les $Q(Z)$ peuvent également ne pas être stables dans le temps (évolution du profil par sédimentation, érosion ou recalibrage, divagation du fleuve dans des lits différents, développement de la végétation, etc.). Dans ce cas, une remise à jour de la $Q(Z)$ est nécessaire, ce qui est difficile car très coûteux avec la méthode 1 (plusieurs jaugeages sont nécessaires sur le terrain avec des conditions de débits différentes). Mais cela est possible avec les méthodes 2 et 3.

Les 3 groupes de méthodes diffèrent par la manière dont les courbes de tarage $Q(Z)$ sont construites (origine des débits Q et des cotes Z , cf. Table 1 ci-dessous), et par les données ou produits associés

éventuellement créés (modèle hydrologique, hydraulique, bathymétrie, frottement, etc.) lors de cette construction. Nous présentons ci-dessous les principes généraux de ces 3 méthodes.

Méthode	Origine des débits Q	Origine des cotes Z	Produits associés
1. Q(Z) traditionnelle	In situ (moulinet, ADCP)	In situ (règle)	Profil en travers (bathymétrie locale)
2. Approche hydrologique	Modèle hydrologique Pluies -> Débits (ex MGB)	Altimétrie spatiale	Modèle hydrologique sur tout le bassin concerné par le fleuve et ses affluents
3. Approche hydraulique	Générés comme on veut, dans une gamme choisie aussi large que l'on veut, en régime permanent ou transitoire	Sorties du modèle pour les débits choisis précédemment, en régime permanent ou transitoire	Modèle hydraulique sur tout le fleuve, mais pas obligatoirement sur les affluents

Table 1. Résumé des 3 groupes de méthodes de calcul des débits à partir de cotes

La méthode que nous développons et testons dans le cadre de cette étude est du type 3, basée sur une approche principalement hydraulique. Nous verrons que nous utilisons néanmoins quelques informations de nature hydrologique globale (débit moyen annuel provenant du Water Balance Model), ainsi que quelques données in-situ locales (stations in-situ disponibles à Bangui sur l'Oubangui et à Kinshasa pour le Congo). On peut faire la remarque que la méthode de type 2, basée sur une approche principalement hydrologique utilise quant-à-elle quelques données de nature hydraulique globale (vitesse de propagation par un modèle de routage, souvent prise égale à la vitesse de l'onde cinématique $c=5/3v$, calculée de manière très approchée, cf. Allen et al 2018) ainsi que quelques données in-situ locales pour le calage du modèle hydrologique.

Il sera intéressant de comparer les 2 méthodes sur un même cas d'étude, ce que le Congo et l'Oubangui permettront probablement. On peut, d'ores et déjà, penser que la combinaison des 2 méthodes sera probablement avantageuse, c'est-à-dire ajouter des compartiments hydrologiques alimentés par des informations sur les pluies dans la méthode 3, et/ou améliorer la méthode de routage par un vrai modèle hydraulique de type Saint-Venant complet dans la méthode 2. Des travaux allant dans ce sens, mais avec des méthodologies très perfectibles apparaissent déjà dans la littérature (cf. Jiang et al 2019).

2.1 Méthode basée sur des courbes de tarages construites à partir de données in-situ

La méthode traditionnelle, de construction d'une courbe point par point à partir de mesures in-situ et ajustement d'une courbe sur ces points, est la plus classique. Elle est utilisée depuis bien longtemps, et au minimum depuis le 19^{ème} siècle. Des jaugeages sont réalisés sur place à un endroit bien choisi, pour son accessibilité, sa stabilité dans le temps et son intérêt hydraulique. Les courbes de tarage aux stations très anciennes de Kinshasa-Est, Inga (sur le Congo), Bangui (sur l'Oubangui), M'Bata (sur la Lobaye), etc. rentrent dans cette catégorie. Les jaugeages étaient effectués à l'époque par des moulinets à hélice (ex: "saumon"), sur des profils verticaux d'une section en travers à la station, à différentes profondeurs. Plus tard, des moulinets électromagnétiques ont remplacé les moulinets à hélice, et actuellement des ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) permettent de faire des mesures de profils 2D verticaux de vitesses avec une grande précision, rapidité et répétabilité (cf.

Fig 54, Fig 55, Fig 56, Fig 57). Ces stations, avec parfois des historiques très anciens (ex: 1902 pour la station de Kinshasa-Est et Inga) sont, par exemple, disponibles sur le site Sierem (<http://www.hydrosociences.fr/sierem/>).

L'avantage de cette méthode est qu'elle est a priori très précise, probablement la plus précise possible, si les jaugeages sont réalisés dans de bonnes conditions. On estime que cette méthode donne un débit avec une erreur de l'ordre de 10 % voire 5 %. Le produit dérivé de cette méthode est de fournir un profil bathymétrique de la section jaugée. Cette méthode n'a pas besoin d'autres informations, contrairement aux 2 autres groupes de méthodes présentées ci-après. La qualité des mesures obtenues par cette méthode fait que ces jaugeages sont souvent utilisés pour caler les modèles hydrologiques ou hydrauliques générés et utilisés dans les méthodes 2 et 3 présentées ci-après.

Les inconvénients de cette méthode sont cependant multiples. Le premier est que pour avoir une courbe de tarage $Q(Z)$ il faut réaliser plusieurs jaugeages à des débits différents, en étiage et en crue, voire bien entendu à des débits très élevés, ce qui peut être dangereux. Il faut en effet, pour réaliser ces jaugeages, être sur l'eau sur une embarcation (voire un pont mais cela n'est pas possible sur le Congo ni sur l'Oubangui). Cela prend également du temps puisqu'il faut revenir à cette station pour ces différentes conditions hydrauliques. Une telle courbe de tarage se construit donc au fil des années. Le second inconvénient est qu'il est difficile d'extrapoler la loi à l'extérieur des débits jaugés (on a donc en théorie une loi $Q(Z)$ qui n'est valable que pour les gammes de débits jaugés). Le troisième inconvénient, intrinsèque à toute loi $Q(Z)$, comme évoqué précédemment, est que les phénomènes d'hystérésis, de vent ou de conditions aval variables ne sont pas pris en compte (a priori). Un quatrième inconvénient est que cette loi $Q(Z)$ est locale, avec une cote Z mesurée dans un référentiel local par rapport à un zéro-échelle souvent mal connu (ou mal référencé et parfois peu communiqué), parfois changeant au cours du temps, ou disparaissant à l'occasion d'une crue importante. Un travail de suivi, d'entretien et de mise à jour est donc nécessaire pour rendre cette $Q(Z)$ fiable et exploitable.

Il est possible de limiter le nombre de jaugeages nécessaires pour construire une courbe $Q(Z)$ pour cette méthode, et d'évaluer une incertitude sur les débits calculés à partir de méthode d'analyse statistique comme celle implémentée dans la méthode BaRatin (Bayesian Rating Curves, <https://forge.irstea.fr/projects/baratin>). A ce titre, cette approche présente un réel intérêt par rapport à la méthode plus traditionnelle qui consistait à construire la $Q(Z)$ sur un ajustement graphique autour des points jaugés, voire polynomiale (en général du second degré) par moindre carré. Cette méthode a été testée par des collègues d'Irstea Lyon sur les stations de Maluku-Tréchet (Fig 1) sur le Congo et de M'Bata (Fig 2) sur la Lobaye (sources Le Coz et al, 2018). Cette méthode peut également bénéficier d'informations sur le contrôle aval (ex: présence d'un seuil), la forme et les dimensions de la section (ex: rectangulaire, trapézoïdale, etc.), voire la pente de la ligne d'eau si elle est disponible pour remédier à certains inconvénients évoqués ci-dessus. L'idée est d'utiliser des informations sur la section et un modèle local simple et statique lié à ces informations pour limiter le nombre de mesures requises, et/ou d'extraire d'autres informations comme les incertitudes.

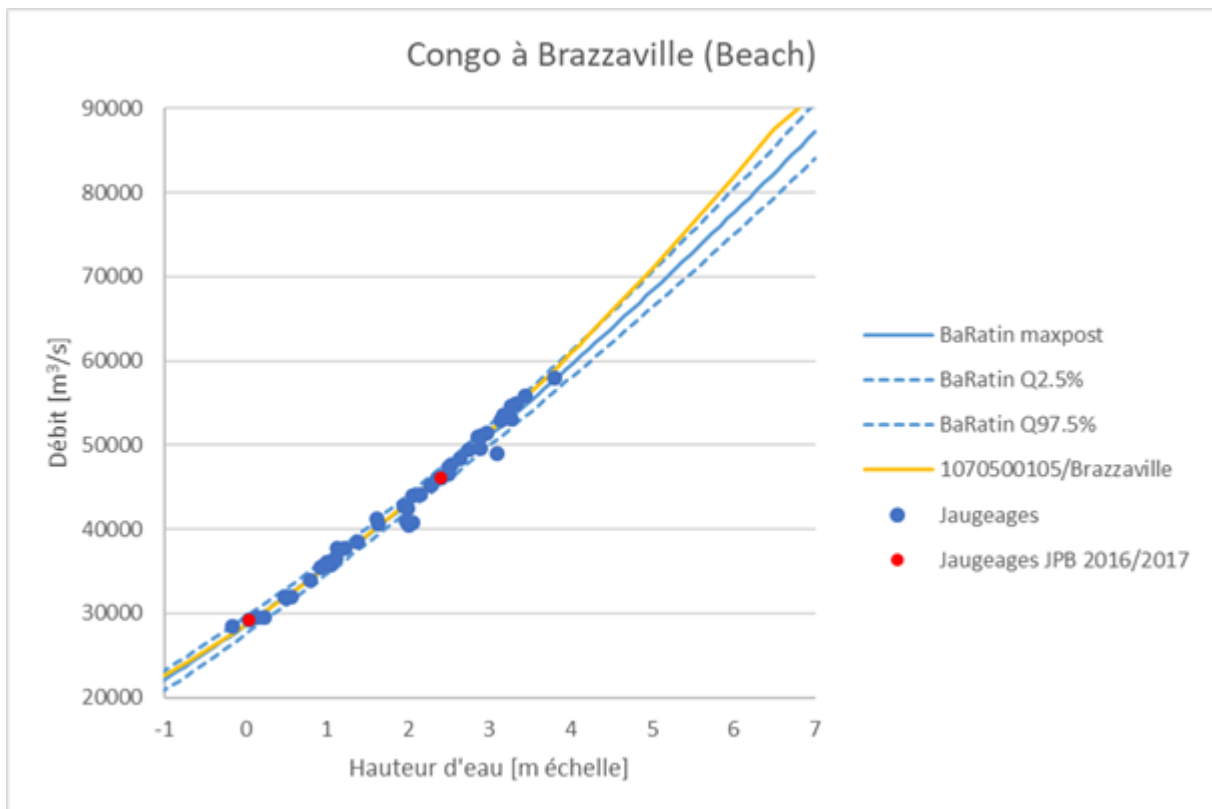


Fig 1. Analyse de la Q(Z) à Maluku-Tréchet avec la méthode BaRatin (source Le Coz et al, 2018)

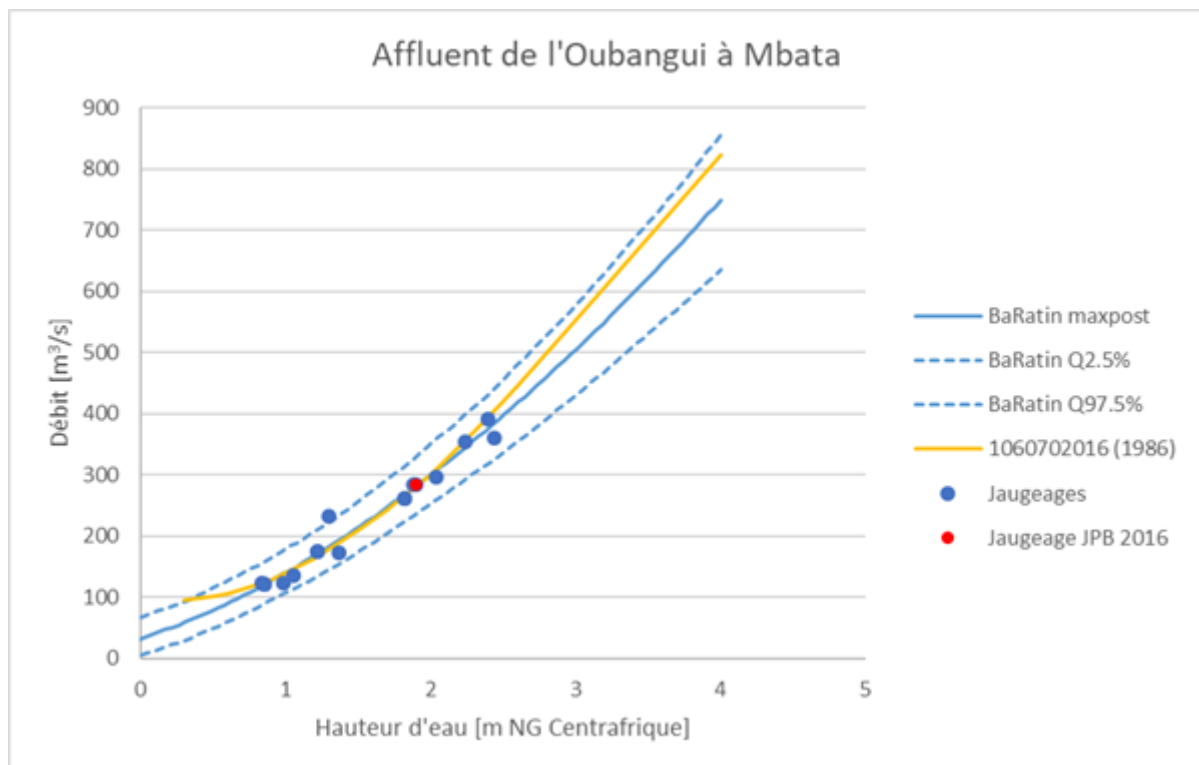


Fig 2. Analyse de la Q(Z) à M'Bata avec la méthode BaRatin (source Le Coz et al, 2018)

D'autres variantes existent également suivant la manière de choisir la forme de la $Q(Z)$, d'obtenir ou « mesurer » Q et/ou Z (cf. Donghwan et al 2019, avec les méthodes "a" à "e" page 742 ; on peut noter ici que les méthodes "f" sont celles évoquées ci-après sous les acronymes MGB-SV et SIC-SV). Ces variables sont obtenues, soit in-situ, soit à partir de satellites, voire en utilisant d'autres variables, comme la largeur, la pente de l'eau, la vitesse de surface, etc. Mais toutes ces méthodes sont basées sur une loi simple, locale et statique reliant Q que l'on cherche à une (voire plusieurs) variable(s) locale(s) (généralement la cote Z).

2.2 Méthode basée sur des courbes de tarages construites à partir de modèles hydrologiques (ex: MGB)

Cette méthode (que nous appellerons par la suite MGB-SV, MGB pour le modèle hydrologique utilisé par Adrien Paris, SV pour les données des Stations Virtuelles utilisées) est basée sur la mise au point d'un modèle hydrologique pluie-débit sur tout le bassin considéré, puis de la combinaison de débits Q générés par ce modèle hydrologique (alimenté par des pluies), et de cotes Z obtenues à partir des satellites altimétriques pour générer une $Q(Z)$ à un endroit donné. Des courbes de tarage $Q(Z)$ sont ainsi construites, et sont ensuite exploitées à chaque fois qu'une nouvelle donnée altimétrique Z est disponible. Cette méthode a été appliquée au Congo, après avoir été développée sur l'Amazone (cf. Paris et al 2015, 2016).

Les avantages de cette méthode sont multiples. D'abord elle a été testée avec succès sur l'Amazone et a donné de bons résultats (cf. Thèse d'Adrien Paris 2015, Paris et al 2016). Elle utilise principalement, voire exclusivement, des informations disponibles globalement (pluies et altimétrie) issues de satellites. Elle est donc généralisable à tous les bassins versants dès que ces données sont disponibles. Un autre avantage de cette méthode est que la disponibilité d'un modèle hydrologique permet d'envisager, a priori, des utilisations de ce modèle en prévision, et donc anticiper des débits et cotes futures en divers endroits du réseau, ou en interpolation pour calculer des débits en divers endroits et instants. Pour cela il faut connaître les pluies sur la totalité du bassin. A notre connaissance la méthode MGB-SV n'a pas été exploitée en prévision pour l'instant dans le cadre de ces études sur le Congo, mais cela doit être possible.

Un inconvénient de cette méthode est qu'il faut mettre au point et caler un modèle hydrologique sur tout le bassin considéré. Il faut également connaître les pluies pour les périodes étudiées. Pour caler ce modèle, il faut probablement des stations in-situ, au moins à 1 exutoire, voire à plusieurs. Un calage avec des paramètres a priori n'est probablement pas satisfaisant, du fait de la diversité des bassins versants, des humidités initiales, des occupations des sols, de la topographie, des aménagements éventuels, etc. Pour que la courbe de tarage $Q(Z)$ obtenue soit de bonne qualité, il faut que ce modèle hydrologique soit de bonne qualité tant en amplitude qu'en fréquence. Il faut en particulier assurer une bonne synchronisation temporelle des débits et des cotes, ce qui n'est pas évident car ces données sont issues de sources très différentes. Il faut que les informations utilisées tant altimétriques satellitaires que les pluies soient connues à une résolution temporelle et spatiale suffisante. On peut penser que sur des bassins versants de taille moyenne le pas de temps journalier est un bon ordre de grandeur, ce qui n'est pas encore accessible pour l'altimétrie satellitaire. Le produit dérivé de cette méthode est de fournir un modèle hydrologique. Le modèle hydrologique utilisé pour ces travaux sur le Congo est le modèle Brésilien MGB (cf. Paris et al 2016).

2.3 Méthode basée sur des courbes de tarages construites à partir de modèles hydrauliques (ex: SIC)

La méthode que nous proposons, 3^{ème} de cette liste est nouvelle et originale, à notre connaissance. Cette méthode (que nous appellerons par la suite SIC-SV, SIC pour le modèle hydraulique utilisé, SV pour les données des Stations Virtuelles utilisées) a été développée à Irstea Montpellier, et comprend différentes variantes, dépendant des informations disponibles ainsi que des étapes d'Assimilation de Données réalisées. On peut enchaîner 3 niveaux d'Assimilation de Données, qui seront évoqués au chapitre 6.1. Elle a été développée dans le contexte du futur satellite SWOT, et adaptée pour les configurations du Congo et de l'Oubangui dans le cadre de cette étude D.6.12. Afin d'être plus facilement opérationnelle, et par manque de données qui ne seront disponibles que dans le cadre SWOT (soit à l'issue du lancement du satellite, soit si des données synthétiques sont générées à partir de simulateurs), elle n'intègre pas pour l'instant tous les modules de la méthode SIC-4DVar. Mais elle en intègre d'autres, qui ont été développés spécifiquement au cours de cette étude, comme par exemple la génération de la bathymétrie à partir de la base de données GWD-LR, ainsi que la génération de courbes de tarage locales aux Stations Virtuelles. Pour l'instant, dans le contexte SWOT, la méthode SIC-4DVar complète a été testée, et continue à l'être, en expériences jumelles avec des données générées sur des fleuves tests à partir de modèles hydrauliques disponibles sur ces fleuves (ex : Garonne, Po, Sacramento, et tous les 19 et 40 fleuves des benchmarks appelés respectivement Pepsi 1 et Pepsi 2). Mais pour le Congo, ou l'Oubangui, un tel modèle hydraulique récent et complet n'existe pas actuellement sur la totalité des zones étudiées ici.

Dans le cadre du projet PANAV des modèles hydrauliques 1D et localement 2D seront développés sur le Congo pour des études de navigabilité requérant une très grande précision locale de ces modèles (avec les logiciels Mascaret 1D et Télémac 2D, cf. études réalisées par BRL et Artélia en 2018-2019). Ces modèles seront développés, ou sont en cours de développement à partir de la bathymétrie mesurée in-situ courant 2018. Mais nous ne disposons pas de ces données, qui ne couvrent d'ailleurs pas la totalité des zones étudiées ici. Dans le cadre du projet CRuHM une bathymétrie est également en cours de mesure sur le Congo, mais n'est pas non plus disponible sur la totalité des zones étudiées ici, ni diffusée à l'extérieur du projet à ce jour. Cette bathymétrie sera utilisée à notre connaissance pour affiner un modèle de routage dans le modèle hydrologique sur le bassin du Congo basé sur le modèle Lisflood (et/ou Global Option).

Par ailleurs, si nous utilisons ces données, notre méthodologie serait liée à l'existence de données bathymétriques in-situ, ce qui est rare, couteux et contraignant, et du coup difficilement généralisable à d'autres fleuves. Nous avons donc maintenu notre souhait de développer notre algorithme en n'utilisant que des données disponibles globalement et des données satellitaires. Le satellite SWOT n'étant pas encore lancé, et des données synthétiques fiables ne pouvant pas être générées par simulation faute de modèle hydraulique, nous avons dû nous limiter aux données altimétriques classiques des missions satellites actuelles ou récentes.

Ces données sont de 3 types : (i) données hydrologiques moyennes (sur la période 1961-2010) globales (Water Balance Model, noté WBM), (ii) données géométriques de largeurs, cotes et surfaces drainées de la base Global Width Database Large River (GWD-LR de Dai Yamazaki) issues de SRTM et permettant, combinées aux données du WBM, de générer une bathymétrie initiale, (iii) données altimétriques issues de missions satellitaires existantes (Envisat, Saral, Jason, Sentinel 3A). Ces données sont détaillées ci-dessous, et font l'objet du Livrable #1.

Les avantages de cette méthode SIC-SV sont multiples. Comme pour la méthode précédente MGB-SV, elle est basée uniquement sur des données globales d'origines satellitaires, donc disponibles pour tous les fleuves. Une fois mise au point, testée et validée sur le Congo et l'Oubangui, nous avons pu la tester sans aucune modification sur le Kasai, la Sangha, la Garonne, le Po, le Missouri, le Connecticut, le Niger, etc. Sur le Congo nous l'avons également testé sur divers tronçons, et par exemple sur une variante allant jusqu'à l'embouchure. Pour des raisons de concision et d'objectif initial de ce travail, les résultats sur l'extension du Congo à l'embouchure, le Kasai et la Sangha ne sont pas détaillés ici, mais juste évoquées à certains endroits.

Un autre avantage de la méthode est de permettre d'analyser les phénomènes d'hystérésis. Cela peut indiquer les Stations Virtuelles sensibles ou non à ces phénomènes, voire de les corriger par l'utilisation de la pente locale pouvant être calculée par le modèle hydraulique.

Un autre avantage de la méthode est de permettre de détecter les Stations Virtuelles a priori moins fiables, du fait de fortes courbes de remous (de type F2, c'est à dire des rapides ou des chutes) à leur localisation géographique, qui rendent la mesure altimétrique moins précise. C'est le cas par exemple de la SV s3a-0741-00 (Fig 3) sur le Congo (sur l'Oubangui il n'y en a pas, toutes les SV retenues sont éloignées de telles courbes de remous pentues ou de chutes).

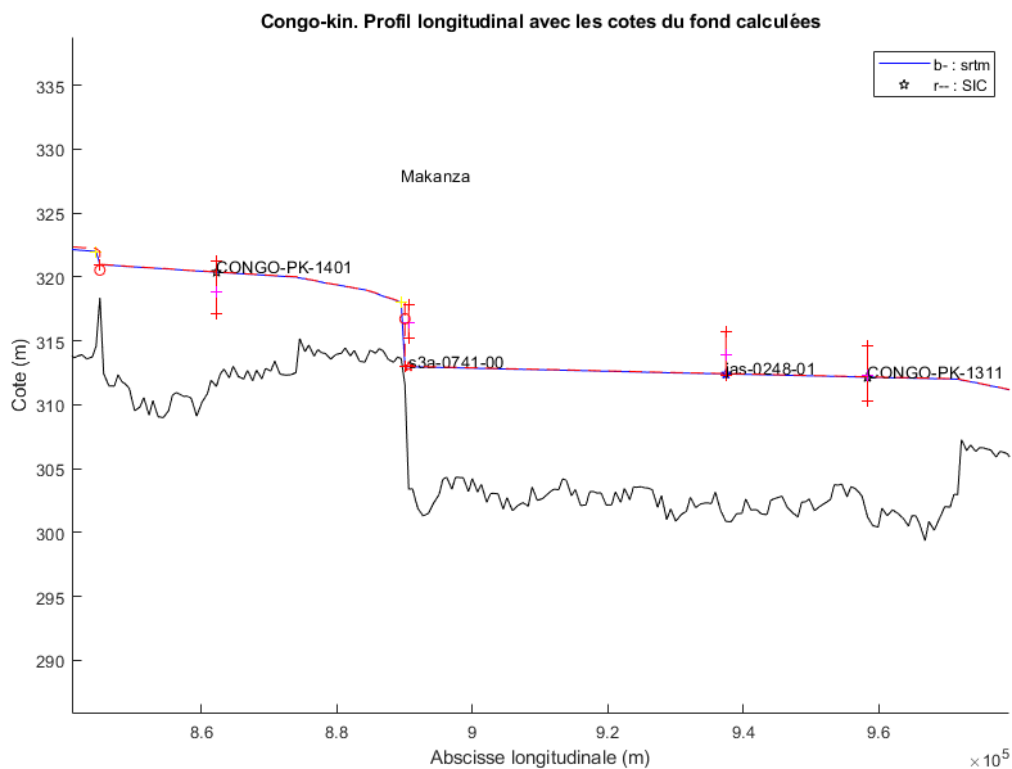


Fig 3. Station Virtuelle Sentinel 3A (s3a-0741-00) à proximité d'une chute

Un autre avantage de cette méthode est également, comme pour la méthode précédente, de pouvoir être utilisée en prévision, a priori, du fait de la disponibilité d'un modèle hydraulique généré au cours de la méthode. Nous n'avons pas analysé cette manière d'utiliser le modèle, mais cela fait partie des perspectives possibles. La prévision peut être étendue sur un horizon temporel plus grand

si le modèle hydraulique est complété à son amont et à ses affluents non modélisés par des modèles hydrologiques (ex: modèle GR4J).

Un autre avantage de la méthode SIC-SV par rapport à MGB-SV est de ne pas nécessiter d'information sur les pluies. Dans le modèle hydraulique, les débits et les cotes générées par simulation à partir du modèle et qui servent à la construction des lois $Q(Z)$ sont donc forcément cohérentes (pas de problèmes de synchronisation temporelle entre Q et Z).

Un inconvénient de la méthode, telle qu'elle est mise en œuvre ici, est de devoir faire un certain nombre de simplifications. Cela est inhérent à toute méthode, mais il est bon de les évoquer ici. Certaines de ces simplifications pourront être levées quand SWOT sera opérationnel. Par exemple, nous avons approximé les sections en travers pour le modèle hydraulique par des sections de forme simple trapézoïdale. SWOT permettra de fournir des informations de largeurs et cotes permettant d'affiner cette forme ("flood plain DEM"), comme nous le faisons sur les fleuves des benchmarks Pepsi 1 & 2. La validation de la courbe de tarage $Q(Z)$ générée avec notre méthode à la station de Bangui par rapport à la $Q(Z)$ in-situ permet cependant de montrer que cette simplification n'empêche pas de donner des résultats très satisfaisants (rRMSE d'environ 5 % à maximum 10 % sans calage et 3.00 % après optimisation du coefficient de Strickler, cf. chapitre 4, Fig 40 et chapitre 5.2, Fig 65). Cela n'était pas acquis d'avance, surtout compte tenu de la géométrie parfois complexe de ce fleuve souvent en tresse. Par ailleurs, les données utilisées sur l'Oubangui pour la génération du modèle hydraulique sont celles de la période SRTM (base GWD-LR et WBM corrigé), à la station de Bangui, correspondant à un débit très faible (950 m³/s). Malgré cela, la $Q(Z)$ générée à cette station de Bangui par la méthode SIC-SV est excellente sur la totalité des amplitudes de débits (entre 225 m³/s et 15800 m³/s entre 1911 et 2010). Il est difficile, à ce stade, de garantir de si bons résultats partout, à toutes les Stations Virtuelles, mais si d'autres $Q(Z)$ in situ sont disponibles, ou au moins un ensemble de mesures (Q , Z), cette vérification pourra être faite. Le coefficient de frottement de Strickler local permet de réaliser un calage du modèle, et ainsi corriger la $Q(Z)$ produite si des informations in-situ sont disponibles. Si aucune $Q(Z)$ locale in-situ n'est disponible, l'analyse des temps de retard visibles sur les variations altimétriques aux Stations Virtuelles permet également d'ajuster les coefficients de frottement, et ainsi de caler le modèle hydraulique (cf. Fig 45 et analyses correspondantes, ainsi que le chapitre 5.1.2). Compte tenu de la meilleure résolution spatiale et temporelle cette analyse sera grandement facilitée avec les futures données SWOT.

Un autre inconvénient potentiel de la méthode est d'utiliser la base GWD-LR (Global Width Database, Large River), elle-même basée sur SRTM, qui est biaisée sur des grandes distances (Fig 19). Ces erreurs sont analysées dans ce rapport et des corrections sont apportées à partir des données des Stations Virtuelles. Mais ces corrections ne sont pas parfaites car les données des SV ne sont pas disponibles pendant la période SRTM (11-22 février 2000) et cela a certainement un impact sur la qualité des $Q(Z)$ générées. Il se trouve que les régimes hydrologiques et hydrauliques du Congo et de l'Oubangui sont relativement réguliers, et par conséquent la correction que nous avons appliquée, basée sur la moyenne des données altimétriques des mois de février doit donner un bon ordre de grandeur pour cette correction. On peut noter ici que ces corrections ne seront plus nécessaires avec la prochaine version de la base GWD-LR sur laquelle Dai Yamazaki est en train de travailler (cf. discussions personnelles en Novembre 2018). En effet, cette nouvelle version tiendra compte de corrections du MNT SRTM. Cette base sera disponible dans les mois qui viennent (a priori premier semestre 2019). Nous ferons une mise à jour des données générées par notre méthode dès que

possible. La totalité de notre algorithme étant automatisé par des scripts Matlab et des exécutions de SIC, cette mise à jour sera simple et rapide.

Un autre inconvénient potentiel de la méthode est d'utiliser la base WBM (Water Balance Model), qui est aussi parfois entachée d'erreurs, car basée sur un modèle hydrologique. Mais en fait nous n'utilisons pas ces données de manière instantanée mais en moyenne sur une longue période (1961-2010) pour en extraire une distribution longitudinale des débits le long du cours d'eau, corrigée ensuite localement ou globalement, quand cette donnée est disponible à certaines stations in-situ. Nous analysons également ces erreurs sur le Congo et l'Oubangui à partir des données in-situ disponibles (cf. Table 2). N'ayant qu'une mesure de cote complète issue de SRTM, l'erreur à corriger est en fait celle entre Q_{wbm} et $Q_{in-situ}$ correspondant à cette date d'acquisition. Cette correction a été appliquée en utilisant les données in-situ de la période SRTM (11-22 février 2000) pour que les débits soient les plus cohérents possibles avec les cotes SRTM utilisées dans la base GWD-LR. Nous avons donc pu corriger ces erreurs, aux emplacements de ces stations in-situ et en appliquant une correction proportionnelle sur la totalité du Congo et de l'Oubangui. D'autres sources de données alternatives à WBM sont disponibles, évoquées ci-dessous et pourraient être analysées ultérieurement. Une autre correction calculée à partir des surfaces drainées, disponibles dans la base GWD-LR a également été appliquée, afin d'ajuster en espace ces 2 bases calculées à des résolutions différentes (3s moyennées upscalé à 18s pour GWD-LR et 6mn pour WBM, soit avec un pixel $20^2=400$ plus grossier pour WBM par rapport à GWD-LR), et avec des sources de données de MNT différentes, ne localisant pas les affluents exactement au même endroit.

3 Etat des lieux, données disponibles (Livrable #1)

Nous avons étudié dans un premier temps le fleuve Congo sur un peu plus de 1800 km à l'amont de Kinshasa. Une fois l'algorithme mis au point, nous l'avons appliqué tel quel sur l'Oubangui sur environ 1200 km à l'amont de sa confluence avec le Congo.

Tous les traitements détaillés ci-après peuvent fonctionner en utilisant exclusivement des données globales (WBM, GWD-LR, données altimétriques aux Stations Virtuelles issues de la base Hydroweb). L'algorithme SIC-SV peut être exécuté en indiquant juste les latitudes et longitudes des points amont et aval du fleuve ou de la rivière à analyser. Si des données in-situ sont disponibles, elles peuvent être utilisées soit pour comparer ou valider certains résultats intermédiaires (ex: bathymétrie, cf. mesures ADCP sur le Congo à l'Ile aux Eléphants ou à Kinshasa, Fig 54 et Fig 56), soit aussi éventuellement pour améliorer le modèle hydraulique généré. C'est ce que nous faisons par exemple sur le Congo pour définir une condition aval à Kinshasa fidèle à la station in-situ, ainsi que sur l'Oubangui en utilisant des données de la Station de Bangui pour caler le coefficient de frottement du modèle hydraulique (Manning-Strickler) pour fournir une $Q(Z)$ générée avec notre méthode SIC-SV la plus proche possible de la $Q(Z)$ locale in-situ.

3.1 Congo

Les données nécessaires pour l'algorithme SIC-SV sont principalement de 3 types : (i) des données hydrologiques moyennes (par exemple sur la période 1961-2010, telles que disponibles dans la base WBM) permettant d'avoir un ordre de grandeur des débits transitant dans les lits des fleuves et de repérer les affluents, (ii) des données de nature géométrique permettant de connaître les largeurs du lit du fleuve et les hauteurs (altitudes) de la ligne d'eau pour une date correspondant à la mission SRTM (11-22 février 2000), et (iii) les données des chroniques temporelles altimétriques aux Stations Virtuelles retenues sur la zone étudiée. Nous détaillons si après ces trois types de données.

3.1.1 Données hydrologiques

Les premières données utilisées sont celles de la base de données appelée Water Balance Model (WBM). Pour nos travaux précédents réalisés dans le cadre du Discharge Algorithm Working Group (DAWG) de l'Equipe scientifique SWOT, et en particulier dans le cadre des tests dits Pepsi Challenge 1 et 2 nous utilisons, comme toute cette communauté DAWG, un débit moyen unique le long du fleuve étudié (noté Q_{WBM} dans l'article Durand et al 2016 par exemple). Dans le cadre de ces travaux du DAWG, les tronçons de rivières et fleuves considérés sont relativement courts et cette hypothèse de débit moyen unique peut être considérée comme satisfaisante. En effet, les biefs individuels ont une longueur de quelques km (typiquement 5 à 10 km) en accord avec les définitions retenues dans le cadre du projet SWOT, et les tronçons de rivière étudiés par le DAWG comptent quelques biefs ou dizaine de biefs maximum.

Compte tenu des longueurs importantes étudiées du fleuve Congo et de son affluent l'Oubangui, nous avons exploité directement la base de données WBM spatialisée (Fig 4). Nous avons développé un premier algorithme analysant cette base WBM le long du linéaire du fleuve choisi, reconstituant le débit moyen le long du fleuve, et détectant les affluents principaux (avec des sauts brusques de débit), voire les échanges avec la nappe ou les apports latéraux diffus avec des variations progressives du débit (Fig 5). Nous avons vérifié qu'il y a une bonne corrélation entre ces données et

les surfaces drainées disponibles dans la base GWD-LR. A proximité des affluents, il y a cependant des petits décalages en x-y (ou latitude-longitude), liés en particulier à la résolution différente de ces 2 bases. Nous avons donc corrigé le débit Q_{wbm} afin de le rendre cohérent avec la résolution de la base GWD-LR. Ce débit corrigé est indiqué en rouge sur la Fig 5 pour le Congo et Fig 25 pour l'Oubangui. Grace à cette correction, on peut vérifier que le débit spécifique est plus régulier (Fig 6), compris entre 12.4 et 18.5 l/s/km², qu'avec le Q_{wbm} initial.

Ce débit moyen longitudinal sera utilisé lors de la génération de la bathymétrie. Le linéaire du fleuve choisi est lui-même détecté et construit automatiquement à partir de la seule indication des points amont et aval (latitude - longitude), à partir de la base GWD-LR décrite au paragraphe suivant.

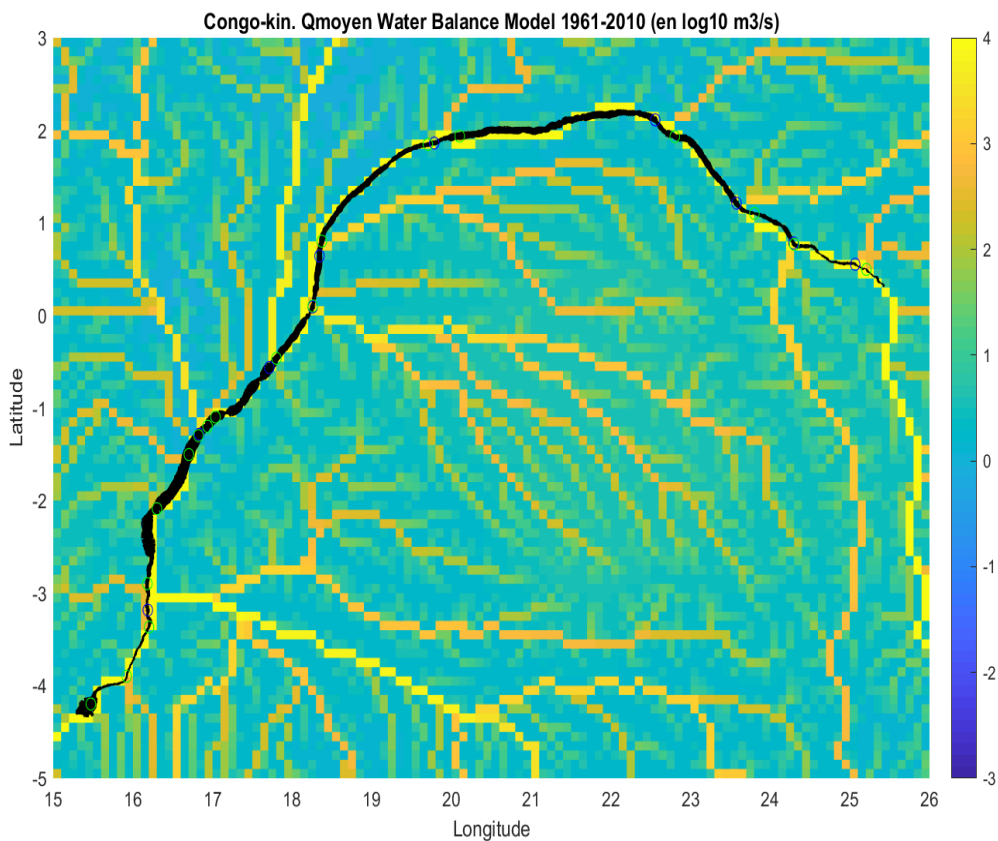


Fig 4. Débit moyen sur le Congo 1961-2010 (en log10 m3/s). Source WBM

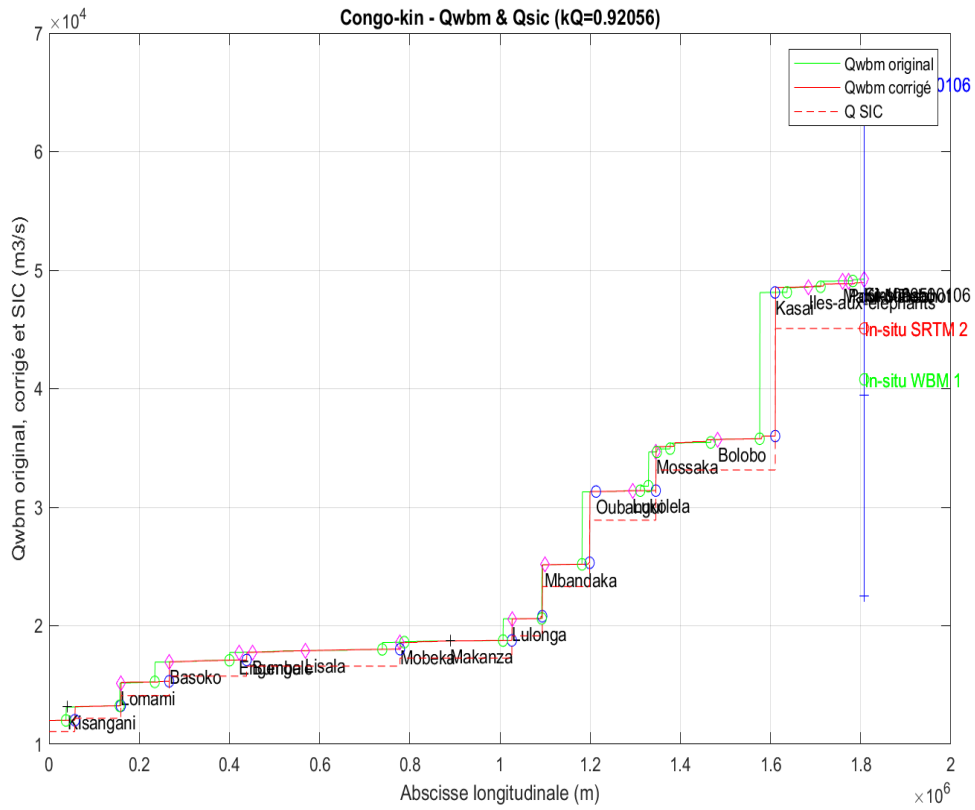


Fig 5. Débit moyen 1961-2010 le long du Congo

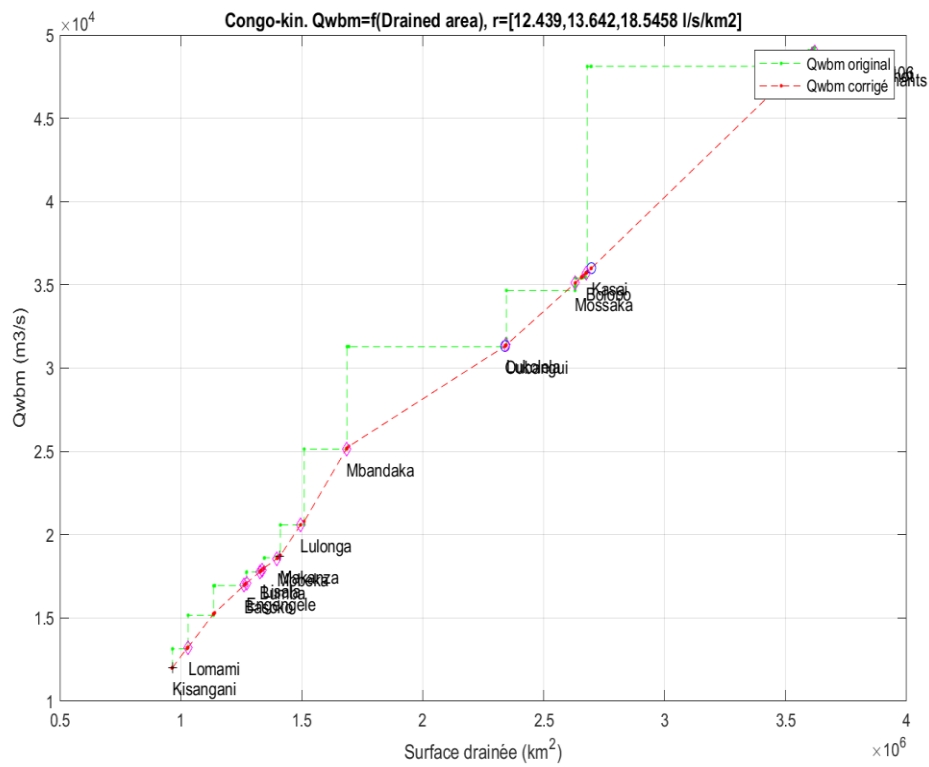


Fig 6. Débit spécifique moyen 1961-2010 le long du Congo

Si une station in-situ est disponible en un point quelconque du fleuve étudié, il est possible de comparer, à cet endroit, la valeur du débit moyen WBM avec la valeur in-situ moyenne pour la même période (si les données sont disponibles sur la période 1961-2010). Il est également possible de récupérer la valeur du débit in-situ pour la période SRTM (si les données sont disponibles sur la période 11-22 février 2000). C'est le cas avec la station Kinshasa-Est & Inga sur le Congo (code 1080500106), et la station de Bangui sur l'Oubangui (code 1060700105). Nous détaillerons ces comparaisons au chapitre 4. Sur le Congo et l'Oubangui aux 2 seules stations in-situ disponibles sur ces périodes (avec cote Z et débit Q), le débit moyen WBM donne un bon ordre de grandeur, mais sous-estime un peu le débit in-situ (cf. Table 2 et Fig 5).

Débit (m3/s)	Moyenne in-situ 1902-2018 1911-2010	Moyenne in-situ 1961-2010 (période WBM)	Qwbm	Qwbm corrigé	Ratio Q in-situ 1961-2010 / Qwbm (corrigé)	Moyenne in-situ 11-22/02/2000 (période SRTM)	Ratio Qsrtm / Qwbm (corrigé)
Kinshasa-Est 1080500106	39683	40780	49226	48968	0.828 (0.833)	45078	0.91574 (0.920)
Bangui 1060700105	3766	3432	4891	4680	0.702 (0.733)	950	0.19423 (0.203)

Table 2. Valeurs de débits de référence aux stations de Kinshasa et de Bangui

On observe en effet que le débit du WBM est relativement proche de la valeur calculée à partir des données in-situ pour la période 1961-2010 (ratio de 0.833 après correction de Qwbm pour la station de Kinshasa Est sur le Congo, et de 0.733 pour la station de Bangui sur l'Oubangui, soit une sous-estimation de 17% et 27% respectivement). En ce qui concerne le débit correspondant à la période d'acquisition de SRTM (11-22 février 2000), il y a une très grande différence de comportement entre le Congo, qui est proche du débit moyen (ratio de 0.92, soit un écart de 8%), alors que pour l'Oubangui la période SRTM correspond à une période d'étiage marqué (ratio de 0.203, soit un écart de presque 80%). C'est-à-dire que le débit de l'Oubangui pour la période SRTM est seulement 20% du débit moyen calculé par le modèle WBM. Ce n'est pas surprenant car le mois de février correspond aux basses eaux sur l'Oubangui qui est dans la partie Nord du Bassin. Nous avons donc "de la chance" sur le Congo mais moins sur l'Oubangui, dans le sens où les données hydrauliques en largeurs et cotes (issues de la base GWD-LR, donc pour la période SRTM) correspondent à des régimes proches de la moyenne (donc correspondant aux débits fournis dans la base WBM) sur le Congo mais pas sur l'Oubangui. Il faudra donc effectuer une correction des débits Q utilisés pour générer la bathymétrie pour avoir un débit plus proche de celui de la période SRTM.

Il existe d'autres bases de données hydrologiques globales, comme :

1. GRDC : https://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/13_dtbse/database_node.html
2. SMHI Hypeweb (simulations historiques) : <http://hypeweb.smhi.se/>
3. FLO1K pour les périodes 1960-2015 : <https://www.nature.com/articles/sdata201852>

Certaines fournissent également, au-delà de moyennes pluriannuelles sur de longues périodes, des données en moyennes mensuelles, ou des données chronologiques à des pas de temps plus fins. Il

pourrait être intéressant de regarder plus en détail ces bases, voire la base WBM non pas sur la moyenne 1961-2010, mais directement pour la période SRTM (11-22 février 2000), afin d'avoir une cohérence entre le débit et les cotes et largeurs utilisées. Comme nous disposons de données in-situ nous avons en fait corrigé les données WBM par les ratios calculés précédemment avec les données in-situ (0.92 pour le Congo et 0.203 pour l'Oubangui, cf. Table 2). Le débit ainsi corrigé est indiqué sur la Fig 5 en rouge pointillé (la courbe en vert est la donnée brute WBM, la courbe en rouge trait plein est la donnée WBM corrigée longitudinalement grâce aux surfaces drainées). La correction est effectuée sur tout le linéaire avec le même ratio, ce qui est une hypothèse simplificatrice faute de plus d'information.

Sur la totalité du linéaire des fleuves étudiés, la base WBM donne des débits moyens variant de l'amont (amont de Kisangani) vers l'aval (Kinshasa) de 11998.5 à 49225.9 m³/s sur le Congo (avant correction, et 11995 à 48968 m³/s après correction) et de 3859.4 à 5992.2 m³/s sur l'Oubangui (avant correction, et de 3849 à 5983 m³/s après correction), de l'amont (amont de Songba-II) à la confluence avec le Congo (Djoundou).

Dans notre algorithme SIC-SV ce sont les seules données hydrologiques utilisées. Avec les données présentées ci-après elles permettront de construire un modèle hydraulique dans le logiciel SIC, qui sera utilisé ensuite pour générer des courbes de tarage Q(Z), elles même utilisées pour fournir des débits à partir de l'altimétrie spatiale.

La dépendance de notre algorithme, présenté ici, aux données de cotes et de largeurs issues de SRTM ne semble pas poser de problème pour les grands fleuves comme le Congo et l'Oubangui, celles-ci semblant de bonne qualité (c'est moins le cas pour les fleuves moins larges et peu pentus comme le fleuve Sénégal). Il y a certes des erreurs sur les grandes distances en cote, mais ces erreurs seront corrigées dans une version prochaine de la base GWD-LR, et les données altimétriques satellitaires permettent également de les corriger (ce que nous avons fait par la suite). Par ailleurs, les futures données SWOT permettront de remplacer avantageusement ces données, comme nous le faisons avec notre algorithme dans le cadre des tests Pepsi 1 et 2. Enfin des bases alternatives sont en cours de développement (GRWL).

La dépendance de notre algorithme, présenté ici, aux données issues de WBM est plus problématique, a priori. Mais toutes les méthodes développées dans le cadre de SWOT (cf. Durand et al 2016) utilisent cette donnée. Le travail fait ici de spatialiser cette donnée et de la corriger avec les surfaces drainées est déjà une nouveauté, développée au cours de ce travail, et améliorant le produit final. Dans le cadre du Congo et de l'Oubangui, nous avons la chance d'avoir quelques stations in-situ ayant permis de corriger ces données. Nous avons vérifié que sur ces 2 fleuves l'ordre de grandeur de Q_{wbm} est plutôt bon, avec des erreurs un peu inférieures à 17% (Congo) et à 27% (Oubangui). Par contre, la valeur de ce débit pour la période SRTM qui nous intéresse (car fournissant les cotes et largeurs utilisées) est très bonne pour le Congo (8% d'erreur), mais beaucoup plus éloignée pour l'Oubangui (presque 80% d'erreur). Si nous n'avons pas effectué les corrections rendues possibles grâce à la station in-situ de Bangui, le modèle hydraulique généré aurait été sensiblement mauvais.

On peut faire plusieurs commentaires à ce sujet :

Le premier est que dans le cadre de SWOT les données fournies (cotes Z, largeurs W, pentes Sw) le seront sur plusieurs années qui ont plus de chance de couvrir une gamme représentative de la

moyenne des conditions hydrologiques et hydrauliques qu'une seule image SRTM (et donc plus correspondre au Q_{wbm} dont on a vu qu'en moyenne il est plutôt bon). Notre algorithme SIC4DVar testé dans le cadre de SWOT (Tests Pepsi 1 et 2) dans sa version actuelle exploite toutes ces données temporelles pour générer la bathymétrie et donc réduit la dépendance à un écart probable entre Q_{srtm} et Q_{wbm} (que 8% sur le Congo, mais 80% sur l'Oubangui). Mais nous n'avons pas pu le tester ici car nous n'avons que les données SRTM en couverture complète (nous avons besoin des hauteurs, largeurs et pentes pour inverser la bathymétrie).

Le second est que même si le Q_{wbm} reste perfectible (on a vu qu'il y avait des erreurs de 17% et 27% sur le Congo et l'Oubangui respectivement), notre algorithme SIC4DVar, dans sa toute dernière version (en cours de test Pepsi 1 et 2) a démontré qu'il est capable de s'affranchir de ce biais et de corriger le débit, la bathymétrie et les frottements, sur des données de type SWOT (en cours de test sur Pepsi 1 donc avec observation journalière, à chaque bief et avec des bruits réduits). Mais pour l'instant nous n'avons pas testé cette dernière approche. Il n'est pas certain qu'avec de l'altimétrie uniquement classique (sans SWOT), les faibles densités spatiales et temporelles des observations soient suffisantes, mais c'est à tester dans le futur (2019-2020).

Le troisième, est qu'au lieu d'utiliser GWD-LR pour les largeurs, on aurait pu utiliser la base GRWL qui donne une largeur moyenne (au lieu d'une largeur instantanée de la période SRTM), à partir des images Landsat, et qui correspond donc mieux, a priori, au Q_{wbm} , qui est également un débit moyen. Par contre les hauteurs de la base GRWL sont également issues de SRTM à ce jour. Et les largeurs de GWD-LR semblent bonnes (cf. comparaisons avec Google Earth ou données ADCP au chapitre 5.1.1). Encore une fois, SWOT révolutionnera la disponibilité de données multi-temporelles et synchrones de Z , W et Sw , avec une couverture globale.

Du fait des remarques précédentes et en particulier de la disponibilité de données in-situ permettant de corriger Q_{wbm} , nous avons gardé l'exploitation de cette base de données WBM dans notre méthodologie. Les résultats de la validation partielle réalisée avec quelques données disponibles au chapitre 5 semblent confirmer la qualité du modèle ainsi mis au point.

3.1.2 Données géométriques

La bathymétrie du Congo ou de l'Oubangui n'est pas disponible comme déjà évoqué précédemment. En tout cas pas à l'époque de l'étude, ni sur la totalité des zones étudiées. Il existe des profils en travers partiel, ou des relevés de profondeurs. Mais faute de référence altimétrique précise, et dense en espace, de la cote de l'eau, ces profondeurs ne sont pas exploitables pour générer un modèle hydraulique.

Nous avons donc généré cette bathymétrie à partir de données auxiliaires. La base GWD-LR (Global Width Database for Large Rivers) de Dai Yamazaki a été utilisée pour récupérer des paramètres géométriques géolocalisés des fleuves Congo et Oubangui pour les zones étudiées. Le Kasai et la Sangha sont également disponibles, et ont été étudiés. Mais les résultats ne sont pas présentés ici, ne faisant pas partie du cahier des charges de l'étude D.6.12.

La version 0.005d=18s (5 millièmes de degrés, soit 18 secondes d'angle en résolution en latitude et longitude) a été utilisée à ce jour (soit un pas d'espace d'environ 555m à l'équateur). Cette base est structurée en 14 fichiers par grande zone géographique. Pour le Congo et l'Oubangui la zone nécessaire est la zone af1 (cf. Fig 7).

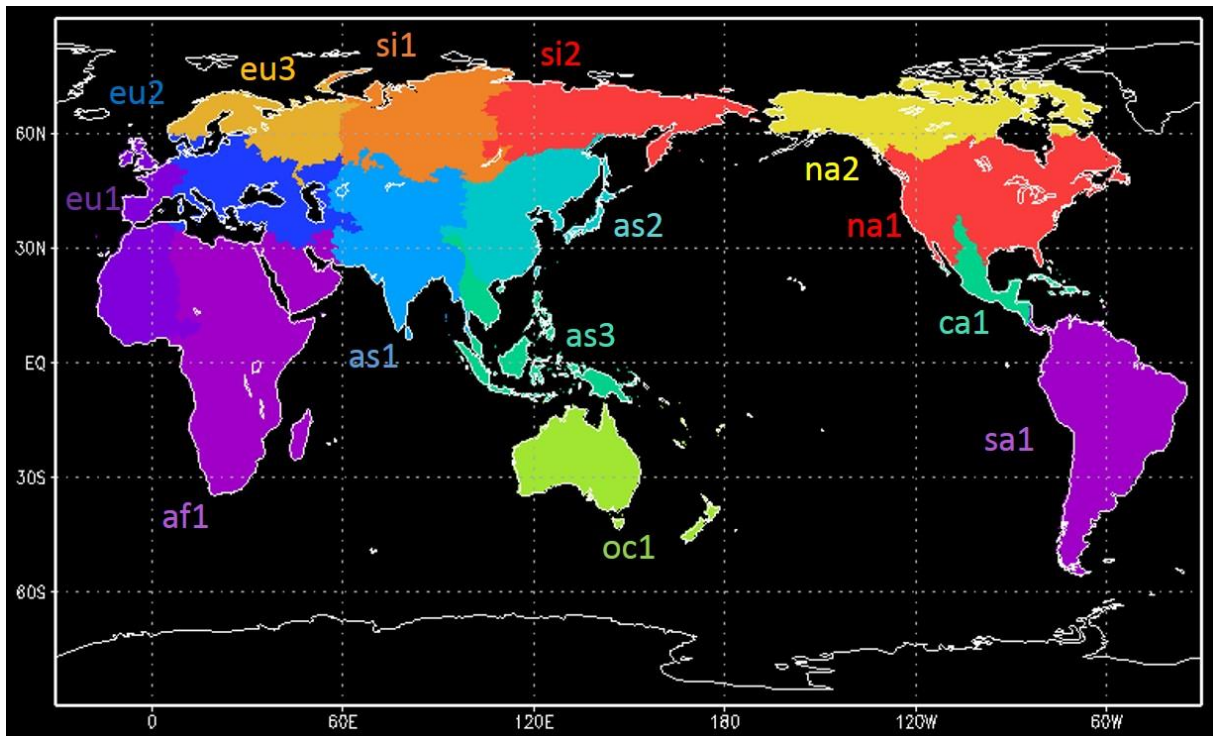


Fig 7. Zones de la base GWD-LR (Source Dai Yamazaki)

Il existe également une version à 3s (soit environ 90m à l'équateur) dont nous disposons également mais qui n'a pas été utilisée à ce jour. Vu la taille du Congo, ainsi que de ses principaux affluents, la version à 18s semble suffisante, et restera donc celle utilisée dans le cadre de cette étude. Bien que SRTM existe aussi à 1s (soit environ 30m à l'équateur), Dai Yamazaki ne compte pas réaliser une base GWD-LR à cette résolution, faute de MNT de qualité suffisante (cf. conversation personnelle). On peut préciser que la base à la résolution de 18 secondes a été créée par upscaling (FLOW algorithm [Yamazaki et al., 2009]) à partir de la base plus fine à la résolution de 3 secondes.

Pour le Congo, le tronçon étudié est situé entre les points amont [Longitude 25°25'22.77" - Latitude 0°19'11.13"] et aval [longitude 15°30'0.98"; Latitude -4°9'11.36"]. Ce tronçon est dessiné en rouge Fig 8, avec les largeurs du fleuve à l'échelle, telles que disponibles dans cette base.

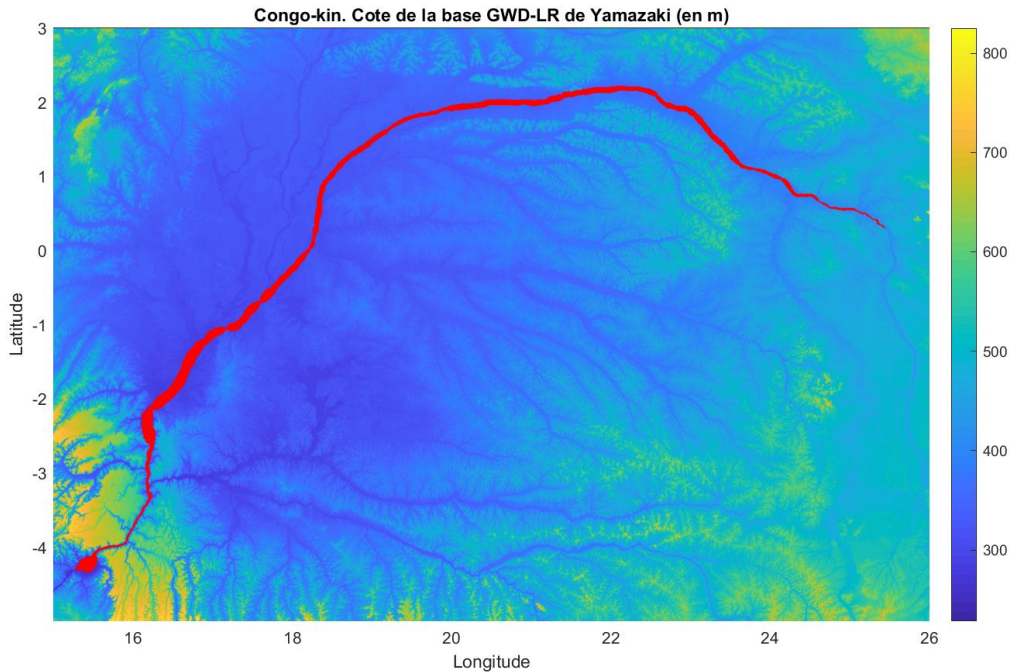


Fig 8. Bassin du Congo et zone retenue jusqu'au Pool de Malebo (base GWD-LR)

Les routines étant génériques, il est facile de prolonger la zone jusqu'à l'embouchure. Ce qui a été fait sur la demande de la CICOS, lors de la mission de Juin 2018, pour voir en particulier les chutes d'Inga.

Des scripts sous Matlab ont été développés pour traiter les données des bases détaillées ici (WBM, GWD-LR, Sierem, Hydroweb), ainsi que les stations virtuelles supplémentaires (collaboration IRD, avec Stéphane Calmant). Tous les traitements étant entièrement automatiques, et les bases de données étant globales, on indique juste les coordonnées latitude et longitude des points amont et aval de la rivière qui nous intéresse. Pour le Congo, 3 options de conditions aval ont été étudiées : (i) à l'entrée du Pool de Malebo, (ii) à l'emplacement de la station in-situ de Brazzaville (code Sierem 1070500105) ou de Kinshasa Est (code Sierem 1080500106) qui sont très proches, et (iii) à l'embouchure.

Exemple de bout de code du script Matlab définissant les points amont et aval :

```

nom_riv='Congo';
region='af1';
% Point amont (en degrés, minutes, secondes)
lon1dms=[25 25 22.77];
lat1dms=[0 19 11.13];
% Point aval (en degrés, minutes, secondes)
if strcmp(opt_avl,'pol')
    % Entrée Pool Malebo
    lon2dms=[15 30 0.98];
    lat2dms=-[4 9 11.36];
elseif strcmp(opt_avl,'kin')
    % Kinshasa emplacement station in-situ
    % 1070500105, BEACH - V.N. Brazzaville, CONGO, -4.272448, 15.294093
    % 1080500106, KINSHASA-EST(H)/INGA(Q), CONGO, -4.2958, 15.3083
    lon2dms=[15 17 38.73]; % 15.294093

```



```

lat2dms=-[4 16 20.81]; % -4.272448
elseif strcmp(opt_avl,'emb')
% Embouchure
lon2dms=[12 32 36.06];
lat2dms=-[6 3 11.75];
end

```

Le script Matlab lit ensuite les données sur la zone qui nous intéresse dans GWD-LR (Fig 9).

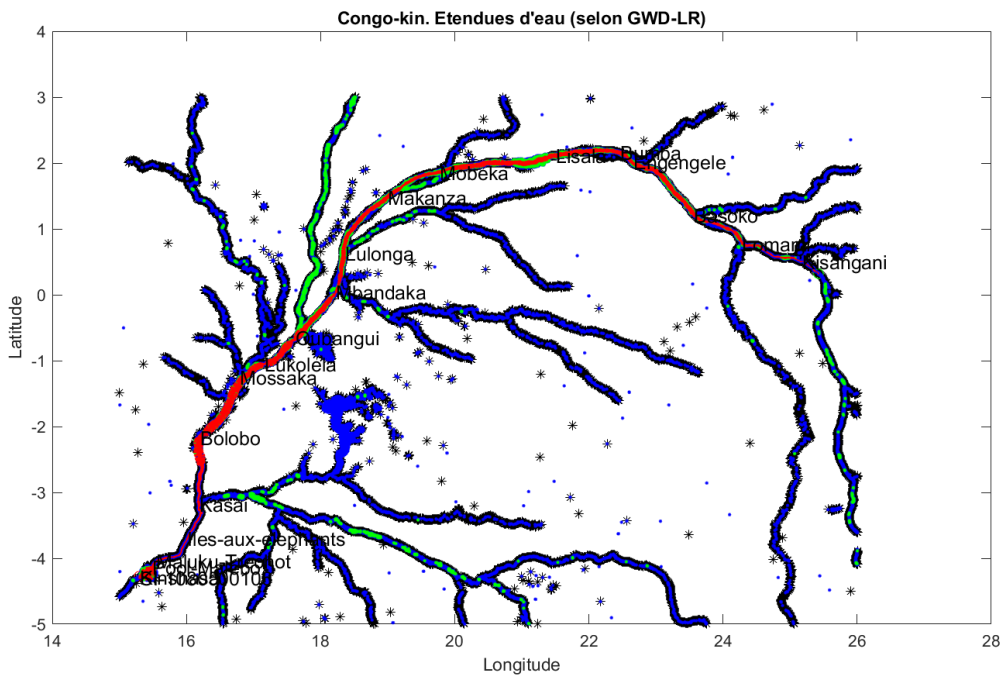


Fig 9. Congo, zones en eau et largeurs des sections (base GWD-LR)

On repère les sections en travers (info largeur, Fig 9 ou zoom sur Fig 10 sur une zone du Congo juste à l'amont de la confluence avec le Kasai) sur le tronçon qui nous intéresse entre son amont (cercle en vert sur Fig 12) et son aval (cercle en rouge sur Fig 12). Les zones en eau sont représentées ici en bleu, et les îles en vert. Les sections en travers sont représentées en rouge, avec la largeur à l'échelle comme indiquée dans la base GWD-LR. Nous les représentons ici perpendiculairement à la ligne centrale :

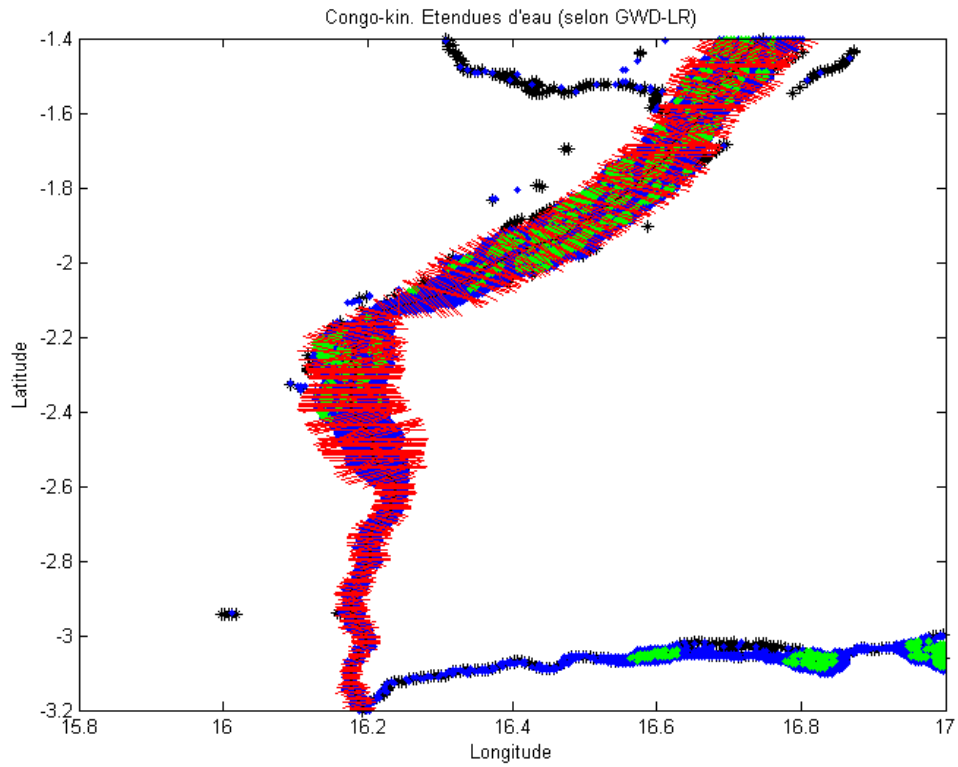


Fig 10. Zoom sur le Congo et largeurs des sections (base GWD-LR)

On peut vérifier sur Google Earth la zone concernée. On peut vérifier la bonne correspondance des largeurs, de la présence d'îles et de la prise en compte des affluents majeurs (ici le Kasai).

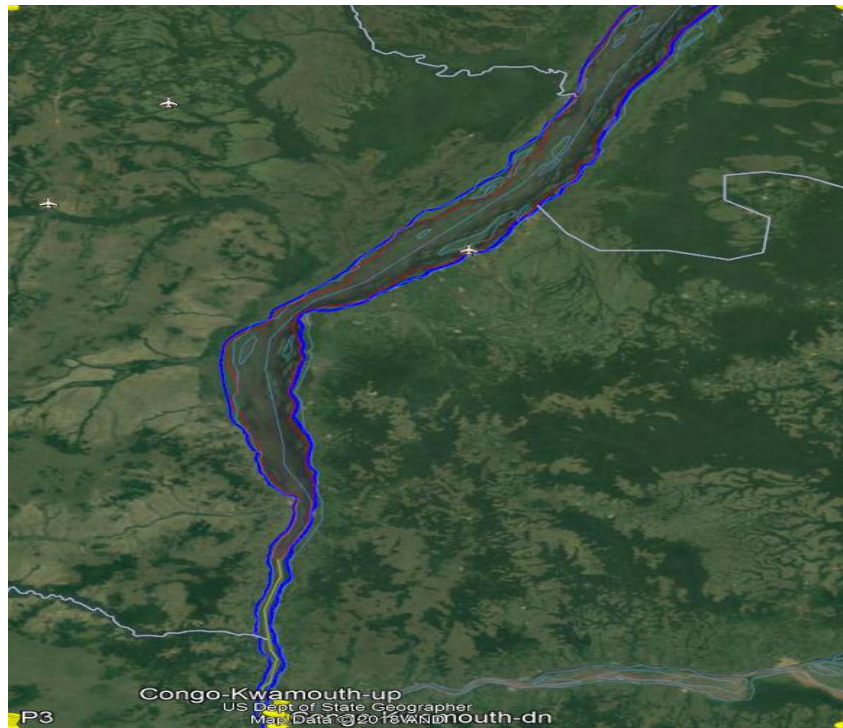


Fig 11. Zone correspondante sur Google Earth

On isole la zone qui nous intéresse, des autres informations :

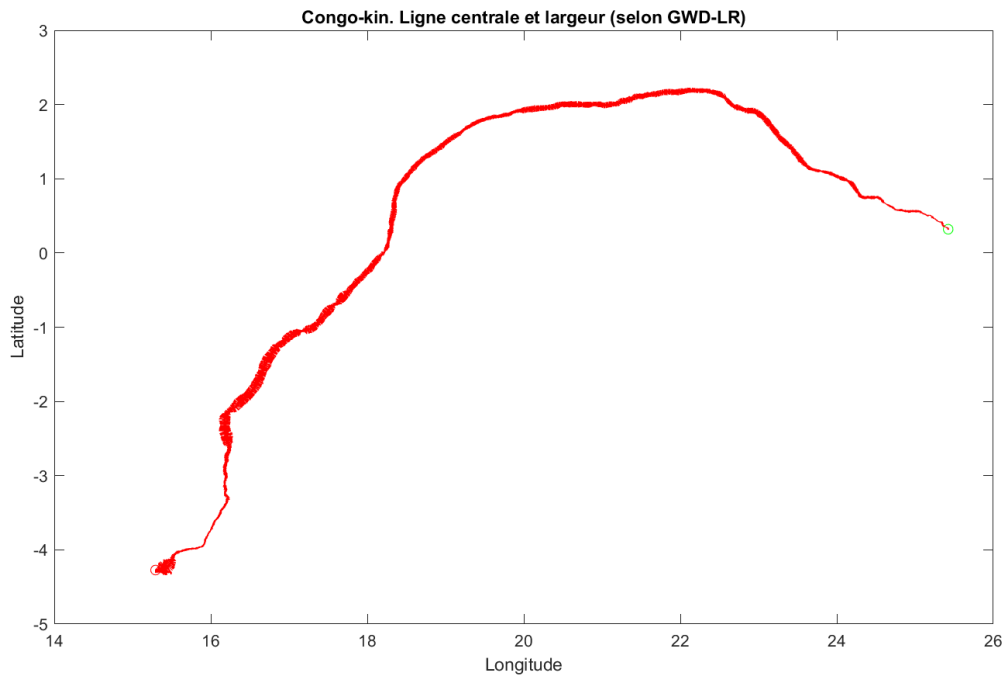


Fig 12. Fleuve Congo seul jusqu'à Kinshasa (base GWD-LR)

On trace le profil longitudinal en cote (Fig 13), issues de SRTM corrigé (GWD-LR). On peut également extraire et analyser les largeurs (Fig 14).

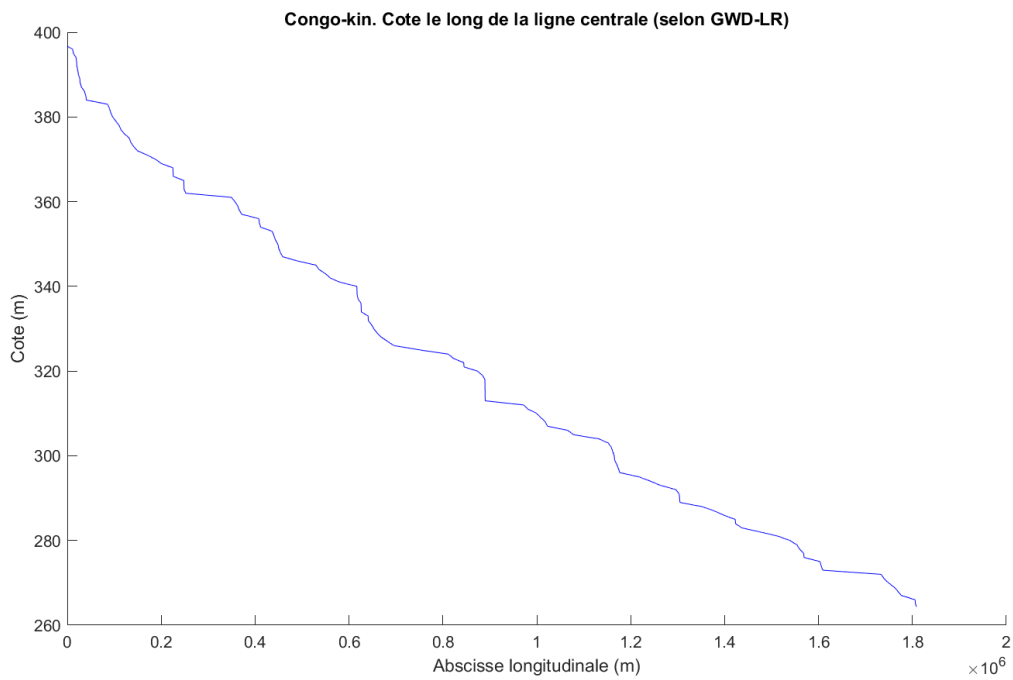


Fig 13. Cotes SRTM du fleuve Congo jusqu'à Kinshasa (base GWD-LR)

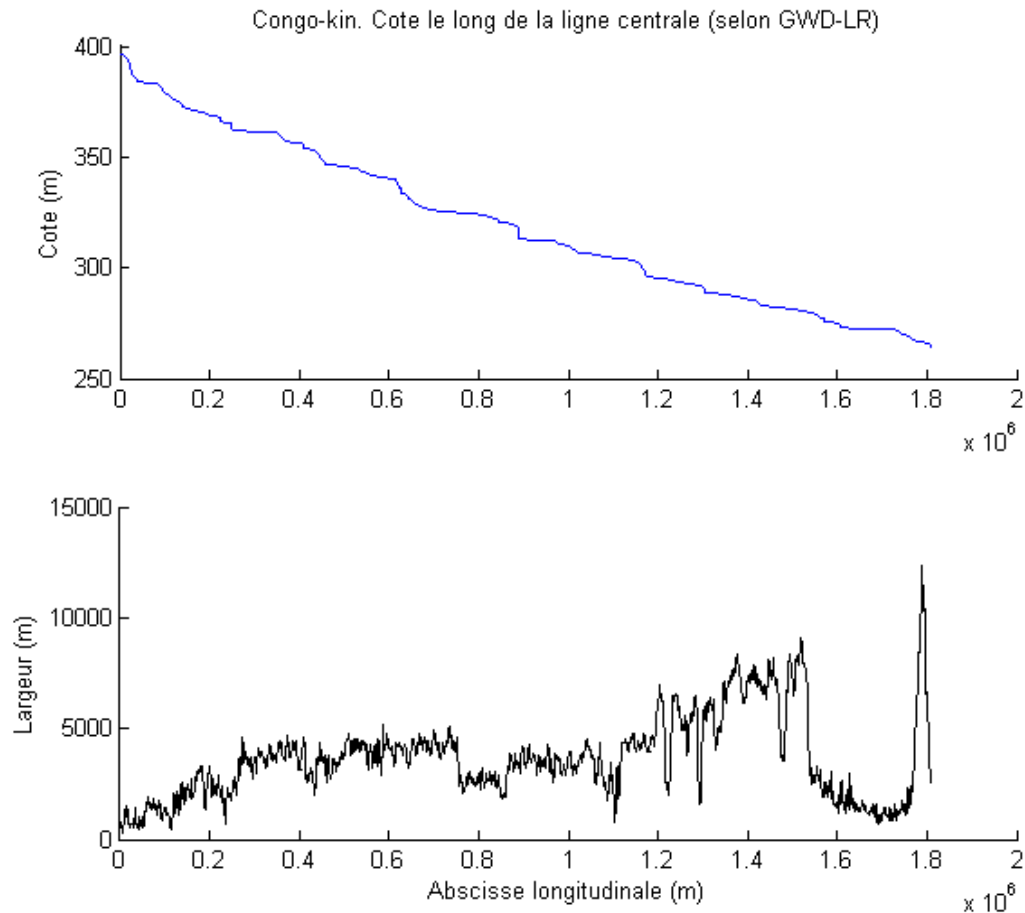


Fig 14. Cotes SRTM et largeurs du fleuve Congo jusqu'à Kinshasa (base GWD-LR)

Les données de largeur semblent de bonne qualité. On vérifiera cela sur 2 profils ADCP (Fig 54 et Fig 56). En comparant à des images Google Earth l'ordre de grandeur semble effectivement très satisfaisant (Fig 11). Dans les zones en tresse la largeur utilisée, disponible dans GWD-LR, est le cumul des largeurs des divers chenaux.

Une autre base plus récente que GWD-LR est maintenant disponible. Appelée GRWL (Global River Width from Landsat, cf. <http://science.sciencemag.org/content/361/6402/585>) est basée sur des images Landsat et a vocation à donner dans un premier temps une valeur moyenne des largeurs sur tous les fleuves du monde, jusqu'à des largeurs de l'ordre de 50 ou 100m. Ultérieurement (2019 ou 2020) des données multi-temporelles devraient être également fournies (par exemple à chaque image Landsat, ou en moyennes mensuelles). Cette base de largeurs moyennes est intéressante et sera étudiée lorsqu'elle sera officiellement disponible. Contrairement à GWD-LR elle n'est pas basée sur SRTM pour les largeurs, mais sur Landsat. Comme nous disposons des débits moyens par la base WBM, il peut être intéressant de la combiner avec la base GRWL pour générer une bathymétrie. Malheureusement la base GRWL ne fournit pas les hauteurs, qui sont indispensables pour notre méthode (elle fournit en fait les hauteurs de SRTM). Encore une fois SWOT fournira les données de largeur ET de hauteurs, ce qui sera très utile pour notre algorithme et remplacera avantageusement les bases GWD-LR et GRWL. En attendant, notre algorithme sera basé ici sur la base GWD-LR, qui s'avère très intéressante sur le Congo et l'Oubangui, hormis le problème de décalage en cote de

SRM que nous analyserons ci-après. En attendant la nouvelle version GWD-LR corrigée, nous avons corrigé les données en cotes grâce aux données altimétriques présentées ci-après.

3.1.3 Données altimétriques

A priori, 2 périodes avaient été identifiées pour tester l'algorithme sur des données Congo et Oubangui, du fait de la présence de données provenant de 3 satellites différents :

- Février 2016 à Juillet 2016, soit 6 mois avec SARAL (DT=35 jours), Jason 2 (10j) et S3A (27j).
- Octobre 2016 à Juin 2017, soit 9 mois avec Jason 2 (10j), Jason 3 (10j) et S3A (27j).

Finalement, nous avons testé l'algorithme sur la totalité des données disponibles, c'est-à-dire entre mi-2002 et fin 2018. Les données provenant de missions différentes mais correspondant à une même localisation géographique de Station Virtuelle ont été fusionnées dans une SV unique (ex: fichiers CONGO_PK et OUBANGUI_PK généré par S. Calmant). Ces séries altimétriques sont appelées "multi-mission". Les données issues de différentes missions ont été regroupées sur la base de contiguïté du point kilométrique (arrondi à l'entier le plus proche) de la mesure altimétrique comptée sur le linéique des rivières. Afin de corriger les décalages en espace entre différentes sources d'information, à partir de ces linéiques et de ces SV, une pente de l'eau a été estimée localement. Elle est ensuite prise en compte dans le "remplacement" des mesures individuelles à un point kilométrique unique de référence pour toute la SV "multi-mission" (source S. Calmant).

Nous avons également gardé quelques stations Envisat, Jason 2 et Saral qui n'ont pas été intégrées dans ces SV multi-mission. Au total sur le Congo, nous avons conservé 2 SV Envisat (en vert sur les Fig 15, Fig 16, Fig 17), 6 SV Jason 2 (en bleu), 3 SV Saral (en magenta), 20 SV Sentinel 3A (en rouge) et 28 SV multi-mission (en noir), soit 59 Stations Virtuelles. Il y a également 19 autres SV disponibles sur le Congo mais en dehors de la zone étudiée (à l'amont de Kisangani, ou entre Kinshasa et l'embouchure), soit donc 78 SV au total. Dans les numérotations ci-après nous garderons ces numéros de 1 à 78, pour que ces numéros ne changent pas en cas de changement de la zone étudiée.

Les SV sont listées ci-dessous, avec leur nom, leur position longitudinale dans notre modèle hydraulique (abscisse longitudinale en mètres, en partant du point amont, avec des abscisses croissantes vers l'aval), ainsi que leur position en longitude et latitude :

```
1 : SV CONGO-PK-0008, x = hors zone, Lon = 12.466, Lat = -6.07
2 : SV CONGO-PK-0041, x = hors zone, Lon = 12.733, Lat = -6.002
3 : SV CONGO-PK-0047, x = hors zone, Lon = 12.783, Lat = -6.001
4 : SV CONGO-PK-0069, x = hors zone, Lon = 12.934, Lat = -5.922
5 : SV CONGO-PK-0104, x = hors zone, Lon = 13.229, Lat = -5.865
6 : SV CONGO-PK-0331, x = hors zone, Lon = 14.157, Lat = -4.944
7 : SV CONGO-PK-0522, x = 1790318.8623 m, Lon = 15.45, Lat = -4.303
8 : SV CONGO-PK-0636, x = 1678829.284 m, Lon = 16.026, Lat = -3.657
9 : SV CONGO-PK-0807, x = 1492681.4967 m, Lon = 16.186, Lat = -2.238
10 : SV CONGO-PK-0848, x = 1449206.5889 m, Lon = 16.385, Lat = -1.956
11 : SV CONGO-PK-0936, x = 1355629.5888 m, Lon = 16.781, Lat = -1.343
12 : SV CONGO-PK-0959, x = 1329130.4306 m, Lon = 16.917, Lat = -1.179
13 : SV CONGO-PK-0993, x = 1293321.6283 m, Lon = 17.168, Lat = -1.044
14 : SV CONGO-PK-1052, x = 1229863.0745 m, Lon = 17.541, Lat = -0.735
15 : SV CONGO-PK-1155, x = 1120398.3079 m, Lon = 18.112, Lat = -0.072
16 : SV CONGO-PK-1311, x = 958330.046 m, Lon = 18.565, Lat = 1.132
17 : SV CONGO-PK-1401, x = 862182.2587 m, Lon = 19.184, Lat = 1.596
18 : SV CONGO-PK-1484, x = 772842.7125 m, Lon = 19.832, Lat = 1.868
19 : SV CONGO-PK-1502, x = 753549.4224 m, Lon = 19.977, Lat = 1.934
20 : SV CONGO-PK-1567, x = 687835.9384 m, Lon = 20.528, Lat = 2.012
21 : SV CONGO-PK-1588, x = 666820.1456 m, Lon = 20.705, Lat = 2.004
22 : SV CONGO-PK-1650, x = 600781.2246 m, Lon = 21.23, Lat = 2.077
23 : SV CONGO-PK-1676, x = 573575.3564 m, Lon = 21.453, Lat = 2.108
```

24 : SV CONGO-PK-1732, x = 515583.814 m, Lon = 21.927, Lat = 2.183
 25 : SV CONGO-PK-1761, x = 484298.4204 m, Lon = 22.189, Lat = 2.185
 26 : SV CONGO-PK-1823, x = 417720.298 m, Lon = 22.685, Lat = 2.004
 27 : SV CONGO-PK-1844, x = 394308.0004 m, Lon = 22.849, Lat = 1.922
 28 : SV CONGO-PK-1942, x = 290573.0718 m, Lon = 23.446, Lat = 1.364
 29 : SV CONGO-PK-1965, x = 267311.9287 m, Lon = 23.577, Lat = 1.221
 30 : SV CONGO-PK-2030, x = 196479.9983 m, Lon = 24.082, Lat = 0.991
 31 : SV CONGO-PK-2079, x = 143886.083 m, Lon = 24.398, Lat = 0.749
 32 : SV CONGO-PK-2122, x = 99569.6649 m, Lon = 24.716, Lat = 0.607
 33 : SV CONGO-PK-2177, x = 41729.2769 m, Lon = 25.169, Lat = 0.507
 34 : SV CONGO-PK-2208, x = 7357.0226 m, Lon = 25.378, Lat = 0.355
 35 : SV CONGO-SRL-014-02-PK-812, x = 1485419.7923 m, Lon = 16.201, Lat = -2.187
 36 : SV CONGO-SRL-057-01-PK-842, x = 1454571.5079 m, Lon = 16.388, Lat = -2.023
 37 : SV CONGO-SRL-143-01-PK-546, x = 1780374.6984 m, Lon = 15.417, Lat = -4.142
 38 : SV CONGO-SRL-229-01-PK-331, x = hors zone, Lon = 14.161, Lat = -4.946
 39 : SV CONGO-SRL-315-01-PK-72, x = hors zone, Lon = 12.937, Lat = -5.913
 40 : SV env-0100-01, x = hors zone, Lon = 14.149, Lat = -4.954
 41 : SV env-0143-01, x = 1780374.6984 m, Lon = 15.414, Lat = -4.145
 42 : SV env-0229-01, x = hors zone, Lon = 14.155, Lat = -4.948
 43 : SV env-0773-01, x = hors zone, Lon = 13.591, Lat = -5.649
 44 : SV env-0930-01, x = 1134826.3983 m, Lon = 18.076, Lat = -0.178
 45 : SV jas-0020-01, x = hors zone, Lon = 12.7884, Lat = -6.0323
 46 : SV jas-0057-01, x = hors zone, Lon = 25.7606, Lat = -1.2791
 47 : SV jas-0070-00, x = 600781.2246 m, Lon = 21.2359, Lat = 2.0636
 48 : SV jas-0083-01, x = 1260060.4851 m, Lon = 17.3865, Lat = -0.9154
 49 : SV jas-0146-02, x = hors zone, Lon = 25.9266, Lat = -3.1536
 50 : SV jas-0146-03, x = 124497.4747 m, Lon = 24.5493, Lat = 0.72137
 51 : SV jas-0159-01, x = 597217.7727 m, Lon = 21.2847, Lat = 2.0661
 52 : SV jas-0235-02, x = 237518.9192 m, Lon = 23.7762, Lat = 1.1049
 53 : SV jas-0248-01, x = 937425.9255 m, Lon = 18.6833, Lat = 1.2568
 54 : SV s3a-0042-00, x = 301533.0285 m, Lon = 23.3998, Lat = 1.421
 55 : SV s3a-0085-00, x = 769930.1343 m, Lon = 19.8429, Lat = 1.8896
 56 : SV s3a-0128-00, x = 1282726.5906 m, Lon = 17.2502, Lat = -1.0141
 57 : SV s3a-0156-00, x = 174560.0849 m, Lon = 24.2137, Lat = 0.87384
 58 : SV s3a-0171-00, x = 1762287.8377 m, Lon = 15.5497, Lat = -4.054
 59 : SV s3a-0199-00, x = 660478.9158 m, Lon = 20.7567, Lat = 1.9856
 60 : SV s3a-0270-00, x = 56117.8852 m, Lon = 25.0748, Lat = 0.53996
 61 : SV s3a-0285-00, x = 1554085.3366 m, Lon = 16.1875, Lat = -2.7145
 62 : SV s3a-0313-00, x = 547980.3188 m, Lon = 21.6594, Lat = 2.1316
 63 : SV s3a-0356-00, x = 780525.172 m, Lon = 19.7614, Lat = 1.8809
 64 : SV s3a-0384-00, x = hors zone, Lon = 25.6399, Lat = -1.1309
 65 : SV s3a-0399-00, x = 1351050.344 m, Lon = 16.8145, Lat = -1.3247
 66 : SV s3a-0427-00, x = 436076.7594 m, Lon = 22.5958, Lat = 2.1257
 67 : SV s3a-0470-00, x = 665153.4789 m, Lon = 20.7193, Lat = 1.9839
 68 : SV s3a-0498-00, x = hors zone, Lon = 26.0129, Lat = -3.6659
 69 : SV s3a-0513-00, x = 1219823.5924 m, Lon = 17.6083, Lat = -0.68692
 70 : SV s3a-0541-00, x = 241407.8081 m, Lon = 23.7542, Lat = 1.1176
 71 : SV s3a-0556-00, x = hors zone, Lon = 13.3591, Lat = -5.9037
 72 : SV s3a-0584-00, x = 544416.8668 m, Lon = 21.6875, Lat = 2.1334
 73 : SV s3a-0599-00, x = hors zone, Lon = 13.1528, Lat = -5.8879
 74 : SV s3a-0612-00, x = hors zone, Lon = 26.737, Lat = -4.615
 75 : SV s3a-0627-00, x = 1054050.3041 m, Lon = 18.2973, Lat = 0.42434
 76 : SV s3a-0655-00, x = 88188.953 m, Lon = 24.8081, Lat = 0.58113
 77 : SV s3a-0698-00, x = 433394.2999 m, Lon = 22.6185, Lat = 2.115
 78 : SV s3a-0741-00, x = 890578.2022 m, Lon = 19.0014, Lat = 1.4676

On récupère également, dans les méta-données des Stations Virtuelles : la correction du Mean Geoidal Undulation (mgu), c'est-à-dire la hauteur du géoïde (EGM2008) par rapport à l'ellipsoïde de référence (WGS84, IAG GRS 80), une correction éventuelle supplémentaire en cote (cdz) liée à la mission, et une distance à l'embouchure si disponible (dtm). Les données mgu et cdz sont importantes car toute erreur se reportera dans les calculs ultérieurs. C'est pour cette raison que nous les indiquons ici :

1: CONGO_PK-0008 : mgu=9.241, cdz=0
 2: CONGO_PK-0041 : mgu=7.48, cdz=0
 3: CONGO_PK-0047 : mgu=7.245, cdz=0
 4: CONGO_PK-0069 : mgu=6.394, cdz=0
 5: CONGO_PK-0104 : mgu=5.301, cdz=0
 6: CONGO_PK-0331 : mgu=3.076, cdz=0
 7: CONGO_PK-0522 : mgu=0.025, cdz=0
 8: CONGO_PK-0636 : mgu=-2.22, cdz=0

9: CONGO_PK-0807 : mgu=-3.13, cdz=0
 10: CONGO_PK-0848 : mgu=-3.802, cdz=0
 11: CONGO_PK-0936 : mgu=-5.693, cdz=0
 12: CONGO_PK-0959 : mgu=-6.719, cdz=0
 13: CONGO_PK-0993 : mgu=-8.72, cdz=0
 14: CONGO_PK-1052 : mgu=-11.451, cdz=0
 15: CONGO_PK-1155 : mgu=-11.833, cdz=0
 16: CONGO_PK-1311 : mgu=-11.776, cdz=0
 17: CONGO_PK-1401 : mgu=-13.46, cdz=0
 18: CONGO_PK-1484 : mgu=-15.086, cdz=0
 19: CONGO_PK-1502 : mgu=-15.142, cdz=0
 20: CONGO_PK-1567 : mgu=-15.307, cdz=0
 21: CONGO_PK-1588 : mgu=-15.477, cdz=0
 22: CONGO_PK-1650 : mgu=-16.666, cdz=0
 23: CONGO_PK-1676 : mgu=-17.298, cdz=0
 24: CONGO_PK-1732 : mgu=-17.134, cdz=0
 25: CONGO_PK-1761 : mgu=-16.492, cdz=0
 26: CONGO_PK-1823 : mgu=-15.869, cdz=0
 27: CONGO_PK-1844 : mgu=-16.028, cdz=0
 28: CONGO_PK-1942 : mgu=-18.148, cdz=0
 29: CONGO_PK-1965 : mgu=-18.697, cdz=0
 30: CONGO_PK-2030 : mgu=-19.437, cdz=0
 31: CONGO_PK-2079 : mgu=-19.61, cdz=0
 32: CONGO_PK-2122 : mgu=-19.41, cdz=0
 33: CONGO_PK-2177 : mgu=-18.722, cdz=0
 34: CONGO_PK-2208 : mgu=-18.312, cdz=0
 35: CONGO_SRL-ICE1_014-02_EGM2008_PK-812 : mgu=-3.217, cdz=0, dtm=812680
 36: CONGO_SRL-ICE1_057-01_EGM2008_PK-842 : mgu=-3.834, cdz=0, dtm=842240
 37: CONGO_SRL-ICE1_143-01_EGM2008_PK-546 : mgu=0.104, cdz=0, dtm=546000
 38: CONGO_SRL-ICE1_229-01_EGM2008_PK-331 : mgu=3.062, cdz=0, dtm=331580
 39: CONGO_SRL-ICE1_315-01_EGM2008_PK-72 : mgu=6.394, cdz=0, dtm=72310
 40: R_con_con_env_0100_01_20030502T090000_20091002T090000 : mgu=3.076, cdz=1.04, dtm=327000
 41: R_con_con_env_0143_01_20020727T210000_20100918T210000 : mgu=0.104, cdz=1.04, dtm=538000
 42: R_con_con_env_0229_01_20021112T210600_20091215T210600 : mgu=3.076, cdz=1.04, dtm=328000
 43: R_con_con_env_0773_01_20030525T210900_20090920T210800 : mgu=3.776, cdz=1.04, dtm=166000
 44: R_con_con_env_0930_01_20020720T084700_20101016T084700 : mgu=-11.649, cdz=1.04, dtm=1139000
 45: R_con_con_jas_0020_01_20080712T193800_20181125T141600 : mgu=7.3265, cdz=0.563
 46: R_con_con_jas_0057_01_20080724T041400_20181127T005400 : mgu=-18.4196, cdz=0.563
 47: R_con_con_jas_0070_01_20080724T162400_20181127T130400 : mgu=-16.6597, cdz=0.563
 48: R_con_con_jas_0083_01_20080715T063700_20181128T011500 : mgu=-10.3561, cdz=0.563
 49: R_con_con_jas_0146_02_20080717T174000_20181130T121800 : mgu=-18.2834, cdz=0.563
 50: R_con_con_jas_0146_03_20080717T173900_20181130T121700 : mgu=-19.5044, cdz=0.563
 51: R_con_con_jas_0159_01_20080718T055000_20181121T023000 : mgu=-16.8047, cdz=0.563
 52: R_con_con_jas_0235_02_20080721T050200_20181124T014200 : mgu=-19.0887, cdz=0.563
 53: R_con_con_jas_0248_01_20080721T171200_20181124T135200 : mgu=-11.9291, cdz=0.563
 54: R_con_con_s3a_0042_00_20160410T082700_20181111T082700 : mgu=-17.9153, cdz=0
 55: R_con_con_s3a_0085_00_20160508T203900_20181112T203900 : mgu=-15.065, cdz=0
 56: R_con_con_s3a_0128_00_20160413T085000_20181114T085000 : mgu=-9.3631, cdz=0
 57: R_con_con_s3a_0156_00_20160414T082300_20181115T082300 : mgu=-19.5754, cdz=0
 58: R_con_con_s3a_0171_00_20160414T210000_20181115T210000 : mgu=-0.011, cdz=0
 59: R_con_con_s3a_0199_00_20160415T203500_20181116T203500 : mgu=-15.5522, cdz=0
 60: R_con_con_s3a_0270_00_20160418T081900_20181119T082000 : mgu=-18.8798, cdz=0
 61: R_con_con_s3a_0285_00_20160418T205600_20181119T205600 : mgu=-3.1801, cdz=0
 62: R_con_con_s3a_0313_00_20160419T203100_20181120T203200 : mgu=-17.6062, cdz=0
 63: R_con_con_s3a_0356_00_20160421T084100_20181122T084200 : mgu=-14.9502, cdz=0
 64: R_con_con_s3a_0384_00_20160422T081600_20181123T081600 : mgu=-18.3948, cdz=0
 65: R_con_con_s3a_0399_00_20160422T205300_20181123T205300 : mgu=-5.8106, cdz=0
 66: R_con_con_s3a_0427_00_20160423T202800_20181124T202800 : mgu=-15.6586, cdz=0
 67: R_con_con_s3a_0470_00_20160425T083800_20181126T083800 : mgu=-15.5133, cdz=0
 68: R_con_con_s3a_0498_00_20160426T081300_20181127T081300 : mgu=-18.0106, cdz=0
 69: R_con_con_s3a_0513_00_20160426T204900_20181127T205000 : mgu=-11.7885, cdz=0
 70: R_con_con_s3a_0541_00_20160427T202400_20181101T202400 : mgu=-19.0497, cdz=0
 71: R_con_con_s3a_0556_00_20160428T090200_20181129T090300 : mgu=5.0087, cdz=0
 72: R_con_con_s3a_0584_00_20160429T083400_20181103T083400 : mgu=-17.5863, cdz=0
 73: R_con_con_s3a_0599_00_20160429T211000_20181103T211100 : mgu=5.6735, cdz=0
 74: R_con_con_s3a_0612_00_20160430T081000_20181104T081000 : mgu=-16.7907, cdz=0
 75: R_con_con_s3a_0627_00_20160430T204600_20181104T204600 : mgu=-12.7807, cdz=0
 76: R_con_con_s3a_0655_00_20160528T202000_20181105T202000 : mgu=-19.302, cdz=0
 77: R_con_con_s3a_0698_00_20160406T083000_20181107T083000 : mgu=-15.6639, cdz=0
 78: R_con_con_s3a_0741_00_20160407T204200_20181108T204300 : mgu=-12.9301, cdz=0

Ces SV peuvent être positionnées sur le tronçon de fleuve étudié (Fig 15). On y ajoute automatiquement l'emplacement des Stations Virtuelles (SV) récupérées automatiquement dans

Hydroweb (les fichiers des stations ont été téléchargés auparavant, le script MatLab trouve ensuite et traite automatiquement les fichiers, avec les meta-données et les données) :

Congo-kin. (ENV (gp):2, JA2 (bp):6, SRL (mp):3, S3A (r):20, ICE (yp):0, TOP (rh):0, SWOT (bx):0, Combined (kp):28, Other (kp):0, Too Far (cp):1

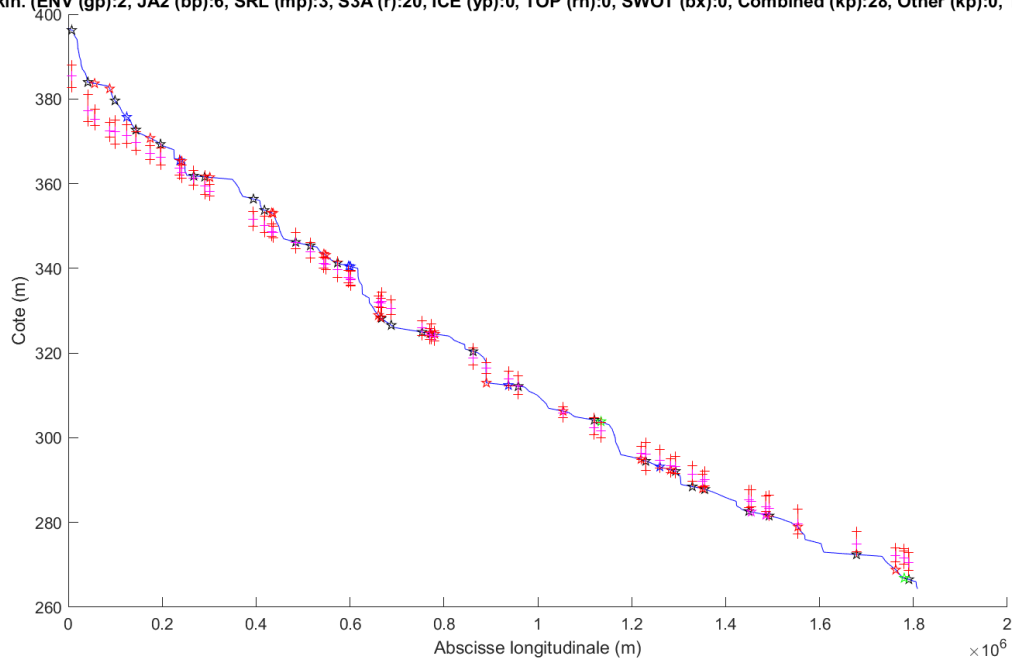


Fig 15. Stations Virtuelles sur le fleuve Congo jusqu'à Kinshasa (Hydroweb)

Dans la figure Fig 15, les étoiles vertes (Envisat), bleues (Jason 2), magentas (Sara), rouges (Sentinel 3A) et noires (multi-mission) sont les emplacements des SV, positionnées à la cote de GWD-LR (donc SRTM 11-22 Février 2000). Les petites barres verticales rouges sont les amplitudes des cotes provenant de ces SV dans la base Hydroweb (croix rouges pour le min et le max dans les données disponibles). On observe bien le décalage des cotes SRTM trop hautes à l'amont et trop basses à l'aval.

On positionne aussi ces SV en plan (Fig 16) :

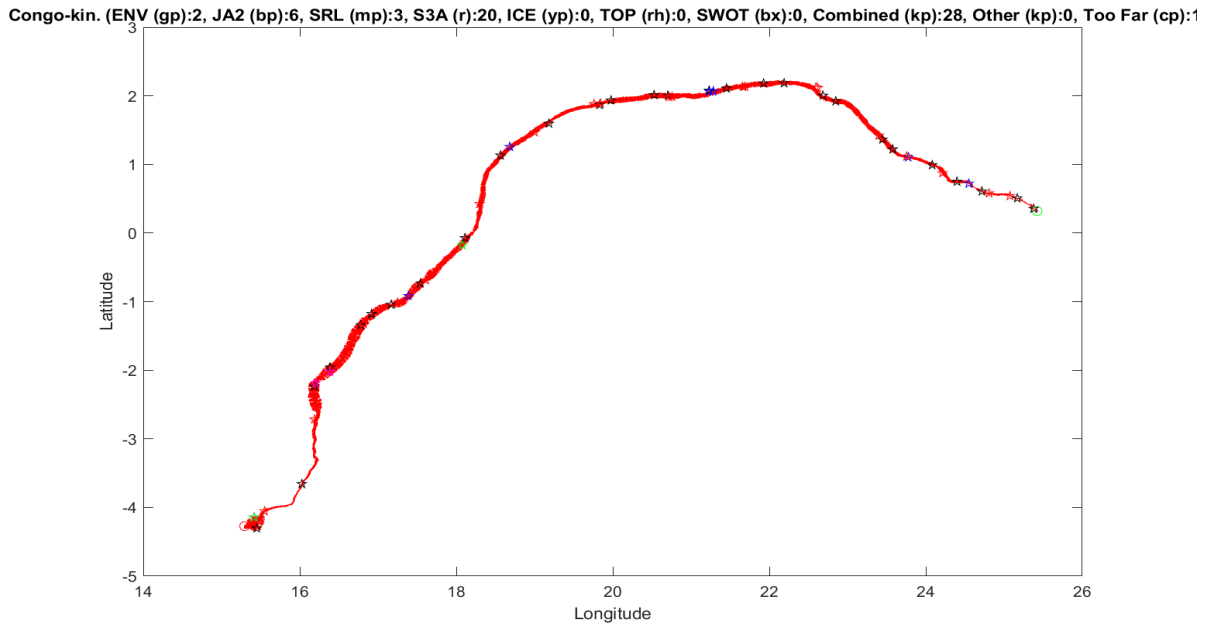


Fig 16. Stations Virtuelles sur le fleuve Congo (Hydroweb)

On peut voir les évolutions temporelles des données des SV :

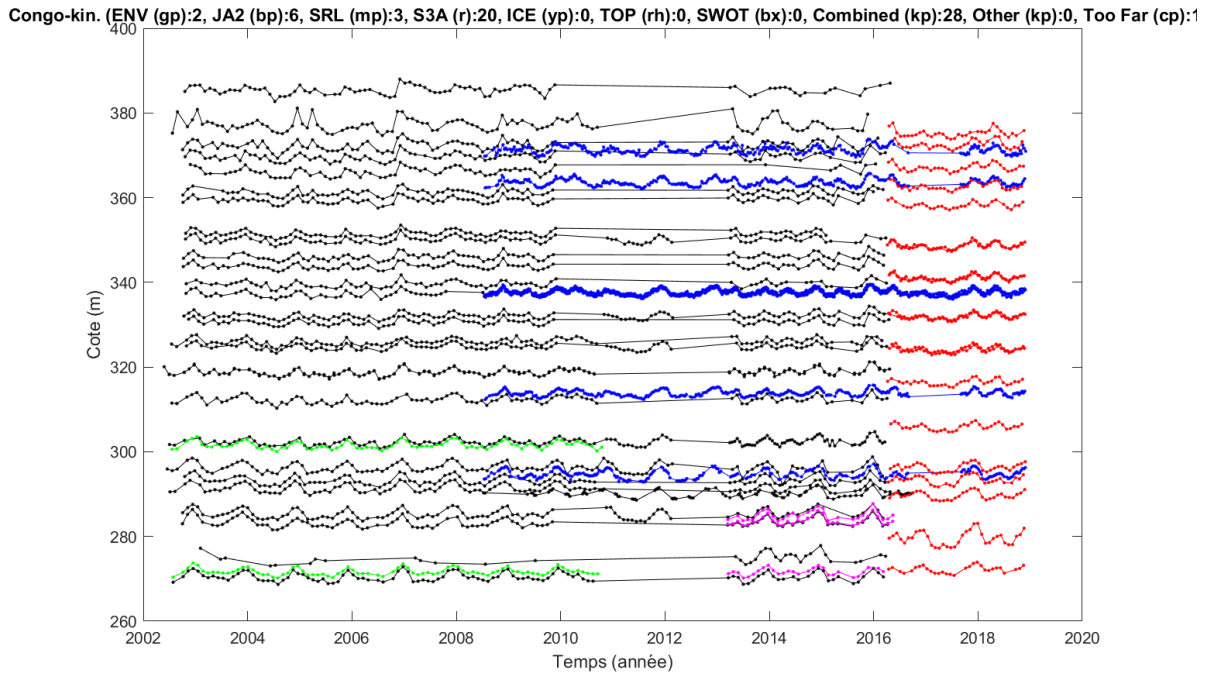


Fig 17. Stations Virtuelles sur le fleuve Congo (Hydroweb)

Si l'on analyse de plus près certaines stations, il y a un écart parfois important entre les données GWD-LR (SRTM donc 11-22 février 2000) et Hydroweb (données 2002 à 2018). Compte tenu des variations cycliques interannuelles, l'écart à corriger est calculé entre la valeur moyenne du mois de

février (mois 2), et la cote SRTM (Fig 18). On aurait pu affiner, en vérifiant à partir des quelques données in-situ disponibles, si la valeur de la cote entre le 11 et 22 février 2000 est effectivement proche de cette valeur moyenne, et ajouter une correction supplémentaire s'il s'avérait que 11-22 février 2000 était une période spécialement sèche ou humide. Mais ces stations in-situ sont peu nombreuses, et de toute façon cette correction est provisoire en attendant la nouvelle base GWD-LR qui intégrera les corrections de SRTM. En attendant, cette correction est calculée ainsi et détaillée ci-dessous pour chaque SV. On indique également les SV hors de la zone retenue, pour information, ainsi que la distance entre cette SV et le point le plus proche du tronçon retenu. On indique également le nombre de points (correspondant donc à un mois de février) sur lesquels la moyenne, et donc la correction à appliquer, est calculée :

```

1 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-PK-0008 (distance=371298.2 m)
2 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-PK-0041 (distance=342374.2 m)
3 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-PK-0047 (distance=337772.8 m)
4 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-PK-0069 (distance=319003.6 m)
5 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-PK-0104 (distance=288902.2 m)
6 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-PK-0331 (distance=145604.3 m)
7: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0522 = -4.0696 (8 points)
8: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0636 = -3.5783 (3 points)
9: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0807 = -1.3125 (8 points)
10: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0848 = -2.0822 (7 points)
11: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0936 = -1.7216 (12 points)
12: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0959 = -2.3344 (7 points)
13: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-0993 = -0.61532 (8 points)
14: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1052 = -1.1506 (11 points)
15: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1155 = 2.0857 (14 points)
16: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1311 = 0.016557 (10 points)
17: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1401 = 1.677 (17 points)
18: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1484 = -0.072686 (10 points)
19: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1502 = -1.2524 (8 points)
20: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1567 = -3.9681 (8 points)
21: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1588 = -3.8527 (11 points)
22: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1650 = 3.107 (29 points)
23: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1676 = 1.8084 (7 points)
24: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1732 = 1.6731 (8 points)
25: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1761 = 0.053152 (6 points)
26: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1823 = 3.8275 (8 points)
27: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1844 = 4.7497 (6 points)
28: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1942 = 2.373 (5 points)
29: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-1965 = 0.76421 (5 points)
30: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-2030 = 2.9643 (6 points)
31: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-2079 = 2.6851 (8 points)
32: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-2122 = 7.2539 (8 points)
33: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-2177 = 6.2351 (9 points)
34: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-PK-2208 = 10.2325 (8 points)
35: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-SRL-014-02-PK-812 = -1.187 (2 pts)
36: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-SRL-057-01-PK-842 = -1.1978 (1 pts)
37: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV CONGO-SRL-143-01-PK-546 = -4.8174 (2 pts)
38 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-SRL-229-01-PK-331 (distance=145402.8 m)
39 : Station Virtuelle hors zone : CONGO-SRL-315-01-PK-72 (distance=317914.7 m)
40 : Station Virtuelle hors zone : env-0100-01 (distance=147122.6 m)
41: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0143-01 = -4.7854 (6 points)
42 : Station Virtuelle hors zone : env-0229-01 (distance=145882.8 m)
43 : Station Virtuelle hors zone : env-0773-01 (distance=241895.8 m)
44: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0930-01 = 2.4239 (7 points)
45 : Station Virtuelle hors zone : jas-0020-01 (distance=339208.4 m)
46 : Station Virtuelle hors zone : jas-0057-01 (distance=181632.7 m)
47: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0070-00 = 3.3235 (26 points)
48: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0083-01 = -0.80399 (11 points)
49 : Station Virtuelle hors zone : jas-0146-02 (distance=390087.4 m)
50: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0146-03 = 4.4098 (26 points)
51: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0159-01 = 2.8591 (28 points)
52: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0235-02 = 1.8133 (25 points)
53: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0248-01 = -1.2508 (23 points)
54: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0042-00 = 3.873 (3 points)
55: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0085-00 = 1.117 (2 points)
56: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0128-00 = 0.015704 (2 points)
57: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0156-00 = 3.9367 (2 points)
58: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0171-00 = -3.1156 (2 points)
59: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0199-00 = -2.5698 (2 points)

```

60: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0270-00 = 8.7678 (2 points)
 61: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0285-00 = 0.83935 (2 points)
 62: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0313-00 = 2.8527 (2 points)
 63: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0356-00 = 1.3452 (2 points)
 64 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0384-00 (distance=163341.8 m)
 65: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0399-00 = -0.5652 (2 points)
 66: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0427-00 = 4.9967 (2 points)
 67: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0470-00 = -2.9203 (2 points)
 68 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0498-00 (distance=448073.0 m)
 69: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0513-00 = -0.36435 (2 points)
 70: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0541-00 = 2.8204 (2 points)
 71 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0556-00 (distance=280045.2 m)
 72: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0584-00 = 2.5044 (2 points)
 73 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0599-00 (distance=296889.2 m)
 74 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0612-00 (distance=567860.4 m)
 75: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0627-00 = 1.0877 (2 points)
 76: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0655-00 = 10.2171 (2 points)
 77: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0698-00 = 5.059 (2 points)
 78: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0741-00 = -2.8344 (2 points)

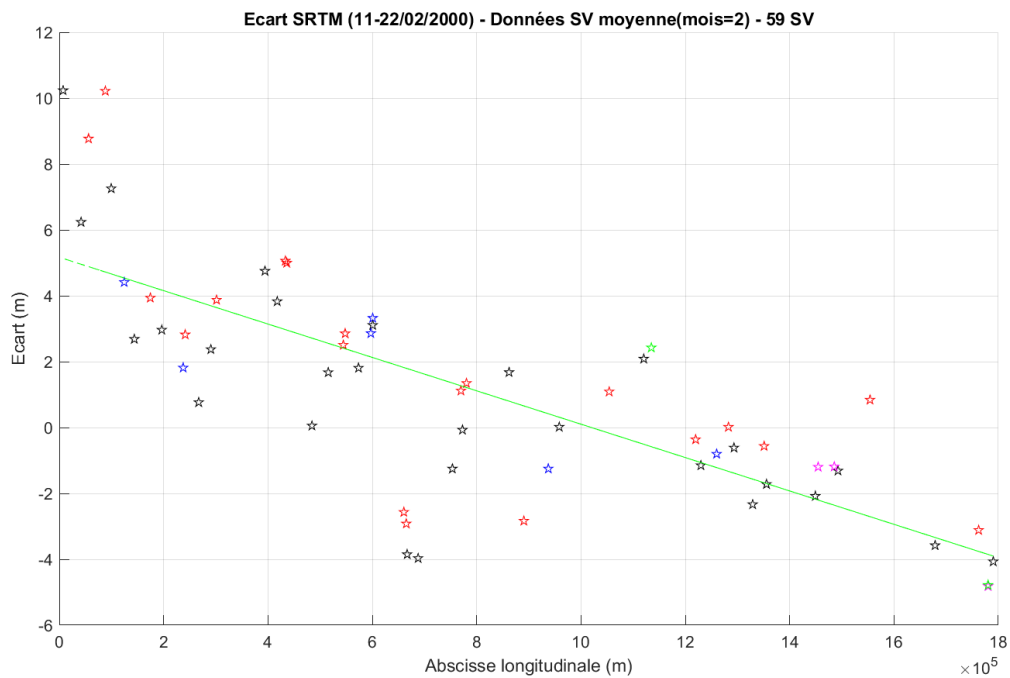


Fig 18. Ecart entre les cotes SRTM et les moyennes des cotes aux SV pour les mois de février (Congo)

Ces écarts (Fig 15, Fig 18) sont principalement dus aux erreurs connues de SRTM (Fig 19). Malheureusement on ne dispose pas des données Hydroweb aux SV pour Février 2000, ce qui aurait permis de vérifier & recalibrer les cotes entre SRTM et ces SV (en supposant que les cotes des SV sont exactes, ce que nous faisons dans cette étude).

Suite à des discussions avec Dai Yamazaki et Jean-François Crétaux, SRTM est connu pour présenter des biais, qui sont effectivement positifs à l'amont et négatifs à l'aval sur cette zone (cf. biais représenté dans le graphe en haut à droite de la Fig 19 ci-dessous) :

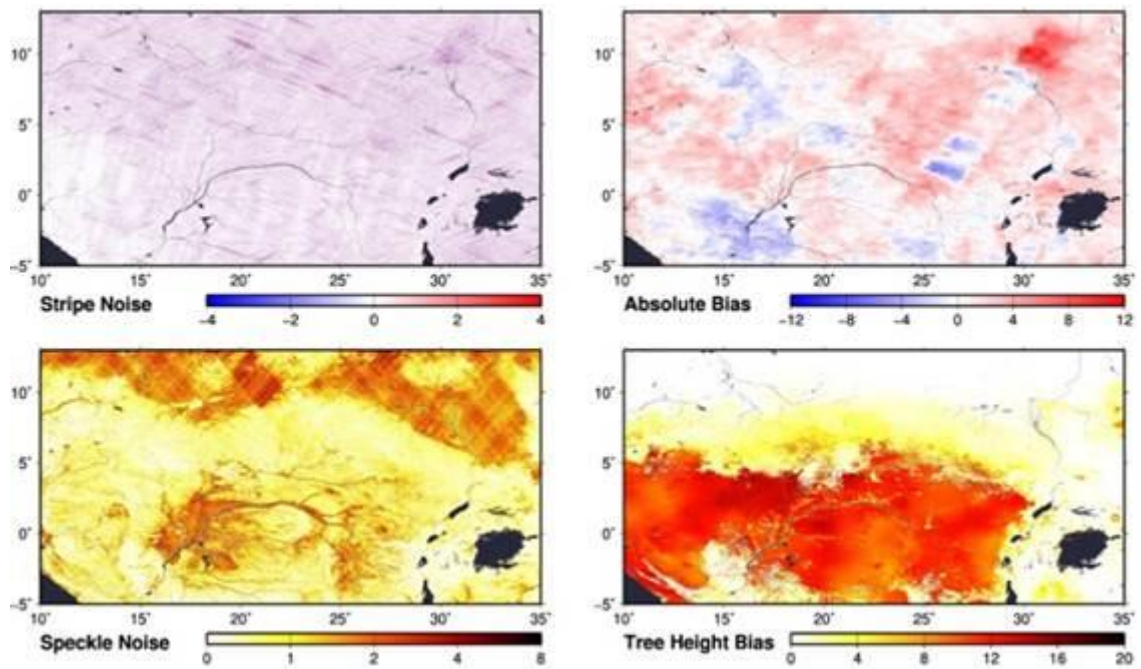


Fig 19. Erreurs SRTM (Source email échangé avec Dai Yamazaki)

Ce que l'on retrouve sur nos données (Fig 18), avec un écart décroissant de manière assez linéaire jusqu'au pool de Malebo (de +10m à -4m au maximum), les écarts étant ensuite plus faibles à l'aval du pool jusqu'à l'embouchure (entre +3m et -4m).

On peut ensuite ajouter les lieux-dits, pour mieux se repérer, ainsi que donner les informations des noms des lieux qui seront donnés aux sections en travers dans le logiciel SIC.

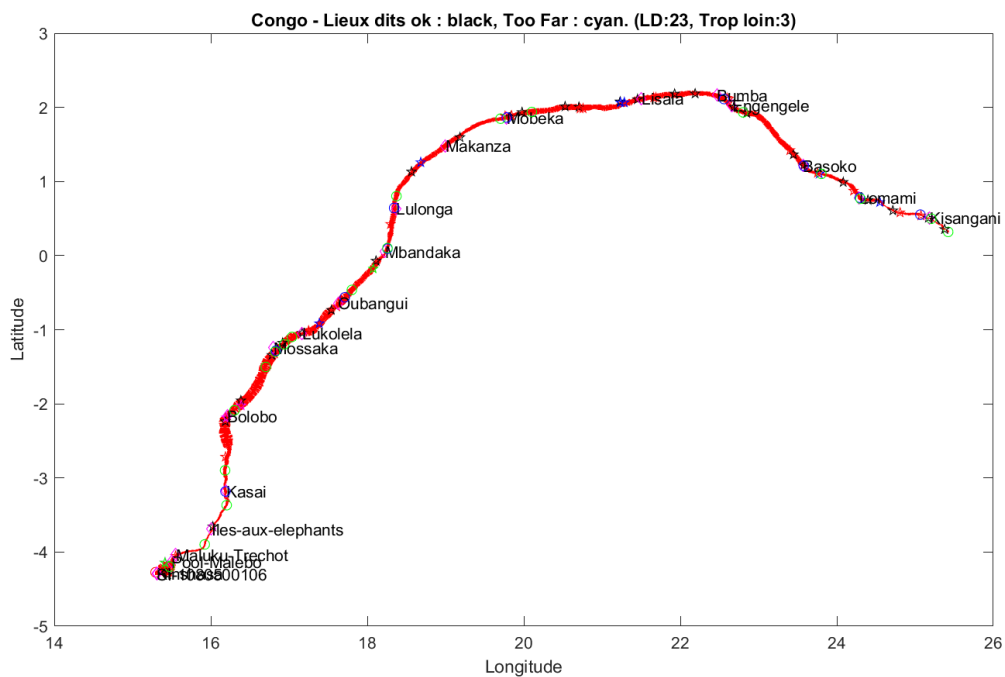


Fig 20. Lieux-dits et Stations Virtuelles (Congo)

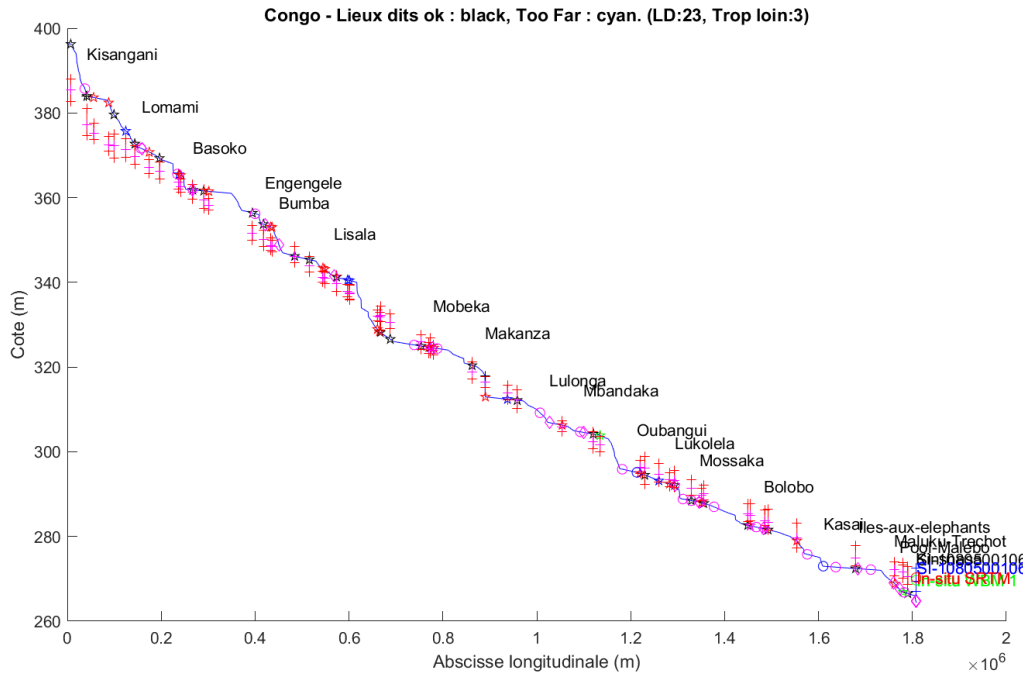


Fig 21. Ligne d'eau GWD-LR, ainsi que SV Hydroweb

3.1.4 Données de stations in-situ

Les données des stations in-situ peuvent être utilisées pour vérifier certaines informations, voire en tenir compte pour appliquer certaines corrections. Sur le fleuve Congo, la seule station in-situ disponible avec une courbe de tarage $Q(Z)$ est celle de Kinshasa Est - Inga (cote mesurée à Kinshasa-Est et débit mesuré à Inga). Celle de Malaku Tréchet n'a que la mesure de la cote Z de disponible, mais pas de courbe de tarage à notre connaissance. Nous ne pouvons donc pas l'utiliser ici pour valider notre modèle hydraulique. Par contre cette station sera intéressante pour valider les cotes altimétriques satellitaires. La Station In-Situ de M'Bata est hors zone (Lobaye, affluent de l'Oubangui).

Nous lisons les données de cette station dans la base Sierem (Station 1080500106). Les données sont disponibles pour la période 1902-2018. Une extraction de ces données nous avait été fournie par HSM (Jean-François Boyer) pour la période 1990-2010. Nous calculons certaines moyennes, pour les débits et pour les cotes, pour des périodes remarquables, et notamment pour la période SRTM (11-22 Février 2000), ainsi que pour la période utilisée pour la base WBM (1961-2010). Le zéro-échelle n'est pas indiqué dans la base Sierem, malgré quelques documents pdf intégrés dans la base Sierem retraçant les évolutions historiques de cette station. Nous avons pris celui trouvé dans le rapport de Laurie Pothin 2016, à la cote Zero_Echelle=267.32 m.

Lit données à la station SI-1080500106 sur [Q_Kinshasa_1902_2018_SIEREM.htm](#)

Lit données à la station SI-1080500106 sur [Z_Kinshasa_1902_2018_SIEREM.htm](#)

Mean $Q_{Kinshasa_1902_2018_SIEREM}$ =39683.58 m³/s

Mean $Q_{Kinshasa_1902_2018_SIEREM-WBM}$ =40780.57 m³/s

Mean $Q_{Kinshasa_1902_2018_SIEREM-SRTM}$ =45078.25 m³/s

Mean $Z_{Kinshasa_1902_2018_SIEREM}$ =269.54 m

Mean $Z_{Kinshasa_1902_2018_SIEREM-WBM}$ =269.68 m

Mean $Z_{Kinshasa_1902_2018_SIEREM-SRTM}$ =270.29 m

Ces données de moyennes sont reportées dans la Table 2. On peut tracer l'ensemble de ces débits et cotes (Fig 22 pour la période 1990-2010 fournie dans un fichier par Jean-François Boyer, HSM, ou sur toute la période 1902-2018 disponible dans la base Sierem, Fig 23, avec la partie 1990-2010 en rouge). A partir de ces données on a pu ajuster un polynôme du second degré pour calculer la courbe de tarage Q(Z) (Fig 22 en bas ainsi que Fig 23 en bas, à partir des données sur leurs périodes respectives).

Pour le polynôme on trouve l'équation suivante, avec un très bon ajustement par rapport aux points (Q,Z) de la base Sierem (rRMSE à SI-1080500106=0.00023568 sur la totalité des points et 0.00026179 sur l'approximation en nombre de points réduits). Cela indique qu'un ajustement polynomial du second degré est très satisfaisant :

$$Q=378.8726*(Z-z_0)^2 + 5498.2177*(Z-z_0) + 21623.3601 ; z_0=266.85$$

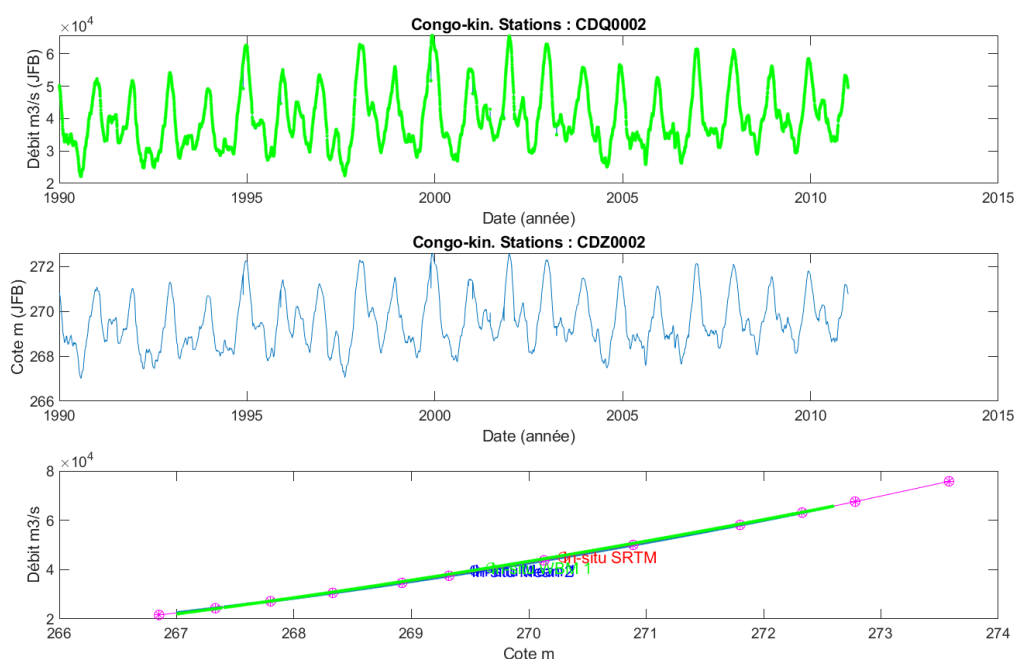


Fig 22. Station Kinshasa (1080500106) sur la période 1990-2010

La variable $z_0=266.85$ choisie ici pour le polynôme est en fait la cote minimum sur toutes les données, et non pas le zéro-échelle (267.32 m). Nous avons fait ce choix pour appliquer le même principe pour toutes les lois Q(Z) que nous génèrerons aux autres stations virtuelles.

Sur la Fig 22 ci-dessus, sur la courbe du bas, la courbe en magenta est celle du polynôme ajusté, dont l'équation est donnée ci-dessus, et la courbe verte est celle des points (Q,Z) de la base Sierem. On constate une très bonne juxtaposition. Les points magenta sont ceux d'une approximation de la Q(Z) en segments, qui sera utilisée dans SIC comme approximation tabulée de cette Q(Z) polynomiale (dans SIC la condition limite aval doit être entrée sous forme tabulée, une fonction polynomiale n'est pas autorisée actuellement).

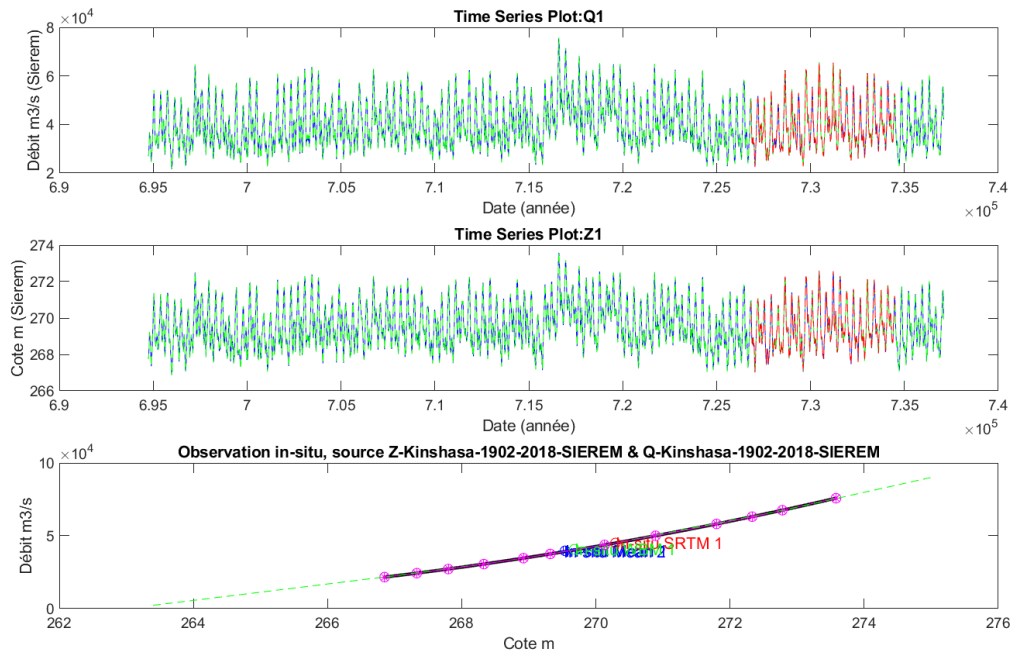


Fig 23. Station Kinshasa (1080500106) sur la période 1902-2018

Notre modèle hydraulique sur le Congo s'arrêtant à Kinshasa, nous choisirons cette $Q(Z)$ comme condition limite aval. Il aurait été également possible de prolonger le modèle plus à l'aval (par exemple à Inga ou à l'embouchure) et de vérifier si la $Q(Z)$ générée par notre méthode SIC-SV correspondait à cette $Q(Z)$ in-situ. Il aurait été probable qu'un ajustement des frottements (coefficients de Manning-Strickler locaux) aurait été nécessaire (c'est cette approche que nous avons testé sur l'Oubangui avec la station de Bangui). Par ailleurs, le pool de Malebo ayant certainement un fonctionnement hydraulique un peu délicat, avec des pentes de l'eau faibles, et donc avec des incertitudes relatives importantes sur ces pentes, nous avons préféré utiliser directement la $Q(Z)$ in-situ calculée comme indiqué ci-dessus.

3.2 Oubangui

Toutes les données précédentes étant obtenues à partir de données globales (GWD-LR, WBM, et Hydroweb), il est immédiat de les extraire pour l'Oubangui. Les scripts développés sont génériques, et il suffit d'indiquer le début et la fin de la zone d'intérêt. Pour l'Oubangui nous avons choisi pour le point amont latitude= 4° 14' 22.00" Nord, longitude= 21° 56' 16.51" Est et pour le point aval, latitude 0° 19' 21.00" Sud, longitude=17° 41' 51.00".

Code du script Matlab définissant ces points amont et aval :

```

nom_riv='Oubangui';
region='af1';
% Point amont (en degrés, minutes, secondes)
lon1dms=[21 56 16.51];
lat1dms=[4 14 22.00];
% Point aval (en degrés, minutes, secondes)
if strcmp(opt_avl,'djo')
    % Doundou, un peu avant la confluence avec le Congo, pour éviter
    % fort Qwbm qui intègre ensuite le Congo lui-meme

```

```

lon2dms=[17 41 51.00];
lat2dms=-[0 19 21.00];
end

```

Nous présentons les figures correspondant aux données extraites sur l'Oubangui, dans la même logique que pour le Congo présenté précédemment.

3.2.1 Données hydrologiques

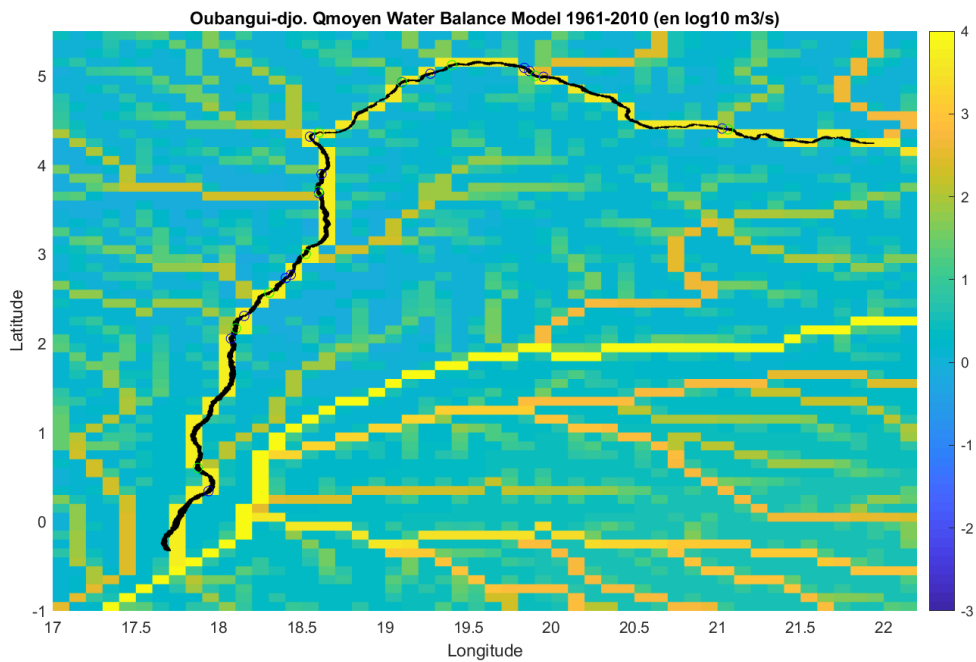


Fig 24. Débit moyen Oubangui 1961-2010 (en log10 m3/s), Source WBM

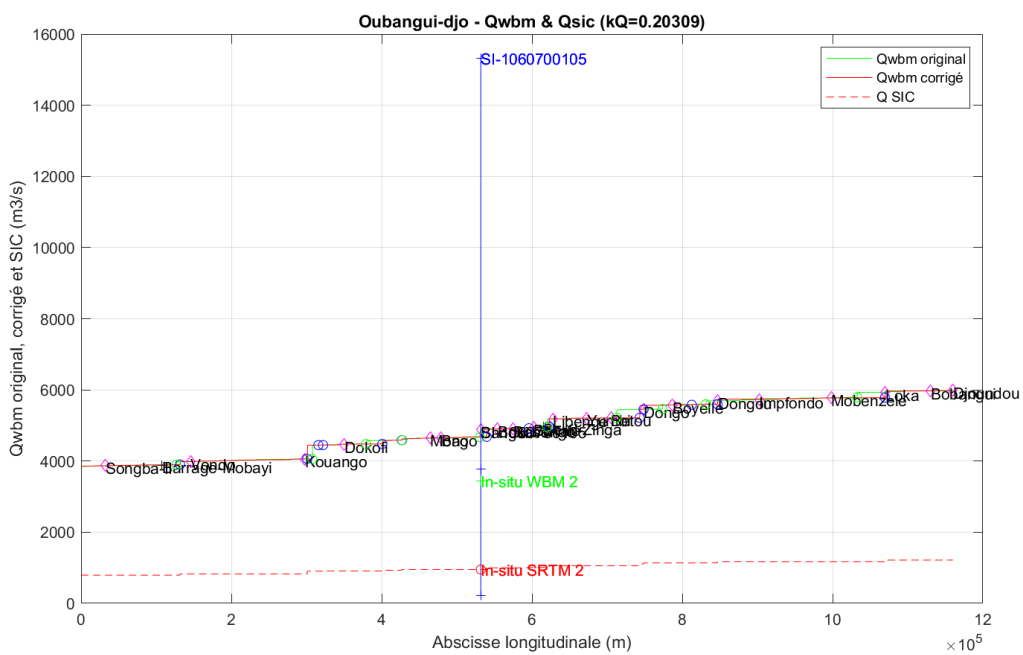


Fig 25. Débit moyen 1961-2010 le long de l'Oubangui

Le débit Q_{wbm} a été corrigé comme indiqué précédemment grâce aux données des surfaces drainées afin de le rendre cohérent en résolution et en x-y avec la base GWD-LR. On voit qu'après cette correction, le débit spécifique est compris entre 8.9 et 10 l/s/km² sur la totalité du linéaire de la rivière Oubangui (Fig 26). La zone proche de Boyelle peut être probablement améliorée avec un meilleur positionnement de l'affluent afin d'avoir une meilleure régularité du débit spécifique.

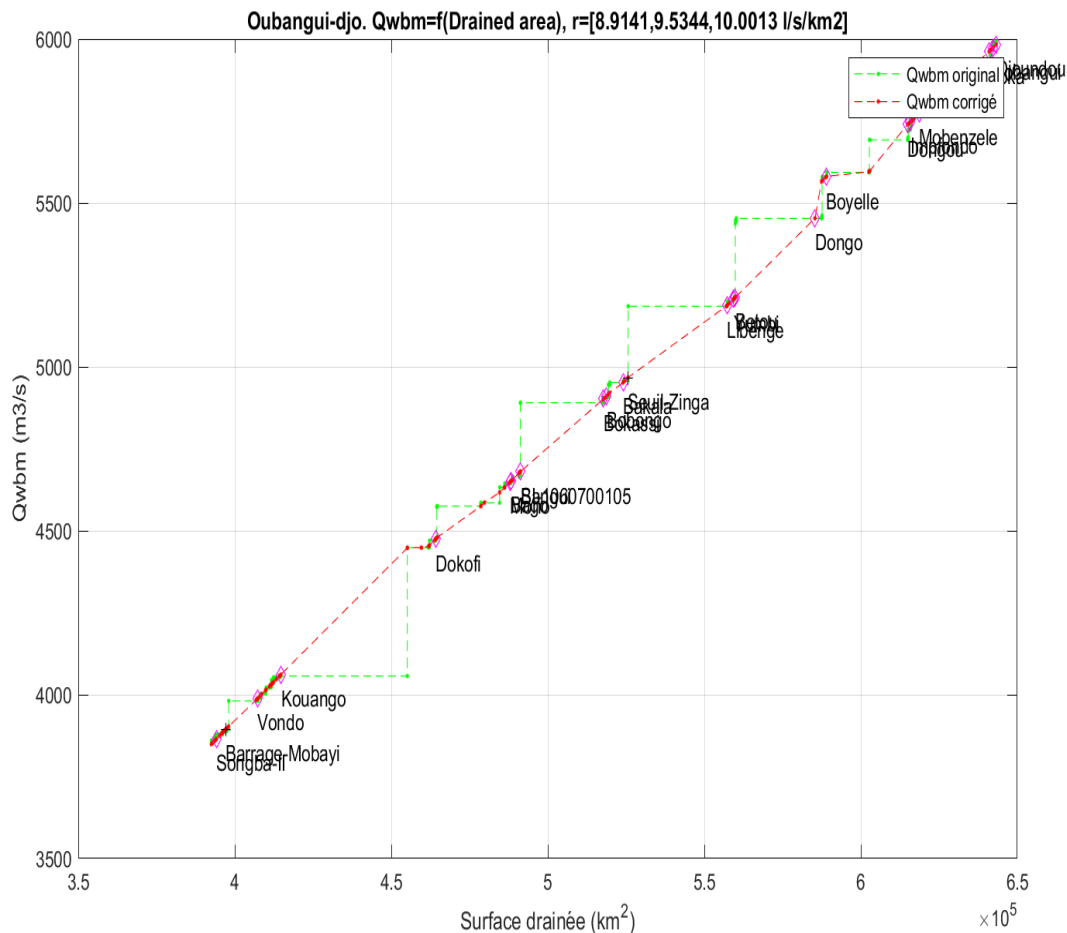


Fig 26. Débit spécifique moyen 1961-2010 le long de l'Oubangui

Contrairement au Congo, où le débit de la période SRTM (courbe rouge pointillée Fig 25) était proche du débit moyen WBM (courbe verte pour les valeurs initiales et rouge en trait plein pour les valeurs corrigées) avec un écart de seulement 8%, on observe que sur l'Oubangui il y a un écart important avec un écart de 79.7% (cf. Table 2 pour les données numériques). Le débit de référence utilisé pour la génération du modèle hydraulique dans SIC a été corrigé en tenant compte de cet écart.

Sur l'Oubangui la zone retenue a une longueur de 1160 km, démarrant à l'amont de Songba II jusqu'à Djoundou. Nous nous sommes arrêtés à Djoundou au lieu de la confluence même, un peu plus à l'aval, car cette zone est très complexe hydrauliquement, avec des connexions entre l'Oubangui et le Congo par des chenaux multiples. Cela ne pose pas de problèmes particuliers car les 2 modèles hydrauliques pour l'Oubangui et pour le Congo seront donc traités indépendamment dans cette étude. La condition limite aval de l'Oubangui sera prise comme étant celle de la base GWD-LR, c'est-à-dire avec une cote quasi-constante à la cote SRTM. Ce point pourrait être amélioré, car le modèle

hydraulique sera faussé dans la zone de la courbe de remous remontant de cette condition limite aval. Mais on observe (Fig 51) que cette zone à l'aval de l'Oubangui entre Bobangui et Djoundou est très pentue et la courbe de remous ne remonte pas jusqu'à la Station Virtuelle la plus proche située vers Mobenzele.

3.2.2 Données géométriques

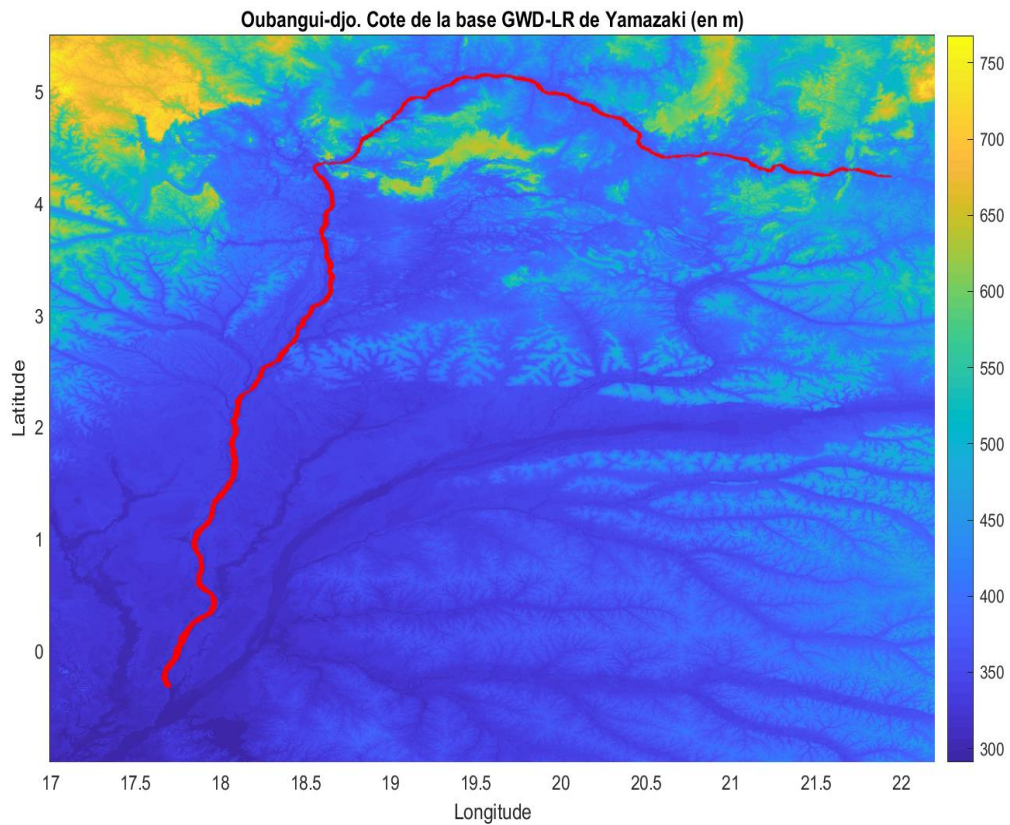


Fig 27. Oubangui et zone retenue jusqu'à l'amont de la confluence avec le Congo (base GWD-LR)

Les données de largeurs et hauteurs sont extraites de la base GWD-LR, comme pour le Congo.

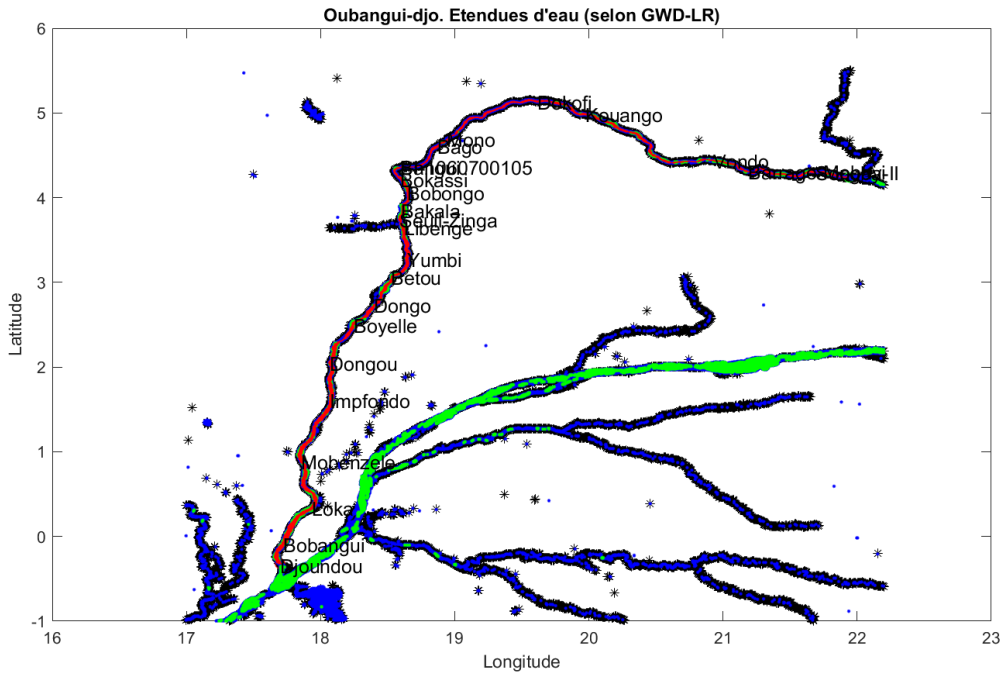


Fig 28. Oubangui et largeur des sections (base GWD-LR)

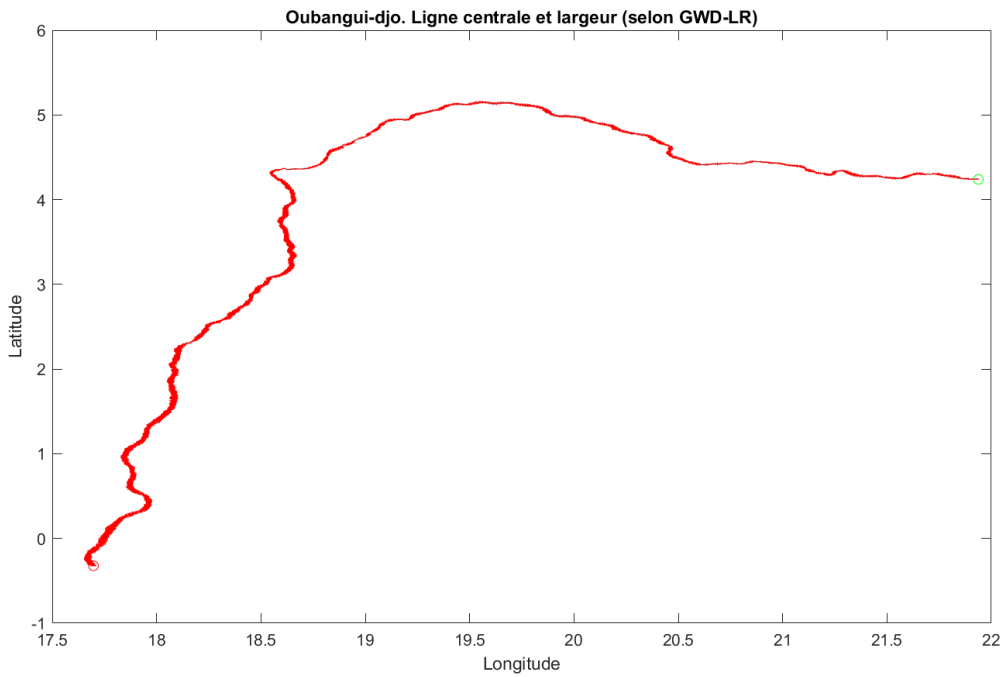


Fig 29. Rivière Oubangui seule (base GWD-LR)

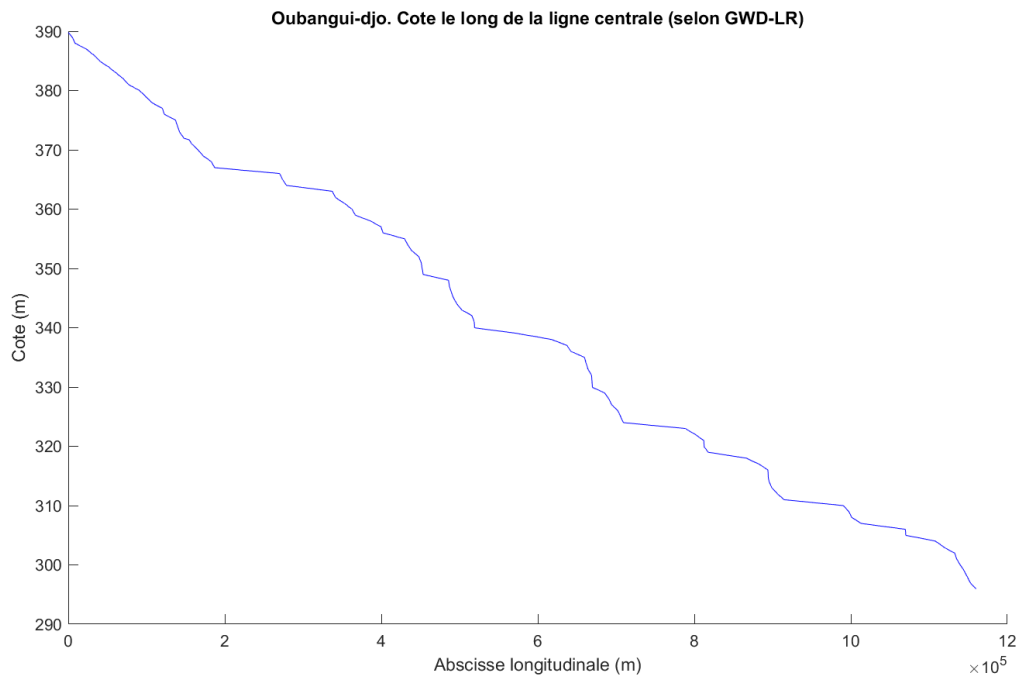


Fig 30. Cote SRTM de l'Oubangui (base GWD-LR)

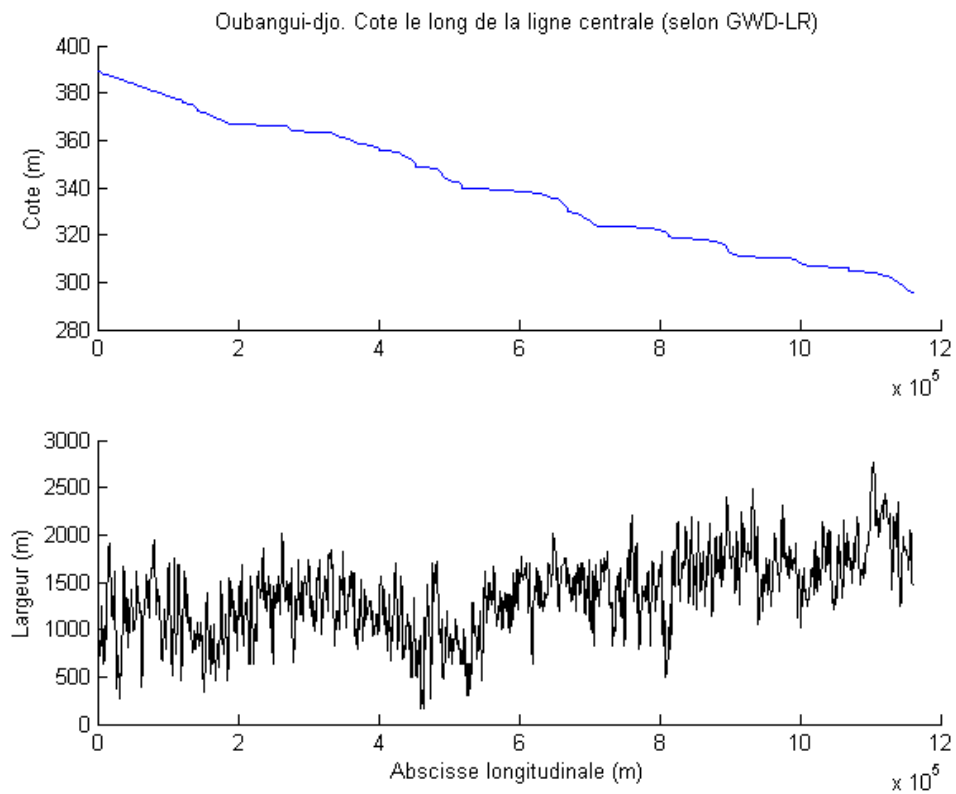


Fig 31. Cote SRTM et largeur de l'Oubangui (base GWD-LR)

3.2.3 Données altimétriques

Comme pour le Congo, nous avons extrait automatiquement les données et méta données à partir de la base Hydroweb, ainsi qu'utilisé des données sous le même format traitées spécifiquement pour cette étude par Stéphane Calmant.

Au total sur l'Oubangui, nous avons conservé 9 SV Envisat (en vert sur les Fig 32, Fig 33, Fig 34), 5 SV Jason 2 (en bleu), 7 SV Saral (en magenta), 6 SV Sentinel 3A (en rouge) et 3 SV multi-mission (en noir), soit 30 Stations Virtuelles. Il y a également 7 autres SV disponibles sur l'Oubangui mais en dehors de la zone étudiée (à l'amont de Songba II), soit donc 37 SV au total.

Comme pour le Congo, nous indiquons ici le positionnement de ces SV, tant en abscisse longitudinale dans notre modèle hydraulique, qu'en référence absolue en longitude et latitude :

```
1 : SV env-0171-01, x = 65141.5744 m, Lon = 21.467, Lat = 4.268
2 : SV env-0257-01, x = 317128.0662 m, Lon = 19.854, Lat = 5.064
3 : SV env-0300-01, x = 101831.3692 m, Lon = 21.216, Lat = 4.294
4 : SV env-0386-01, x = 304176.0059 m, Lon = 19.933, Lat = 4.993
5 : SV env-0629-01, x = hors zone, Lon = 22.213, Lat = 4.143
6 : SV env-0715-01, x = 172853.9361 m, Lon = 20.713, Lat = 4.429
7 : SV env-0758-01, x = 1666.6667 m, Lon = 21.922, Lat = 4.24
8 : SV env-0801-01, x = 419245.3902 m, Lon = 19.162, Lat = 4.944
9 : SV env-0844-01, x = hors zone, Lon = 20.528, Lat = 4.438
10 : SV env-0887-01, x = 781968.4941 m, Lon = 18.26, Lat = 2.518
11 : SV env-0930-01, x = 411332.812 m, Lon = 19.207, Lat = 4.963
12 : SV ja2-0070-01, x = 254494.6688 m, Lon = 20.257, Lat = 4.794
13 : SV ja2-0083-02, x = 357476.6312 m, Lon = 19.563, Lat = 5.153
14 : SV jas-0083-01, x = 1042163.0988 m, Lon = 17.9069, Lat = 0.5441
15 : SV jas-0159-01, x = hors zone, Lon = 22.0555, Lat = 4.2191
16 : SV jas-0248-01, x = 787984.2869 m, Lon = 18.2466, Lat = 2.4801
17 : SV s3a-0085-00, x = 419245.3902 m, Lon = 19.1647, Lat = 4.9446
18 : SV s3a-0199-00, x = 278827.4409 m, Lon = 20.1089, Lat = 4.9036
19 : SV s3a-0313-00, x = 109188.3918 m, Lon = 21.1744, Lat = 4.3174
20 : SV s3a-0356-00, x = 233495.23 m, Lon = 20.3856, Lat = 4.6934
21 : SV s3a-0427-00, x = hors zone, Lon = 22.1363, Lat = 4.1966
22 : SV s3a-0470-00, x = 98823.4728 m, Lon = 21.2346, Lat = 4.3061
23 : SV s3a-0584-00, x = hors zone, Lon = 22.1439, Lat = 4.1901
24 : SV s3a-0627-00, x = 912974.7069 m, Lon = 18.0522, Lat = 1.5314
25 : SV UBANGUI-J2-070-01-PK-859, x = 255280.343 m, Lon = 20.254, Lat = 4.803
26 : SV UBANGUI-J2-159-01-PK-1115, x = hors zone, Lon = 22.061, Lat = 4.219
27 : SV UBANGUI-PK-0190, x = 975894.0592 m, Lon = 17.865, Lat = 1.061
28 : SV UBANGUI-PK-0556, x = 582559.5636 m, Lon = 18.652, Lat = 4.004
29 : SV UBANGUI-PK-0599, x = 533838.1831 m, Lon = 18.576, Lat = 4.351
30 : SV UBANGUI-SRL-257-01-PK-795, x = 313564.6142 m, Lon = 19.864, Lat = 5.039
31 : SV UBANGUI-SRL-300-01-PK-987, x = 101831.3692 m, Lon = 21.218, Lat = 4.285
32 : SV UBANGUI-SRL-386-01-PK-803, x = 303390.3317 m, Lon = 19.933, Lat = 4.978
33 : SV UBANGUI-SRL-629-01-PK-1114, x = hors zone, Lon = 22.218, Lat = 4.13
34 : SV UBANGUI-SRL-715-01-PK-924, x = 172853.9361 m, Lon = 20.715, Lat = 4.432
35 : SV UBANGUI-SRL-758-01-PK-1076, x = 1666.6667 m, Lon = 21.924, Lat = 4.241
36 : SV UBANGUI-SRL-801-01-PK-700, x = 419800.9457 m, Lon = 19.16, Lat = 4.95
37 : SV UBANGUI-SRL-844-01-PK-903, x = 196401.0341 m, Lon = 20.532, Lat = 4.445
```

Nous indiquons aussi, comme pour le Congo, la correction du Mean Geoidal Undulation (mgu), la correction éventuelle supplémentaire en cote (cdz) liée à la mission, et la distance à l'embouchure si disponible (dtm) :

```
1: R_con_oub_env_0171_01_20021006T203100_20091213T203100 : mgu=-8.14, cdz=1.04, dtm=1020000
2: R_con_oub_env_0257_01_20021113T203700_20091216T203700 : mgu=-6.986, cdz=1.04, dtm=790000
3: R_con_oub_env_0300_01_20021011T083700_20091218T083700 : mgu=-8.694, cdz=1.04, dtm=987000
4: R_con_oub_env_0386_01_20021014T084300_20091221T084300 : mgu=-7.315, cdz=1.04, dtm=803000
5: R_con_oub_env_0629_01_20021022T202800_20091229T202800 : mgu=-9.612, cdz=1.04, dtm=1114000
6: R_con_oub_env_0715_01_20021025T203400_20071123T203400 : mgu=-8.873, cdz=1.04, dtm=924000
7: R_con_oub_env_0758_01_20021027T083400_20091025T083400 : mgu=-8.602, cdz=1.04, dtm=1076000
8: R_con_oub_env_0801_01_20021028T204000_20100104T204000 : mgu=-5.379, cdz=1.04, dtm=700000
9: R_con_oub_env_0844_01_20020925T084000_20100106T084000 : mgu=-8.637, cdz=1.04, dtm=903000
10: R_con_oub_env_0887_01_20020926T204500_20100107T204500 : mgu=-7.435, cdz=1.04, dtm=368000
```

```

11: R_con_oub_env_0930_01_20020928T084600_20100109T084600 : mgu=-5.454, cdz=1.04, dtm=707000
12: R_con_oub_ja2_0070_01_20090606T233600_20160816T150600 : mgu=-7.79, cdz=0.491, dtm=850000
13: R_con_oub_ja2_0083_02_20080715T063900_20140427T072500 : mgu=-6.111, cdz=0.491, dtm=753000
14: R_con_oub_jas_0083_01_20080725T043600_20181128T011600 : mgu=-11.5126, cdz=0.563
15: R_con_oub_jas_0159_01_20080718T055100_20181121T023100 : mgu=-9.0663, cdz=0.563
16: R_con_oub_jas_0248_01_20080721T171200_20181124T135200 : mgu=-7.4537, cdz=0.563
17: R_con_oub_s3a_0085_00_20160508T204000_20181112T204000 : mgu=-5.3531, cdz=0
18: R_con_oub_s3a_0199_00_20160415T203600_20181116T203600 : mgu=-7.6866, cdz=0
19: R_con_oub_s3a_0313_00_20160419T203200_20181120T203200 : mgu=-8.8274, cdz=0
20: R_con_oub_s3a_0356_00_20160421T084100_20181122T084100 : mgu=-7.8723, cdz=0
21: R_con_oub_s3a_0427_00_20160423T202800_20181124T202800 : mgu=-9.3677, cdz=0
22: R_con_oub_s3a_0470_00_20160425T083700_20181126T083700 : mgu=-8.6395, cdz=0
23: R_con_oub_s3a_0584_00_20160429T083300_20181103T083400 : mgu=-9.3677, cdz=0
24: R_con_oub_s3a_0627_00_20160430T204600_20181104T204600 : mgu=-9.6451, cdz=0
25: UBANGUI_J2-ICE1_070-01_EGM2008_PK-859 : mgu=-7.79, cdz=0, dtm=859420
26: UBANGUI_J2-ICE1_159-01_EGM2008_PK-1115 : mgu=-9.105, cdz=0, dtm=1115580
27: UBANGUI_PK-0190 : mgu=-10.22, cdz=0
28: UBANGUI_PK-0556 : mgu=-6.011, cdz=0
29: UBANGUI_PK-0599 : mgu=-5.223, cdz=0
30: UBANGUI_SRL-ICE1_257-01_EGM2008_PK-795 : mgu=-7.111, cdz=0.25, dtm=795240
31: UBANGUI_SRL-ICE1_300-01_EGM2008_PK-987 : mgu=-8.729, cdz=0.25, dtm=987140
32: UBANGUI_SRL-ICE1_386-01_EGM2008_PK-803 : mgu=-7.362, cdz=0.25, dtm=803160
33: UBANGUI_SRL-ICE1_629-01_EGM2008_PK-1114 : mgu=-9.671, cdz=0.25, dtm=1114100
34: UBANGUI_SRL-ICE1_715-01_EGM2008_PK-924 : mgu=-8.873, cdz=0.25, dtm=924550
35: UBANGUI_SRL-ICE1_758-01_EGM2008_PK-1076 : mgu=-8.602, cdz=0.25, dtm=1076950
36: UBANGUI_SRL-ICE1_801-01_EGM2008_PK-700 : mgu=-5.379, cdz=0.25, dtm=700780
37: UBANGUI_SRL-ICE1_844-01_EGM2008_PK-903 : mgu=-8.579, cdz=0.25, dtm=903350

```

Ces SV peuvent être positionnées sur le tronçon de fleuve étudié (Fig 32). On y ajoute automatiquement l'emplacement des Stations Virtuelles (SV) récupérées automatiquement dans la base Hydroweb, ainsi que les SV complémentaires traitées par Stéphane Calmant (en particulier les 3 stations multi-missions).

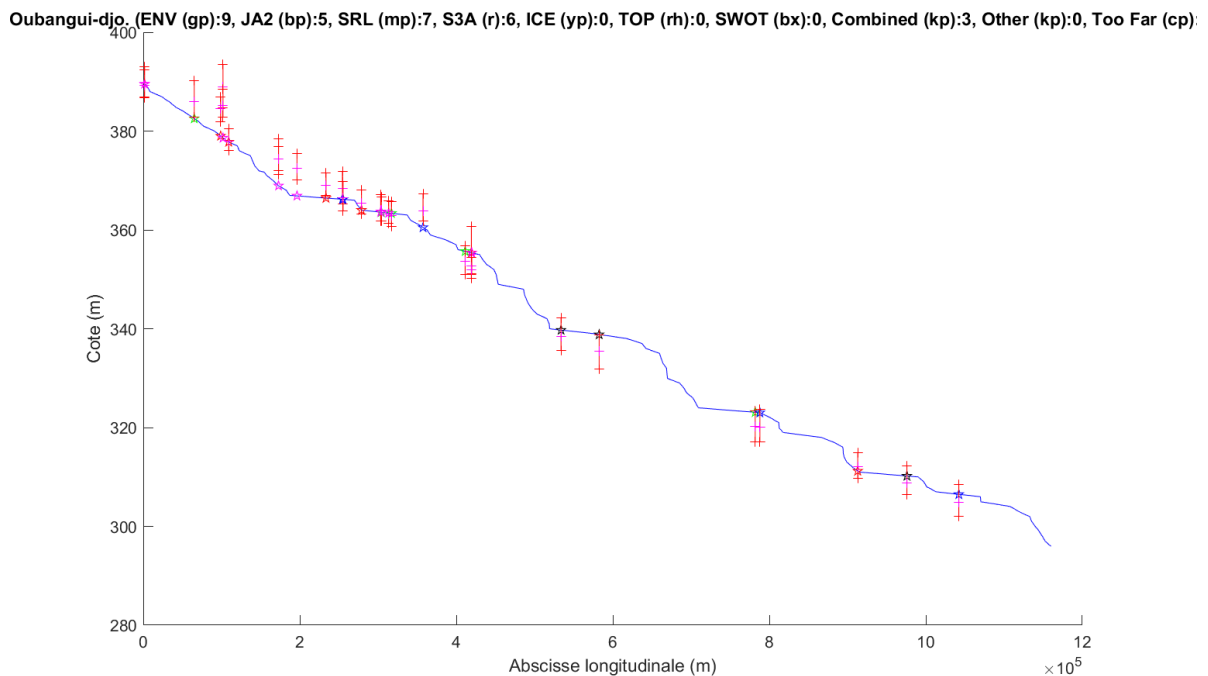


Fig 32. Stations Virtuelles sur l'Oubangui (Hydroweb)

On positionne aussi ces SV en plan (Fig 33) :

Oubangui-djo. (ENV (gp):9, JA2 (bp):5, SRL (mp):7, S3A (r):6, ICE (yp):0, TOP (rh):0, SWOT (bx):0, Combined (kp):3, Other (kp):0, Too Far (cp):

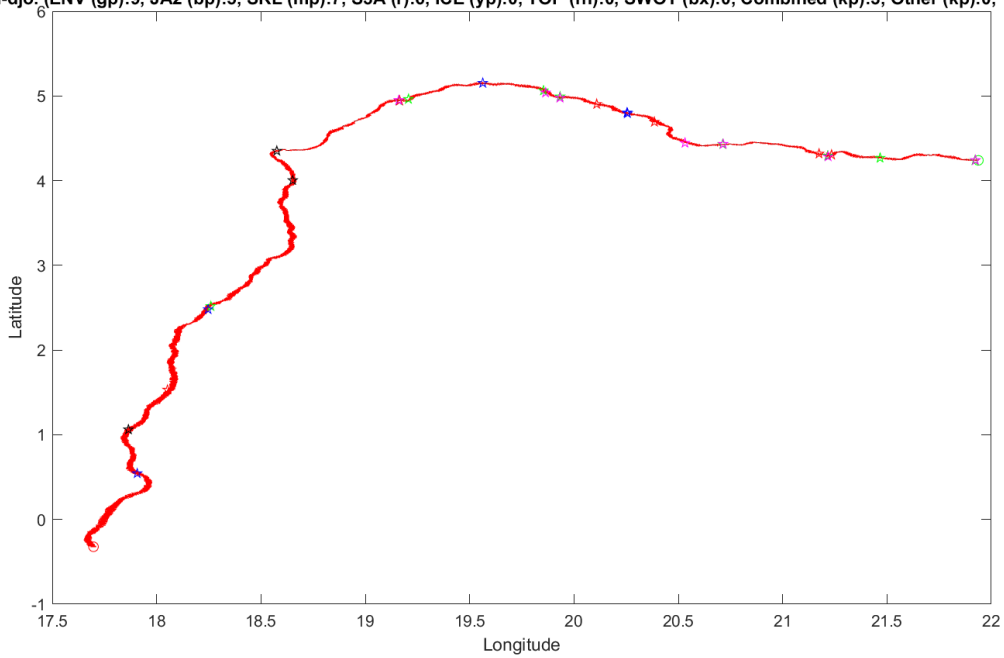


Fig 33. Stations Virtuelles sur l'Oubangui (Hydroweb)

On peut voir les évolutions temporelles des données des SV :

Oubangui-djo. (ENV (gp):9, JA2 (bp):5, SRL (mp):7, S3A (r):6, ICE (yp):0, TOP (rh):0, SWOT (bx):0, Combined (kp):3, Other (kp):0, Too Far (cp):

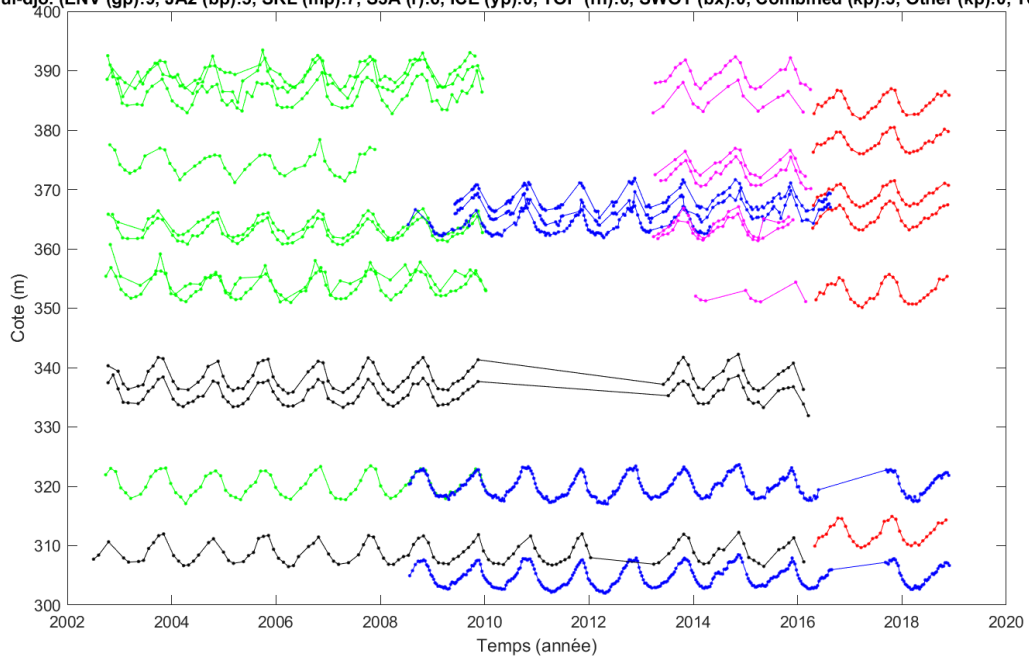


Fig 34. Stations Virtuelles sur l'Oubangui (Hydroweb)

Comme pour le Congo, on analyse l'écart entre les données GWD-LR (SRTM donc 11-22 février 2000) et Hydroweb en moyenne sur les mois de février (données 2002 à 2018) :

- 1: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0171-01 = -1.8063 (6 points)
- 2: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0257-01 = 2.0013 (5 points)
- 3: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0300-01 = -9.0796 (5 points)
- 4: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0386-01 = 1.2565 (5 points)
- 5 : Station Virtuelle hors zone : env-0629-01 (distance=32513.1 m)
- 6: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0715-01 = -3.516 (4 points)
- 7: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0758-01 = 1.2092 (5 points)
- 8: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0801-01 = 2.6894 (2 points)
- 9 : Station Virtuelle hors zone : env-0844-01 (distance=2003.1 m)
- 10: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0887-01 = 4.5869 (6 points)
- 11: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV env-0930-01 = 3.6478 (6 points)
- 12: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV ja2-0070-01 = -0.6549 (15 points)
- 13: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV ja2-0083-02 = -2.1271 (15 points)
- 14: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0083-01 = 3.2551 (25 points)
- 15 : Station Virtuelle hors zone : jas-0159-01 (distance=13619.6 m)
- 16: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV jas-0248-01 = 4.6373 (25 points)
- 17: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0085-00 = 4.5302 (2 points)
- 18: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0199-00 = 0.6322 (2 points)
- 19: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0313-00 = 1.6608 (1 points)
- 20: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0356-00 = -0.8411 (2 points)
- 21 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0427-00 (distance=22777.8 m)
- 22: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0470-00 = -3.5262 (1 points)
- 23 : Station Virtuelle hors zone : s3a-0584-00 (distance=23445.5 m)
- 24: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV s3a-0627-00 = 1.0921 (2 points)
- 25: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-J2-070-01-PK-859 = 1.152 (15 pts)
- 26 : Station Virtuelle hors zone: UBANGUI-J2-159-01-PK-1115 (distance=14163.9 m)
- 27: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-PK-0190 = 2.8842 (10 points)
- 28: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-PK-0556 = 4.9604 (8 points)
- 29: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-PK-0599 = 3.314 (8 points)
- 30: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-257-01-PK-795 = 1.7687 (2 pts)
- 31: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-300-01-PK-987 = -4.8098 (2 pts)
- 32: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-386-01-PK-803 = 1.4101 (2 pts)
- 33 : Station Virtuelle hors zone: UBANGUI-SRL-629-01-PK-1114 (distance=33632.9 m)
- 34: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-715-01-PK-924 = -3.4812 (3 pts)
- 35: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-758-01-PK-1076 = 2.239 (3 pts)
- 36: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-801-01-PK-700 = 3.9593 (3 pts)
- 37: Ecart SRTM - Data SV moyenne mois 2, pour la SV UBANGUI-SRL-844-01-PK-903 = -3.5993 (3 pts)

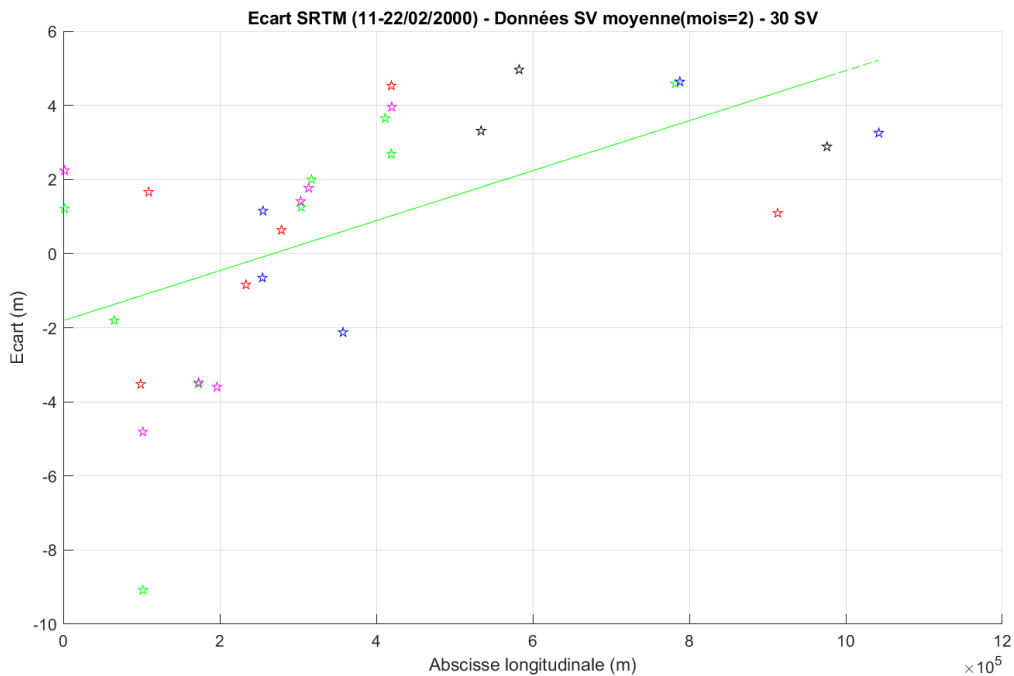


Fig 35. Ecart entre les cotes SRTM et les moyenne des cotes aux SV pour les mois de février (Oubangui)

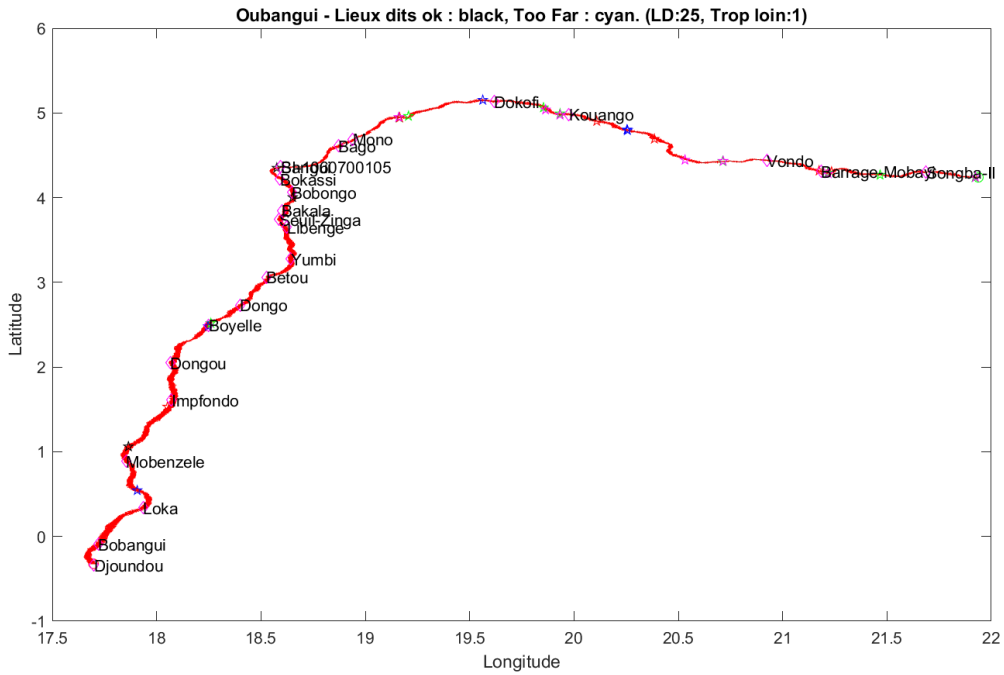


Fig 36. Lieux-dits et Stations Virtuelles (Oubangui)

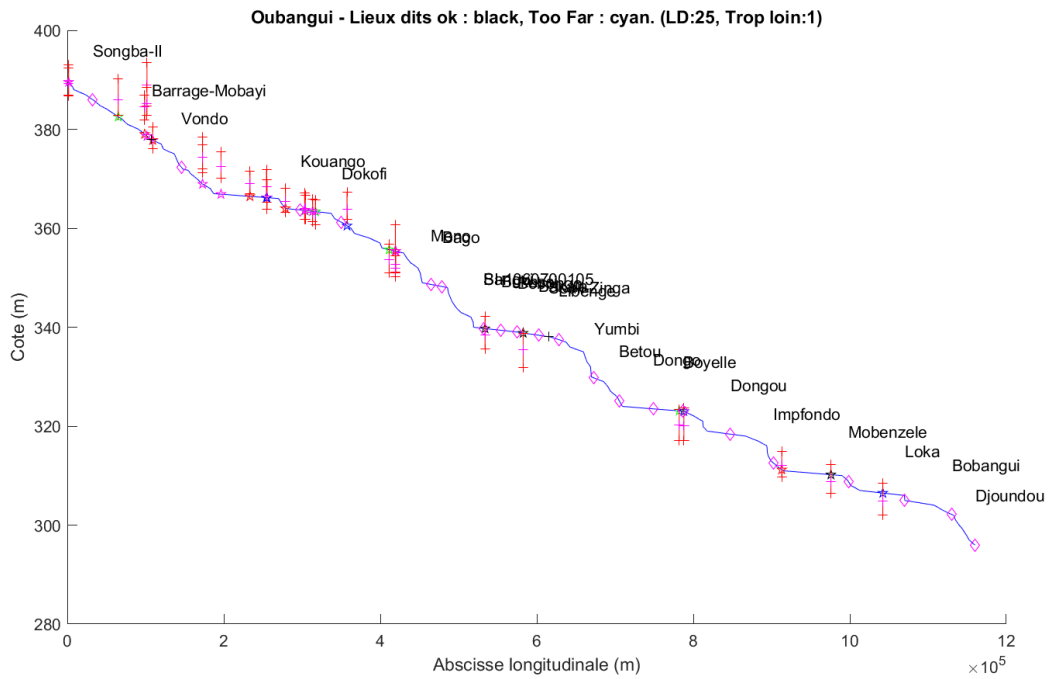


Fig 37. Ligne d'eau GWD-LR, ainsi que SV Hydroweb

3.2.4 Données de stations in-situ

Sur l'Oubangui, la seule station in-situ disponible avec une courbe de tarage Q(Z) est celle de Bangui.

Nous lisons les données de cette station dans la base Sierem (Station 1060700105). Les données sont disponibles pour la période 1911-2000 en cote Z et en débits Q. Une extraction de ces données nous avait été fournie par HSM (Jean-François Boyer) pour la période 1990-2010 pour les cotes et 1990-2000 pour les débits. Pour une raison inconnue les valeurs en débit ne sont pas disponibles pour la période 2000-2010. Nous avons donc ajusté un polynôme sur les données 1990-2000 pour obtenir une Q(Z), qui a servi ensuite à calculer les débits Q pour la période manquante 2000-2010, à partir des cotes Z. Ces valeurs sont utiles tant pour la période SRTM que pour le calcul de la moyenne WBM. Nous calculons certaines moyennes, pour les débits et pour les cotes, pour des périodes remarquables, et notamment pour la période SRTM (11-22 Février 2000), ainsi que pour la période utilisée pour la base WBM (1961-2010). Pour le zéro-échelle nous avons pris celui trouvé dans un document de la base Sierem, à la cote Zero_Echelle= 336.12 m.

Lit données à la station SI-1060700105 sur Q_Bangui_1911_2000_SIEREM.htm

Lit données à la station SI-1060700105 sur Z_Bangui_1911_2010_SIEREM.htm

Q_Bangui_1911_2000_SIEREM. Tmin=1911.0027. Tmax=2000.0902

Z_Bangui_1911_2010_SIEREM. Tmin=1911.1781. Tmax=2010.0233

Mean Q_Bangui_1911_2000_SIEREM=3958.14 m³/s

Mean Q_Bangui_1911_2000_SIEREM-WBM= not enough data

Mean Q_Bangui_1911_2000_SIEREM-SRTM= not enough data

Mean Z_Bangui_1911_2010_SIEREM=338.67 m

Mean Z_Bangui_1911_2010_SIEREM-WBM=338.40 m

Mean Z_Bangui_1911_2010_SIEREM-SRTM=336.34 m

Lit données à la station SI-1060700105 code POQ2000 et POZ0007 sur donnee_v3 étendues

Donnee, POQ2000. Tmin=1911.1781. Tmax=2010.0233

Donnee, POZ0007. Tmin=1911.1781. Tmax=2010.0233

Mean Q_Sierem station SI-1060700105 code POQ2000, 1911-2010=3766.01 m³/s

Mean Q_Sierem station SI-1060700105 code POQ2000 1961-2010-WBM=3431.94 m³/s

Mean Q_Sierem station SI-1060700105 code POQ2000 2000-SRTM=950.50 m³/s

Mean Z_Sierem station SI-1060700105 code POZ0007, 1911-2010=338.67 m

Mean Z_Sierem station SI-1060700105 code POZ0007 1961-2010-WBM=338.40 m

Mean Z_Sierem station SI-1060700105 code POZ0007 2000-SRTM=336.34 m

Pour le polynôme on trouve l'équation suivante, avec un très bon ajustement :

$$Q=105.2562*(Z-z_0)^2 + 533.5685*(Z-z_0) + 227.2652 ; z_0=335.23$$

avec un rRMSE=2.918e-005 (sur tous les points, cf. points noirs) et rRMSE==4.5337e-005 (sur l'approximation en nombre de points réduits, cf. points magenta)

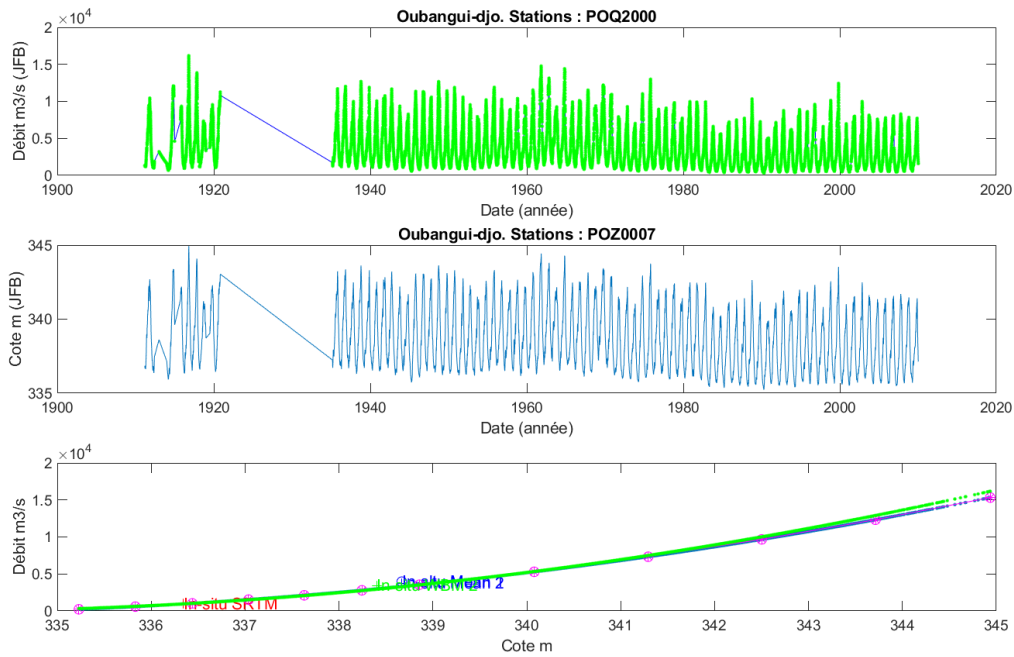


Fig 38. Station Bangui (1060700105) sur la période 1911-2010, données recalculées à partir des cotes et d'une Q(Z) ajustée sur la période 1990-2000

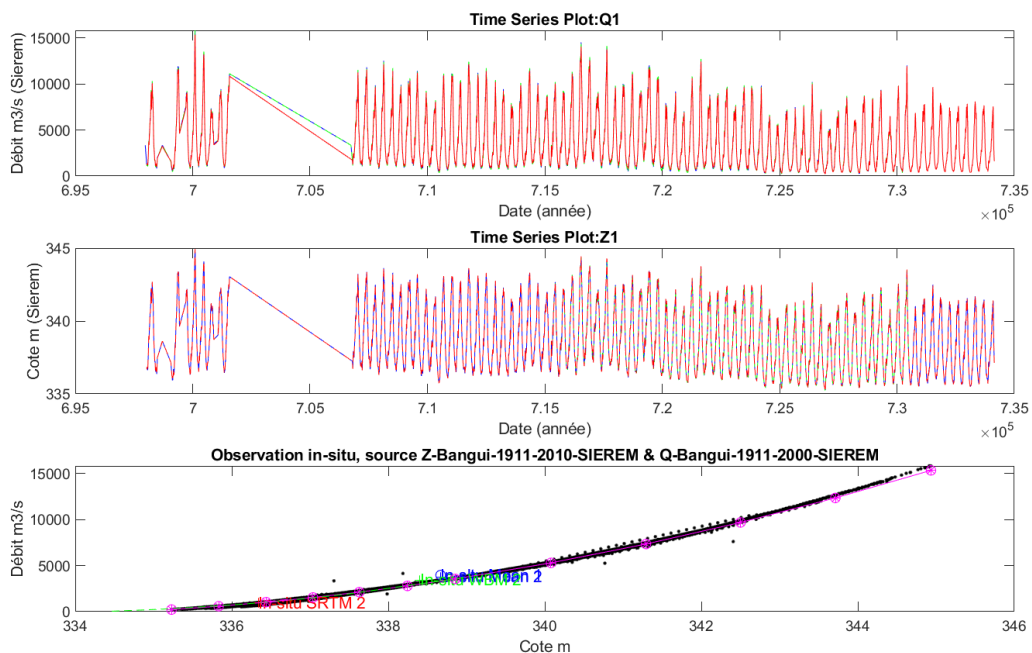


Fig 39. Station Bangui (1060700105) sur la période 1911-2010, données brutes Sierem

Notre modèle hydraulique sur l'Oubangui s'arrête un peu à l'amont de l'embouchure avec le Congo, à Djoundou. La condition limite aval à cet endroit sera la cote SRTM. La station de Bangui servira à ajuster le coefficient de frottement K_s en comparant sa $Q(Z)$ avec la $Q(Z)$ générée par la méthode SIC-SV.

4 Algorithmes et Résultats (Livrable #2)

Les données présentées précédemment sont ensuite utilisées pour générer automatiquement une bathymétrie d'un modèle hydraulique.

Nous supposons ici que le débit longitudinal calculé à partir de la base WBM, corrigé grâce aux surfaces drainées de la base GWD-LR et grâce aux Stations in-situ (Bangui sur l'Oubangui et Kinshasa Est - Inga sur le Congo), correspondant à la période SRTM est correct. La valeur brute WBM était déjà d'un bon ordre de grandeur par rapport aux données in-situ disponibles. Les corrections réalisées peuvent nous laisser espérer une valeur satisfaisante, même s'il est difficile de le garantir. Nous donnerons des éléments de réflexion par rapport à cette hypothèse ci-dessous. Nous analyserons en particulier l'influence d'une erreur sur cette données (de +/- 5%, 10%, 15%, 20%) et sur la manière de pouvoir corriger cette erreur éventuelle.

Nous supposons également que les données de la base GWD-LR sont correctes, et notamment les largeurs et les surfaces drainées. Les surfaces drainées sont calculées à partir de Hydro1K, issu de GTOPO30, lui-même issu de SRTM à 3s. Pour les hauteurs, nous savons qu'il y a des biais à grandes longueurs d'onde (Fig 19) qui seront corrigés dans une mise à jour de la base en 2019. En attendant cette correction nous avons-nous même apporté une correction à partir des informations des SV. Il y avait 2 options possibles pour cette correction, avec un but identique de rendre compatibles les données en cote du modèle hydraulique dans le logiciel SIC et les cotes altimétriques des SV. Soit on corrigeait la ligne d'eau, soit on corrigeait les données des SV. Nous avons développé et testé un algorithme qui corrige la ligne d'eau. Mais cet algorithme est en fait plus complexe qu'il n'y paraît et ses résultats n'étaient pas entièrement satisfaisants. Par ailleurs, comme indiqué précédemment, Dai Yamazaki est en train de corriger sa base GWD-LR en intégrant les erreurs en cote connues de SRTM. Nous avons donc préféré appliquer la seconde option, en attendant la nouvelle base, et corriger les cotes altimétriques des SV pour les ramener au référentiel en cote de notre modèle hydraulique.

Nous devons ensuite faire une hypothèse de forme de section en travers. Le plus simple mais a priori quand même réaliste est de supposer une section équivalente de forme trapézoïdale (équivalente au sens de même surface mouillée, même largeur au miroir et si possible même périmètre mouillé). Nous savons que le Congo et l'Oubangui ont de nombreux passages en tresse, avec des chenaux multiples, mais les données disponibles dans la base GWD-LR ne décrivent pas ces données à ce niveau de détail. Les futures données SWOT permettront de donner ces détails, ainsi que construire un MNT des berges (floodplain DEM) à partir des observations des hauteurs et surfaces en eau au cours du temps. Seule la partie en permanence sous l'eau serait à reconstituer (comme nous le faisons dans le cadre des tests du Pepsi Challenge 1 & 2). Le fruit des berges pourra donc être déterminé à partir des observations SWOT, quand il sera en exploitation. Mais actuellement, seule la largeur cumulée des divers chenaux est indiquée dans la base GWD-LR. Il semble que ce soit aussi le cas de la base GRWL. Nous prendrons donc une hypothèse de forme de section trapézoïdale. Le fruit des berges de la section trapézoïdale est a priori inconnu. Ce fruit a un impact relativement limité du fait de la largeur importante du fleuve. Grâce à la Station in-situ de Bangui nous optimiserons localement ce fruit, et nous confirmerons que ce fruit a une influence minime (Fig 41), et que l'optimum strict (Fig 40) est pour un fruit $b=0$ (rectangulaire), voire de 1 (pente des berges à 45°). Par la suite nous retiendrons un fruit $b=1$ pour le Congo ainsi que pour l'Oubangui, qui est plus réaliste que $b=0$. D'autres hypothèses de formes sont possibles et seront étudiées dans le futur par curiosité,

pour voir la sensibilité de l'approche à ce choix. On peut penser aux formes et méthodes étudiées dans Jiang et al 2019, ou Domeneghetti 2016.

Les coefficients de frottement K_s sont également a priori inconnus. Les tables peuvent donner des indications et des ordres de grandeur. Mais nous savons que ces frottements sont également des paramètres permettant d'intégrer les divers effets négligés dans un modèle hydraulique 1D ou 1.5D mais générant des pertes de charge, comme les méandres, des obstacles ponctuels et certainement les chenaux multiples des zones en tresse. Le coefficient de frottement K_s a été calé pour retrouver la courbe de tarage $Q(Z)$ in-situ à Bangui. La valeur de $K_s=48$ a été trouvée à l'optimum (Fig 40, qui représente les valeurs d'une fonction coût quadratique ($rRMSE$ = relative root mean square error) sur l'écart entre les débits in-situ et les débits générés par le modèle hydraulique SIC avec la méthodologie décrite dans ce document, sur la totalité de l'historique 1910-2010). Aucune courbe de tarage récente n'est disponible sur la partie du Congo traitée pour ajuster le coefficient de frottement sur cette zone. Il y a bien la Station de Kinshasa-Est mais qui est utilisée comme condition limite aval du modèle hydraulique, et donc qui ne peut pas être utilisée indépendamment pour le calage ou la validation. Il aurait été possible de prolonger le modèle du Congo plus à l'aval et de conserver alors la Station de Kinshasa-Est en calage ou validation. Mais nous avons décidé initialement de terminer le modèle du Congo au pool de Malebo, ce qui militait pour utiliser cette station in-situ (sa courbe de tarage $Q(Z)$) comme condition limite aval de notre modèle. Nous avons donc choisi $K_s=48$ pour l'Oubangui ainsi que pour le Congo. Ce coefficient retenu est considéré comme réaliste mais pourra être modifié si des données supplémentaires sont disponibles. On observe sur la Fig 40 que le fruit b a une influence faible sur le minimum du $rRMSE$, avec cependant une légère préférence pour les fruits faibles ($b=0$ ou 1). En ce qui concerne l'influence de K_s , le minimum est trouvé pour $K_s=48$, avec une valeur du critère de 0.037 , soit 3.7% d'erreur, mais avec des valeurs très satisfaisantes pour un K_s entre 40 et 50 . Pour K_s compris entre 35 et 55 on ne dépasse pas $rRMSE=0.14$, c'est-à-dire 14% d'erreur moyenne sur le débit, ce qui n'est pas si mauvais, sachant que les mesures in-situ sont considérées comme bonnes si l'erreur est inférieure à 10% .

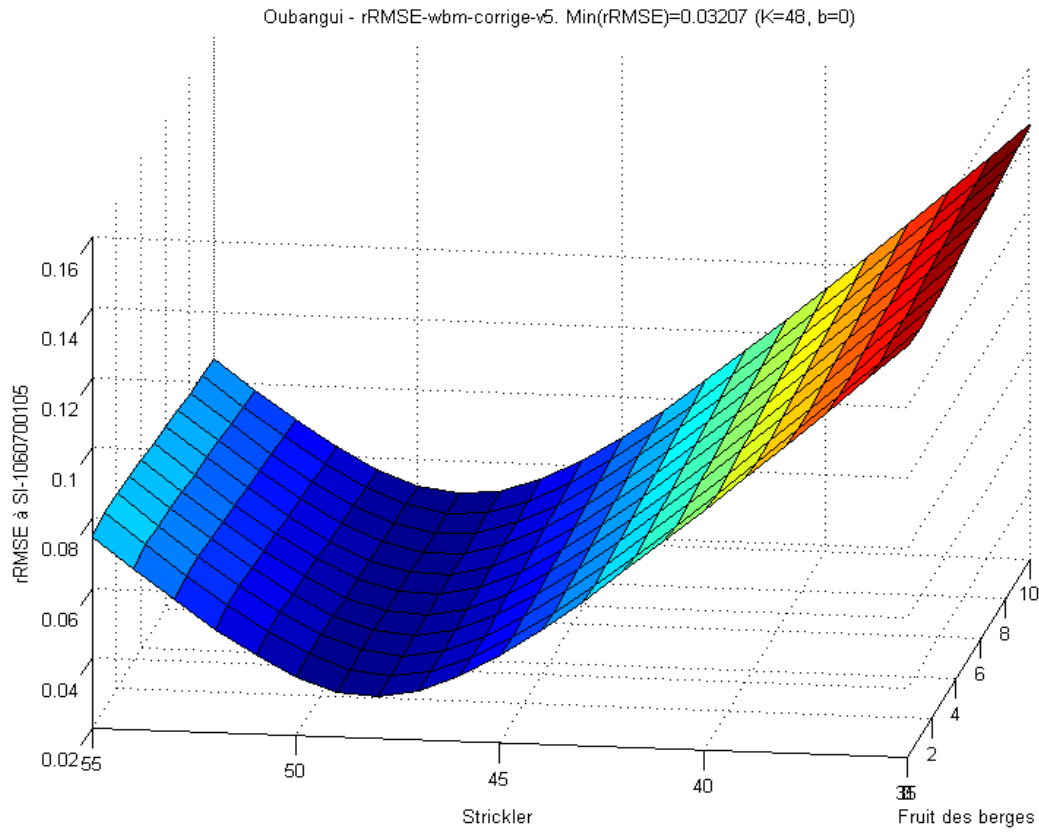


Fig 40. Optimisation de Ks (frottement) et b (fruit des berges) avec la Q(Z) in-situ à Bangui

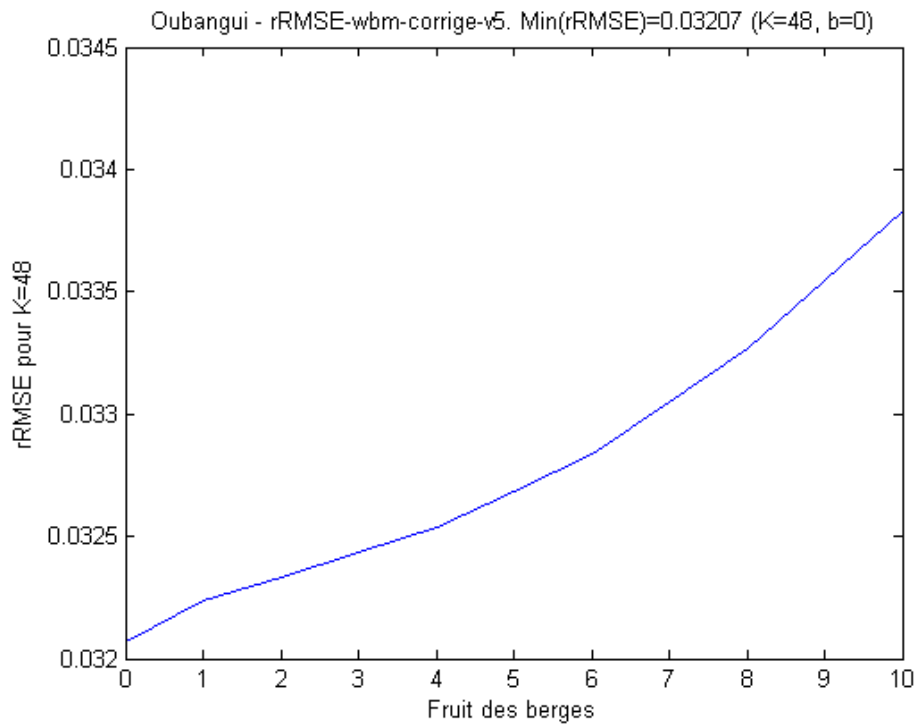


Fig 41. Influence du fruit des berges sur le rRMSE (pour le Ks optimum 48)

Une erreur éventuelle sur le coefficient de Strickler aura un impact sur la cote du fond calculée par notre algorithme d'inversion (Fig 42, Fig 43). Même si ce coefficient a été optimisé à partir de données in-situ, ce coefficient a une validité locale et il est probable qu'un autre coefficient soit mieux adapté dans une autre zone. Mais la cote de l'eau restera correcte, du fait de la méthode utilisée (on calcule la bathymétrie par inversion d'une équation à partir de diverses données dont la ligne d'eau), soit à la valeur de la cote SRTM utilisée comme référence (et qui sera corrigée avec la prochaine version de la base GWD-LR), soit en tenant compte d'une correction effectuée à partir des informations des Stations Virtuelles (supposées elles comme correctes, correction notée dz1 dans la suite). On rentre ainsi dans un cadre appelé couramment "d'équifinalité". C'est-à-dire que diverses combinaisons de bathymétries et de frottements peuvent donner les mêmes résultats de hauteurs d'eau pour un même débit de référence. Idem pour une erreur sur le débit de référence (ex: Q_{WBM} modifié), qui donnera une bathymétrie différente.

Mais il faut noter à ce stade que cette constatation est vraie dans le cadre de la méthode utilisée ici, dans cette première étape, basée pour l'instant sur le modèle de Manning-Strickler en régime permanent (Eq 1), sous hypothèse Froude faible, ce qui permet d'utiliser la pente de la ligne d'eau à la place de la pente de charge. L'équifinalité n'est pas une propriété intrinsèque à un phénomène physique (ex: l'hydrologie dans un bassin versant, l'hydraulique dans un fleuve), mais est principalement liée à un choix d'un modèle (ex: modèle hydrologique distribué, modèle hydrologique global, modèle local permanent de Manning-Strickler, modèle de courbe de remous en régime permanent, modèle hydraulique transitoire Saint-Venant 1.5D, etc.), à un ensemble d'observations disponibles (ex: hauteurs, voire débits en certains x et t, un jeu de débit, ou plusieurs jeux de débit, etc), ainsi qu'à leur incertitude, et enfin lié à la variable physique à reconstruire (ex: débit en certains points, bathymétrie, etc). Dans le cadre des données SWOT nous aurons bien plus d'informations que celles disponibles dans cette étude.

La première étape de la méthode est donc de trouver la bathymétrie, par inversion de l'équation locale de Manning-Strickler (Eq 1), avec Q étant le débit de référence (Q_{wbm} modifié), K_s le coefficient de frottement choisi après le calage sur la station de Bangui ($K_s=48$), la largeur L et la pente S_w étant données par la base GWD-LR (A est la surface d'écoulement, et R le rayon hydraulique) :

$$Q = K_s A R^{2/3} \sqrt{S_w} \quad (\text{Eq 1})$$

On voit par exemple les différentes bathymétries générées pour la même ligne d'eau et le même débit de référence lorsque K_s varie de 30 à 40 et le fruit des berges de 0 à 2 (Fig 42 et Fig 43). Les variations de cote du fond sont de l'ordre de 1 à 3m maximum. Toutes ces combinaisons donnent la même cote de l'eau pour le débit de référence, mais lorsque le débit va varier, les cotes de l'eau vont devenir distinctes entre les différentes options du modèle. L'équifinalité peut ainsi être levée si les cotes et les débits peuvent être observés pour un autre jeu de données. Dans le cas où une courbe de tarage locale $Q(Z)$ in-situ est disponible, cette information peut être utilisée pour trouver le K_s , et donc la bathymétrie optimale permettant de rendre compte le mieux possible de cette $Q(Z)$. C'est ce que nous avons fait grâce à la Station de Bangui. La bonne nouvelle est non seulement que le minimum a été atteint pour une valeur réaliste de K_s , mais aussi que la $Q(Z)$ est bonne sur la totalité de sa gamme (avec un rRMES global de l'ordre de 3%), et non pas uniquement pour 2 points. Cela prouve, au moins localement dans la zone de Bangui, que le modèle hydraulique se comporte de

manière très proche de la réalité (mesures in-situ ayant conduit à la $Q(Z)$ de Bangui), et ce sur toute la gamme des débits. Mais une telle $Q(Z)$ in-situ n'est pas très courante et nous verrons ci-dessous un autre moyen de lever cette équifinalité.

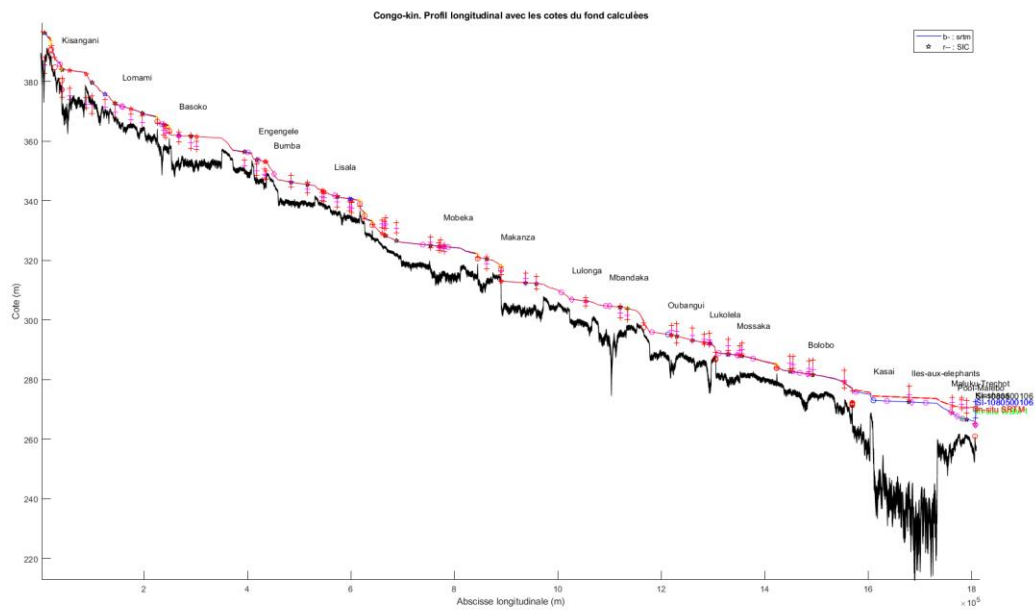


Fig 42. Variations de bathymétrie pour K_s entre 30 et 40 et b entre 0 et 2

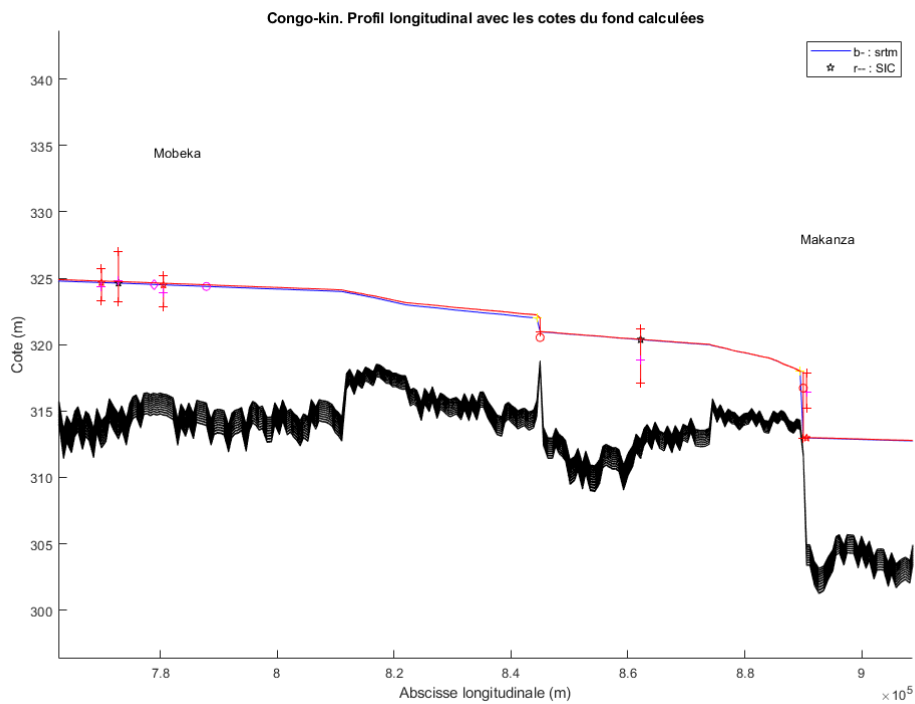


Fig 43. Variations de bathymétrie pour K_s entre 30 et 40 et b entre 0 et 2 (zoom)

Pour les mêmes raisons que ci-dessus, diverses combinaisons de débit de référence et de frottements peuvent donner la même bathymétrie et la même ligne d'eau.

Dans l'équation de Manning-Strickler (Eq 1), on remarque que Q et K_s interagissent proportionnellement. S_w est la pente de l'eau calculée à partir de la ligne d'eau SRTM. A et R sont respectivement la surface mouillée et le rayon hydraulique, et dépendent donc de la section en travers à estimer. La méthode appliquée consiste donc, dans un premier temps, à trouver la cote du fond Z_b de chaque section en travers permettant de vérifier l'équation ci-dessus. Du fait de la proportionnalité entre Q et K_s , on constate que toute erreur multiplicative identique sur l'un et sur l'autre donneront la même bathymétrie.

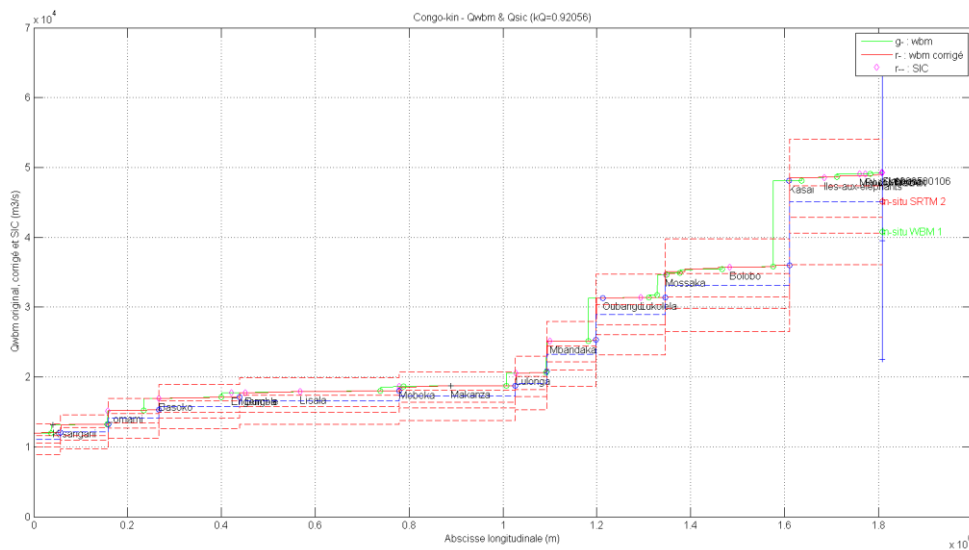


Fig 44. Variations de débit +/- 5, 10, 15, 20% autour de Q_{ref} (Q_{WBM} corrigé)

Pour illustrer (et analyser) cette notion d'équifinalité, on a donc généré différents modèles hydrauliques (c'est-à-dire différentes bathymétries et frottements) en appliquant notre algorithme en utilisant le débit de référence $Q_{ref} = Q_{WBM}$ corrigé, ainsi que des variations autour de ce débit de référence de +/- 5, 10, 15, 20%. Les débits correspondants sont indiqués en traits rouge pointillés sur la Fig 44. Pour chaque valeur de cette erreur multiplicative, on applique la même erreur sur K_s , afin d'avoir la même bathymétrie. On a donc une gamme de modèles hydrauliques possibles, si le débit de référence n'est pas connu parfaitement, avec une erreur de +/- 20%, ce qui est a priori réaliste. On peut alors calculer les temps de retard de propagation hydraulique le long du fleuve pour chacun de ces modèles (Fig 45). On calcule 4 temps de retard : celui lié à la célérité des ondes $c = \sqrt{gA/L}$, celui lié à la vitesse $v = Q/A$, celui lié à $v+c$, et celui lié à la vitesse de l'onde cinématique $5/3.v$. La célérité c ne dépend que de la géométrie et de la profondeur, cette variable ne change donc pas entre les 9 modèles (courbe bleu foncée). Par contre la vitesse v (courbe en rouge), ainsi que la vitesse de l'onde cinématique (courbe en cyan) varient sensiblement entre les modèles. Si les observations altimétriques satellitaires sont capables de détecter ces vitesses de déplacement les variations de cote de l'amont vers l'aval des fleuves, alors une partie ou la totalité de l'équifinalité pourra être levée. Il faut en fait 2 informations de natures complémentaires et non-linéairement dépendantes, pour résoudre cette équifinalité : une information pour arbitrer le choix de la bonne bathymétrie, et donc ici de la bonne profondeur à partir de la célérité $v+c$ des ondes (qui dépend

principalement de la profondeur), et une information pour arbitrer le bon choix de Q_{ref} et de K_s parmi un ensemble de valeurs proportionnelles à partir de la vitesse de déplacement de l'hydrogramme (a priori proche de la vitesse de l'onde cinématique $5/3v$, et encore plus de celle de l'onde diffusive mais qui est un peu plus compliqué à calculer). En fait la vitesse $v+c$ est très difficile à observer (impossible en fait de manière précise), car correspondant au déplacement du front de l'onde (difficilement détectable en dehors d'un laboratoire hydraulique, ou hors phénomène très particulier comme un mascaret). Mais la différence entre cette vitesse $v+c$ et la vitesse moyenne v ou $5/3v$ est très liée à l'étalement des ondes de l'amont vers l'aval, c'est-à-dire en fait à la diffusion. Les 2 variables plus facilement observables sont donc en fait la vitesse moyenne de déplacement des ondes (proche de $5/3v$) et l'étalement de ces ondes (diffusion). Cette détection sera possible si les observations sont suffisamment denses en espace et en temps. C'est sur ce point que SWOT apportera un avantage très important par rapport aux missions classiques actuelles. Sur le Congo, pour corriger le débit Q_{ref} par un facteur de 10% nous observons qu'il faut être capable de détecter un temps de propagation d'un hydrogramme avec une précision de l'ordre de 2h pour 100 km de linéaire de fleuve, soit environ 1 jour pour 1200 km de linéaire de fleuve ($3 \cdot 10^4$ secondes pour 40% d'écart, cf Fig 46).

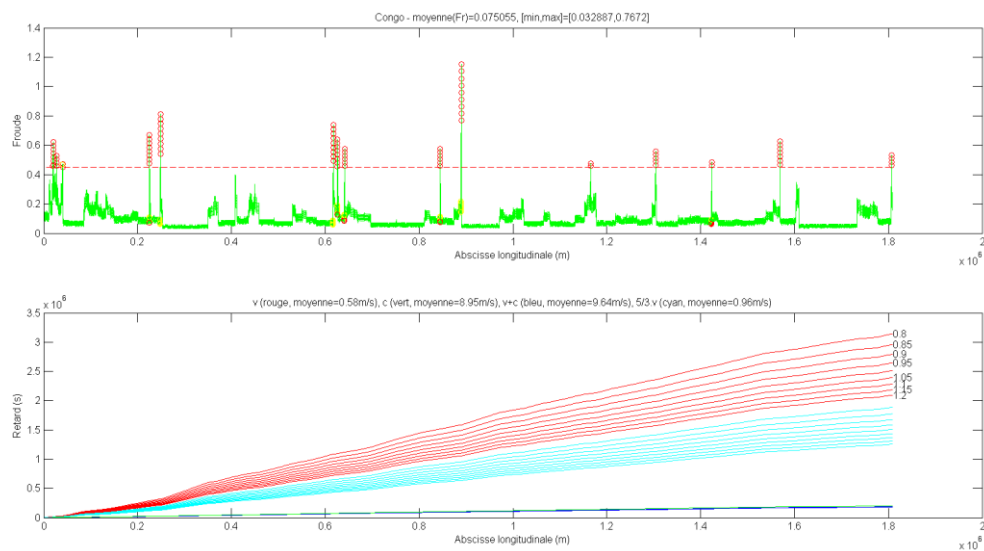


Fig 45. Nombres de Froude et temps de retard le long du Congo avec Q_{ref} et K_s variables

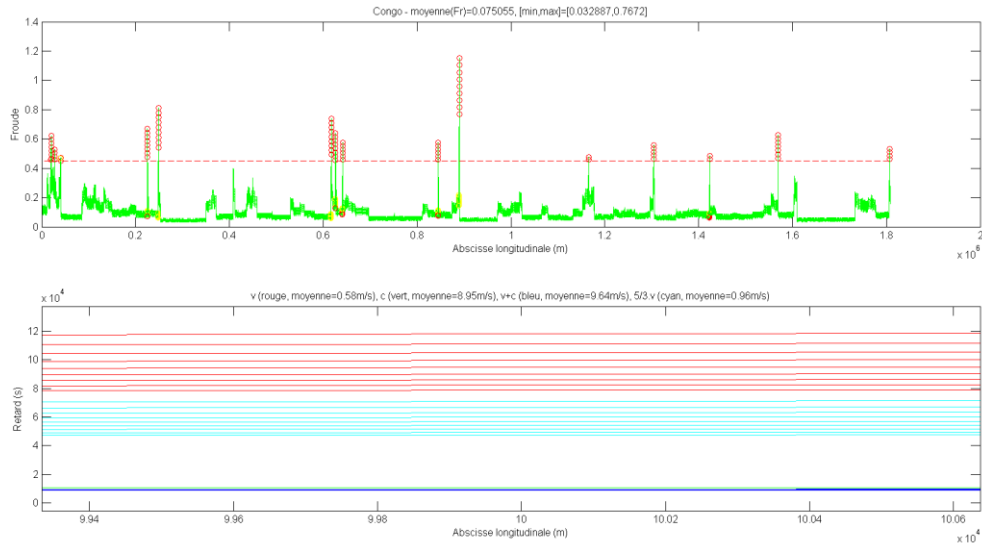


Fig 46. Temps de retard le long du Congo avec Qref et Ks variables (zoom)

Dans le cadre de SWOT les données disponibles seront bien plus nombreuses, tant spatialement que temporellement, et cette équifinalité sera probablement levée (comme l'indique certains de nos travaux publiés ou en cours). Nous avons donné ici une explication hydraulique des liens qui existent entre bathymétrie, frottement, débit et niveau d'eau afin comprendre comment un problème initial difficile à résoudre dépend des hypothèses faites et des modèles utilisés. Il est clair qu'avec une approche utilisant l'équation de Manning-Strickler en régime permanent, le problème peut être résolu si l'on connaît le débit, et si une information complémentaire comme une $Q(Z)$ locale permet d'estimer les frottements K_s . Mais si un doute subsiste sur la qualité du Q_{ref} , et/ou si une $Q(Z)$ locale n'est pas disponible, l'équifinalité liée à ce modèle en régime permanent ne permet pas de résoudre le problème. Par contre l'utilisation d'un modèle en régime transitoire, fournissant des informations sur les temps de propagation, peut, si les observations sont suffisamment denses, lever cette équifinalité, en choisissant parmi les diverses options possible, celle collant le mieux aux observations. La méthode SIC4DVar utilise ce principe. Nous évaluerons ces temps de retard sur le Congo au chapitre 5.1.2 et comparerons les données issues des Stations Virtuelles et les variables calculables avec notre modèle hydraulique.

Après la première phase de génération de la bathymétrie par inversion de l'équation Eq 1, nous effectuons un calcul complet de courbe de remous, avec le logiciel SIC, en régime permanent. Nous observons une très bonne correspondance entre la ligne d'eau ainsi calculée et la ligne d'eau de référence (SRTM). Il existe cependant des écarts au niveau de chutes ou des rapides, où l'hypothèse selon laquelle la pente de perte de charge ($J=dH/dx$) est égale à la pente de la ligne d'eau ($S_w=dZ/dx$) n'est pas bonne. En effet cette hypothèse est valable si le nombre de Froude est faible. C'est pour cette raison que le modèle faisant cette hypothèse est parfois appelé Low Froude. Lors de la génération de la bathymétrie, nous positionnons donc des seuils à ces emplacements. Ces chutes ou seuils sont détectés automatiquement à partir des nombres de Froude (Fig 47), calculés avec le modèle hydraulique, ou des variations de cote. Ces seuils sont intégrés dans le modèle hydraulique.

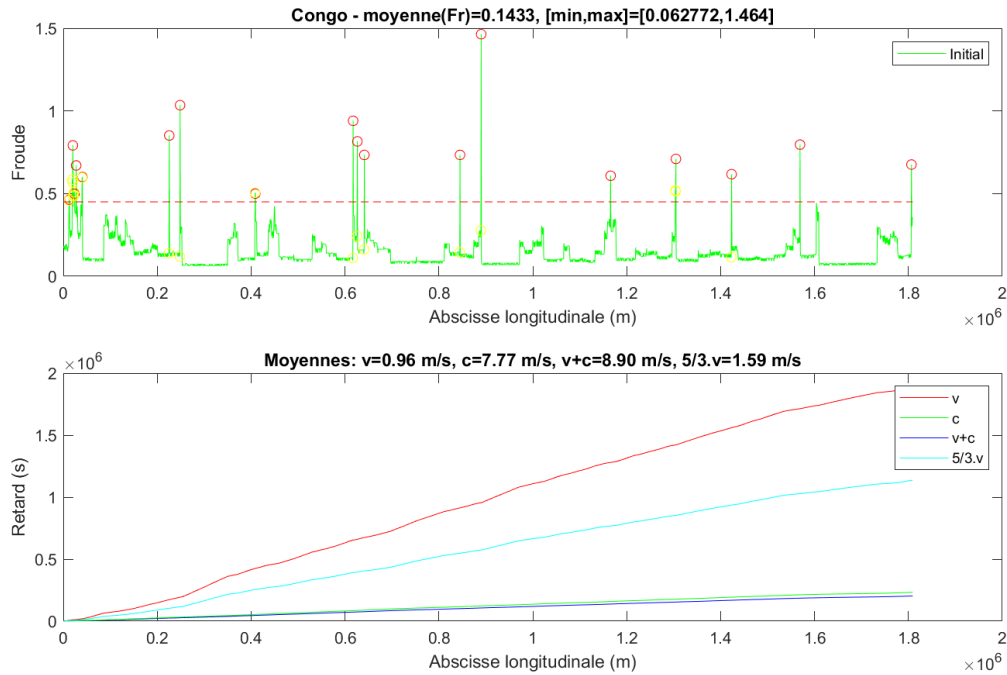


Fig 47. Nombres de Froude et temps de retard le long du Congo

Nous vérifions alors que les écarts entre la ligne d'eau calculée dans SIC et la ligne d'eau de référence sont très faibles (Fig 49, Fig 52).

Les fichiers pour SIC sont ensuite générés de manière automatique, ce qui permet de réaliser des simulations en régime permanent et transitoire dans le logiciel SIC.

On peut donc générer une bathymétrie sous ces hypothèses. La cote du fond ainsi calculée par inversion de l'équation locale de Manning-Strickler est dessinée sur la Fig 48 pour le Congo et Fig 51 pour l'Oubangui. Une fois ce modèle disponible, un calcul en régime permanent est réalisé, avec un calcul complet de courbe de remous. Ce calcul est donc plus précis et réaliste que le calcul initial avec l'équation locale de Manning-Strickler. Ce calcul fait apparaître de légères différences entre la ligne d'eau calculée ainsi avec le logiciel SIC, et la ligne d'eau de référence (GWD-LR). Ces écarts sont présentés Fig 49 pour le Congo et Fig 52 pour l'Oubangui. Pour le Congo, l'écart à l'aval est plus important car nous avons imposé une condition limite aval provenant de la Station in-situ de Kinshasa Est au lieu de conserver la cote SRTM. Avec la nouvelle base GWD-LR cet écart devrait disparaître. Dans tous les cas, cet écart sera pris en compte (noté dz2 ci-après) pour corriger les données des cotes des SV à injecter dans les Q(Z) générées par SIC. Une autre méthode aurait été de corriger la bathymétrie dans SIC pour annuler ces écarts, avec une seconde phase d'inversion. En fait ces zones avec des écarts un peu plus importants sont généralement des zones à fortes courbures de la ligne d'eau, à proximité des seuils détectés et introduits dans le modèle. Elles sont plus sensibles à modéliser, dépendent plus des choix de modélisation, y compris du pas d'espace de calcul. Les données des Stations Virtuelles à ces endroits sont également plus sujettes à caution, puisque une erreur de localisation de la trace du satellite aura une influence plus importante sur la cote mesurée. Enfin, nous utilisons, pour générer la bathymétrie, la base GWD-LR à 18s donc environ 555m à l'équateur, ce qui peut être un peu grossier aux localisations des chutes. On voit sur ces figures que les écarts sont généralement faibles, ou très localisés à des endroits où des chutes ou courbures

importantes de ligne d'eau sont présentes. On observe également que ces erreurs sont généralement négligeables devant les variations relatives des cotes aux SV (croix en rouge sur la Fig 49). Il nous paraissait donc préférable de prêter moins d'importance aux SV situées dans ces zones délicates, que de raffiner à tout prix le modèle hydraulique à ces endroits, sachant de diverses sources d'incertitudes rendaient cet exercice délicat. Une correction (noté dz2 par la suite) sera quand même calculée et appliquée pour avoir une cohérence entre les Q(Z) construites et les cotes fournies par les SV. La simplification faite ainsi est de considérer que cette correction dz2 sera constante, indépendamment des conditions hydrauliques (débits faibles ou forts), alors qu'il est probable que cette correction devrait être variable en fonction du débit.

Pour résumer le principe de la méthode utilisée pour générer la bathymétrie on peut dire que la méthode est de type « résolution de problèmes inverses », ou d'assimilation de données. En effet, en général, dans les problèmes classiques « directs », la bathymétrie est connue, et elle est utilisée pour générer des cotes et des débits pour certains scénarios hydrauliques. Ici on part de données de cotes, de largeurs et de pentes (GWD-LR), de cotes altimétriques satellitaires (SV), et de débits (Q_{WBM}), pour générer une bathymétrie pour un modèle hydraulique. Ces problèmes sont en général délicats car mal-posés au sens d'Hadamard. Nous pouvons réaliser en séquence jusqu'à 3 niveaux d'inversion, ou d'Assimilation de Données :

1. Le premier niveau est celui utilisant l'équation locale de Manning-Strickler (Eq 1). C'est celle que nous décrivons ci-dessus. L'approche est locale en x et en t. C'est-à-dire que nous inversons cette équation localement à chaque endroit x, et pour un ou plusieurs scénarios hydrauliques (c'est à dire, à un ou plusieurs instants t, correspondant à des débits différents). Ici nous n'avons qu'une ligne d'eau complète (GWD-LR, 11-22 février 2000), donc nous n'utilisons que ce scénario. Dans d'autres contextes (SWOT Discharge Algorithm Working Group, Pepsi Challenge), nous avons exploité diverses lignes d'eau à divers instants, pour calculer une bathymétrie minimisant un critère sur l'ensemble des données. Une fois SWOT lancé et ses données disponibles cette approche pourra être réalisée, mais pas actuellement. La qualité de la ligne d'eau GWD-LR est suffisante pour appliquer cette étape avec succès. C'est une découverte de notre étude. SRTM n'est en effet pas connu pour être très précis, ni exempt d'erreurs, mais GWD-LR hormis un décalage identifié et discuté précédemment est satisfaisant sur le Congo et l'Oubangui.
2. Le deuxième niveau est celui utilisant l'équation d'intégration d'une courbe de remous en régime permanent. Nous l'avons utilisé (calcul dans le logiciel SIC) pour calculer les corrections dz2. L'approche est globale en x et locale en t. Nous observons que les améliorations apportées par cette deuxième méthode sont très locales. Ce niveau permet de mettre au point des courbes de tarage Q(Z) faciles à utiliser en temps réel de manière opérationnelle. C'est le choix que nous avons fait.
3. Le troisième niveau est celui utilisant les équations complètes de Saint Venant. L'approche est globale en x et en t. Nous n'avons pas encore appliqué ce niveau sur les données du Congo et Oubangui. L'avantage serait de vérifier si des corrections supplémentaires pourraient être apportées au modèle. L'inconvénient est que la mise en œuvre opérationnelle est plus complexe, puisque un modèle hydraulique doit être exécuté en temps réel en intégrant les nouvelles observations aux SV, ou testé sur des scénarios passés avec suffisamment de données. Nous testerons ce troisième niveau dans le futur, pour voir si les Q(Z) calculées aux SV peuvent être améliorées, en intégrant les données de missions

actuelles. L'intégration de données SWOT n'est pas encore envisageable, tant que le satellite n'est pas lancé, ni même en expérience synthétique car l'utilisation du simulateur HR SWOT sur une zone aussi grande nécessite beaucoup de travail, non prévu à ce jour. Par contre nous avons vérifié dans une zone de 400 km du Congo que les temps de retard et donc les dynamiques étaient bien représentées dans le modèle hydraulique, par rapport à l'information qu'on peut extraire dans cette zone à partir des Stations Virtuelles. Cette validation sera faite plus systématiquement dans le futur, et si nécessaire cette 3^{ème} phase d'Assimilation de donnée sera utilisée pour corriger le modèle hydraulique (et donc les Q(Z) générées). Mais cette phase sera plus délicate du fait de la taille du système considéré.

Les résultats préliminaires obtenus pour le calcul de ces bathymétries ont été présentés à la CICOS lors de la mission de Juin 2018 et paraissaient réalistes, en termes de profondeurs, et de positionnement des seuils, tant pour le Congo que pour l'Oubangui.

Compte tenu du caractère générique de ces données et traitements, les mêmes résultats ont été obtenus pour l'Oubangui. Ces résultats sont présentés ci-après, d'abord pour le Congo, puis selon la même méthodologie pour l'Oubangui.

4.1 Congo

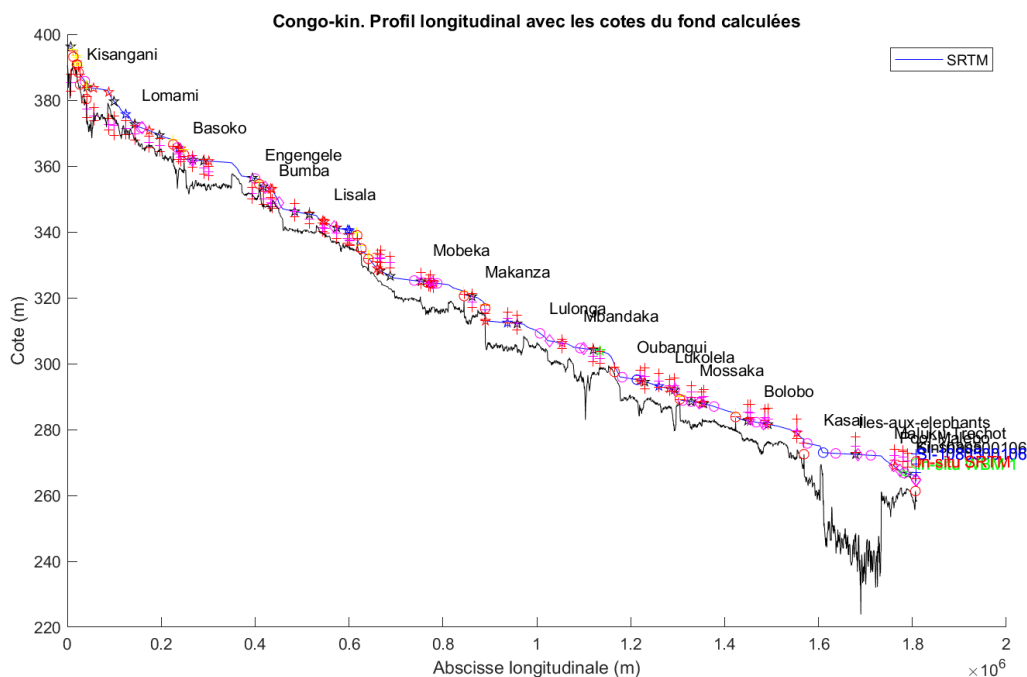


Fig 48. Bathymétrie pour le Congo

Les cotes de fond variant parfois rapidement (en x) comme dans le Pool de Malebo ne sont pas à prendre à la lettre, et sont dues aux incertitudes sur les pentes de l'eau, surtout dans ces zones à pentes faibles. Mais nous ne les avons pas lissées, cela n'ayant pas de conséquences hydrauliques.

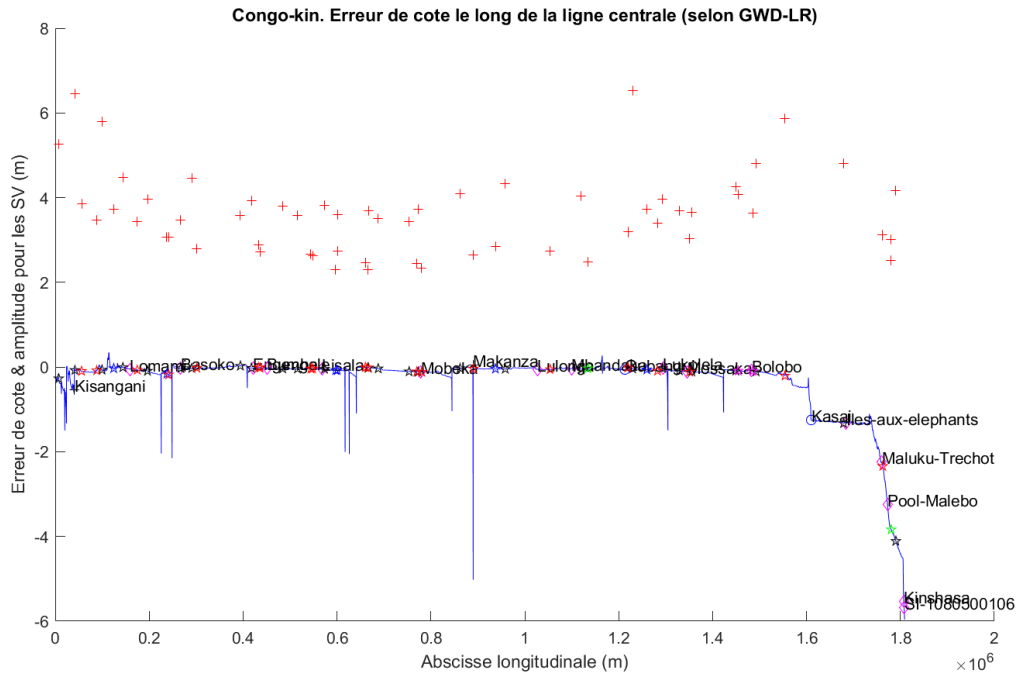


Fig 49. Ecart de ligne d'eau entre SIC et SRTM, pour le Congo

Sur le Congo, la condition limite aval issue initialement de la cote SRTM de la base GWD-LR a été remplacée par la Q(Z) de la station in-situ de Kinshasa. C'est pour cette raison que la cote en rouge pointillé des Fig 48 et Fig 50 (SIC) est plus haute à l'aval par rapport à la cote en bleu (SRTM). C'est pour cette raison également qu'il y a un écart important à l'aval entre la cote calculée par SIC et la cote SRTM (Fig 49). On voit que l'influence de la courbe de remous remonte jusqu'à l'amont de la confluence avec le Kasai, c'est-à-dire sur près de 300 km.

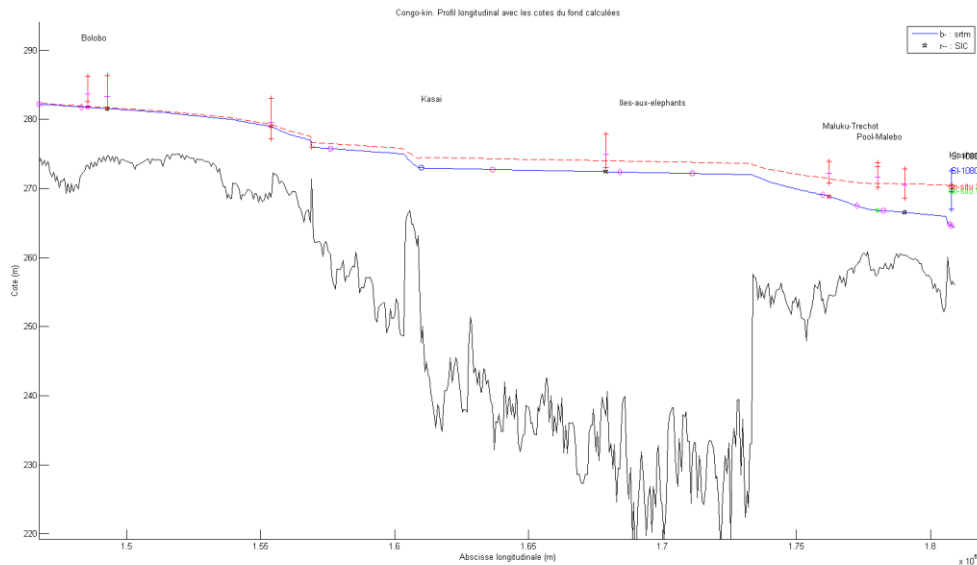


Fig 50. Zoom sur les cotes dans le Pool de Malebo

Le modèle ainsi généré, et les corrections à apportées étant identifiées, il est possible de l'exploiter pour générer différentes lignes d'eau à différents débits. Une série de simulations en régime permanent sont effectuées allant de 5% à 200% du débit de référence pour le Congo et de 5% à 1600% du débit de référence pour l'Oubangui (on monte jusqu'à 1600% sur l'Oubangui car le débit de référence y est faible), afin de balayer l'ensemble de la gamme des débits des fleuves. Ces simulations sont ensuite exploitées pour générer les courbes de tarage aux emplacements des SV, ainsi qu'aux stations in-situ éventuelles.

Sur le Congo les 59 Q(Z) obtenues aux 59 SV retenues ainsi sont données ci-dessous. Pour chacune, l'équation du polynôme est donné, ainsi que le z0 de référence (choisi comme la cote minimum obtenue dans la série altimétrique), ainsi que les corrections dz1 (entre SRTM et la moyenne des cotes du mois de février de la SV, cette correction ayant vocation à être supprimée après correction de la base GWD-LR avec la prochaine version prévue pour 2019) et la correction dz2 (entre SIC et SRTM, liée aux courbes de remous à certains endroits ainsi corrigées).

La procédure à appliquer est donc la suivante :

Pour une SV donnée (exemple : CONGO-PK-0522), on récupère une cote altimétrique Zsv (par rapport au Géoïde de référence EGM2008, c'est-à-dire une altitude). On corrige cette cote altimétrique des valeurs dz1 (pour tenir compte des erreurs de SRTM, exemple -4.0696 m pour la SV7), ainsi que dz2 (pour tenir compte des écarts entre SIC et SRTM, exemple : 4.1248 m). On a donc une cote Zsic qui devient comparable à (dans le même référentiel en cote) celles générées par le modèle SIC. Les valeurs dz1 et dz2 sont données dans les Table 3 pour le Congo et Table 5 pour l'Ouangui :

$$Z_{sic} = Z_{sv} + dz1 + dz2$$

On peut ensuite injecter cette cote dans le polynôme de la SV :

$$Q=p1*(Z-z0)^2 + p2*(Z-z0) + p3$$

Où p1, p2, p3 ainsi que z0 sont des paramètres donnés dans les Table 4 pour le Congo et Table 6 pour l'Oubangui.

Numéro de la SV	Nom de la SV	dz1 (SRTM - mean(SV)) (en m)	dz2 (SIC-SRTM) (en m)
SV7	CONGO-PK-0522	-4.0696	4.109
SV8	CONGO-PK-0636	-3.5783	1.3288
SV9	CONGO-PK-0807	-1.3125	0.1078
SV10	CONGO-PK-0848	-2.0822	0.0894
SV11	CONGO-PK-0936	-1.7216	0.1096
SV12	CONGO-PK-0959	-2.3344	0.0842
SV13	CONGO-PK-0993	-0.6153	0.0285
SV14	CONGO-PK-1052	-1.1506	0.038
SV15	CONGO-PK-1155	2.0857	0.0526
SV16	CONGO-PK-1311	0.0166	0.0462
SV17	CONGO-PK-1401	1.6770	0.0299
SV18	CONGO-PK-1484	-0.0727	0.1136
SV19	CONGO-PK-1502	-1.2524	0.1069
SV20	CONGO-PK-1567	-3.9681	0.036
SV21	CONGO-PK-1588	-3.8527	0.0169
SV22	CONGO-PK-1650	3.1070	0.0789
SV23	CONGO-PK-1676	1.8084	0.0468
SV24	CONGO-PK-1732	1.6731	0.0412
SV25	CONGO-PK-1761	0.0532	0.0381
SV26	CONGO-PK-1823	3.8275	0.0241
SV27	CONGO-PK-1844	4.7497	-0.0267
SV28	CONGO-PK-1942	2.3730	0.0279
SV29	CONGO-PK-1965	0.7642	0.0294
SV30	CONGO-PK-2030	2.9643	0.0931
SV31	CONGO-PK-2079	2.6851	0.0086
SV32	CONGO-PK-2122	7.2539	0.0662
SV33	CONGO-PK-2177	6.2351	0.0748
SV34	CONGO-PK-2208	10.2325	0.2715
SV35	CONGO-SRL-014-02-PK-812	-1.1870	0.0947
SV36	CONGO-SRL-057-01-PK-842	-1.1978	0.0906
SV37	CONGO-SRL-143-01-PK-546	-4.8174	3.8383
SV41	env-0143-01	-4.7854	3.8383
SV44	env-0930-01	2.4239	0.0333
SV47	jas-0070-00	3.3235	0.0789
SV48	jas-0083-01	-0.8040	0.0606
SV50	jas-0146-03	4.4098	0.0316
SV51	jas-0159-01	2.8591	0.0767
SV52	jas-0235-02	1.8133	0.1602
SV53	jas-0248-01	-1.2508	0.0423
SV54	s3a-0042-00	3.8730	0.0232
SV55	s3a-0085-00	1.1170	0.1102
SV56	s3a-0128-00	0.0157	0.0908
SV57	s3a-0156-00	3.9367	0.0693

SV58	s3a-0171-00	-3.1156	2.3399
SV59	s3a-0199-00	-2.5698	0.0071
SV60	s3a-0270-00	8.7678	0.0955
SV61	s3a-0285-00	0.8393	0.2068
SV62	s3a-0313-00	2.8527	0.0356
SV63	s3a-0356-00	1.3452	0.1183
SV65	s3a-0399-00	-0.5652	0.1135
SV66	s3a-0427-00	4.9967	0.0193
SV67	s3a-0470-00	-2.9203	0.0126
SV69	s3a-0513-00	-0.3644	0.0125
SV70	s3a-0541-00	2.8204	0.1802
SV72	s3a-0584-00	2.5044	0.0365
SV75	s3a-0627-00	1.0877	0.0554
SV76	s3a-0655-00	10.2171	0.0815
SV77	s3a-0698-00	5.0590	0.0061
SV78	s3a-0741-00	-2.8344	0.0391

Table 3. Corrections dz1 et dz2 à appliquer aux cotes altimétriques des SV

Numéro de la SV	Nom de la SV	p1	p2	p3	z0 (en m)
SV7	CONGO-PK-0522	260.8196	3272.9514	-3063.8259	261.8619
SV8	CONGO-PK-0636	180.2993	-4761.6836	24972.9644	245.8828
SV9	CONGO-PK-0807	185.9419	5657.0764	-12182.4351	276.4386
SV10	CONGO-PK-0848	281.0949	3845.3053	-11122.327	277.3892
SV11	CONGO-PK-0936	842.8065	-730.7825	-5794.0847	282.3514
SV12	CONGO-PK-0959	665.081	-4092.0676	3271.4144	280.8138
SV13	CONGO-PK-0993	1263.3946	-17947.6461	56213.1173	280.2495
SV14	CONGO-PK-1052	680.6764	-297.6199	-4308.1983	288.4474
SV15	CONGO-PK-1155	737.2916	418.0579	-646.0999	296.6936
SV16	CONGO-PK-1311	418.5364	-476.1905	-7266.7957	303.9066
SV17	CONGO-PK-1401	710.329	65.1108	-1265.7774	313.6362
SV18	CONGO-PK-1484	306.5035	-274.9831	-5247.2513	315.8163
SV19	CONGO-PK-1502	275.2557	626.6705	-4509.973	318.5155
SV20	CONGO-PK-1567	188.7951	2522.2991	-15097.0469	322.6658
SV21	CONGO-PK-1588	310.1054	2292.3228	-15244.0815	325.0007
SV22	CONGO-PK-1650	596.9795	9752.0102	-4772.6059	335.3649
SV23	CONGO-PK-1676	507.9095	4968.2038	-3785.502	336.3757
SV24	CONGO-PK-1732	625.4023	2532.1267	-2235.278	339.8855
SV25	CONGO-PK-1761	516.049	363.3545	-2033.1409	340.4705
SV26	CONGO-PK-1823	608.9223	3990.688	5296.9066	347.9069
SV27	CONGO-PK-1844	528.1442	8369.9568	6947.7684	350.7022
SV28	CONGO-PK-1942	523.8093	673.4875	-2804.0568	353.895
SV29	CONGO-PK-1965	450.6841	-909.7152	-2660.5527	353.6006
SV30	CONGO-PK-2030	456.9536	5002.3151	6203.4733	364.9468
SV31	CONGO-PK-2079	281.4093	3517.8997	6037.0503	368.4722
SV32	CONGO-PK-2122	161.601	4304.1771	21920.7452	374.8527
SV33	CONGO-PK-2177	137.0233	1756.0744	-752.9201	372.8658
SV34	CONGO-PK-2208	153.9956	3717.4116	8414.373	385.3284
SV35	CONGO-SRL-014-02-PK-812	227.342	4660.6985	-15633.112	275.453
SV36	CONGO-SRL-057-01-PK-842	276.8226	4226.5219	-8183.177	277.0541

SV37	CONGO-SRL-143-01-PK-546	264.0228	1625.406	-10314.2276	259.89
SV41	env-0143-01	264.0228	1642.3034	-10261.9443	259.89
SV44	env-0930-01	884.6305	4524.4873	5150.3439	298.7848
SV47	jas-0070-00	596.9795	10010.4395	-2633.841	335.3649
SV48	jas-0083-01	703.357	736.726	-6007.4775	287.4301
SV50	jas-0146-03	415.4291	4668.6711	11992.6945	371.298
SV51	jas-0159-01	515.8274	9170.729	-4243.5889	335.6298
SV52	jas-0235-02	549.2946	2584.5815	-10956.0524	358.8418
SV53	jas-0248-01	375.3555	-1459.1721	-5434.4339	303.7081
SV54	s3a-0042-00	581.2413	2992.6742	1104.3813	354.5607
SV55	s3a-0085-00	302.9592	153.2961	-5210.705	315.3337
SV56	s3a-0128-00	775.0353	3122.489	-9092.6682	287.1478
SV57	s3a-0156-00	410.4229	4368.5487	9596.3552	365.8792
SV58	s3a-0171-00	296.0793	-233.6697	-7689.6898	258.1284
SV59	s3a-0199-00	554.3227	435.4629	-6046.3384	325.544
SV60	s3a-0270-00	164.4132	3334.8206	10983.5104	374.8875
SV61	s3a-0285-00	51.3948	6536.0205	-15865.2075	271.2411
SV62	s3a-0313-00	661.1761	5689.2647	10156.1643	339.278
SV63	s3a-0356-00	329.6696	1545.9745	-4108.0705	317.1276
SV65	s3a-0399-00	845.8364	-1599.9896	-4036.1521	280.9709
SV66	s3a-0427-00	1084.4977	4801.3705	4674.617	346.336
SV67	s3a-0470-00	384.471	2049.5358	-11337.3702	325.1049
SV69	s3a-0513-00	593.8023	-2631.1679	-725.9939	285.6825
SV70	s3a-0541-00	706.1422	3897.1338	-6976.963	359.0989
SV72	s3a-0584-00	656.59	5375.6343	8865.1063	339.6495
SV75	s3a-0627-00	304.9315	2673.1435	-3089.6276	299.9769
SV76	s3a-0655-00	212.0948	6759.5995	46196.3193	378.5035
SV77	s3a-0698-00	966.9717	5357.9533	6551.8609	346.686
SV78	s3a-0741-00	322.4412	-1119.7643	-4073.9464	305.7524

Table 4. Coefficients des polynômes des Q(Z) et références z0 aux SV

Nous pouvons donc appliquer ces courbes Q(Z) à la totalité des données altimétriques provenant des SV. Ces résultats sont présentés au chapitre 6.

4.2 Oubangui

Les mêmes traitements sont réalisés sur l'Oubangui, pour la zone définie précédemment. Une bathymétrie est générée (Fig 51). Du fait de la disponibilité d'une Station in-situ à Bangui, le point (Q,Z) pour la période 11-22 février 2000 a été utilisé pour ajuster le coefficient de frottement dans SIC (Ks=48). Ce point est évoqué dans le chapitre suivant.

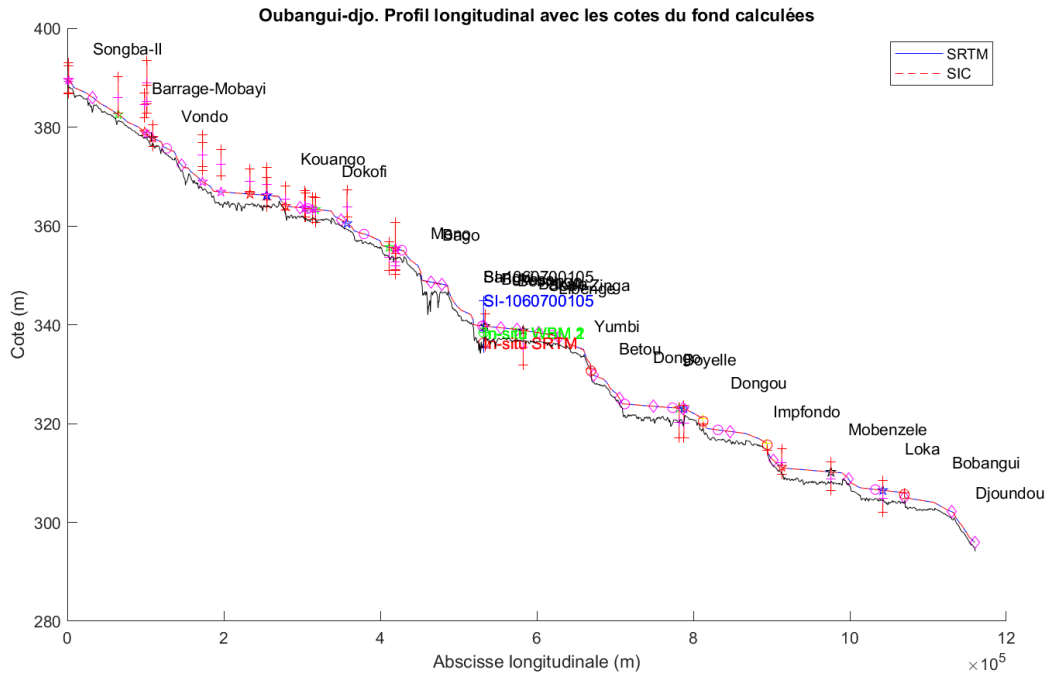


Fig 51. Bathymétrie pour l'Oubangui

La ligne d'eau calculée par SIC (ligne rouge pointillée) et la ligne d'eau de référence SRTM (ligne bleue) sont très proches (Fig 51). Les différences entre ces 2 lignes d'eau sont représentées Fig 52. On observe que les écarts sont très localisés, et par chance relativement faibles aux emplacements des SV. Les corrections dz2 seront donc faibles, ce que nous vérifions dans la Table 5.

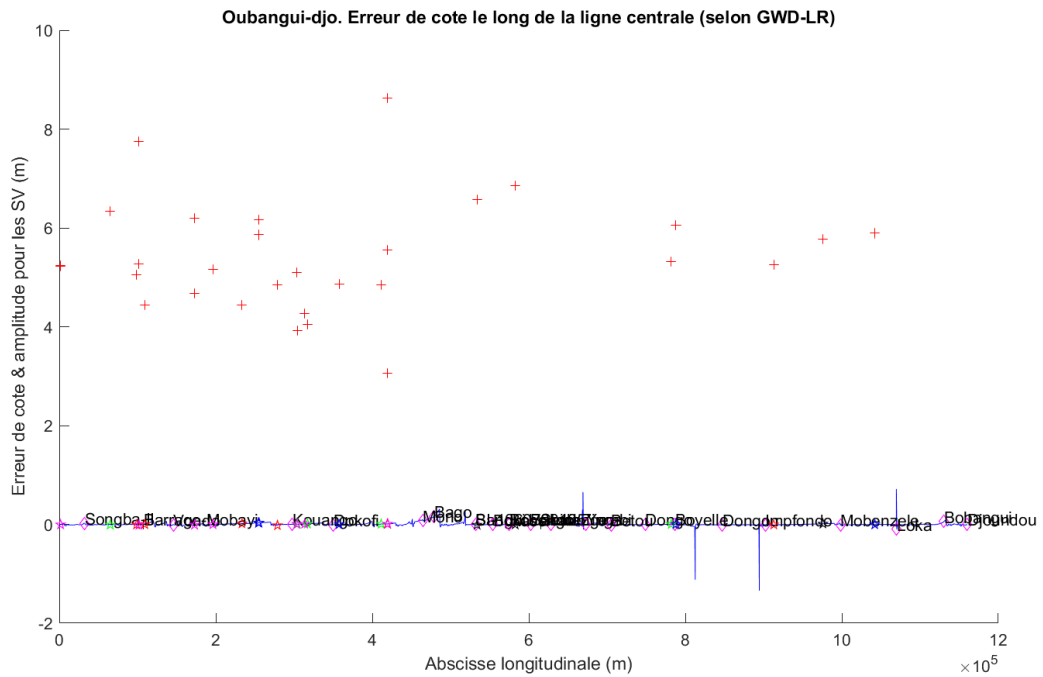


Fig 52. Ecart de ligne d'eau entre SIC et SRTM, pour l'Oubangui

Numéro de la SV	Nom de la SV	dz1 (SRTM - mean(SV)) (en m)	dz2 (SIC-SRTM) (en m)
SV1	env-0171-01	-1.8063	0.0094
SV2	env-0257-01	2.0013	-0.0107
SV3	env-0300-01	-9.0796	0.0158
SV4	env-0386-01	1.2565	-0.0059
SV6	env-0715-01	-3.5160	0.0111
SV7	env-0758-01	1.2092	0.0053
SV8	env-0801-01	2.6894	-0.0084
SV10	env-0887-01	4.5869	-0.0019
SV11	env-0930-01	3.6478	-0.0066
SV12	ja2-0070-01	-0.6549	-0.03
SV13	ja2-0083-02	-2.1271	0.0004
SV14	jas-0083-01	3.2551	0.0055
SV16	jas-0248-01	4.6373	-0.0035
SV17	s3a-0085-00	4.5302	-0.0084
SV18	s3a-0199-00	0.6322	0.0215
SV19	s3a-0313-00	1.6608	-0.0006
SV20	s3a-0356-00	-0.8411	-0.0147
SV22	s3a-0470-00	-3.5262	0.0063
SV24	s3a-0627-00	1.0921	0.007
SV25	UBANGUI-J2-070-01-PK-859	1.1520	-0.0313
SV27	UBANGUI-PK-0190	2.8842	-0.0108
SV28	UBANGUI-PK-0556	4.9604	0.0048
SV29	UBANGUI-PK-0599	3.3140	0.0107
SV30	UBANGUI-SRL-257-01-PK-795	1.7687	-0.0084
SV31	UBANGUI-SRL-300-01-PK-987	-4.8098	0.0158
SV32	UBANGUI-SRL-386-01-PK-803	1.4101	-0.0044
SV34	UBANGUI-SRL-715-01-PK-924	-3.4812	0.0111
SV35	UBANGUI-SRL-758-01-PK-1076	2.2390	0.0053
SV36	UBANGUI-SRL-801-01-PK-700	3.9593	-0.0087
SV37	UBANGUI-SRL-844-01-PK-903	-3.5993	0.0007

Table 5. Corrections dz1 et dz2 à appliquer aux cotes altimétriques des SV

Numéro de la SV	Nom de la SV	p1	p2	p3	z0 (en m)
SV1	env-0171-01	371.7164	-1100.9922	735.3263	381.3195
SV2	env-0257-01	237.5003	999.2905	999.5435	361.4515
SV3	env-0300-01	168.7786	-2340.8016	7297.3694	377.6691
SV4	env-0386-01	205.2177	381.0214	153.6369	361.1165
SV6	env-0715-01	198.2559	-1153.3174	1411.4989	367.1904
SV7	env-0758-01	278.3432	941.0359	702.3641	388.2333
SV8	env-0801-01	262.3673	1437.9276	1868.8498	353.4333
SV10	env-0887-01	234.1409	2081.7552	4207.5028	320.3703
SV11	env-0930-01	215.2727	1574.6483	2818.0267	353.5277
SV12	ja2-0070-01	231.3608	-160.3127	-520.4054	364.0549
SV13	ja2-0083-02	334.5227	-945.4699	395.3645	359.3216
SV14	jas-0083-01	129.6655	1931.1016	3667.3298	304.6416
SV16	jas-0248-01	267.2049	2274.6614	4400.3597	320.1982
SV17	s3a-0085-00	262.3673	2403.8592	5404.8303	353.4333

SV18	s3a-0199-00	136.1767	641.4257	372.651	362.7425
SV19	s3a-0313-00	206.2407	1299.0897	1565.0699	376.7945
SV20	s3a-0356-00	182.054	-195.2626	-246.4226	364.256
SV22	s3a-0470-00	245.0514	-1226.1804	1115.1081	377.8026
SV24	s3a-0627-00	161.3293	1043.0821	794.661	309.7927
SV25	UBANGUI-J2-070-01-PK-859	234.0135	575.8492	-205.1957	363.8207
SV27	UBANGUI-PK-0190	306.7453	1878.055	2552.3788	308.1626
SV28	UBANGUI-PK-0556	183.3936	1923.254	4989.7781	336.7087
SV29	UBANGUI-PK-0599	121.4007	993.9997	1964.7743	337.5996
SV30	UBANGUI-SRL-257-01-PK-795	231.0149	931.9029	898.4719	361.6451
SV31	UBANGUI-SRL-300-01-PK-987	168.7786	-899.4999	379.6498	377.6691
SV32	UBANGUI-SRL-386-01-PK-803	202.8597	610.3143	436.2538	361.5379
SV34	UBANGUI-SRL-715-01-PK-924	198.2559	-1139.5386	1371.6605	367.1904
SV35	UBANGUI-SRL-758-01-PK-1076	278.3432	1514.3116	1966.6225	388.2333
SV36	UBANGUI-SRL-801-01-PK-700	266.3108	2133.0864	4161.0718	353.4111
SV37	UBANGUI-SRL-844-01-PK-903	138.0431	-982.7539	1637.7603	364.3126

Table 6. Coefficients des polynômes des $Q(Z)$ et références z_0 aux SV

Nous pouvons donc appliquer ces courbes $Q(Z)$ à la totalité des données altimétriques provenant des SV. Ces résultats sont présentés au chapitre 6.

5 Comparaison des résultats avec données in-situ (Livrable #3)

Les données in-situ disponibles sur le Congo et l'Oubangui exploitables dans cette étude, comme déjà signalé précédemment sont relativement maigres. Les données intéressantes ont en fait été utilisées pour générer et ajuster le modèle hydraulique. La difficulté principale rencontrée est liée au fait que pour un modèle hydraulique des données de débit, seules, ou des données de profondeurs ou de cotes, seules, ne sont pas exploitables. Il faut des données de débits ET de cotes correspondant aux mêmes scénarios hydrauliques, pour être exploitées dans le modèle hydraulique. Idem pour un modèle hydrologique pour lequel il faut des données de pluies ET de débits pour les mêmes périodes. Par ailleurs, pour un modèle hydraulique, les cotes doivent être disponibles dans un référentiel précis, par exemple dans notre cas nous avons utilisé le géoïde EGM2008, pour être dans le même référentiel que les données altimétriques des Stations Virtuelles. Des profondeurs, seules, ne sont pas non plus exploitables à 100% pour vérifier si un modèle hydraulique est bon. En effet, ce qui nous intéresse dans notre modèle hydraulique, est que les relations débits & cotes soient bien représentées. En effet ce sont ces relations qui seront utilisées pour générer les $Q(Z)$ qui seront exploitées ensuite de manière opérationnelle. Il est cependant intéressant, même si pas complètement concluant, de vérifier si les profondeurs obtenues, pour divers débits, correspondent bien entre le modèle hydraulique SIC et des mesures in-situ. Lors de la mission de Juin 2018, le modèle hydraulique SIC a été présenté à la CICOS, et les ordres de grandeur des profondeurs, tant sur le Congo que sur l'Oubangui ont été jugés très réalistes. Dans les données récupérées lors de cette mission, nous avons pu analyser 2 jaugeages ADCP réalisés en 2015. Avec les Stations Virtuelles, nous pouvons également analyser les temps de propagation et les comparer à ceux obtenus dans le modèle. Nous présentons ces analyses ci-dessous.

5.1 Congo

5.1.1 Mesures ADCP

La première mesure ADCP disponible a été réalisée le 2 Juillet 2015 à l'île aux éléphants. Cette zone est comprise dans notre modèle hydraulique (Fig 53).

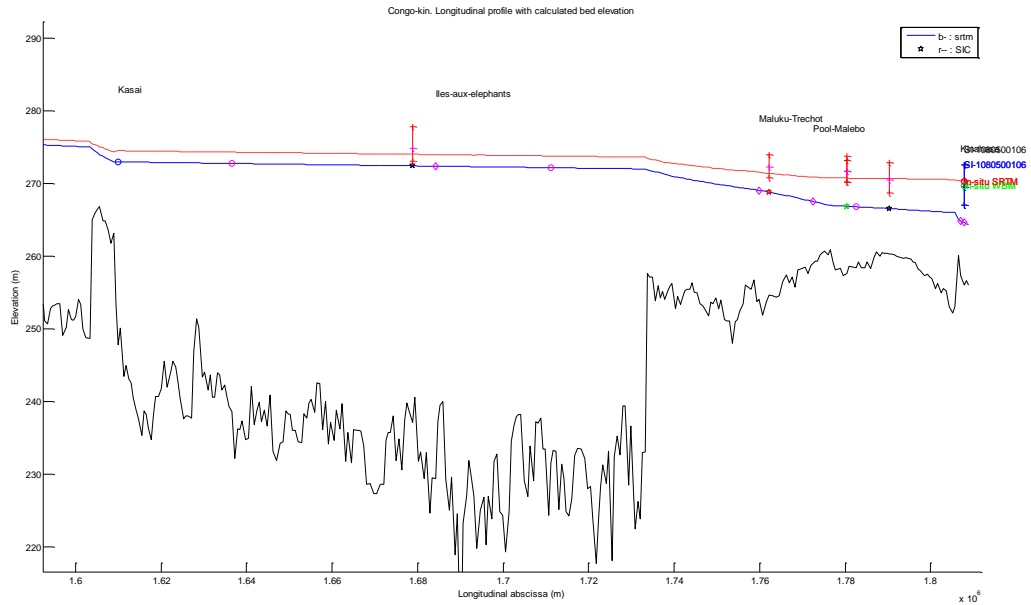


Fig 53. Zoom sur le modèle du Congo vers le Pool de Malebo (l'Ile aux Eléphants)

Ile aux Eléphants (entrée) mesuré le 2/7/2015, à l'aller et au retour :

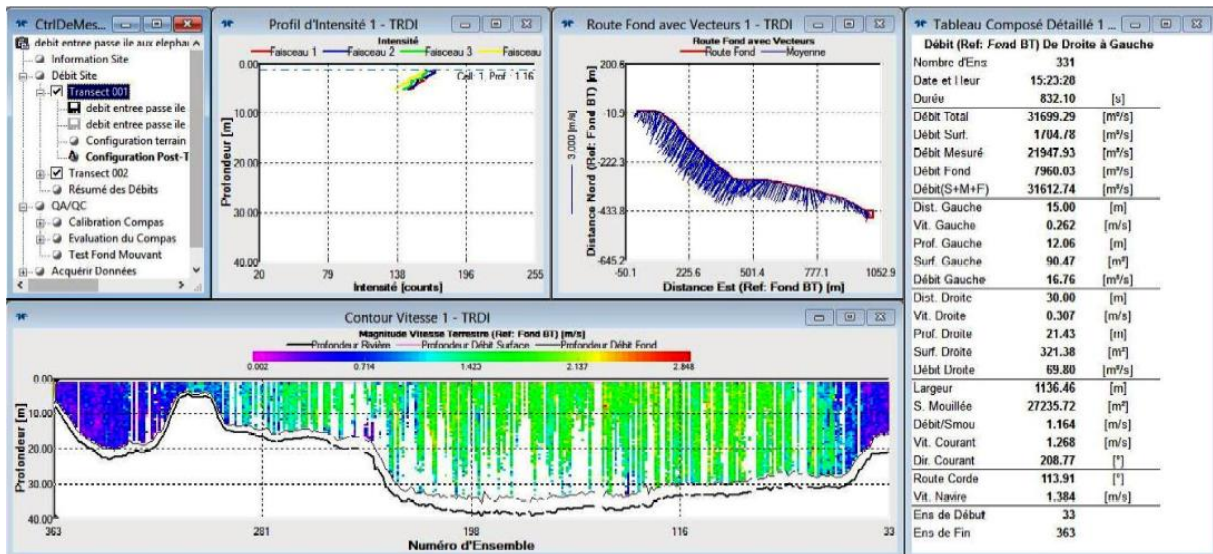


Fig 54. Jaugeage ADCP sur le Congo, Ile aux Eléphants (entrée) mesuré le 2/7/2015 (Aller)

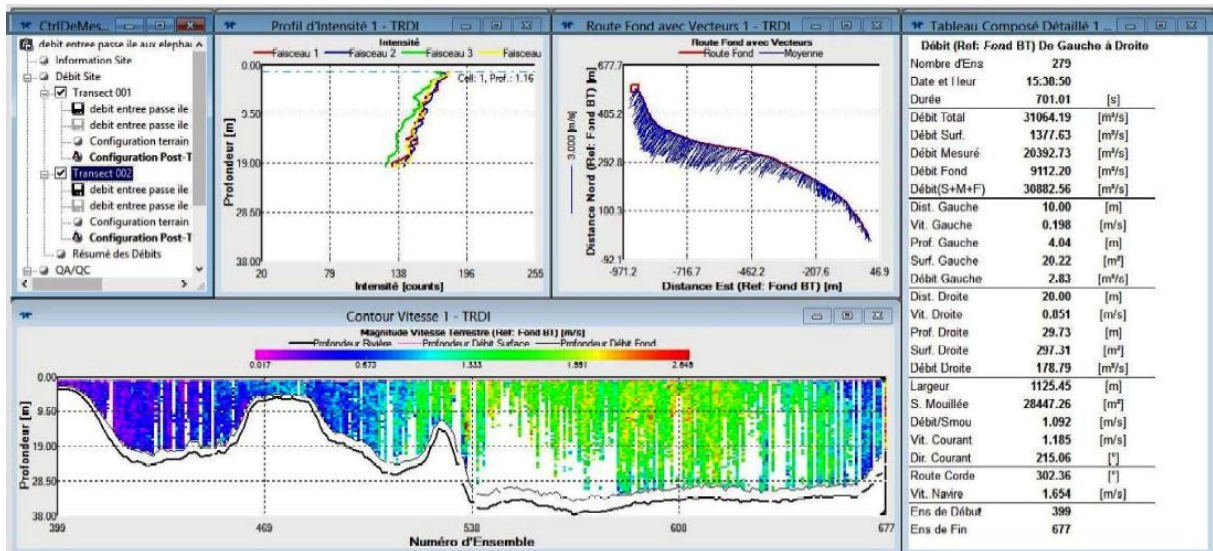


Fig 55. Jaugeage ADCP sur le Congo, Ile aux Eléphants (entrée) mesuré le 2/7/2015 (Retour)

Les variables mesurées lors de ce jaugeage sont résumées dans la Table 7. Une simulation avec le logiciel SIC a été réalisée pour le débit mesuré lors de ce jaugeage, soit en moyenne entre l'aller et le retour 31381 m³/s. On observe que la Largeur est bien retrouvée dans le modèle, avec une erreur de 5.8%. Cela confirme la qualité de cette donnée dans la base GWD-LR. Par contre, il y a des écarts plus importants sur la Surface Mouillée (+30.3%), la Profondeur Moyenne (+23.2%) ainsi que du coup sur la Vitesse Moyenne (-22.6%). Une explication possible est que cette zone se trouve dans le Pool de Malebo, avec des pentes très faibles de la ligne d'eau, et du coup des erreurs relatives potentiellement plus importantes sur la profondeur calculée dans ces zones. On voit par ailleurs que cette zone a une bathymétrie relativement chahutée (Fig 53), ce qui est également visible sur les écarts du relevé ADCP entre le passage à l'aller (Fig 54) et au retour (Fig 55) avec des écarts de plusieurs mètres sur un transect qui est censé être proche entre le passage aller et retour. Comme déjà évoqué précédemment, l'inversion de l'équation de Manning Strickler utilisée pour calculer la bathymétrie est sensible aux erreurs de pentes, qui sont relativement importantes dans ces zones plates. Mais inversement, une erreur de bathymétrie générera des erreurs de cote de l'eau faible. On peut donc espérer que cette erreur n'aura pas a priori de conséquences néfastes sur le modèle ni donc ses utilisations. Il est possible que cette erreur de bathymétrie soit aussi liée à une erreur de pentes liées aux erreurs de SRTM. Une fois la base GWD-LR mise à jour nous vérifierons si ces résultats s'améliorent. La vitesse qui est importante est en fait la vitesse moyenne sur une zone donnée, plus que la vitesse locale qui peut être relativement variable si la bathymétrie est chahutée, ce qui est le cas dans le Pool de Malebo. Notre vérification sur 400 km de la vitesse de déplacement de la pointe de crue donne une très bonne correspondance entre les valeurs issues de la simulation dans SIC et les données issues des mesures des Stations Virtuelles dans cette zone (chapitre 5.1.2).

	ADCP (A & R)	SIC	Ecart (%)
Débit (m ³ /s)	31699 & 31064	31622	0.8%
Largeur (m)	1136 & 1125	1197	5.8%
Surface (m ²)	27235 & 28447	36269	30.3%
Vitesse (Q/S) (m/s)	1.164 & 1.092	0.872	-22.6%
Profondeur max (m)	35 & 33	31.1	-8.5%
Profondeur moyenne (S/L) (m)	24 & 25.3	30.3	23.2%

Table 7. Jaugeage ADCP sur le Congo, Ile aux Eléphants (entrée) mesuré le 2/7/2015

Kinshasa - Brazzaville mesuré le 13/6/2015, à l'aller et au retour :

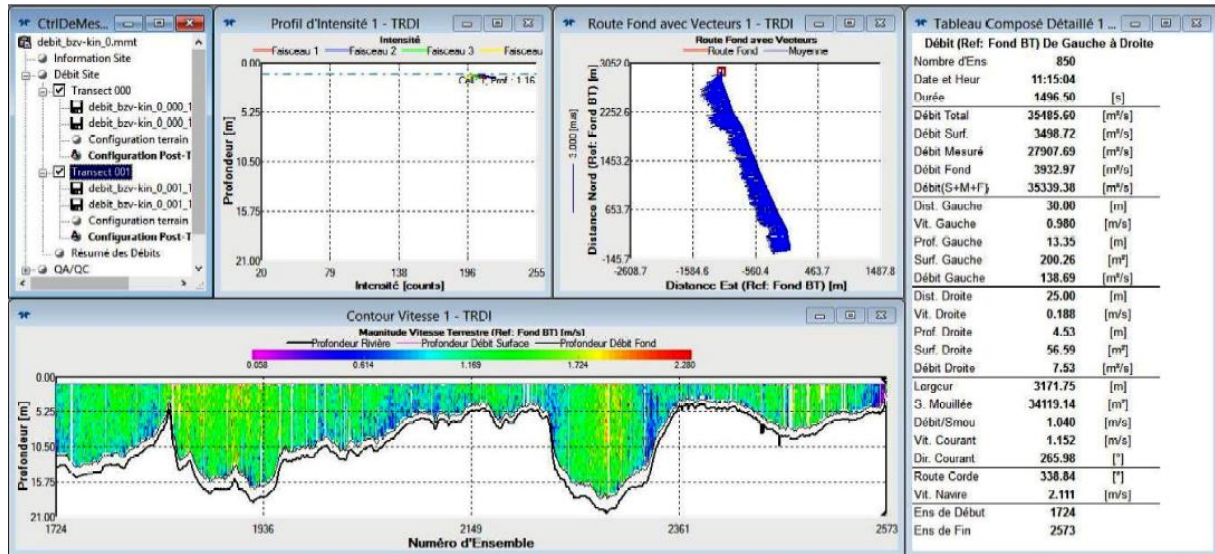


Fig 56. Jaugeage ADCP sur le Congo, Kinshasa - Brazzaville mesuré le 13/6/2015 (Aller)

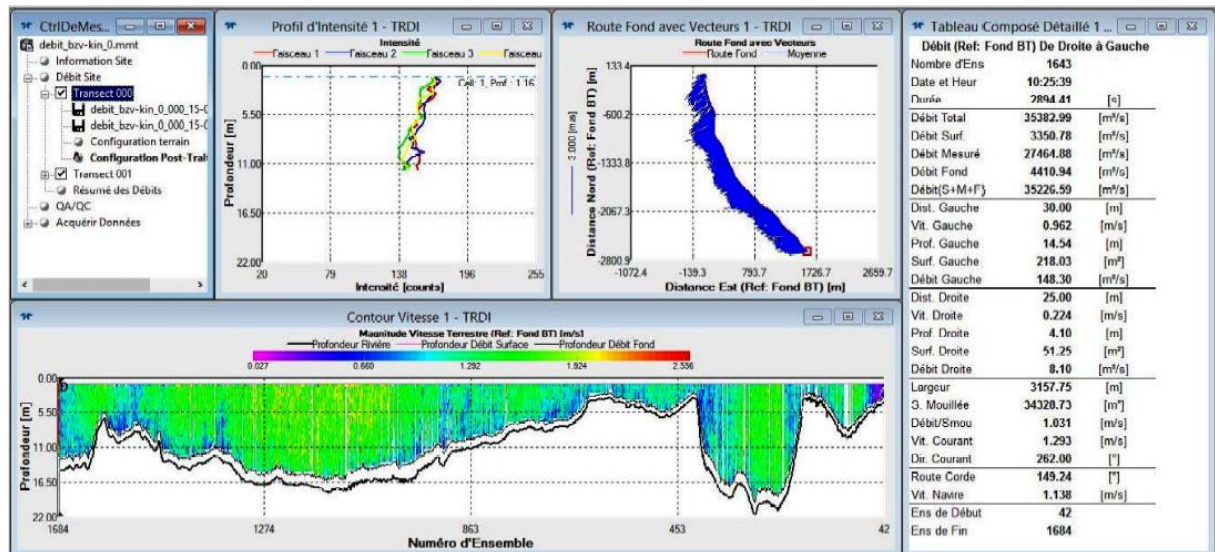


Fig 57. Jaugeage ADCP sur le Congo, Kinshasa - Brazzaville mesuré le 13/6/2015 (Retour)

	ADCP (A & R)	SIC	Ecart (%)
Débit (m3/s)	35485 & 35383	35434	0.0%
Largeur (m)	3172 & 3158	2946	-6.9%
Surface (m2)	34119 & 34320	29192	-14.7%
Vitesse (Q/S) (m/s)	1.04 & 1.031	1.21	17.2%
Profondeur max (m)	18 & 19	9.94	-46.2%
Profondeur moyenne (S/L) (m)	10.76 & 10.87	9.91	-8.7%

Table 8. Jaugeage ADCP sur le Congo, Kinshasa - Brazzaville mesuré le 13/6/2015

Sur le jaugeage de Kinshasa les résultats sont aussi plutôt encourageants, avec une erreur faible de Largeur (-6.9%), une erreur raisonnable de Surface (-14.7%), de Profondeur Moyenne (-8.7%) ainsi que de Vitesse (+17.2%). L'erreur sur la profondeur maximum est quant à elle importante (-46.2%) mais comme le montrent les Fig 56 et Fig 57, ce profil est peu homogène en profondeur (la forme n'est pas vraiment trapézoïdale).

5.1.2 Vitesses de propagation

Comme indiqué précédemment il était intéressant de vérifier si les dynamiques transitoires étaient correctement représentées dans le modèle hydraulique par rapport aux observations, en l'occurrence provenant des Stations Virtuelles. Nous avons montré précédemment que ces temps de retard pouvaient lever l'équifinalité entre le débit et les frottements. L'observation des données altimétrique de ces SV (Fig 17, Fig 34) montre une crue principale annuelle, ainsi que des petites crues secondaires. Afin de calculer les temps de retard de propagation de cette crue principale, il était utile de repérer une zone la plus longue possible sans affluents importants, qui pourraient modifier la forme de la crue, et faire une interpolation (spline en l'occurrence) afin de compenser le pas de temps d'observation trop important, et en tout cas trop grand par rapport aux temps de retard à estimer (ex : 10 jours pour Jason, alors que les temps de retard sont de l'ordre de quelques heures à quelques jours). C'est ce que nous représentons Fig 58 :

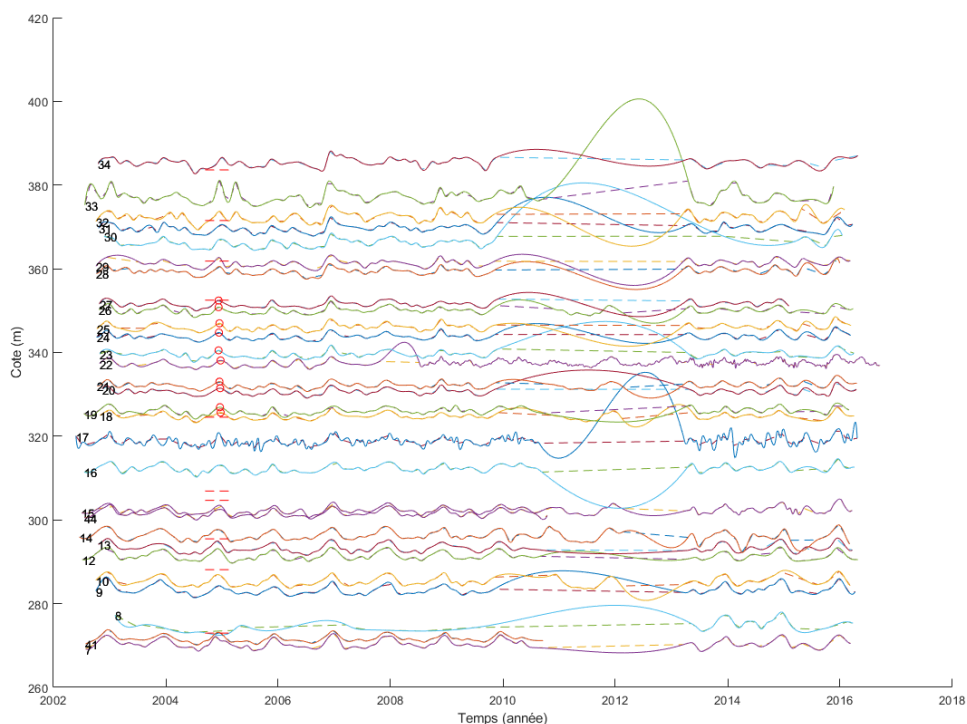


Fig 58. Interpolations splines sur les SV

Nous avons choisi sur l'ensemble de la période 2003-2016 une crue particulièrement nette, ainsi qu'une zone la plus longue possible située entre 2 affluents (les traits horizontaux pointillés rouges sur les Fig 58, Fig 59, Fig 60 délimitent les SV entre les affluents principaux).

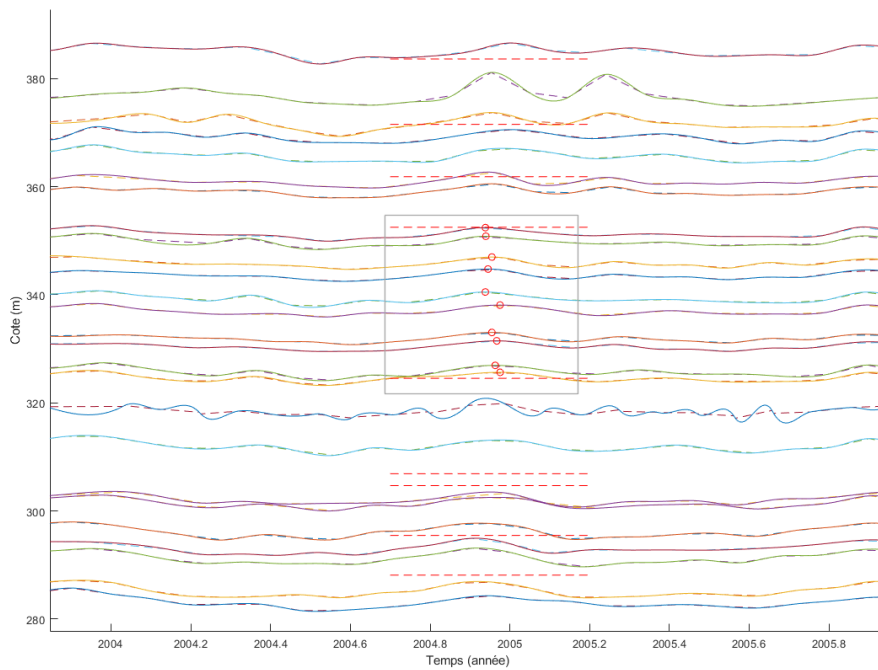


Fig 59. Zoom sur une propagation de crue sur la zone CONGO-PK-1484 à CONGO-PK-1844

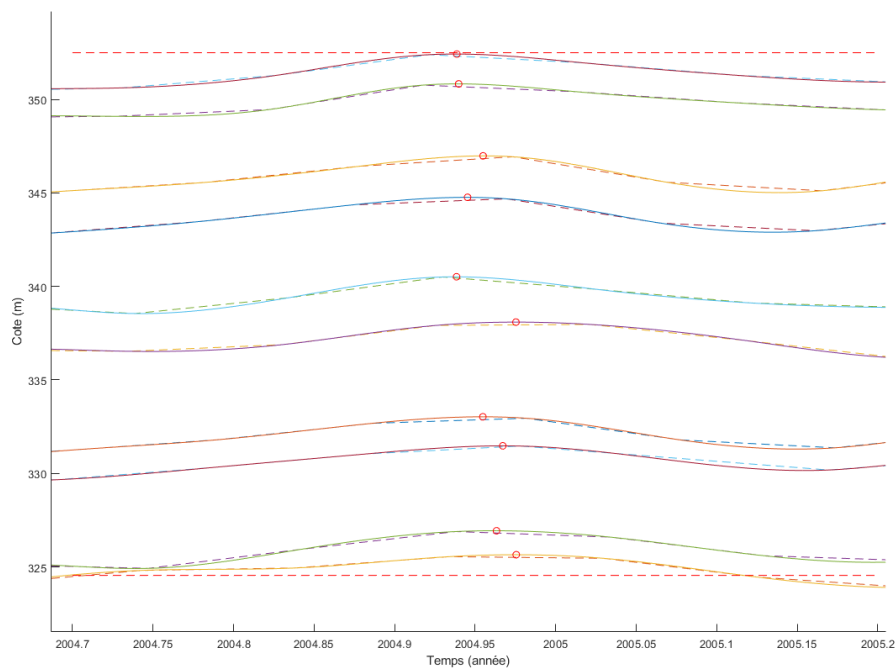


Fig 60. Zoom sur une propagation de crue sur la zone CONGO-PK-1484 à CONGO-PK-1844

Par un traitement automatique de détection du maximum (points rouges Fig 60), nous avons pu analyser les temps d'arrivée de la pointe de crue, en fonction de l'abscisse de la SV (Fig 61) :

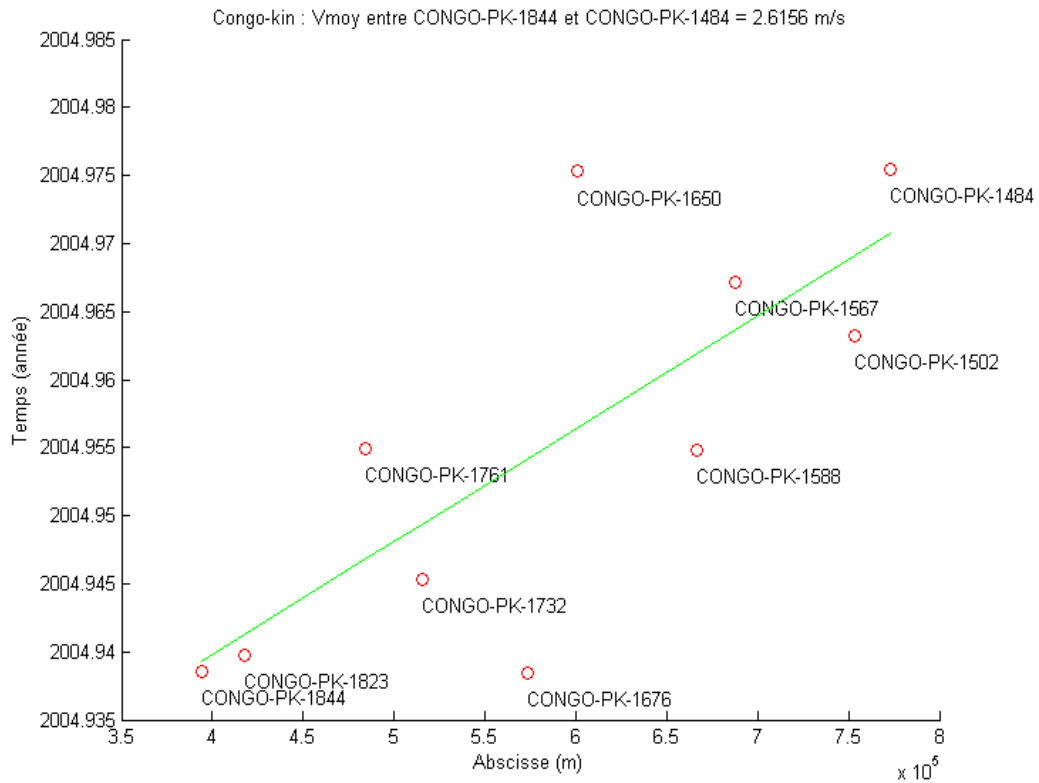


Fig 61. Temps d'arrivée de la pointe de crue à toutes les SV sur la zone CONGO-PK-1484 à PK-1844

Une interpolation linéaire sur cette courbe, donne une vitesse moyenne de 2.6156 m/s (Fig 61). La seconde étape consistait à calculer le même temps de propagation de la pointe de crue dans le logiciel SIC, entre les 2 SV extrêmes (CONGO-PK-1484 à CONGO-PK-1844) :

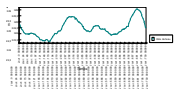


Fig 62. Crue simulée dans SIC à la SV CONGO-PK-1484

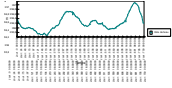


Fig 63. Crue simulée dans SIC à la SV CONGO-PK-1844

Les données issues de la simulation dans SIC donnent :

Nom Station Virtuelle	Abscisse (m)	Jour Qmax	Heure Qmax
CONGO-PK-1484	7.7284e+05	678	20:00:00
CONGO-PK-1502	7.5355e+05	678	16:00:00
CONGO-PK-1567	6.8784e+05	678	20:00:00
CONGO-PK-1844	3.9431e+05	677	04:00:00

Table 9. Temps de passage de la pointe de crue sur 4 Stations Virtuelles

Le temps de retard calculés sur la pointe du maximum (donc la même variable estimée avec les mesures altimétriques satellitaires sur la même zone) entre la SV CONGO-PK-1844 et la SV CONGO-PK-1484 est :

$$V_{\text{moy SIC}} = \frac{7.7284e+05 - 3.9431e+05}{(24+16)*3600} = 2.6287 \text{ ms}^{-1}$$

Cette valeur de 2.6287 ms^{-1} est à comparer avec $V_{\text{moy SV}} = 2.6156 \text{ ms}^{-1}$, soit une erreur de 0.5 %, ce qui est extraordinairement proche. Encore une fois, on ne peut pas garantir à ce stade que cette très bonne représentation des temps de retard dans notre modèle SIC par rapport aux valeurs réelles estimées à partir de l'altimétrie satellitaire sera toujours aussi bonne, mais ce premier résultat est très intéressant et encourageant. Une analyse systématique sera réalisée prochainement.

5.2 Oubangui

Nous pouvons réaliser un zoom sur le modèle hydraulique autour de la station in-situ de Bangui (Fig 64). Nous observons que la cote à la station est influencée par une courbe de remous de type F2 remontant sur plus de 150 km. La $Q(Z)$ générée par SIC à cette station est représentée en vert sur la Fig 65. On observe qu'elle colle parfaitement à la $Q(Z)$ générée à partir des points de la base Sierem. Ce résultat nous paraît remarquable, car il y a certes un ajustement du coefficient de Strickler à $K_s=48$ (et fruit des berges à 1), mais qui a été réalisé pour ajuster le point (Q,Z) correspondant à la période SRTM, qui correspond à un débit très faible (950 m³/s). Et nous observons que les $Q(Z)$ coïncident sur la totalité des données, y compris pour des débits très forts (15000 m³/s).

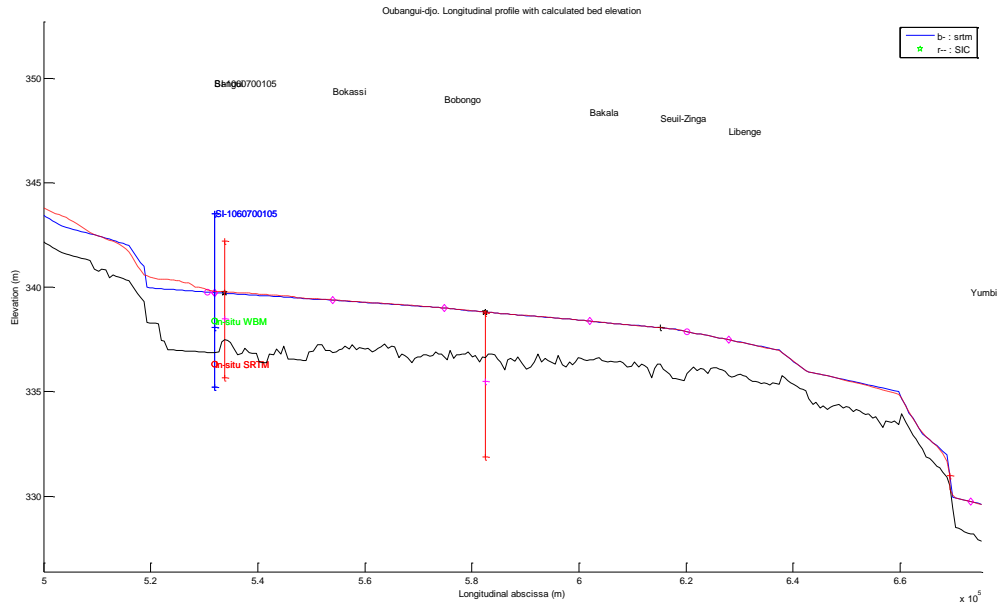


Fig 64. Zoom sur le modèle vers la SI de Bangui

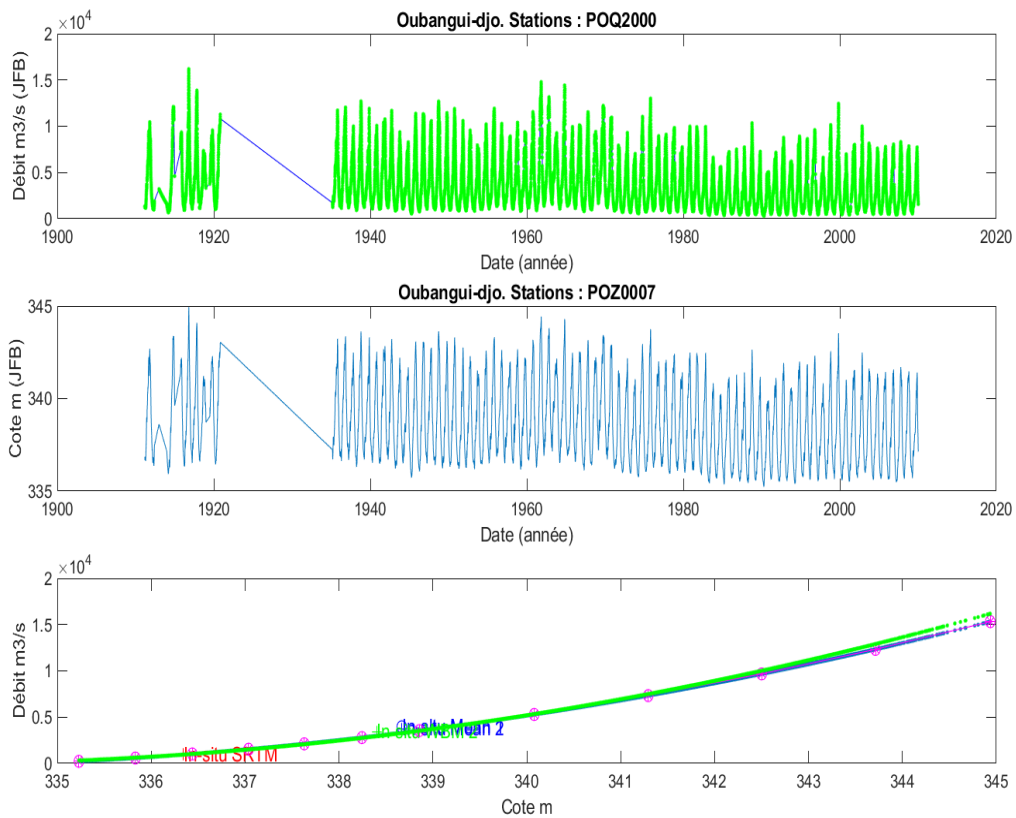


Fig 65. Station Bangui (1060700105) sur la période 1911-2010. $Q(Z)$ calculée par SIC

On obtient sur l'ensemble des débits sur toute la période 1910-2010 un $rRMSE=3.2\%$ avec optimisation (on trouve $K=48$ et fruit des berges latérales $f=1$). La sensibilité de ce $rRMSE$ au fruit des

berges f est faible et on voit qu'on trouve un rRMSE satisfaisant pour une gamme autour de l'optimum (Fig 40).

6 Méthode de calcul et première version de l'outil (Livvable #4)

La méthodologie présentée ci-dessus conduit à génération de courbes de tarage $Q(Z)$, sous forme polynomiales du second degré, faciles à implémenter et à alimenter à partir des données de Stations Virtuelles. Deux corrections sont à appliquer aux cotes obtenues.

La première notée $dz1$ a vocation à disparaître lorsque nous aurons accès à la nouvelle base GWD-LR avec les cotes SRTM corrigées (travaux en cours selon discussions personnelles avec Dai Yamazaki, disponibilité prévue premier semestre 2019).

La seconde correction notée $dz2$ est en général faible et correspond à un écart entre un calcul de Manning Strickler local (utilisé pour calculer la bathymétrie, par inversion de l'équation) et un calcul de courbe de remous complet (ce que fait SIC, et donc utilisé pour les générations des $Q(Z)$). Une correction de la bathymétrie pourrait aussi être réalisée pour éviter cette seconde correction.

Les valeurs des coefficients ($p1$, $p2$ et $p3$) des polynômes des $Q(Z)$, les $Z0$ de référence, ainsi que les corrections $dz1$ et $dz2$ sont détaillés dans les Table 3, Table 4 pour le Congo et Table 5, Table 6 pour l'Oubangui.

A partir d'une cote Z obtenue soit à partir d'un satellite (Station Virtuelle), soit à partir d'une station in-situ, notée Zsv ci-dessous, il faut appliquer les transformations suivantes :

$$Z_{sic} = Z_{sv} + dz1 + dz2$$

On peut ensuite injecter cette cote dans le polynôme de la SV :

$$Q = p1 * (Z_{sic} - z0)^2 + p2 * (Z_{sic} - z0) + p3$$

Où $p1$, $p2$, $p3$ ainsi que $z0$ sont des paramètres donnés dans les Table 4 pour le Congo et Table 6 pour l'Oubangui.

Les variables Z_{sic} , Z_{sv} , $dz1$ et $dz2$ sont exprimées en mètres (USI). Les débits en m^3/s (USI).

6.1 Congo

Sur le Congo, à ce jour, nous disposons de 59 SV dans la zone retenue, entre les années 2002 à 2018, soit 6058 observations à la date de rédaction de ce rapport.

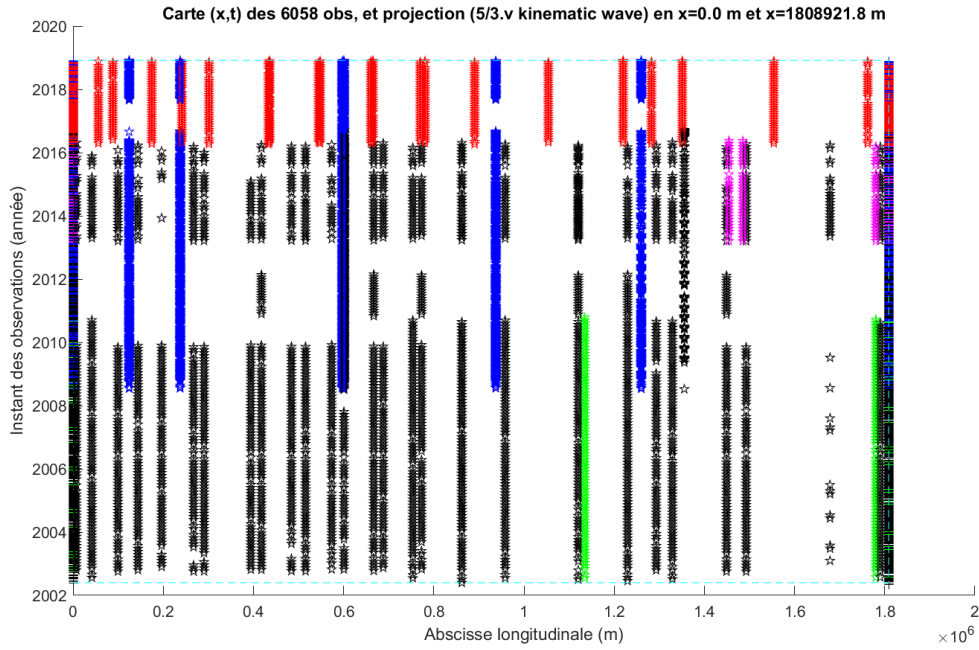


Fig 66. Observations en espace et en temps sur le Congo

En analysant pour chaque SV les périodes temporelles des observations, nous retrouvons majoritairement (Fig 67) des périodes de 30 jours (Envisat, en vert sur la Fig 66), 10 jours (Jason 2 & 3, en bleu) et 27 jours (Sentinel 3A, en rouge). Il y a aussi quelques valeurs à 20 jours (probablement une Jason avec une donnée manquante), quelques 17 jours (probablement des Sentinel combinées avec des Jason) et parfois des DT à 1 ou 2 jours qui doivent correspondre à des SV mixtes combinant plusieurs missions.

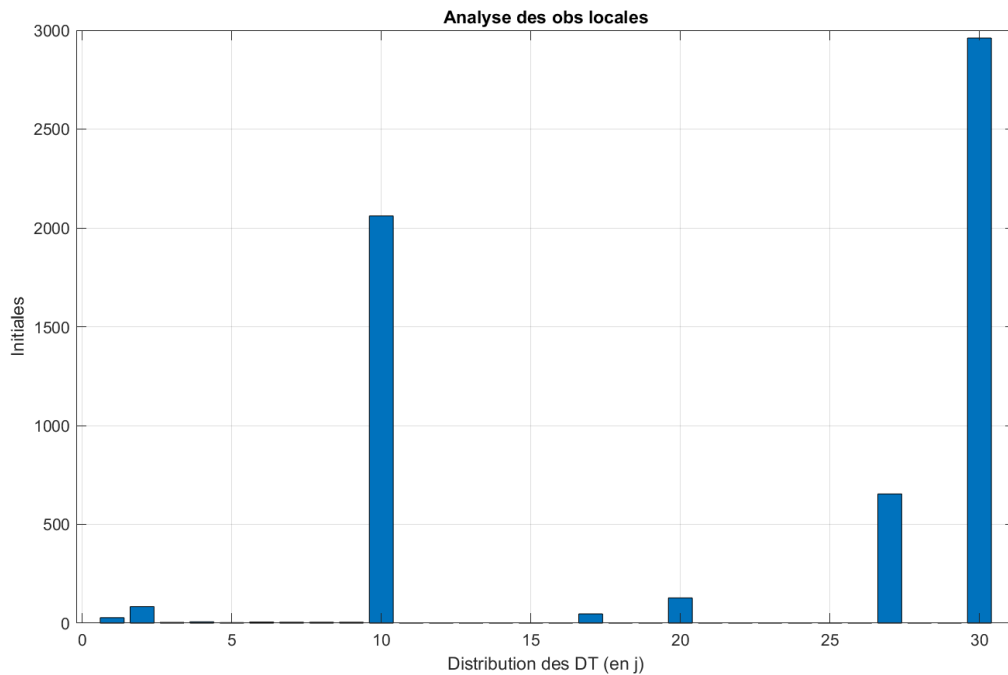


Fig 67. Période entre les observations, sur le Congo

Exemple :

Voilà un exemple de courbe sous Matlab de Z(t) et Q(t) calculées avec une Q(Z) à la Station Virtuelle Sentinel 3A « s3a-0085-00 »

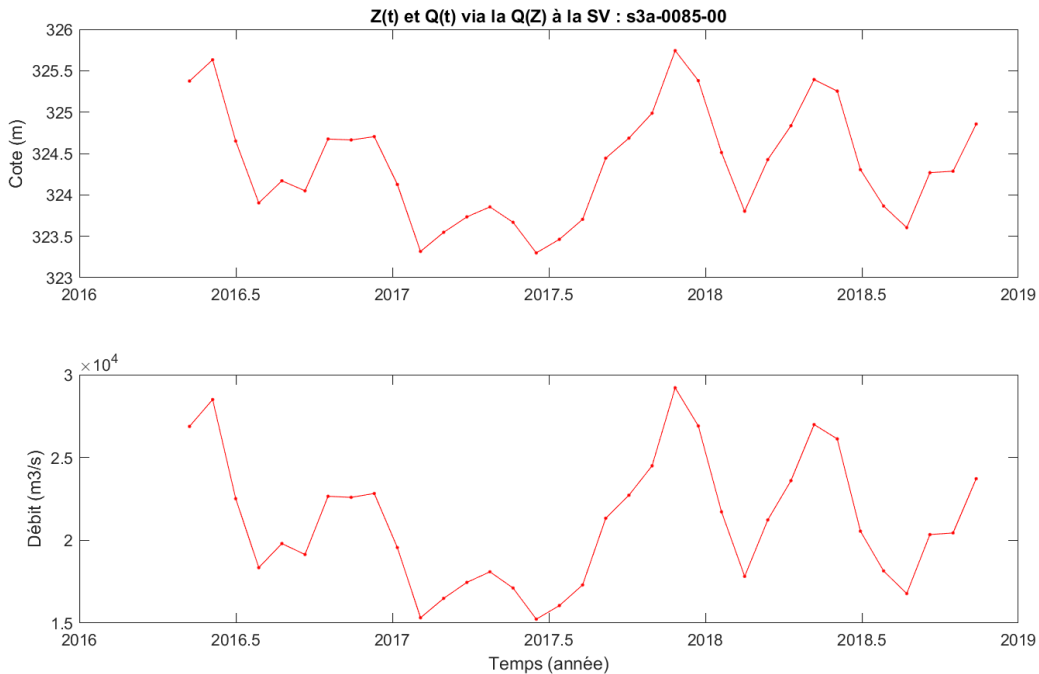


Fig 68. Exemple à la SV Sentinel 3A 0085-00 des cotes Z et des débits Q

Pour info, les données de la Q(Z) sont (cf. Table 3 et Table 4) :

SV55	s3a-0085-00		1.1170		0.1102
SV55	s3a-0085-00	302.9592	153.2961	-5210.705	315.3337

C'est-à-dire pour la SV s3a-0085-00 :

SV 55. Correction dz1 (SRTM - mean(SV))=1.117 m ; dz2 (SIC-SRTM)=0.1102 m

SV 55. $Q=302.9592*(Z-z_0)^2 + 153.2961*(Z-z_0) - 5210.705$ m³/s ; $z_0=315.3337$ m

Z dans le polynôme ci-dessus = cote brute de la SV (dessin du haut) + correction dz1 + correction dz2

Puis on calcule $Q=Q(Z)$ avec la formule polynomiale.

On peut représenter les résultats en débit obtenus ainsi pour toutes les SV et toutes les observations (Fig 69). On y dessine aussi les valeurs obtenues par la Q(Z) calculées avec la même méthodologie à la Station In-Situ de Kinshasa, retenue comme condition limite aval (en rouge en haut à gauche de la Fig 69, pour ne pas surcharger on a mis uniquement les valeurs des années 2002 à 2011 à cette station).

Congo-kin. (ENV. (gp):2, JA2 (bp):6, SRL (mp):3, S3A (r):20, ICE (yp):0, TOP (rh):0, SWOT (bx):0, Combined (kp):28, Other (kp):0, Too Far (cp):1

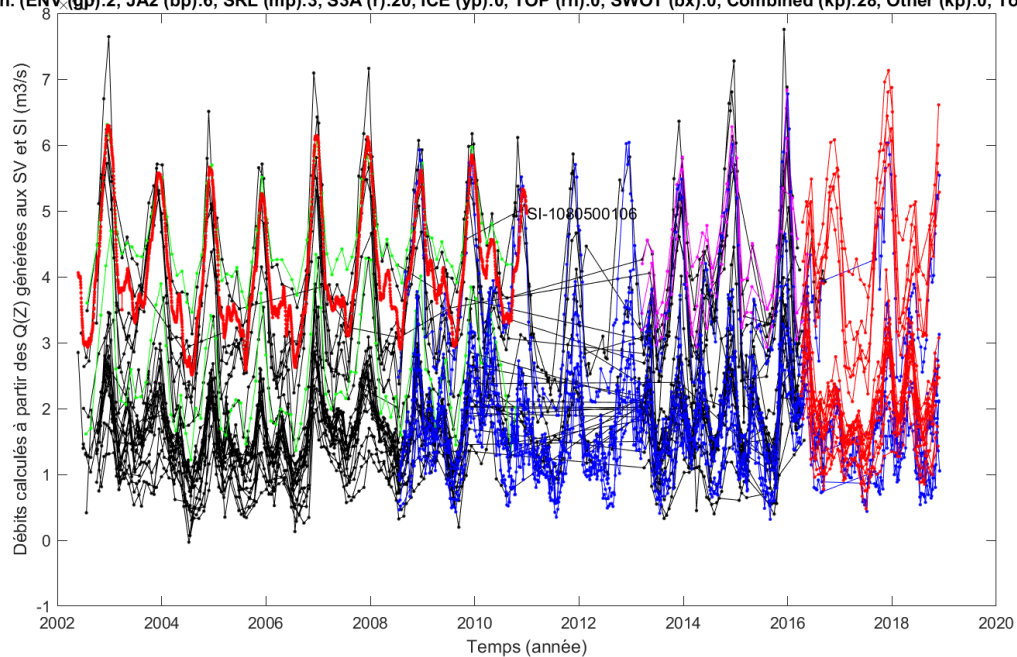


Fig 69. Débits à toutes les SV, et la Station in-situ sur le Congo

Afin de donner accès à ces résultats de manière simple et « opérationnelle », nous avons développé une interface web, récupérant automatiquement les données sur la base Hydroweb, en temps réel, et appliquant les formules précédentes. Cette interface a clairement vocation à évoluer en fonction des besoins et suggestion de la CICOS. Une autre option est d'intégrer ces calculs directement dans le SIH. En attendant la validation ou suggestion de modifications de cette interface nous n'y avons intégré que 2 SV, mais nous pourrons l'étendre à toutes les SV facilement.

L'adresse de cette interface web est : <http://cicos.g-eau.net>

Dans l'interface web, on peut sélectionner la SV dans une liste déroulante. Pour cette station on observe alors le graphique des cotes (1000 dernières valeurs), ainsi que les débits calculés avec la méthode décrite ci-dessus. Les cotes étant indiquées avec une incertitude, les incertitudes correspondantes sur les débits sont également indiquées.

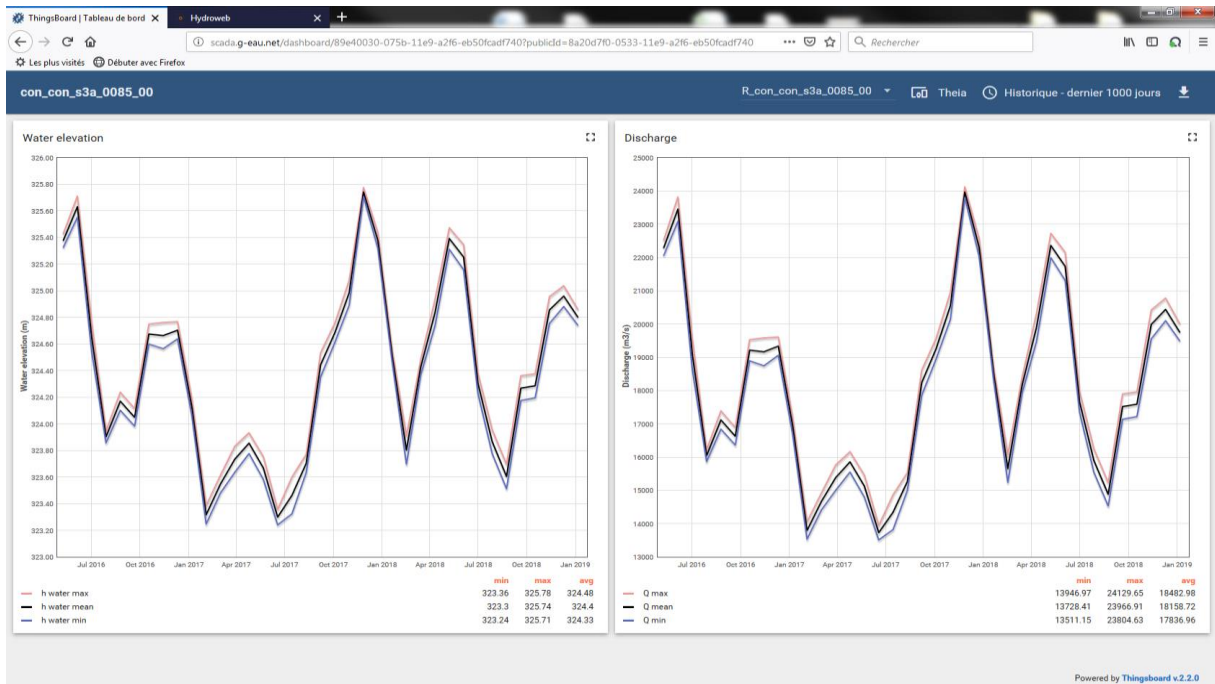


Fig 70. Interface web de calcul en temps réel de Q à la SV S3A 0085_00

6.2 Oubangui

Sur l'Oubangui, à ce jour, nous disposons de 30 SV dans la zone retenue, entre 2002 et maintenant, soit 2238 observations à la date de rédaction de ce rapport.

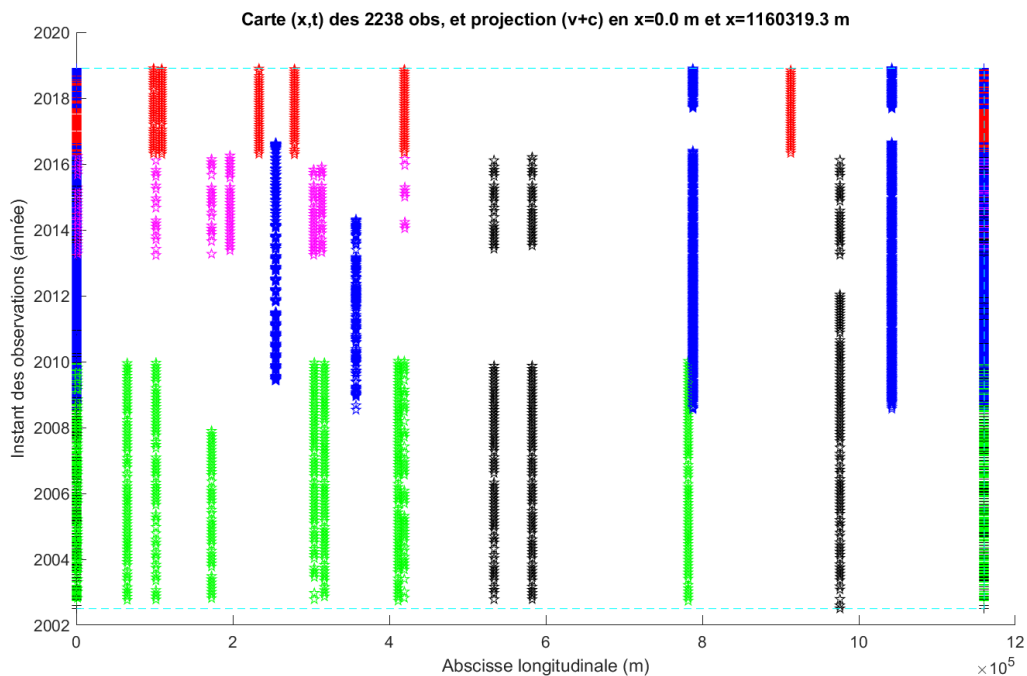


Fig 71. Observations en espace et en temps sur l'Oubangui

Nous observons encore principalement des périodes entre les observations de 30, 10 et 27 jours.

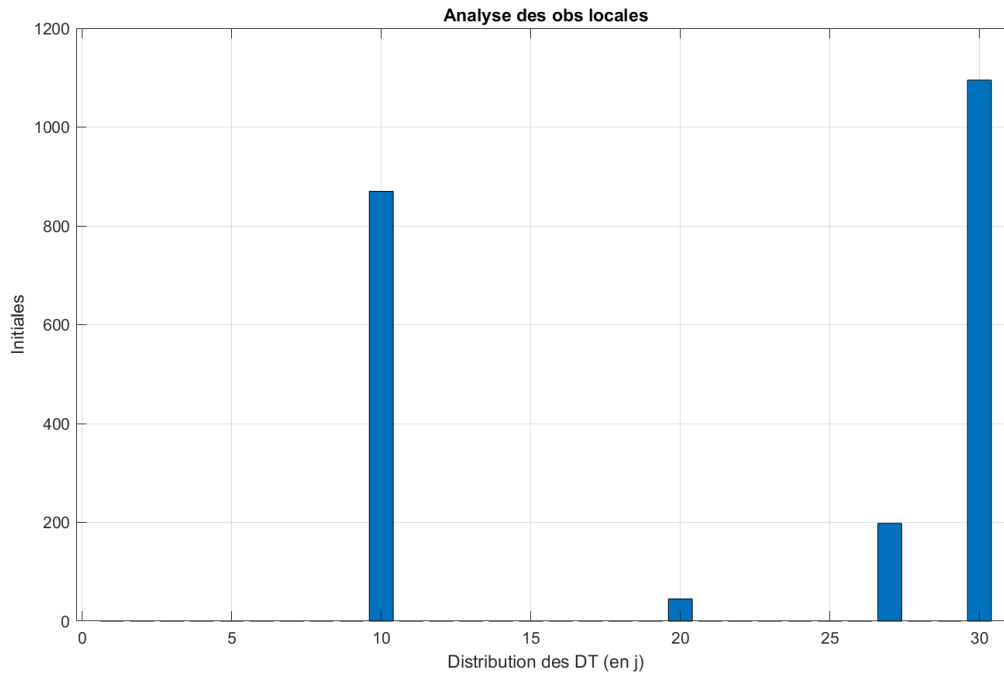


Fig 72. Période entre les observations, sur l'Oubangui

Nous appliquons l'équation polynomiale de la Q(Z) à la SV Envisat 0171-01, avec les corrections (cf. Table 5 et Table 6) :

SV1	env-0171-01		-1.8063	0.0094	
SV1	env-0171-01	371.7164	-1100.9922	735.3263	381.3195

Pour la SV env-0171-01 :

SV 1. Correction dz1 (SRTM - mean(SV))=-1.8063 m ; dz2 (SIC-SRTM)=0.0094 m

SV 1. $Q=371.7164*(Z-z_0)^2 - 1100.9922*(Z-z_0) + 735.3263 \text{ m}^3/\text{s}$; $z_0=381.3195 \text{ m}$

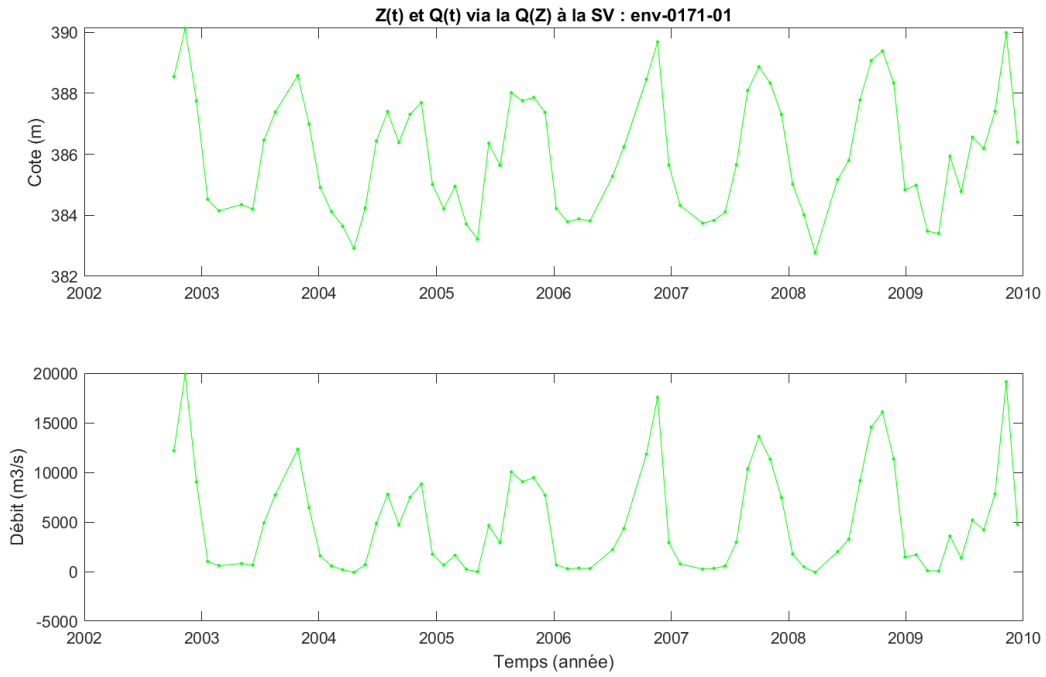


Fig 73. Exemple à la SV Envisat 0171-01 des cotes Z et des débits Q

Nous représentons également les résultats à toutes les SV, ainsi qu'à la SI de Bangui (dont on a vu qu'elle collait parfaitement avec la Q(Z) in-situ déterminée à partir des données de la base Sierem).

Oubangui-djo. (ENY (gp):9, JA2 (bp):5, SRL (mp):7, S3A (r):6, ICE (yp):0, TOP (rh):0, SWOT (bx):0, Combined (kp):3, Other (kp):0, Too Far (cp):

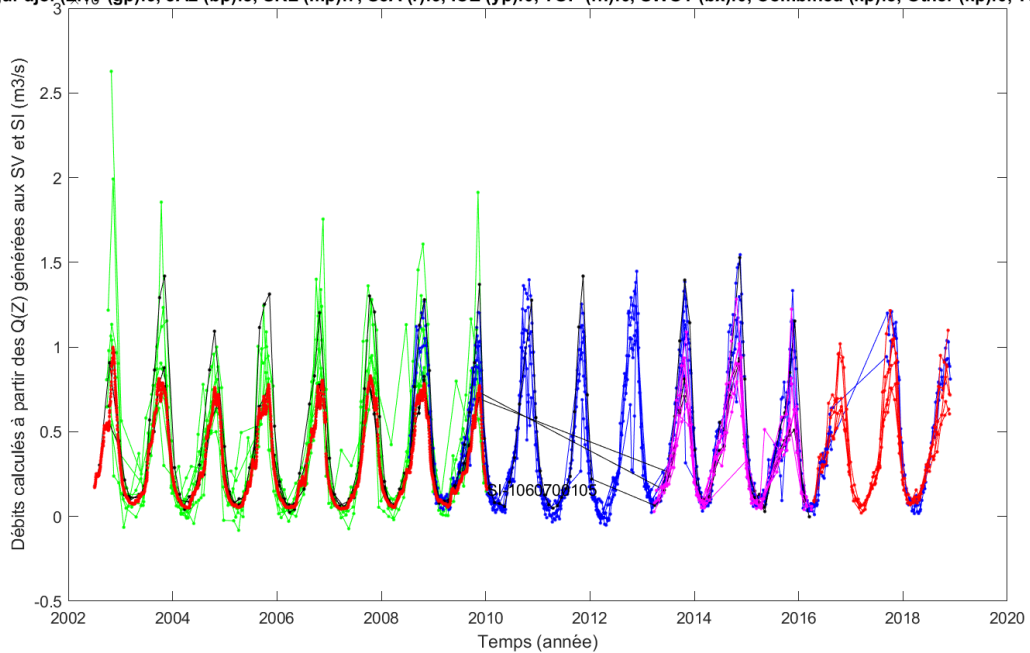


Fig 74. Débits à toutes les SV, et la Station in-situ sur l'Oubangui

7 Recommandations et perspectives (Livrable #5)

7.1 Possibilités d'améliorations de l'algorithme et possibilités de développement de l'outil

Il y a bien entendu plusieurs pistes d'amélioration et d'extension de l'algorithme. Certaines seront intégrées dans le cadre de cette action, lorsque les données correspondantes seront disponibles. D'autres sont ouvertes à la discussion, en fonction des intérêts de la CICOS.

La première amélioration visera à utiliser une mise à jour de la base GWD-LR qui devrait être disponible prochainement (1^{er} semestre 2019). Nous avons envisagé de corriger "manuellement" la ligne d'eau SRTM à partir des écarts aux Stations Virtuelles. Un script faisant cela a même été développé. Mais cette correction est sujette à caution entre les SV, ainsi qu'au choix de la valeur de la référence (moyenne des données aux SV, moyenne de février, etc.), car les observations pendant la période SRTM ne sont pas disponibles. Les corrections de SRTM en cours par Dai Yamazaki se font probablement à partir d'autres MNT (ex: TandemX, etc.). Les données de TandemX sont devenues publiques, mais cela représente un travail important, qui dépasse le cadre de cette étude. Il est donc préférable d'attendre la disponibilité de cette nouvelle version de GWD-LR. En attendant nous avons calculé pour chaque SV une correction appelée dz1 qui vise à rendre cohérentes entre elles les cotes des SV et la cote de référence de SRTM qui est utilisée pour générer le modèle hydraulique dans SIC. Le jour où cette version de GWD-LR sera disponible cette correction dz1 sera obsolète (ou a priori très réduite). De nouvelles Q(Z) seront fournies (nouveaux coefficients p1, p2 et p3 des polynômes, nouvelles références Z0). Le modèle hydraulique sera modifié et donc les corrections dz2 seront aussi probablement modifiées, mais à priori de manière limitée.

Les données altimétriques fournies par les missions actuelles (Sarat, Envisat, Jason, Sentinel) ne fournissent qu'une cote au nadir du satellite. La mission SWOT fournira en plus des pentes de l'eau. Ces pentes peuvent en effet être calculées du fait de la mesure en 2 dimensions sur 2 fauchées latérales. Cela donne une information très importante et utile permettant en effet de corriger les effets d'hystérésis évoqués au chapitre 2. Grâce au modèle SIC mis au point, nous avons pu vérifier si ces phénomènes sont présents de manière importante ou non sur le Congo et l'Oubangui. Pour cela nous avons réalisé des simulations en régime permanent, sur quelques scénarios simples et réaliste, et avons comparé les couples de points (Q,Z) ainsi obtenus par rapport aux courbes de tarages obtenues précédemment. Ces points sont tracés en rouge sur les Fig 75 et Fig 76, où les courbes de tarage sont en vert. Nous observons que ces effets ne sont pas négligeables sur la plupart des SV. Les écarts en débits peuvent être pour certaines SV de l'ordre de 10%. Nous affinerons ces estimations dans le cadre des scénarios réels reconstruits sur les périodes 2002-2018. Nous pourrions ainsi donner une incertitude sur les débits reconstitués. Les régimes hydrologiques et hydrauliques du Congo et de l'Oubangui étant assez réguliers, il est également possible de fournir une Q(Z) différente à la montée et à la descente des crues. Ce point pourra faire l'objet d'une étude rapide.

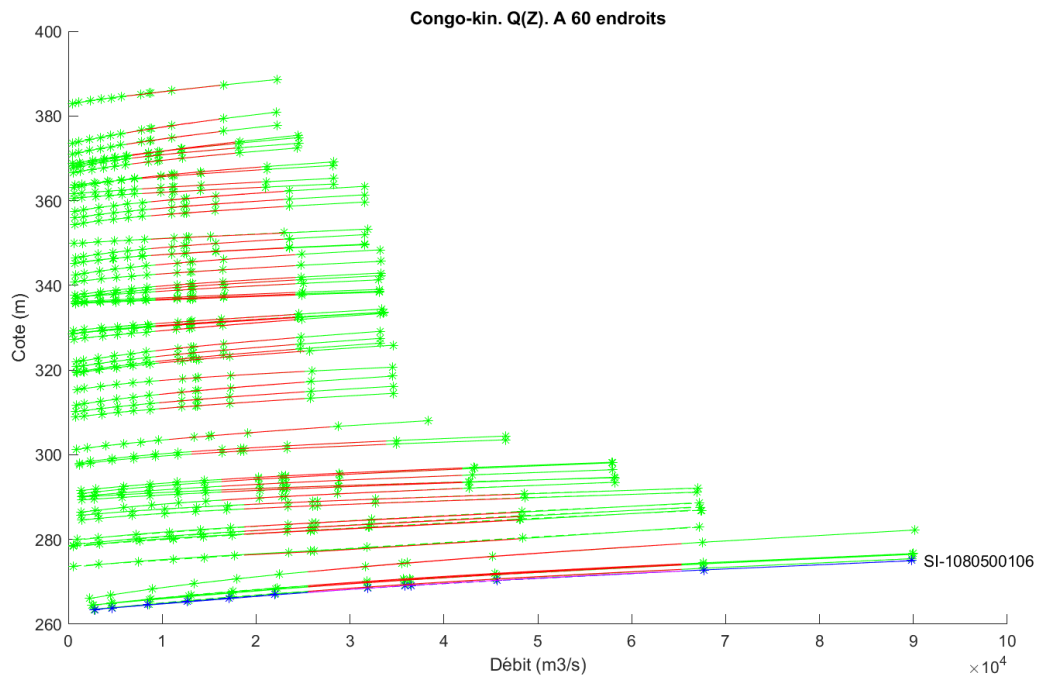


Fig 75. Mise en évidence d'effets d'hystérésis sur le Congo

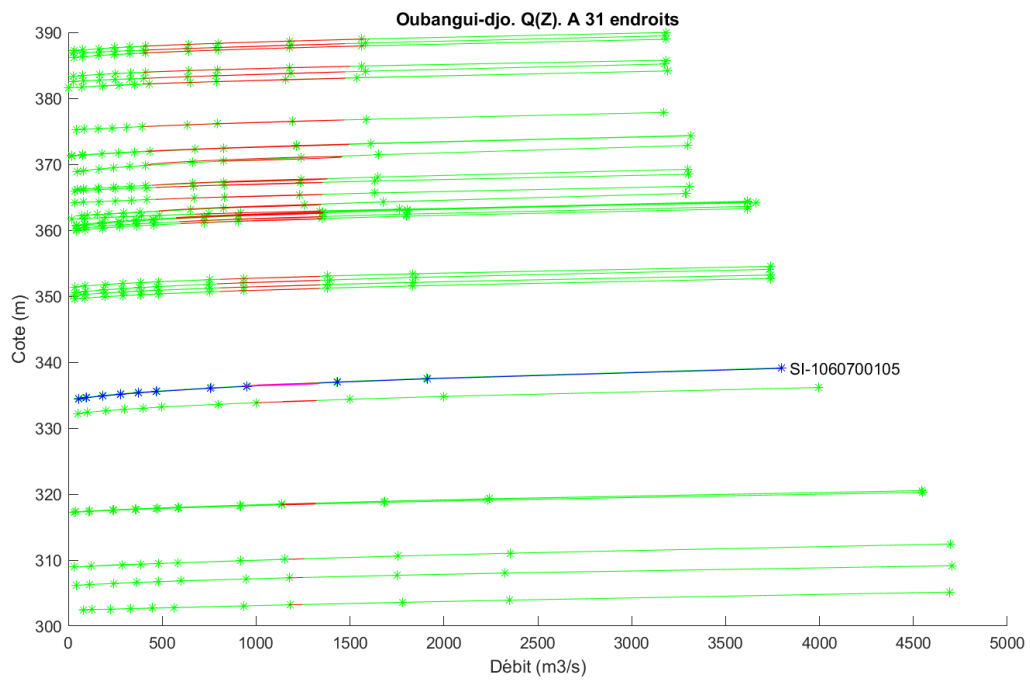


Fig 76. Mise en évidence d'effets d'hystérésis sur l'Oubangui

7.2 Pistes pour l'ajout de nouvelles stations virtuelles, liées à d'autres missions satellitaires altimétriques classiques (en lien avec le LEGOS et CLS)

Les données Sentinel 3A sont disponibles depuis peu. Nous avons pu les intégrer dans nos calculs en fin d'étude (automne 2018). Il est très facile d'intégrer de nouvelles SV dans la chaîne de traitement. Il suffit de les ajouter dans la base Hydroweb ou de fournir les fichiers au même format que ceux déjà fournis par le LEGOS. Tous les traitements étant automatisés le calcul des Q(Z) à ces nouvelles SV se fera rapidement. Il faudra aussi les ajouter dans l'outil opérationnel, soit celui proposé ci-dessus (<http://cicos.g-eau.net>), soit un autre à discuter.

Si des courbes de tarage sont utiles à d'autres endroits que des emplacements de SV, la méthodologie peut tout à fait les générer. Il suffit de préciser ces emplacements. Par exemple si des stations in-situ sont disponibles ailleurs, on peut les comparer à celles générées par notre approche.

7.3 Analyse des trajectoires (traces) de la future mission SWOT sur les zones étudiées (fréquence temporelle, couverture géographique)

Cette étude n'a pas été réalisée. L'étude des traces peut se faire, mais ce point est indépendant de l'étude D.6.12. L'intégration de données de type SWOT n'est pas possible actuellement car les vraies données ne seront disponibles qu'après le lancement, et la génération de données synthétiques générées par le simulateur HR nécessite un MNT de la zone, un modèle hydraulique a priori précis. Une option serait d'utiliser le modèle que nous générons dans SIC, mais lancer le simulateur sur des séquences multi-temporelles sur tout le Congo et l'Oubangui demande beaucoup de travail, dépassant le cadre de cette action D.6.12. Mais une autre étude pourrait être envisagée analysant l'apport des futures données SWOT par rapport aux données d'altimétrie classique, avec leur caractéristiques en espace et en temps.

7.4 Disponibilité de nouvelles bathymétries (projets CRuHM, PANAV)

Les projets CRuHM et PANAV comportent des développements de modèles hydrauliques. Nous n'avons pas pu obtenir les bathymétries correspondantes. Cependant cela n'a pas empêché le développement de notre méthodologie. Par ailleurs, cette méthodologie est donc plus générique car elle ne repose pas sur des relevés terrain longs et coûteux.

Si cette bathymétrie est disponible elle pourra être utilisée pour la comparer à celle générée dans le cadre de notre étude.

8 Conclusion

A ce stade nous sommes en mesure de générer une bathymétrie approximative à partir de données satellitaires (base GWD-LR, issue de SRTM), ainsi que de la base WBM, elle-même issue d'un MNT, d'un modèle hydrologique grande échelle et de données pluviométriques ré-analysées sur les années 1961-2010.

Cette bathymétrie est considérée dans un premier temps comme satisfaisante, pour tester une maquette de reconstitution des débits à partir de données altimétriques. Son avantage est qu'elle est générée à partir de données globales uniquement, sans mesures in-situ et est donc applicable à la totalité des fleuves et rivières pour lesquels ces données sont disponibles et fiables. Si pour certains

sites une bathymétrie in-situ plus fine et plus précise est disponible, ces données pourront être utilisées en remplacement. Lorsque des données étaient disponibles nous les avons utilisées soit pour affiner certains paramètres du modèle (ex : Ks avec la Q(Z) de Bangui, condition limite aval à Kinshasa), soit pour valider notre approche. Nous avons vu que les temps de propagation des pointes de crue pouvaient être utilisés pour ajuster un coefficient, comme le frottement, si une Q(Z) locale n'est pas disponible. Nous n'avons fait cette vérification que localement, mais il est envisageable d'étendre cette idée.

Ces données ont permis de générer les fichiers de données du modèle SIC² (Irstea) et de réaliser des simulations hydrauliques en régime permanent et transitoire.

Ces simulations ont permis de générer des courbes de tarage Q(Z) à tous les emplacements intéressants, et en particulier aux SV (Stations Virtuelles) et aux SI (Stations in-situ). A la Station in-situ de Bangui, notre approche a permis de coller parfaitement avec la Q(Z) locale (rRMSE de 3.2%). Nous ne pouvons pas garantir que cela est valide partout, mais toute information ou toute observation pourra être analysée pour détecter des anomalies éventuelles et les corriger.

Le modèle hydraulique ainsi développé a aussi de nombreuses autres applications potentielles. Il a permis par exemple de calculer les temps de retard, d'évaluer les phénomènes d'hystérésis. Il n'est cependant pas aussi précis qu'un modèle généré partir de relevé in-situ comme cela est réalisé dans le cadre des projets CRuHM ou PANAV en cours.

9 Références

Ces références sont loin d'être exhaustives sur le sujet de l'estimation des débits à partir de données altimétriques. Une littérature commence à être abondante sur ce sujet depuis une bonne dizaine d'années. Ce sont principalement des références des auteurs de cette étude, complétées par des références citées dans le texte.

Allen, G.H., Pavelsky, T., (2018), Global extent of rivers and streams, *Science*, 361 (6402), pp. 585-588. doi: 10.1126/science.aat063

Allen G. H., Pavelsky T. M., (2018), Global River Widths from Landsat (GRWL) Database. Zenodo; doi: 10.5281/zenodo.1297434

Andral A., S. Legrand, J-F. Cretaux, S. Calmant, A. Paris, S. Delichere, P-O. Malaterre, H. Oubanas, D. Jouve, F. Lefevre, G. Goulemvuga, B. Tondo, M. Lemenager, C. Brachet, S Cherchali, N Picot, (2018), Toward a better knowledge of water flowing of the Congo basin and hydropower potential with satellite altimetry. Perspectives with the future SWOT altimetry mission, Chapman conférence sur le Congo, Washington, 25-27 Septembre, Poster

Domeneghetti, A., (2016), On the use of SRTM and altimetry data for flood modeling in data-sparse regions, *WaterResour. Res.*, 52, 2901–2918, doi: 10.1002/2015WR017967.

Donghwan Kim, Hanwen Yu, Hyongki Lee, Edward Beighley, Michael Durand, Douglas E. Alsdorf, Euiho Hwang, (2019), Ensemble learning regression for estimating river discharges using satellite

altimetry data: Central Congo River as a Test-bed, Remote Sensing of Environment, Volume 221, 2019, Pages 741-755, ISSN 0034-4257, doi: 10.1016/j.rse.2018.12.010.

Durand, M., et al., (2016), An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope, Water Resour. Res., 52, 4527–4549, doi: 10.1002/2015WR018434.

Durand M., R. Frasson, S. Tuozzolo, C. Gleason, P-A. Garambois, P-O. Malaterre, (2018), A first estimate of the expected distribution of SWOT river discharge accuracy, AGU Fall Meeting, Washington, 10-14 Décembre, Oral Presentation

Gejadze Igor, Malaterre Pierre-Olivier, (2016), Design of the control set in the framework of variational data assimilation. Journal of Computational Physics. August 2016. doi: 10.1016/j.jcp.2016.08.029

Gejadze Igor, Malaterre Pierre-Olivier, (2016), Discharge estimation under uncertainty using variational methods with application to the full Saint-Venant hydraulic network model. International Journal for Numerical Methods in Fluids. Version of Record online: 28 July 2016, doi: 10.1002/fld.4273

Liguang Jiang, Henrik Madsen, Peter Bauer-Gottwein, (2019), Simultaneous calibration of multiple hydrodynamic model parameters using satellite altimetry observations of water surface elevation in the Songhua River, May 2019, Remote Sensing of Environment 225:229-247, doi: 10.1016/j.rse.2019.03.014

Le Coz J., H. Chen, B. Renard and P-O. Malaterre, (2018), Bayesian estimation of streamflow using satellite data and ground discharge measurements, AGU Fall Meeting, Washington, 10-14 Décembre, Poster

Malaterre P-O., H. Oubanas, I. Y. Gejadze, F. Billaud, (2018), Estimation des débits sur le fleuve Congo à partir de mesures satellitaires altimétriques, Méthodologie, Illustrations, Données, Atelier Régional sur le suivi hydrologique et applications spatiales dans le bassin du Congo. Groupe de travail sur l'hydrologie spatiale – Programme SWOT. Djeuga Palace Hotel, Yaoundé, Cameroun 7-9 Mars

Oubanas, H., I. Y. Gejadze, P-O. Malaterre, F. Mercier, (2018), River discharge estimation from synthetic SWOT-type observations using variational data assimilation and the full Saint-Venant hydraulic model, Journal of Hydrology, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.004

Oubanas, H., I. Y. Gejadze, P-O. Malaterre, M. Durand, R. Wei, R. Frasson, A. Domeneghetti, (2018), Discharge estimation in ungauged basins through variational data assimilation: The potential of the SWOT mission, Water Resources Research, doi: 10.1002/2017WR021735

Oubanas, H., I. Y. Gejadze, P-O. Malaterre, F. Mercier, (2018), River discharge estimation under uncertainty from synthetic SWOT-type observations using variational data assimilation, Journal la Houille Blanche, doi: 10.1051/lhb/2018022

Oubanas H., I. Y. Gejadze, P-O. Malaterre, A. Domeneghetti, M. J. Tourian, M. Durand, (2018), River discharge estimation in ungauged basins using multi-missions variational data assimilation, AGU Fall Meeting, Washington, 10-14 Décembre, Oral Presentation

Paris, A., Dias de Paiva, R., Santos da Silva, J., Medeiros Moreira, D., Calmant, S., Garambois, P.-A., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., Seyler, F., (2016), Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin, *Water Resources Research*, 52 (5), pp. 3787-3814. doi: 10.1002/2014WR016618.

Paris, A., (2015), PhD, Utilisation conjointe de données d'altimétrie satellitaire et de modélisation pour le calcul des débits distribués dans le bassin amazonien.

Pavelsky T. M., L. C. Smith, (2008), RivWidth: A Software Tool for the Calculation of River Widths From Remotely Sensed Imagery. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* 5, 70–73. doi: 10.1109/LGRS.2007.908305

Pekel J.-F., A. Cottam, N. Gorelick, A. S. Belward, (2016), High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418–422. doi: 10.1038/nature20584pmid:27926733

Yamazaki, D., F. O'Loughlin, M. A. Trigg, Z. F. Miller, T. M. Pavelsky, and P. D. Bates, (2014), Development of the Global Width Database for Large Rivers, *Water Resour. Res.*, 50, 3467–3480, doi: 10.1002/2013WR014664

Yamazaki, D., Oki, T., and Kanae, S., (2009), Deriving a global river network map and its sub-grid topographic characteristics from a fine-resolution flow direction map, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 2241-2251, doi: 10.5194/hess-13-2241-2009.