

Université Pierre et Marie Curie

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

**Validation de l'utilisation des pluies satellitaires
pour la modélisation hydrologique en Guyane française**

Alexis Jeantet

Directeur de recherche : Vazken Andréassian

**Co-encadrants : David Brochart
Maxime Montfort**



**Equipe HYDRO, UR HBAN,
IRSTEA à Antony**

13/09/2017



Summary

We propose to analyse two methods of correction for a satellite precipitation product, namely the TRMM product. The first one uses a Dated Additive Correction (DAC) correcting the satellite-based estimates by comparison with the ground-based measurements interpolated by IDW ; and the other one uses a correction based on Intensity Scaling (IS), determined by a rolling average between the real rainfall and the satellite precipitation product. The goal is to evaluate those products from the point of view of a hydrologist, with their capacity to generate a flow in a hydrological model.

We find that both methods improve the simulation of flow compared with the TRMM precipitation product. However, the IS correction gives (surprisingly) consistently better performances than the DAC method. Our study indicates that the IS correction considers the rainfall abatement, and the DAC method not, which is an advantage for the IS correction. Nevertheless, the IS correction is not perfect, and a "hybridisation" with the IS correction and the DAC method would improve the simulation and allow improved hydrological forecasting perspectives in French Guiana.

Table des matières

Introduction	1
1 Présentation de la Guyane et choix des bassins versants utilisés	2
1.1 Topographie et climat en Guyane française	2
1.2 Choix des bassins versants	3
2 Caractéristiques des données utilisées et du modèle GR4J	4
2.1 Données en entrée du modèle	4
2.1.1 Données pluviométriques	4
2.1.2 Données hydrométriques	8
2.1.3 Données d'évapotranspiration	10
2.1.4 Analyse climatique de la Guyane	10
2.2 Description du modèle GR4J	12
2.2.1 Fonctionnement du modèle	12
2.2.2 Optimisation des paramètres	14
2.2.3 Stratégies de calage	15
3 Comparaison des trois produits de pluie satellitaire	16
3.1 Hydrogrammes et comparaisons des débits simulés sur toute la chronique	16
3.2 Hydrogrammes et comparaisons des débits simulés sur des périodes spécifiques	25
3.3 Analyse par Split-Sample Test	27
3.4 Etudes sur la fréquence au non dépassement des pluies par bassin	28
4 Analyses des corrections hybrides proposées	31
4.1 Différentes stratégies testées	31
4.1.1 Hybridation directe de CAD sur IS	31
4.1.2 Hybridation directe de CAD sur IS par palier de distance limite	32
4.1.3 Correction Multiplicative Datée sur la pluie IS	33
4.1.4 Simulation avec de la pluie réelle interpolée sur chaque pixel	34
4.2 Synthèse des stratégies d'hybridation par analyse du NSE	36
Conclusion	41
Annexe 1 : Cumuls annuels pour chaque bassin	43

Liste des tableaux

1	Synthèse des caractéristiques des bassins versants guyanais	3
2	Synthèse des données d'EvapoTranspiration	10
3	Dates des périodes de calage par bassin versant	15
4	Synthèse des NSE en calage du modèle pour chaque bassin	23
5	Paramètres des modèles pour les trois produits initiaux	23

Table des figures

1	Cartes topographique (à gauche) et pluviométrique (à droite) de la Guyane française [Météo France]	2
2	Carte des bassins versants guyanais avec les trois stations de mesures à disposition. [Hydrosheds, Banque Hydro, DEAL, 2017]	3
3	Carte des pixels sur la zone d'étude et des 10 postes pluviométriques de Météo France disponibles en temps réel	6
4	Graphique présentant l'évolution de la pluie observée en fonction de la pluie satellitaire	8
5	Chroniques des débits observés pour les 6 bassins versants	9
6	Evolution du produit TRMM brute pour les six bassins versants et de l'ETP au pas de temps mensuel sur une année type.	11
7	Evolution des cumuls annuels des trois produits pluviométriques et du débit observé pour le bassin du Maroni à Langa Tabiki.	11
8	Modèle GR4J	12
9	Etude de sensibilité du taux de remplissage du réservoir de production à l'état initial	16
10	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin du Maroni à Langa Tabiki	17
11	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin du Maroni à Maripasoula	18
12	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de l'Oyapock à Saut Maripa	19
13	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de l'Approuague à Saut Athanase	20
14	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de la Mana à Saut Sabbat	21
15	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de la Comté à Saut Bief	22
16	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur une période humide pour la bassin du Maroni à Langa Tabiki	25
17	Hydrogrammes des débits simulés et observés sur une période seche pour la bassin du Maroni à Langa Tabiki	26
18	Schéma explicatif du calage-validation (Split-Sample Test)	27
19	Graphique du calage-validation par bassin et par pluie	28
20	Fréquences au non dépassement de chaque type de pluie par bassin	29
21	Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride directe pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	31
22	Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride limitée à 50km pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	32
23	Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride limitée à 100km pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	33
24	Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride multiplicative pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	34
25	Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie réelle interpolée avec 10 postes pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	35
26	Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie réelle interpolée avec 32 postes pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	36

27	Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki	37
28	Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant du Maroni à Maripasoula	37
29	Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant de l'Oyapock à Saut Maripa	38
30	Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant de la Mana à Saut Sabbat	38
31	Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant de l'Approuague à Saut Athanase	39
32	Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant la Comté à Saut Bief	39

Introduction

- La prévision hydrologique sur le territoire guyanais rencontre deux difficultés majeures :
- la faible densité du réseau pluviométrique disponible en temps réel (10 postes, essentiellement situées au Nord-Est du département) ;
 - le fait que les bassins versants de l'Oyapock à l'Est et du Maroni à l'Ouest s'étendent au-delà du territoire guyanais.

Pour cette raison, la Cellule de Veille Hydrologique de la DEAL Guyane s'est orienté vers l'utilisation de pluies satellitaires, avec l'aide de Météo France et d'Irstea.

Les pluies satellitaires présentent cependant des imperfections qui les rendent difficilement exploitables en l'état. Irstea (Brochart *et al.*, 2014) et Météo France (Beaufort *et al.*, 2016) ont donc proposé des post-traitements statistiques. L'objectif de l'étude est de proposer une **évaluation hydrologique** de ces traitements, afin de vérifier que les produits concernés sont exploitables pour la modélisation hydrologique. Alors que les corrections ont été conçues pour mieux représenter la pluie ponctuelle, il s'agit à présent d'évaluer le produit spatialisé à l'échelle de six bassins versants : la Comté à Saut-Bief (1800 km^2), le Maroni à Maripasoula (28000 km^2), le Maroni à Langa Tabiki (62000 km^2), l'Oyapock à Saut Maripa (24000 km^2), la Mana à Saut Sabbat (10500 km^2) et l'Approuague à Saut Athanase (8000 km^2).

1 Présentation de la Guyane et choix des bassins versants utilisés

1.1 Topographie et climat en Guyane française

La Guyane s'étend sur un territoire de plus de $83\,000\text{ km}^2$, recouvert à 96% par la forêt équatoriale. Sa population d'environ 230 000 habitants et en très forte augmentation, est majoritairement répartie sur le littoral et le long du Fleuve Maroni qui sert de frontière à l'Ouest avec le Suriname. Sur la figure 1, la topographie de la Guyane est caractérisée par de faibles reliefs sur la zone littorale, qui s'accroissent en allant vers le sud. La pluviométrie annuelle est caractérisée par un gradient est-ouest, avec des valeurs allant de moins de 2600 mm dans l'ouest et le sud-ouest (bassin versant du Maroni) à plus de 3600 mm dans le nord-est (à l'intérieur du triangle Cacao-Régina-Roura)(Brochart *et al.*, 2013). La pluie semble régionalisée, et nous verrons que c'est une caractéristique dont il faudra tenir compte par la suite.

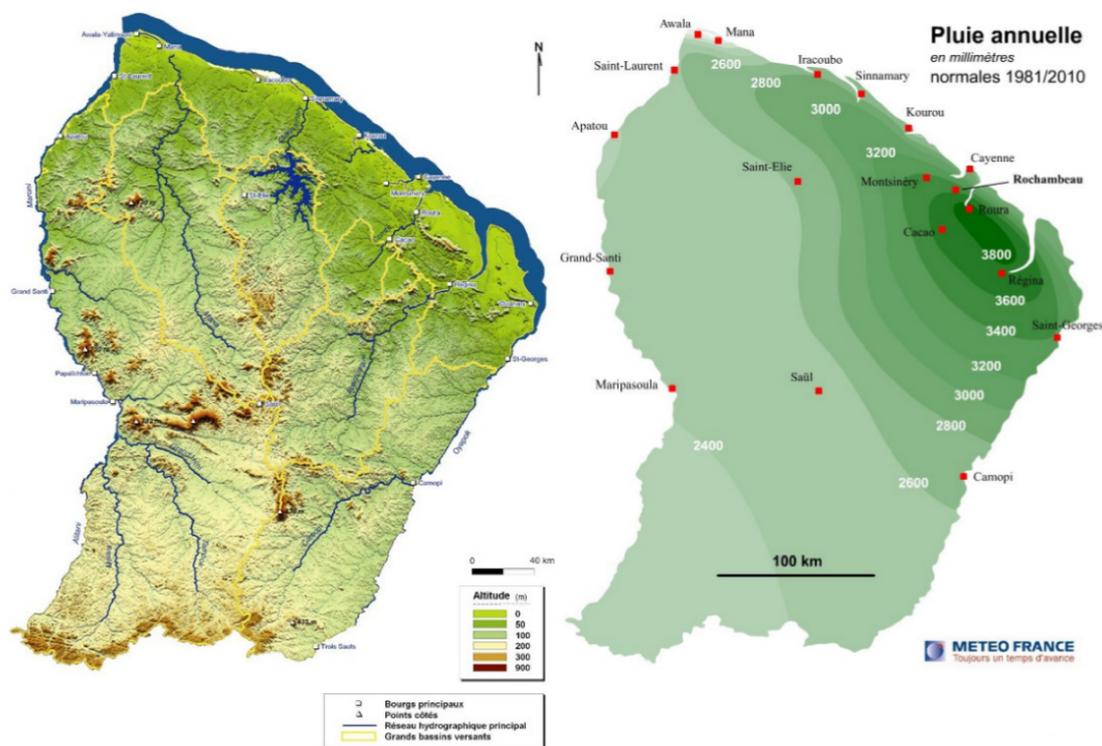


FIGURE 1 – Cartes topographique (à gauche) et pluviométrique (à droite) de la Guyane française [Météo France]

La Guyane possède un réseau hydrographique très dense avec 111 000 km de linéaire (BD CARTHAGE). La forte influence des marées se fait ressentir sur plusieurs dizaines de kilomètres dans les terres jusqu'aux premiers seuils rocheux. Pour cette étude, nous avons choisi de représenter le réseau hydrométrique de Guyane par six bassins versants, échantillon limité par les données hydrométriques à notre disposition.

1.2 Choix des bassins versants

Nous disposons de données hydrométriques et pluviométriques sur six stations de mesures réparties sur le territoire guyanais (figure 2) :

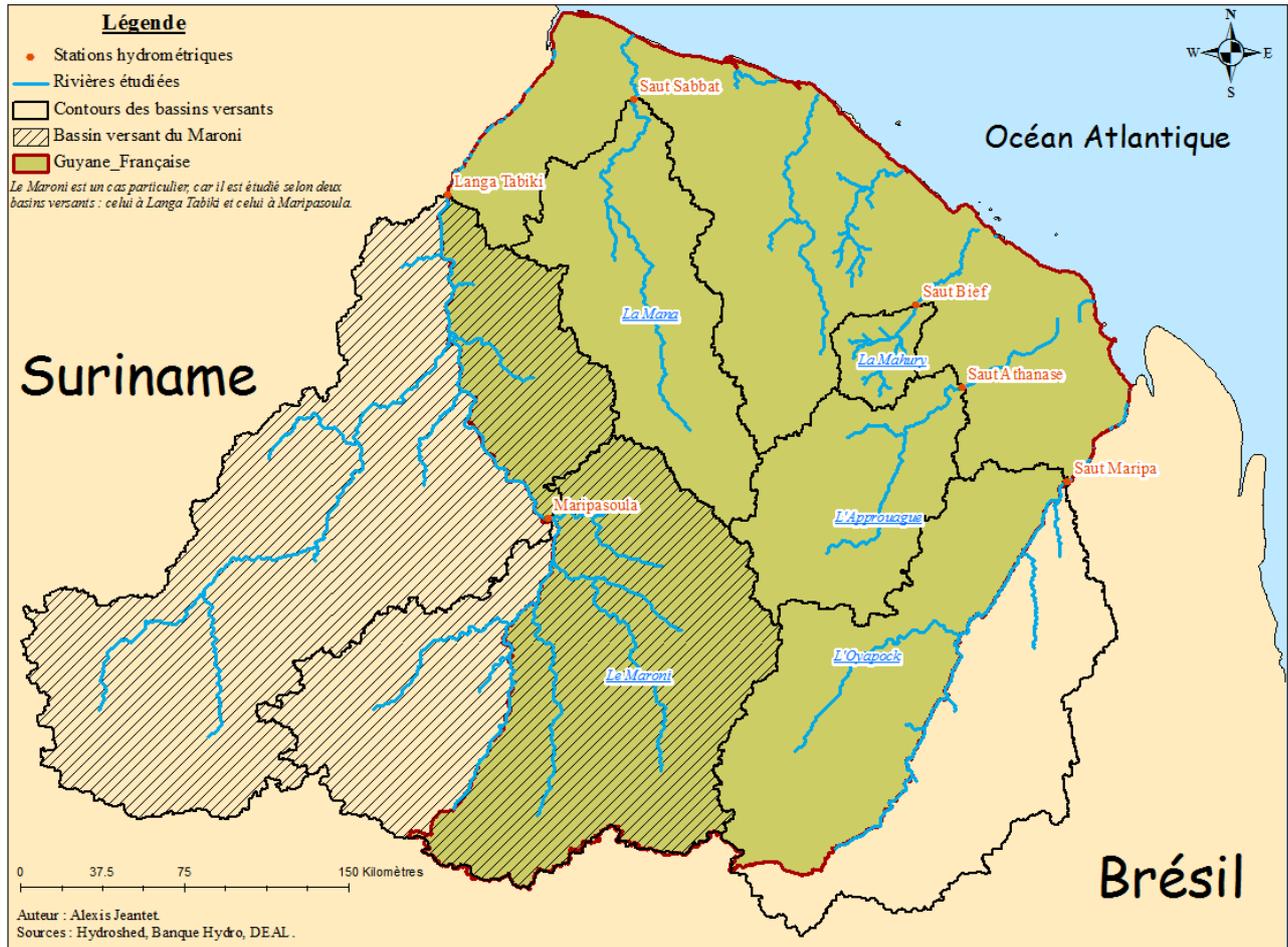


FIGURE 2 – Carte des bassins versants guyanais avec les trois stations de mesures à disposition. [Hydrosheds, Banque Hydro, DEAL, 2017]

Les caractéristiques des différents bassins versants sont synthétisées au tableau 1 :

Tableau 1 – Synthèse des caractéristiques des bassins versants guyanais

Stations	Codes hydro	Cours d'eau	Superficie BD Carthage(km ²)
Langa Tabiki	50410030	Le Maroni	60930
Maripasoula	52210020	Le Maroni	28285
Saut Maripa	60200030	L'Oyapock	25120
Saut Sabbat	70500080	La Mana	10225
Saut Athanase	80320030	L'Approuague	7725
Saut Bief	91040020	la Comté	1760

Le fleuve Maroni a deux stations hydrométriques qui le caractérisent, la station de Maripasoula qui est à l'amont de la station de Langa Tabiki. Une partie de leur bassin versant est situé au Suriname, hors des limites administratives de la Guyane française.

Le réseau hydrographique a été déterminé à partir du MNT fourni par HYDROSHED et nous avons choisi de ne représenter sur la figure 2 que les cours d'eau intéressants pour notre étude.

Il est à noter que tous ces cours d'eau n'ont pas la même ampleur, et que le palier que nous avons choisi pour représenter les plus importants comme Le Maroni ne convenait pas pour les caractériser tous. Dans le cas de la Comté, nous avons dû définir un seuil plus petit pour les visualiser, et ainsi les intégrer à la carte générale. Cette dernière permet uniquement de visualiser chacun des cours d'eau et ne reflète en aucune façon leur importance respective.

2 Caractéristiques des données utilisées et du modèle GR4J

2.1 Données en entrée du modèle

2.1.1 Données pluviométriques

Descriptif du produit TRMM "brut"

Les produits de pluies satellitaires, de par leur large couverture spatiale, permettent d'estimer une précipitation dans des zones difficiles d'accès, et grâce leur fréquence temporelle importante, pouvant aller jusqu'à deux mesures par heure, il est possible d'obtenir une chronique continue sur une région souhaitée en quasi-temps réel (Brochart et Andreassian, 2013).

Ils sont principalement issus de deux types de mesures :

- Tout d'abord, les données InfraRouges (IR) fournissent une mesure de la température de brillance¹ des nuages, qui est corrélée à la probabilité de précipitation du nuage. Les IR donnent une mesure assez peu fiable de précipitations mais elles présentent l'avantage d'être mesurées par des satellites géostationnaires, qui peuvent fournir des mesures toutes les 30 minutes.
- Ensuite, il y a imageurs micro-ondes (MW), embarqués sur des satellites en orbite basse, qui ne peuvent donc pas fournir de données aussi fréquentes que les IR (seulement une mesure par jour) mais dont l'estimation est beaucoup plus fiable. Le principe de mesures est que les capteurs de micro-ondes passives détectent l'énergie des micro-ondes émises naturellement par la Terre à travers les nuages et dont une partie est atténuée par les précipitations (Brochart *et al.*, 2014). C'est de cette partie absorbée qu'est déduite la quantité de pluies dans le nuage.

En combinant ces deux types de mesures par différentes techniques, le but est de profiter de la qualité des estimations des MW avec la fréquence temporelle des IR.

Il existe plusieurs produits de pluies satellitaires, dont les trois plus connus sont PERSIANN², CMORPH³ et TRMM⁴. Dans cette étude, c'est ce dernier que nous avons utilisé. A l'initiative d'un partenariat entre la NASA⁵ et la JAXA⁶, c'est à la fois un réseau de satellites et une série de produits satellitaires qui utilisent ces satellites. En particulier, c'est le produit TRMM 3B42RT que nous utilisons dans cette étude. Dans leur article, Ringard *et al.* (2015) affirment

1. Température de brillance : Température du corps noir émettant la même puissance lumineuse que la source considérée

2. PERSIANN : Precipitation Estimation from Remotely-Sensed Information using Artificial Neural Network

3. CMORPH : Climate Prediction Center (CPC) MORPHing technique

4. TRMM : Tropical Rainfall of Measuring Mission

5. NASA : agence spatiale américaine

6. JAXA : agence spatiale japonaise

que c'est le produit le plus performant pour une étude hydrologique, surtout pour des régions marquées par d'intenses pluies convectives.

Sa résolution spatiale est de 0.25° par 0.25° , soit dans la région de la Guyane française des pixels assimilables à des carrés de 28 km de côté (une surface de pixel $\simeq 800 \text{ km}^2$); à l'échelle de la Guyane, c'est une résolution assez grossière, avec environ 110 pixels pour décrire tout le territoire. Cette faible résolution constitue une des limites des produits satellitaires dans notre étude car à l'échelle de certains bassins de notre échantillon, cela représente une bonne proportion de leur surface. Dans le cas du bassin de la Comté à Saut Bief (91040020) avec une surface $\simeq 1500 \text{ km}^2$, c'est 50% de sa superficie.

La résolution temporelle du produit TRMM est de 3h (Brochart et Andreassian, 2013). Il utilise les données MW lorsqu'elles sont disponibles, et les données IR sinon. Il calibre les IR sur les données obtenues avec MW pour augmenter au maximum la qualité des estimations de pluies, à une résolution temporelle en temps quasi-réel ("Real Time (RT)" caractérisant le produit). Le principe du produit TRMM 3B42RT est qu'il utilise 3B42, algorithme qui produit en deux étapes que nous ne détaillerons pas des estimations de pluies satellitaires ajustées par un mélange entre les estimations par IR.

Correction proposée par Météo France

Dans le cadre d'un projet mené par Météo France, Beaufort *et al.* (2016) ont testé plusieurs méthodes de correction sur plusieurs produits de pluies satellitaires différents, réparties selon trois principes phares :

- Corrections multiplicatives : ils ont multiplié par des coefficients le produit TRMM brut selon différentes techniques, comme la multiplication par amplitude locale, la méthode de correction par transformation puissance, ou par valeur relative.
- Corrections additives : Elles consistent à ajouter ou soustraire un terme à la pluie brute, déterminé par des techniques comme l'interpolation par IDW⁷ ou interpolation par krigeage des résidus.
- Méthode d'ajustement de fonction de répartition : mise en place par Piani *et al.* (2010), elle consiste à ajuster la distribution des estimations de pluies satellitaires à la pluie réelle observée. Ensuite, il suffit d'analyser la concordance entre la fonction de répartition des pluies observées avec la fonction de répartition des estimations de pluies satellitaires.

Beaufort *et al.* (2016) ont testé ces corrections sur trois différents types de produits satellites, le TRMM, l'HydroEstimator qui est un algorithme utilisant le satellite GOES⁸ et le GPM⁹ qui est un réseau international de satellites fournissant les dernières estimations de pluies depuis Mars 2015. Pour évaluer les méthodes de corrections, ils se sont focalisés sur les critères de biais absolus et des RMSE calculés à partir des cumuls de pluies sur 1 jour et 14 jours.

Pour TRMM, ils se sont aperçus que les meilleures performances étaient obtenues suite à une correction par IDW sur un cumul de 14 jours et à une correction par transformation puissance pour les cumuls quotidiens.

Au final, la méthode de correction qui a été retenue est la correction additive par IDW, qui permet d'améliorer nettement les estimations de pluies par satellites.

Pour rappel, c'est une méthode de correction additive qui consiste à calculer les biais $K_p = (P_{sat} - P_{obs})$ sur l'ensemble de la période en utilisant des données de pluies

7. Inverse Distance Weight, pondéré selon l'inverse de la distance

8. Geostationary Operational Environmental Satellites

9. Global Precipitation Measurement

observées sur 10 stations pluviométriques automatiques de Météo France au pas de temps journalier et 59 stations situées au Suriname. Pour chaque poste est donc calculé un K_p , qui permet ensuite de définir un terme correctif R_i par l'équation

$$R_i = \frac{\sum(\frac{1}{d_i^2} \times K_p)}{\sum_i(\frac{1}{d_i^2})}$$

avec :

- d_i la distance entre le pixel i et la station pluviométrique où K_p est calculé.
- R_i le terme de correction des précipitations pour le pixel i .

Cette étape est répétée pour tous les pixels qui composent la Guyane. C'est une correction datée : une nouvelle grille est créée chaque jour en fonction des mesures fournies par les postes pluviométriques. L'avantage qu'elle présente (en théorie) est que les estimations de pluies satellitaires sont interpolées selon des points de référence au sol, et plus il y a de points de référence, plus la correction est efficace. Le défaut est qu'elle est dépendante de chroniques de pluies observées et du bon fonctionnement d'un grand nombre de stations pluviométriques.

De plus, nous avons vu que la répartition des stations pluviométriques en Guyane n'est pas homogène, elles sont principalement concentrées le long de la côte. On s'attend donc à ce que la correction soit plus efficace sur la côte que dans les terres. La figure 3 ci-dessous présente la carte des pixels sur la zone d'étude, allant de -51 à -51 degrés décimaux en longitude et de 1 à 6 degrés décimaux en latitude ; en tout, 480 pixels sur la zone.

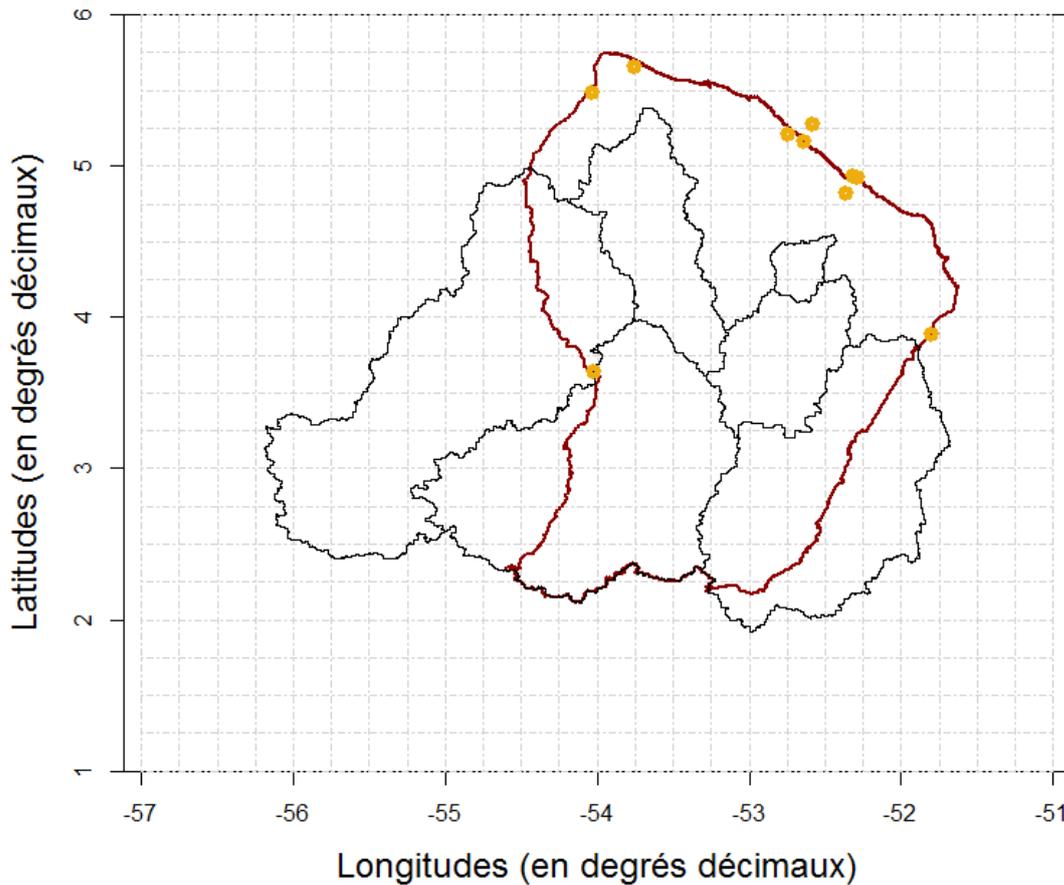


FIGURE 3 – Carte des pixels sur la zone d'étude et des 10 postes pluviométriques de Météo France disponibles en temps réel

Pour la suite de l'étude, nous appellerons cette méthode **CAD (Correction Additive Datée)**. Regardons maintenant la correction proposée par Irstea mise au point par Brochart *et al.* (2014).

Correction proposée par Irstea

Pour conserver la résolution des mesures tout en exploitant une base de données fiable, Brochart *et al.* (2014) ont développé une méthode de correction des pluies satellitaires basée sur des échelles d'intensité. C'est une méthode qui propose de dire que les pluies satellitaires sont majoritairement altérées par un signal de distorsion, dont la valeur dépend de leur intensité. La correction appliquée à chaque partie de la zone d'étude n'est pas la même, et plutôt que de se focaliser sur une méthode difficile pour résoudre intégralement le problème, cette solution permet de donner une estimation de pluie la plus proche possible de la réalité. Pour la suite de l'étude, nous l'appellerons la correction **IS (Intensity Scaling)**.

Dans leur étude, Brochart *et al.* (2014) ont montré qu'il y avait une dépendance spatiale de la correction apportée aux estimations de pluies. En effet, comme nous avons vu avec la carte des précipitations réelles sur la courbe de gauche de la figure 1, la Guyane peut être divisée en trois parties selon la hauteur de pluie :

- La côte, allant de l'extrémité Ouest du littoral jusqu'à la région de Regina, caractérisée par un climat humide sous l'effet des masses d'air océaniques, et d'une précipitation moyenne de 3000 mm/an.
- L'intérieur des terres, avec essentiellement des marais, qui reçoit moins d'eau que la côte et dont la précipitation moyenne est de 2500 mm/an.
- La région de Regina, près de la côte, qui reçoit la plus grosse quantité d'eau et dont la précipitation moyenne est la plus élevée en Guyane, avec près de 5600 mm en 2000.

Cette spatialisation de la pluie se retrouve dans l'estimation des pluies satellitaires, ce qui implique qu'il y ait des biais différents selon ces trois régions.

La même équipe a aussi montré qu'il y avait une dépendance temporelle de la correction apportée aux pluies satellitaires. En effet, ils ont constaté que suivant le mois de l'année étudié, l'erreur sur la pluie satellitaire n'est pas la même. Pour corriger les pluies satellitaires sur la Guyane française, ils ont donc appliqué une correction propre à la région d'intérêt et au mois qui caractérise la donnée, soit 36 corrections différentes. C'est une correction non datée car une fois que les grilles sont définies, elles sont utilisées pour tous les jours de la chronique.

Les corrections sont substitutives, c'est à dire qu'en fonction de ces grilles de correction, chaque valeur de pluie satellitaire va être remplacée par la valeur correspondante sur la moyenne glissante entre pluie satellitaire et pluie observée, sur la grille de correction concernée. La figure 4 illustre un exemple de moyenne glissante ("Rolling Mean", courbe en rouge) entre pluie satellitaire (P_{Noise}) et pluie observée aux postes (P_{Truth}).

Cependant, on remarque que la substitution via la moyenne glissante a un cas particulier : la pluie nulle. Dans ce cas, la méthode remplace la valeur zéro par la moyenne des pluies observées historiquement surtout les jours où le satellite indiquait une pluie nulle. C'est limite majeure de la correction proposée par Irstea, la pluie nulle n'est pas représentée, on suppose qu'il pleut au moins un peu tous les jours sur chaque pixel.

Cette correction présente l'avantage d'être moins dépendante de stations pluviométriques que la méthode CAD, elle considère les dépendances spatiale et temporelle de la correction à la pluie réelle, et définit ses tableaux en conséquence. Elle est donc en théorie plus adaptée pour des zones où la densité de stations pluviométriques est faible.

Au regard de ces deux méthodes de correction, on s'attend à ce que la méthode CAD soit plus efficace que la correction IS lorsque nous sommes proches de la côte, mais que pour des zones situés plus dans les terres, ce soit la correction IS qui donne de meilleurs résultats que la

méthode CAD.

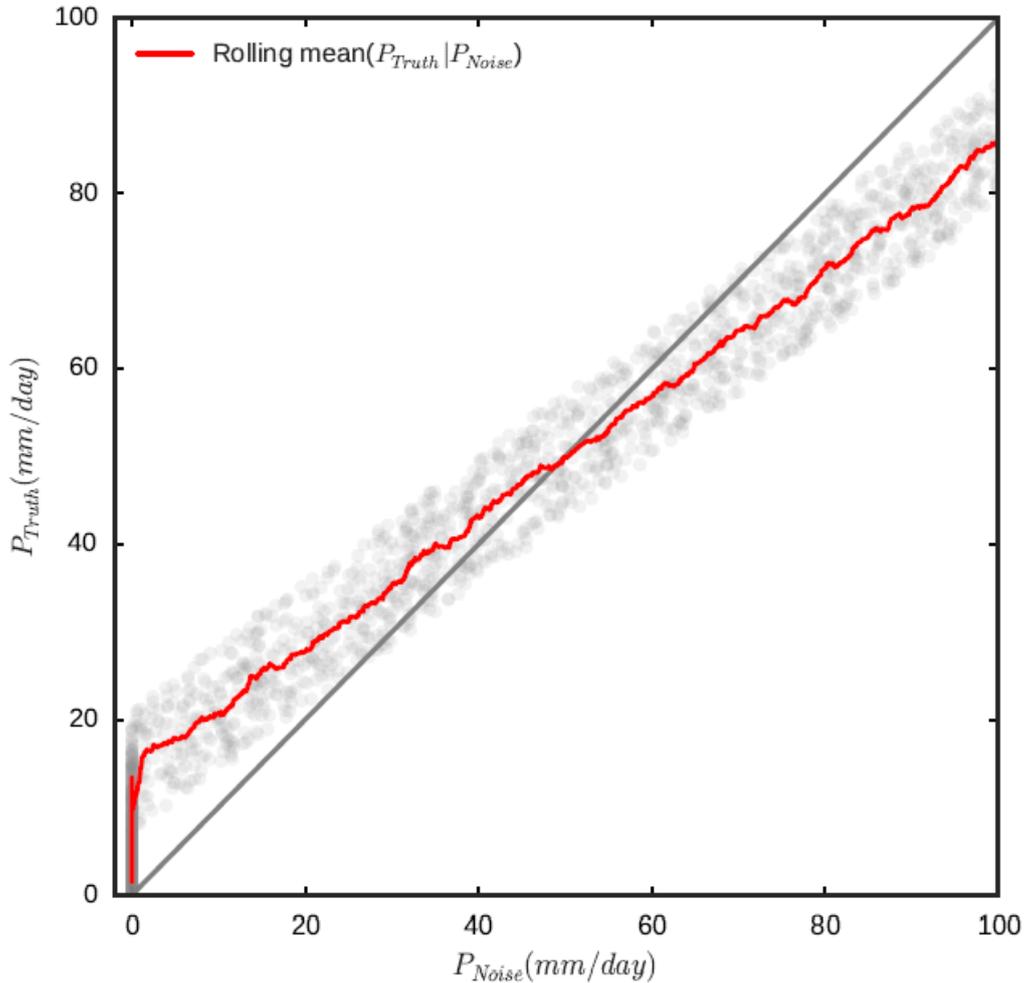


FIGURE 4 – Graphique présentant l'évolution de la pluie observée en fonction de la pluie satellitaire

2.1.2 Données hydrométriques

Le principe de notre étude est de réaliser une validation indirecte de ces produits satellitaires, car il y a trop peu de données en pluie observées pour les évaluer. Pour ce faire, nous utilisons un modèle hydrologique, qui a besoin de données de débits observées en entrée pour se caler. Nous avons utilisé les mesures de débits réalisées sur chacun des exutoires des bassins versants cités dans le tableau 1. Nous avons converti ces débits en lame d'eau (mm/jour) pour obtenir des données que nous pouvons comparer entre elles.

Les bassins versants ont des débits à l'exutoire assez différents, qui dépendent principalement de leur situation géographique. En effet, le débit moyen sur le bassin de Langa Tabiki (50410030) situé à l'Ouest de la Guyane à la frontière avec le Suriname est entre 5 et 10 mm/jour, alors que celui du bassin de Saut Bief (91040020) dans la région de Regina peut dépasser les 30 mm/jour suivant la période de l'année. Cette répartition est fortement corrélée à la spatialisation de la pluie visible sur la figure 1. Les hydrogrammes de chacun de ces bassins sont présentés en figure 5, avec en rouge les lacunes de débits pour chaque bassin. Dans certains cas, les lacunes sont importantes, comme avec Saut Sabbat, pour lequel presque 8 ans de données sont manquantes. La qualité des données en entrée influe sur le calage du modèle et constitue donc une des limites de l'étude.

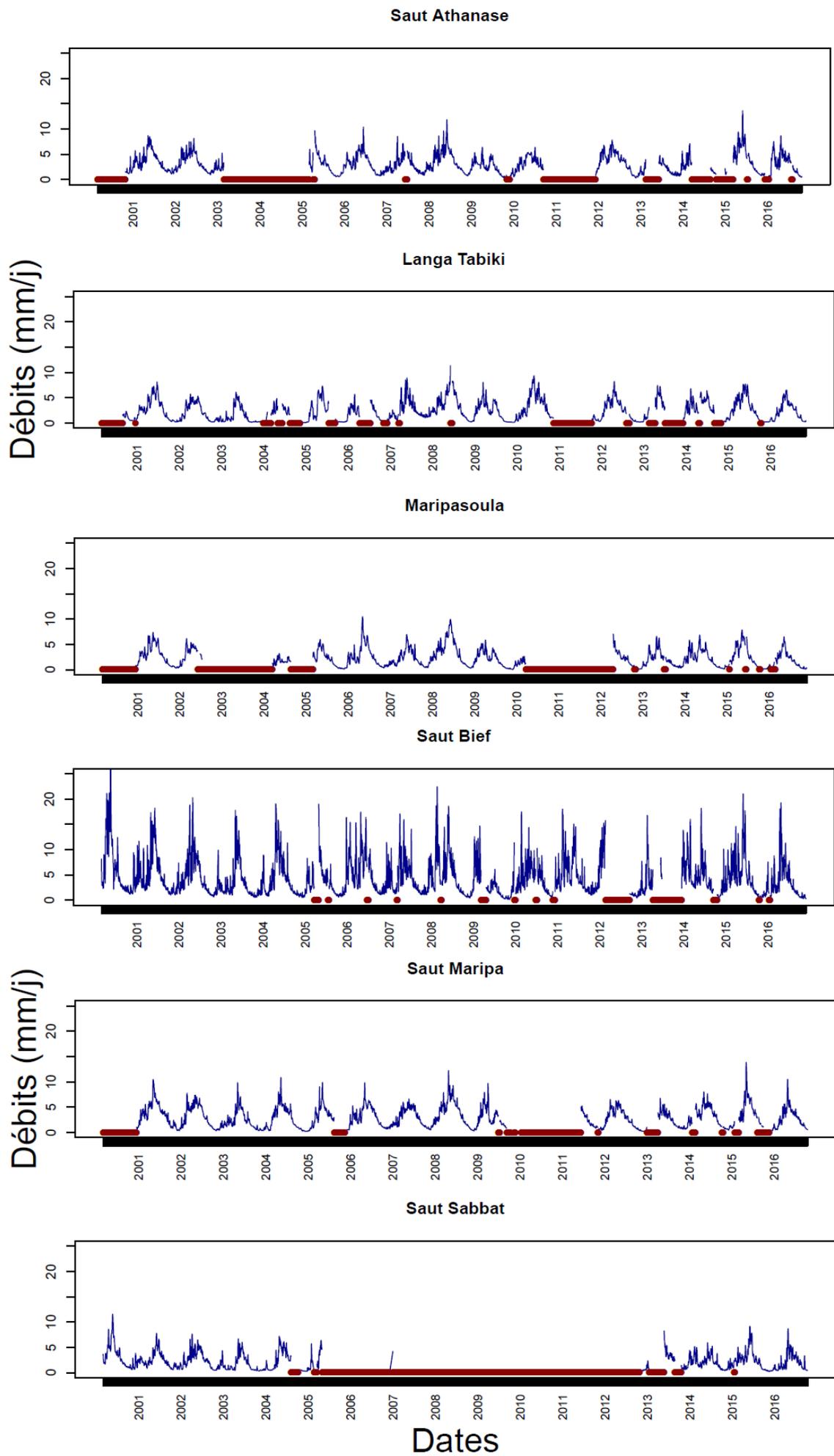


FIGURE 5 – Chroniques des débits observés pour les 6 bassins versants

2.1.3 Données d'évapotranspiration

Pour l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), nous avons utilisé des données identiques sur toute la période d'étude, suivant le mois de l'année, afin de considérer un effet de saisonnalité, mais en supposant qu'il n'y ait pas de changements climatiques sur cette période. C'est une hypothèse en raison du manque de données de températures en Guyane française, il n'était pas possible d'estimer l'ETP par les méthodes de Penman ou de Oudin. Les données sont regroupées dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 – Synthèse des données d'EvapoTranspiration

Mois	ETP (mm/jour)
Janvier	3.3
Février	3.9
Mars	4.1
Avril	4.2
Mai	3.5
Juin	3.5
Juillet	3.9
Août	4.7
Septembre	5.3
Octobre	5.2
Novembre	5.2
Décembre	4.8

L'ETP ne varie que très peu sur l'année selon nos données. Cependant, de par la position géographique de la Guyane, cette hypothèse n'est pas infondée, son exposition au soleil reste à peu près constante tout au long de l'année et les saisons n'y sont marquées que sur des régions plus au Nord, avec un climat continental comme en métropole.

2.1.4 Analyse climatique de la Guyane

Sur le graphe de la figure 6 ci-dessous, nous avons représenté l'évolution des estimations de pluies satellitaires TRMM brute, au pas de temps mensuel sur une année complète, ainsi que l'évolution de l'ETP grâce aux valeurs extraites du tableau 2.

Selon notre hypothèse, l'ETP varie peu au cours de l'année, entre 3 et 5 mm/jour. La saisonnalité est peu marquée, avec un creux qui coïncide avec les fortes pluies et un dôme au moment où les précipitations sont faibles. Dans le cas de la précipitation, celle-ci est fortement marquée par la saisonnalité. En effet, il y a deux saisons des pluies, une de Novembre à Février avec des amplitudes moyennes entre 5 et 13 mm/jour, et une autre plus forte entre mars et Juin avec des amplitudes entre 10 et 14 mm/jour. Puis entre Août et Novembre, c'est la saison sèche, les précipitations moyennes sont autour de 3 mm/jour. Les courbes de précipitations se ressemblent, pour la plupart elles sont dans la même gamme de grandeur, bien qu'on discerne une graduation entre elles. Cependant, la courbe du bassin de la Comté à Saut Bief (91040020) a un pic plus élevé lors de la saison des pluies en Mai, atteignant les 14 mm/jour. C'est un résultat attendu car c'est le bassin le plus proche de la région de Regina, marquée par les plus fortes pluies en Guyane (cf figure 1) et cela coïncide avec l'hydrogramme du bassin sur la figure

5 qui présente des amplitudes de débits plus élevées que celles des autres bassins. Ce graphique nous permet de dire que les estimations de pluies satellitaires brutes semblent fiables au regard des moyennes mensuelles, elles sont cohérentes avec ce à quoi on peut s'attendre au vu du climat, surtout pour la spatialisation des pluies en Guyane. Le produit TRMM brute semble capable de présenter la variabilité annuelle moyenne des pluies.

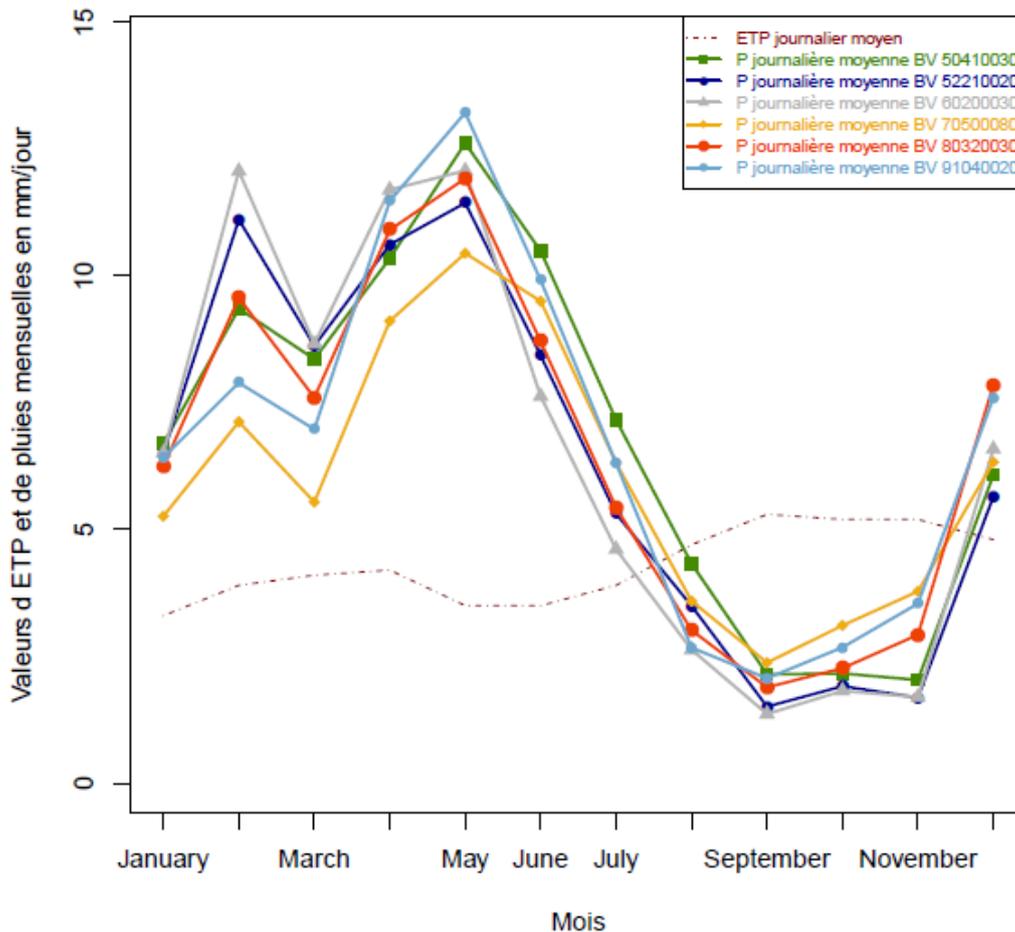


FIGURE 6 – Evolution du produit TRMM brute pour les six bassins versants et de l’ETP au pas de temps mensuel sur une année type.

Nous pouvons aussi regarder les cumuls annuels des trois produits pluviométriques étudiés, illustrés sur la figure 7 avec l'exemple du bassin du Maroni à Langa Tabiki (les cumuls pour les autres bassins sont visibles en Annexe 1).

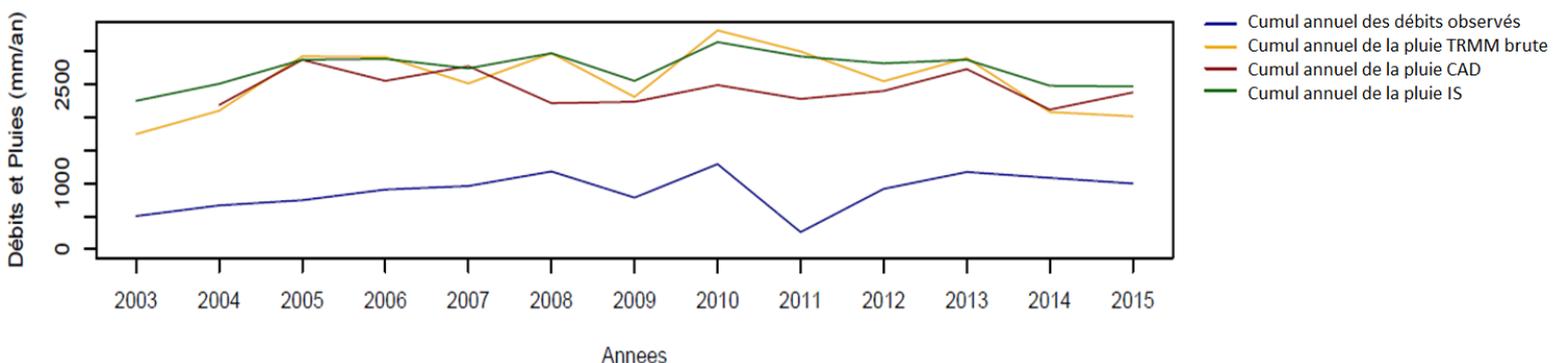


FIGURE 7 – Evolution des cumuls annuels des trois produits pluviométriques et du débit observé pour le bassin du Maroni à Langa Tabiki.

Sur la figure 7, les cumuls des trois produits pluviométriques se ressemblent, ils varient dans une même gamme allant de 1500 à 3000 mm/an, mais on remarque que la pluie TRMM brute est celle qui est marquée par le plus de variations, alors que la pluie IS est la plus stable d'une année à l'autre. Nous verrons par la suite que cela a un impact sur la qualité des simulations en sortie du modèle hydrologique.

2.2 Description du modèle GR4J

2.2.1 Fonctionnement du modèle

Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journaliers) comme outil pour valider les pluies satellitaires en simulant des débits avec ce modèle, et en comparant la qualité des simulations en sortie via les hydrogrammes, ou les graphiques $Q_{sim} = f(Q_{obs})$.

Le modèle GR4J est un modèle hydrologique pluie-débit empirique, c'est-à-dire qu'il a besoin de données observées pour définir des paramètres et les caler. Ici ce sont les données de débits observées aux exutoires des six bassins versants d'intérêt. Une fois son jeu de paramètres obtenu, au nombre de quatre pour le pas de temps journalier, il prend en entrée des données de précipitations et d'ETP et simule un débit en fonction de ces mesures climatiques. La figure 8 ci-dessous présente le fonctionnement du modèle GR4J :

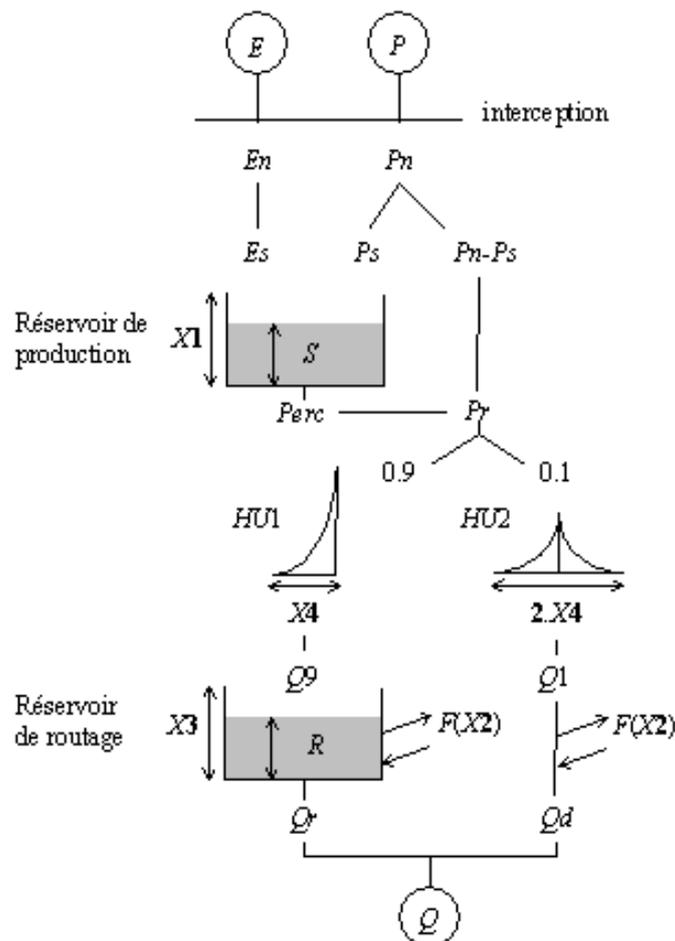


FIGURE 8 – Modèle GR4J

Les quatre paramètres du modèle sont :

- **X1** : Capacité du réservoir de production, appelé aussi réservoir de sol (mm), l'équivalent de la RFU (Réserve Facilement Utilisable), qui traduit la capacité de rétention du système.
- **X2** : Coefficient d'échange souterrain qui traduit le flux de transfert entre l'intérieur et l'extérieur d'un bassin.
- **X3** : Capacité du réservoir de routage qui traduit le transfert dynamique du débit dans le système.
- **X4** : Temps de base de l'hydrogramme unitaire. Si X4 augmente, il y a translation des vecteurs de débit dans le temps, et lissage des pics de valeur, ce qui traduit un allongement du temps de réponse du bassin versant.

GR4J fonctionne de la manière suivante : On désigne par P (mm) la hauteur de la pluie et par E (mm) l'évapotranspiration potentielle (ETP). P est une estimation de la pluie de bassin et E peut être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle.

La première opération est la neutralisation de P par E pour déterminer une pluie nette Pn et une évapotranspiration nette En, calculées par :

- Si $P > E$, alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- Si $P < E$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P$

Deux cas se distinguent alors :

- Si $P_n > 0$: Une partie Ps est prélevée
- Si $P_n < 0$: Une partie Es est prélevée

Dans ces calculs interviennent X1 (mm) et S qui sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production. S est mis à jour par $S = S - E_s + P_s$.

Une percolation Perc issue du réservoir de production est alors calculée et le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par : $S = S - Perc$.

La quantité d'eau Pr est celle qui atteint finalement la partie routage du modèle. Elle est divisée en deux composantes d'écoulement, 90% étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10% par un unique hydrogramme unitaire HU2.

HU1 et HU2 dépendent du même paramètre X4, temps de base de HU1 exprimé en jours.

Un échange souterrain en eau (perte ou gain) est aussi calculé via différentes variables, comme R qui est le niveau dans le réservoir de routage, X3 la capacité à un jour du réservoir et X2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est ensuite mis à jour en ajoutant la sortie Q9 de l'hydrogramme HU1 et F. Il se vidange ensuite en une sortie Qr, qui remet à jour le niveau du réservoir, et qui constitue une partie du débit que simule le modèle. Le reste est donné par la sortie Q1 de l'hydrogramme. HU2 est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd. Enfin, la somme de Qr et Qd donne le débit total simulé par le modèle.

Pour plus de détails, il est possible de se référer à l'article de Perrin *et al.* (2003) ou au package AirGR sur le langage R que nous avons utilisé dans cette étude pour le modèle GR4J (Coron *et al.*, 2017).

Plusieurs tactiques sont possibles pour définir les paramètres du modèle, et nous allons maintenant présenter la méthode choisie dans cette étude pour fixer ces paramètres.

2.2.2 Optimisation des paramètres

Dans son fonctionnement, le modèle GR4J nécessite le calage des quatre paramètres décrits précédemment en se basant sur des débits observés par un algorithme "pas à pas". Ces paramètres sont initialement pré-filtrés par une méthode locale directe qui cherche à maximiser (ou minimiser) une fonction objectif. La méthode de pré-filtrage des paramètres permet de fournir à la méthode de calage pas-à-pas un point de départ situé dans la région probable de convergence. Elle consiste en une inspection systématique mais grossière de l'espace des paramètres, en se basant sur des quantiles des distributions a priori des paramètres (Lobligeois, 2014).

Une fois calé, il faut évaluer l'erreur du modèle lors de l'optimisation de ses paramètres. En effet, la méthode "pas à pas" fonctionne de la manière suivante : nous prenons le chemin qui maximise l'adéquation entre le débit observé et le débit simulé en fonction d'un critère de performance choisi. Dans notre étude, nous avons choisi le NSE (Nash–Sutcliffe model Efficiency coefficient) comme critère de performance ; c'est la fonction objectif de notre modèle. C'est ce critère qui permet au modèle de trouver la meilleure combinaison de paramètres lors du calage et confère au modèle ses performances. La formule du NSE est décrite ci-dessous :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_i (Q_{obs_i} - Q_{moy_{obs}})^2}$$

avec :

- NSE : le critère de NASH.
- Q_{obs_i} : Débit observé au pas de temps i .
- Q_{sim_i} : Débit simulé au pas de temps i .
- $Q_{moy_{obs}}$: moyenne des débits observés.

C'est le rapport entre la covariance de la simulation et de l'observation sur la variance de l'observation, que nous comparons à 1. Plus le critère est proche de 1, plus la simulation proposée par le modèle est fiable.

Il existe plusieurs transformations possibles à appliquer sur la fonction objectif pour forcer le modèle à se focaliser sur un type précis de débit, dont les quatre principaux sont décrites ci-dessous :

- Q : on n'applique aucune transformation au débit, ce qui privilégie les débits de crue.
- \sqrt{Q} : on privilégie les débits intermédiaires.
- $\log(Q)$: On privilégie les faibles débits.
- $\frac{1}{Q}$: On privilégie les très faibles débits, les débits d'étiage.

Pour déterminer quel était la meilleure transformation possible pour notre cas d'étude, comme il n'est pas possible de comparer les simulations entre elles, nous avons lancé une première fois le modèle pour réaliser un split sample test pour tester la robustesse des paramètres. Le principe est que nous divisons l'ensemble de la chronique disponible en deux sous-périodes P1 et P2. Puis nous calons le modèle respectivement sur P1 et P2 et nous regardons si les paramètres obtenus sont les mêmes sur les deux simulations (cf partie 3.3). Si oui, alors le paramètre est robuste pour notre étude. Nous avons fait ce test sur les quatre paramètres, pour chaque transformation, et

la transformation qui donne les paramètres les plus robustes est \sqrt{Q} ; c'est donc celle que nous avons utilisé pour le reste de l'étude.

2.2.3 Stratégies de calage

Pour caler les paramètres, il faut laisser un certain temps au modèle pour qu'il trouve les meilleurs paramètres possibles et donne la qualité de simulation la plus satisfaisante ; c'est la période de calage. Dans notre étude, nous avons majoritairement calé sur toute la période définie par l'ensemble des chroniques de débits disponibles sur chaque bassin, et par les pluies satellitaires. Le tableau 3 regroupe les périodes choisies pour chaque bassin en fonction de ces deux contraintes :

Tableau 3 – Dates des périodes de calage par bassin versant

Codes stations	Deb WarmUp	Fin WarmUp	Deb Calage	Fin Calage
50410030	01/03/2000	28/02/2002	01/03/2002	31/10/2016
52210020	01/03/2000	28/02/2002	01/03/2002	22/11/2016
60200030	01/03/2000	28/02/2002	01/03/2002	16/10/2016
70500080	01/03/2000	28/02/2002	01/03/2002	11/10/2016
80320030	01/03/2000	28/02/2002	01/03/2002	24/10/2016
91040020	01/03/2000	28/02/2002	01/03/2002	27/11/2016

La période de chauffe (Warm-Up) est la période durant laquelle le débit simulé n'est pas conservé, les états internes du modèle n'ont pas eu le temps de se stabiliser et on estime que les simulations ont une qualité insuffisante pour être gardé. D'ordinaire, la période de chauffe est d'environ un an pour des modèles lancés en métropole française. Mais au cours de l'étude, nous nous sommes aperçus que le calage du modèle dépend du territoire sur lequel le modèle est lancé et qu'il faut en tenir compte dans le choix de la période de chauffe. Le choix de un an était inadapté pour la Guyane française. Une alternative était d'augmenter la période de chauffe, que nous avons augmenté de un à deux ans pour tous les bassins, mais l'augmenter d'avantage diminuerait la longueur des périodes de calage.

Pour pallier à ce problème, nous avons regardé le comportement des paramètres lors de cette période de chauffe, et nous avons remarqué que le réservoir de production était sensible à l'initialisation donnée en début de simulation. Par défaut, le modèle initialise le niveau à 30%, une valeur définie par plusieurs observations faites en métropole française. En regardant l'évolution du niveau du réservoir sur l'ensemble de la chronique, nous avons remarqué que cela ne convenait pas pour la modélisation en Guyane française. La figure 9 illustre cette évolution avec l'exemple du bassin du Maroni à Langa Tabiki.

Quatre cas de figures ont été testés. Si on initialise le niveau à 30% (courbe bleue), celui-ci met 2 ans à reprendre le comportement illustré sur le reste de la chronique. Les observations sont les même si le niveau est initialisé à 0% (courbe noire) ou à 100% (courbe rouge). Pour ne pas donner de valeurs arbitraires au modèle, la solution trouvée est de lancer le modèle une première fois sur le bassin avec un réservoir de production initialisé arbitrairement à 30% ; puis nous calculons la moyenne des trois derniers niveaux dans le réservoir sur les jours identiques à celui du début de la chronique (courbe verte). Par exemple, pour la bassin du Maroni à Langa Tabiki, la période de chauffe commence le 01 Mars 2000. Pour initialiser le réservoir de production, nous avons moyenné les niveaux obtenus lors d'une première simulations les 01 Mars 2014, 2015 et 2016. Par cette méthode, on constate que le niveau est plus homogène. De plus, comme X1 est mieux paramétré, cela influe sur le calage des trois autres paramètres.

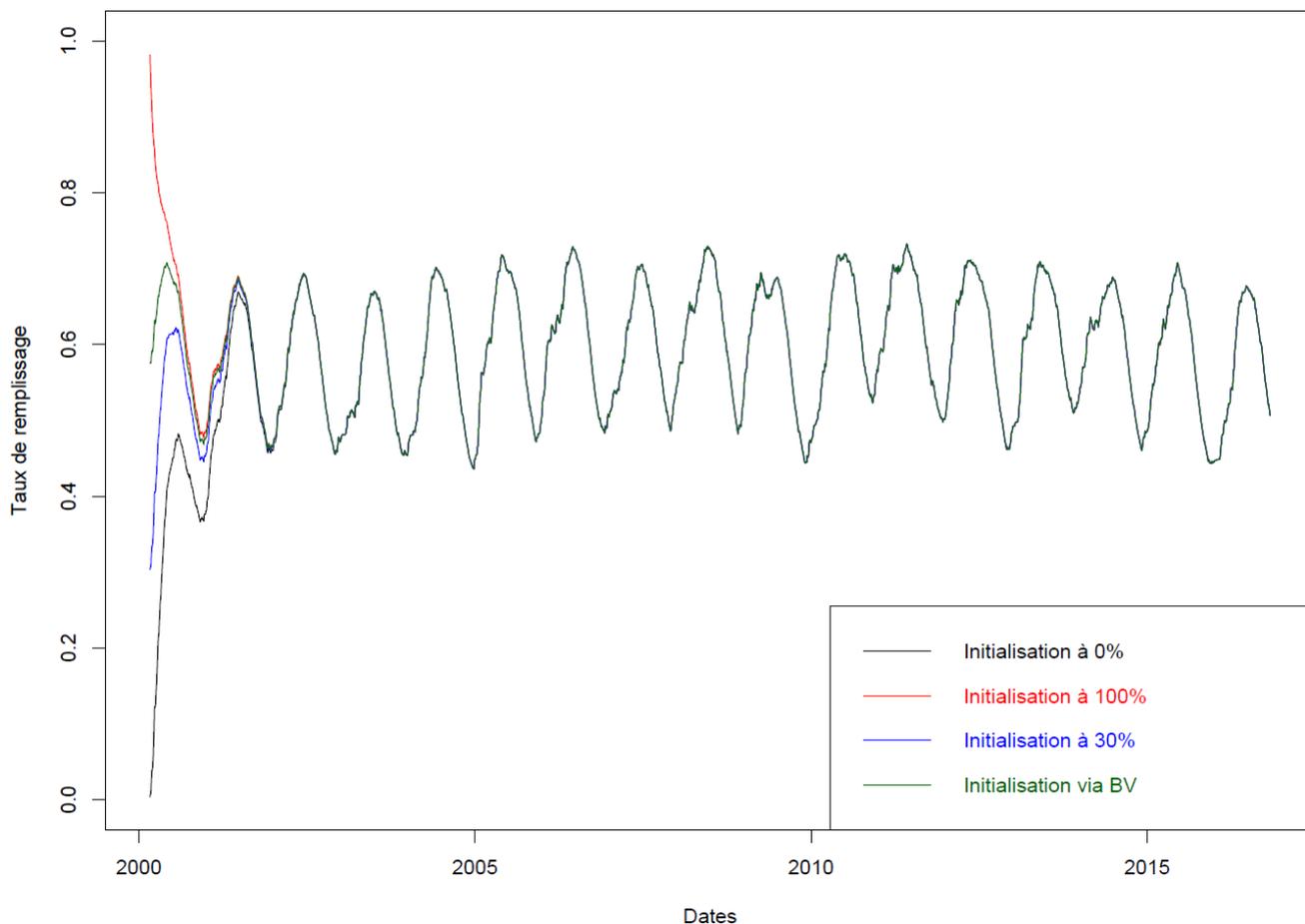


FIGURE 9 – Etude de sensibilité du taux de remplissage du réservoir de production à l'état initial

3 Comparaison des trois produits de pluie satellitaire

3.1 Hydrogrammes et comparaisons des débits simulés sur toute la chronique

Pour valider nos produits, nous avons commencé par regarder les hydrogrammes des débits simulés en fonction des hydrogrammes des débits observés pour chaque bassin, et nous avons tracé les graphiques de la fonction $Q_{sim} = f(Q_{obs})$. Les figures 10 à 15 illustrent les hydrogrammes obtenus pour les six bassins versants de l'étude.

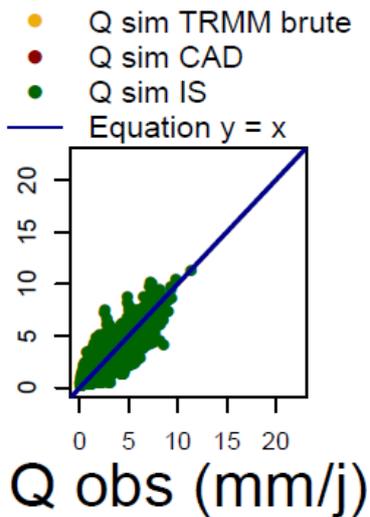
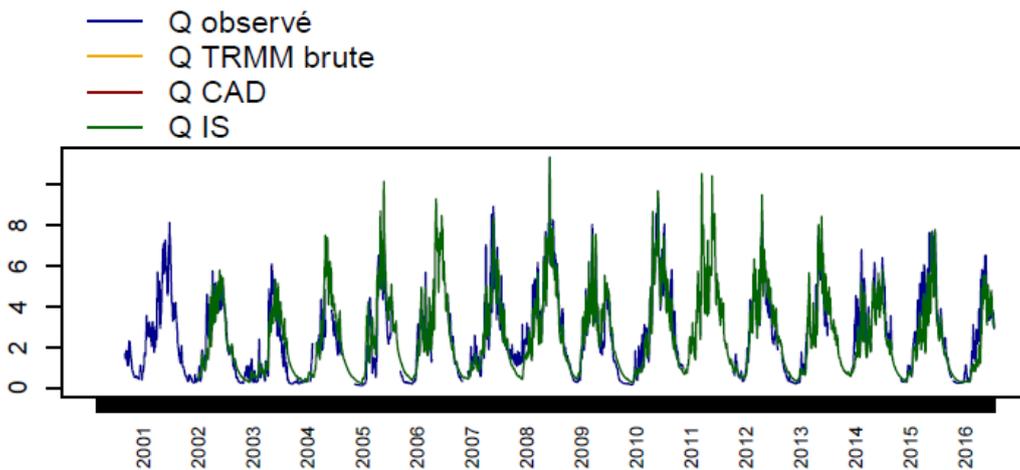
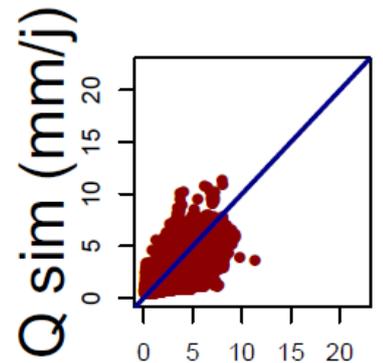
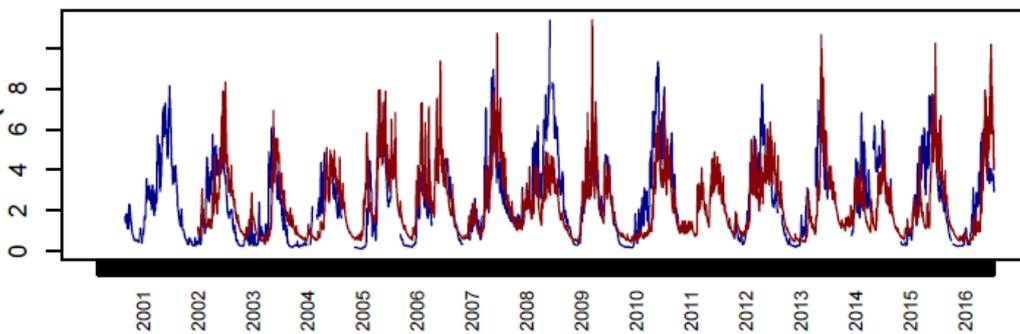
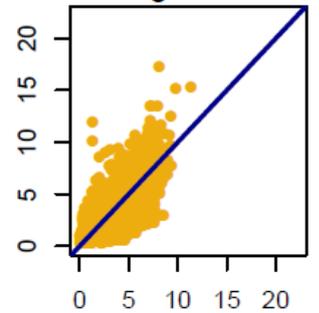
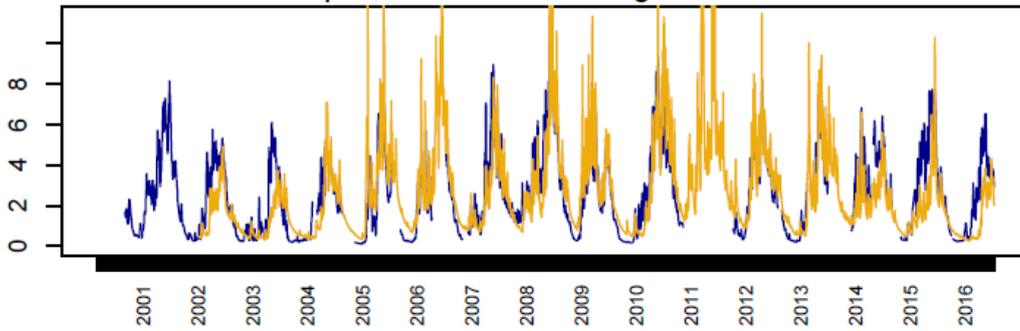
Dans le cas du bassin du Maroni à Langa Tabiki (cf figure 10), pour la pluie TRMM brute (en jaune), l'hydrogramme des débits simulés suit la tendance de celui des débits observés mais les pics de crue sont plus hauts et sont peu décalés dans le temps par rapport à la réalité (en bleu). De plus, En regardant le graphique de la fonction $Q_{sim} = f(Q_{obs})$, le nuage de point formé semble suivre la droite 1 :1 ($y = x$), mais il reste encore assez épais. La pluie TRMM brute ne paraît pas optimale pour simuler un débit dans le cas du bassin du Maroni à Langa Tabiki.

L'hydrogramme obtenu avec la pluie CAD n'est pas bien corrélé à celui des débits observés, même si l'intensité des pics de crue est en partie améliorée par rapport à la pluie TRMM brute. De plus, le graphique de la fonction $Q_{sim} = f(Q_{obs})$ donne un nuage de points moins corrélé à la droite 1 :1 que celui de la pluie TRMM brute. Pour le bassin du Maroni à Langa Tabiki, la méthode CAD semble dégrader la simulation par rapport à la pluie TRMM brute. Pour la

correction IS, l'hydrogramme des débits simulés est mieux corrélé à la réalité que dans les deux autres cas, et le nuage de points de la fonction $Q_{sim} = f(Q_{obs})$ est celui qui suit le plus la droite 1 :1. Avec ce bassin, en se basant sur les critères graphiques, le produit le plus efficace semble être obtenu avec la correction IS.

Chroniques des débits sim avec la pluie observée et la pluie satellite pour le bassin à Langa Tabiki

Q obs vs Q sim avec Psat pour le BV à Langa Tabiki



- Q observé
- Q TRMM brute
- Q CAD
- Q IS

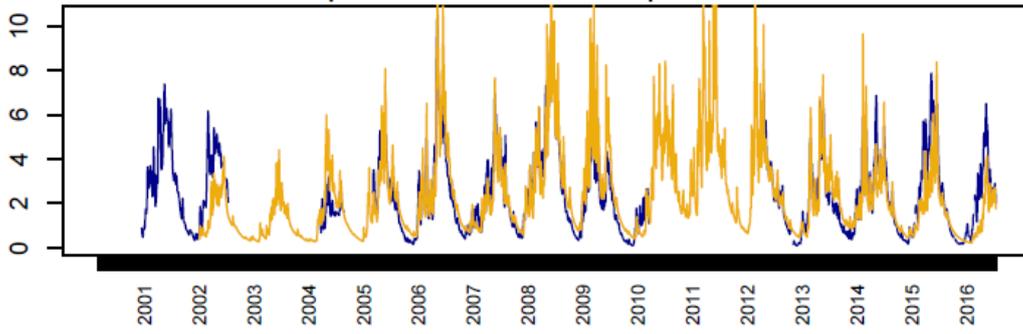
- Q sim TRMM brute
- Q sim CAD
- Q sim IS
- Equation $y = x$

Dates

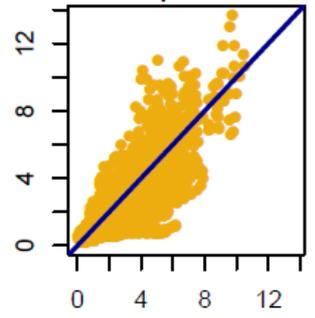
Q obs (mm/j)

FIGURE 10 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin du Maroni à Langa Tabiki

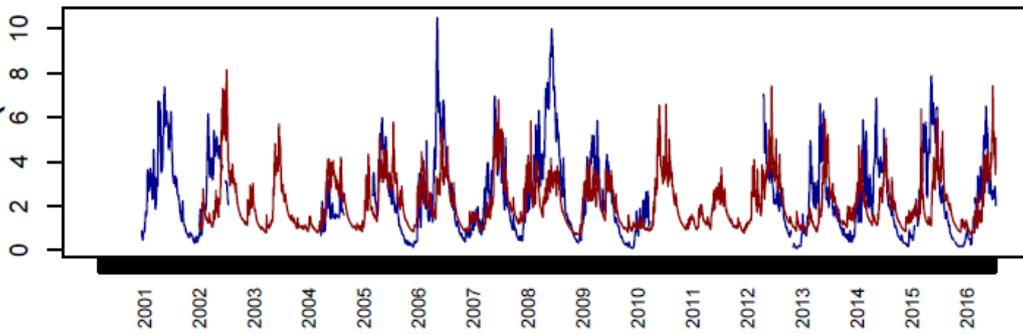
Chroniques des débits sim avec la pluie observée et la pluie satellite pour le bassin à Maripasoula



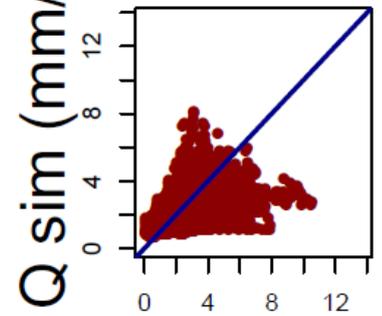
Q obs vs Q sim avec Psat pour le BV à Maripasoula



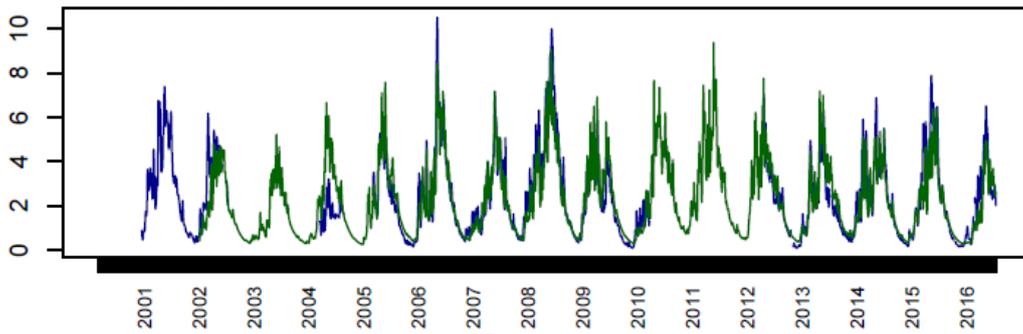
Débits (mm/j)



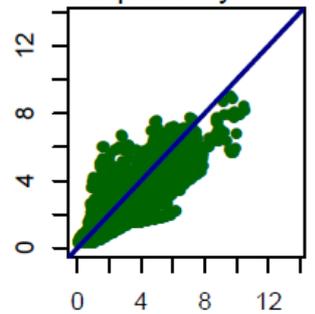
Q sim (mm/j)



- Q observé
- Q TRMM brute
- Q CAD
- Q IS



- Q sim TRMM brute
- Q sim CAD
- Q sim IS
- Equation $y = x$

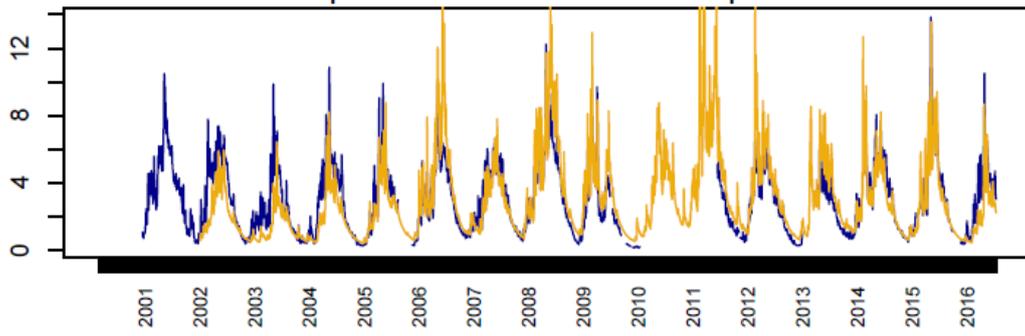


Q obs (mm/j)

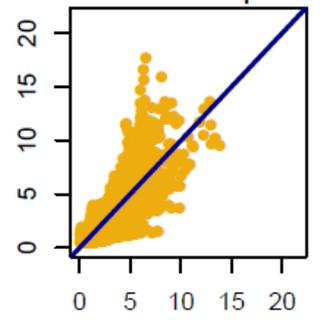
Dates

FIGURE 11 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin du Maroni à Maripasoula

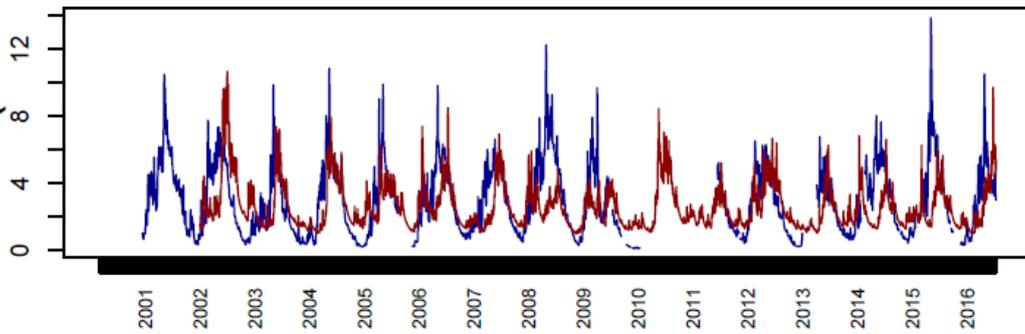
Chroniques des débits sim avec la pluie observée et la pluie satellite pour le bassin à Saut Maripa



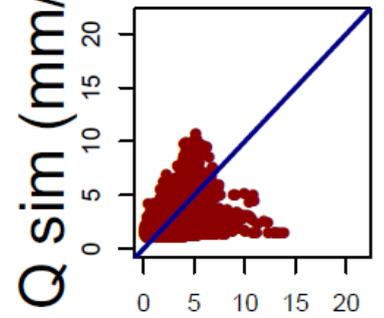
Q obs vs Q sim avec Psat pour le BV à Saut Maripa



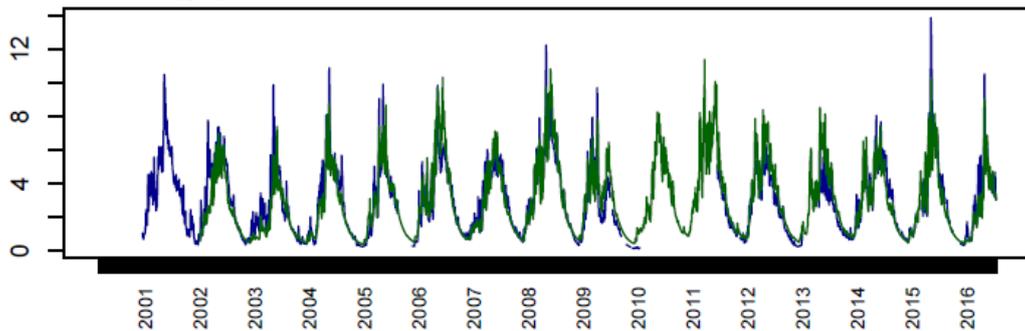
Débits (mm/j)



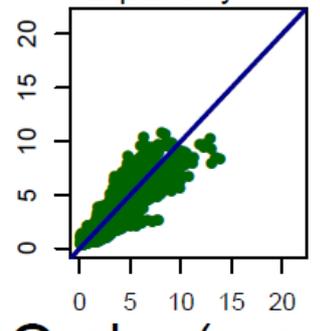
Q sim (mm/j)



- Q observé
- Q TRMM brute
- Q CAD
- Q IS



- Q sim TRMM brute
- Q sim CAD
- Q sim IS
- Equation $y = x$

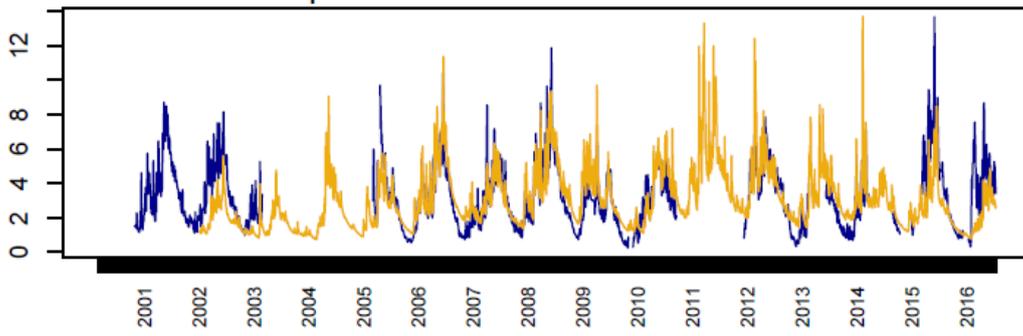


Dates

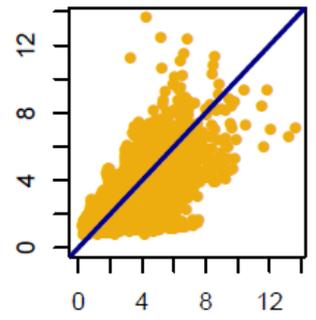
Q obs (mm/j)

FIGURE 12 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de l'Oyapock à Saut Maripa

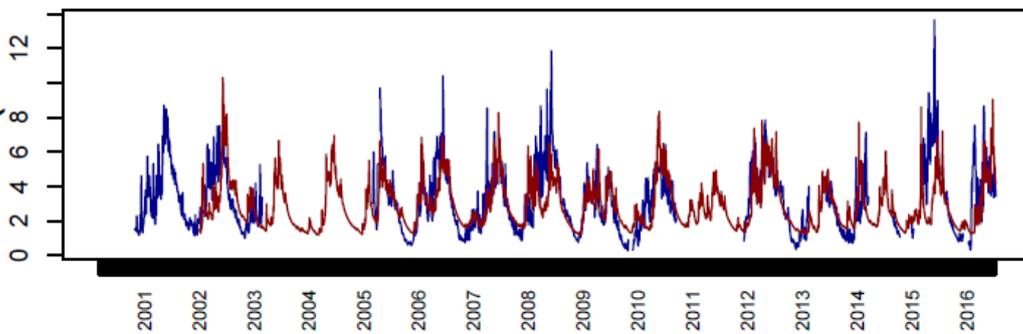
Chroniques des débits sim avec la pluie observée et la pluie satellite pour le bassin à Saut Athanase



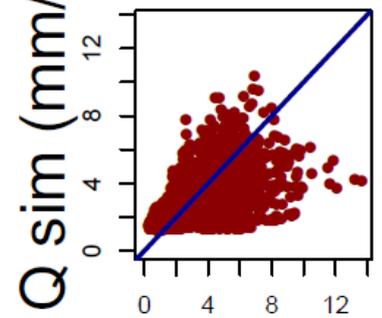
Q obs vs Q sim avec Psat pour le BV à Saut Athanase



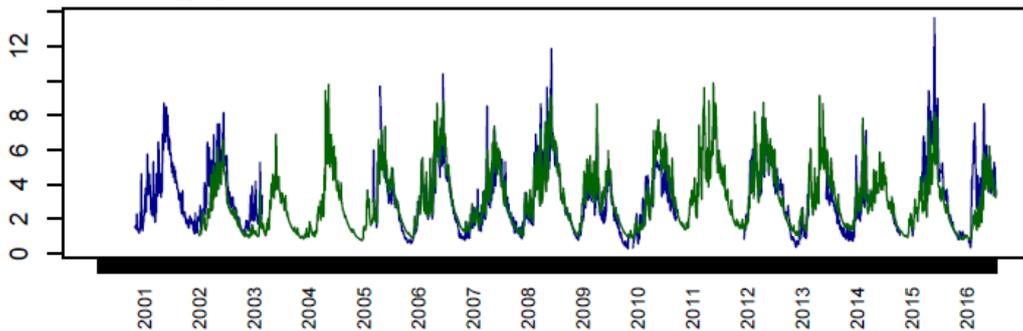
Débits (mm/j)



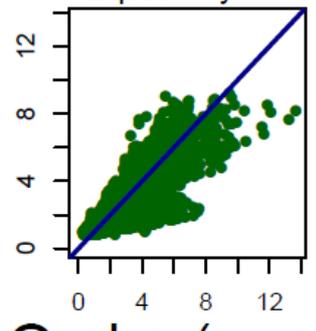
Q sim (mm/j)



- Q observé
- Q TRMM brute
- Q CAD
- Q IS



- Q sim TRMM brute
- Q sim CAD
- Q sim IS
- Equation $y = x$

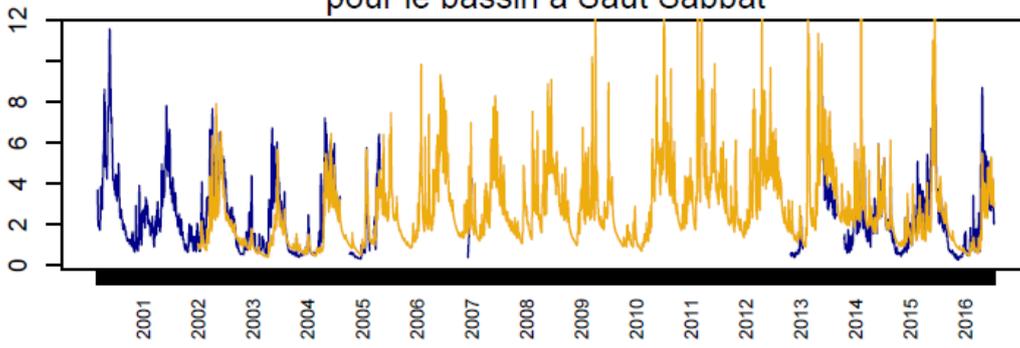


Dates

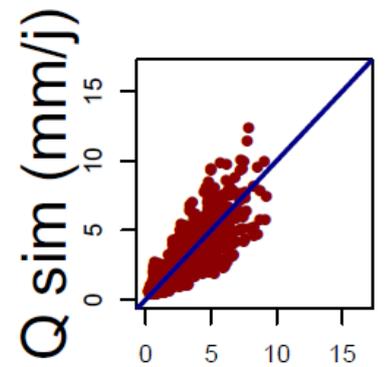
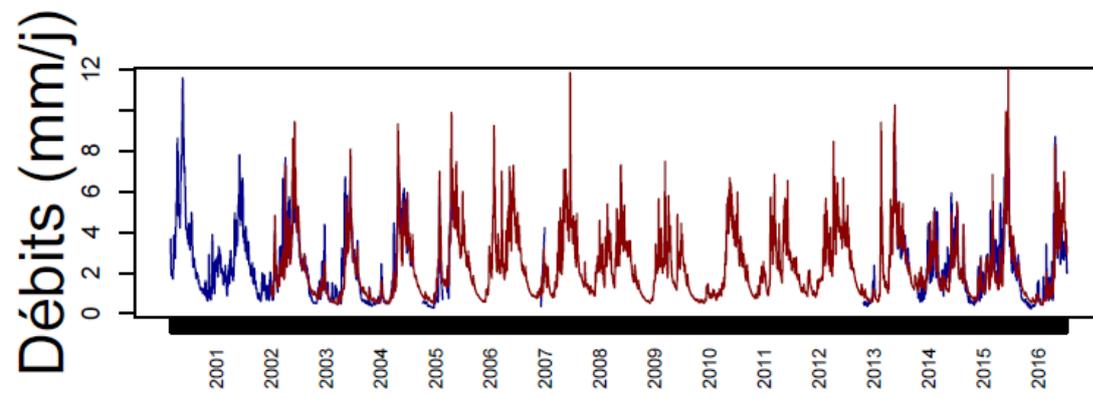
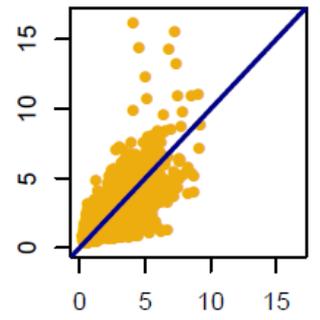
Q obs (mm/j)

FIGURE 13 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de l'Approuague à Saut Athanase

Chroniques des débits sim avec la pluie observée et la pluie satellite pour le bassin à Saut Sabbat



Q obs vs Q sim avec Psat pour le BV à Saut Sabbat



- Q observé
- Q TRMM brute
- Q CAD
- Q IS

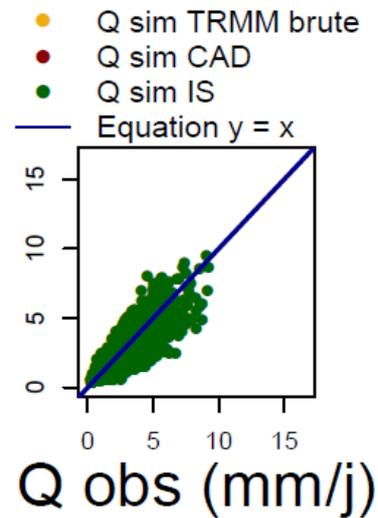
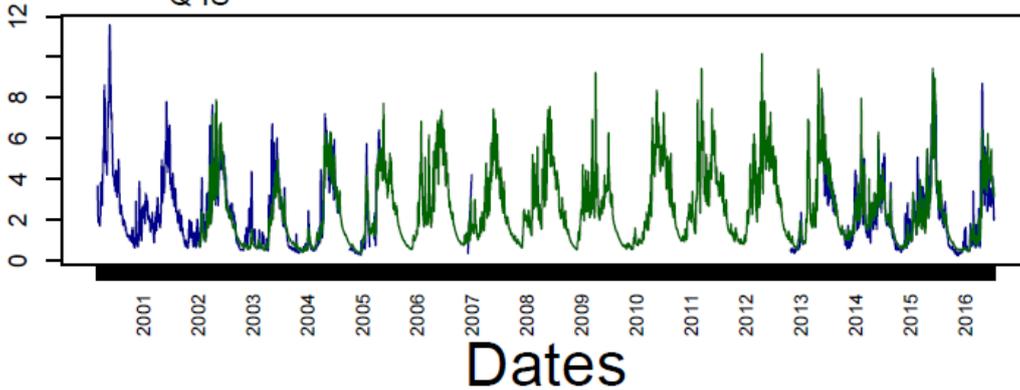
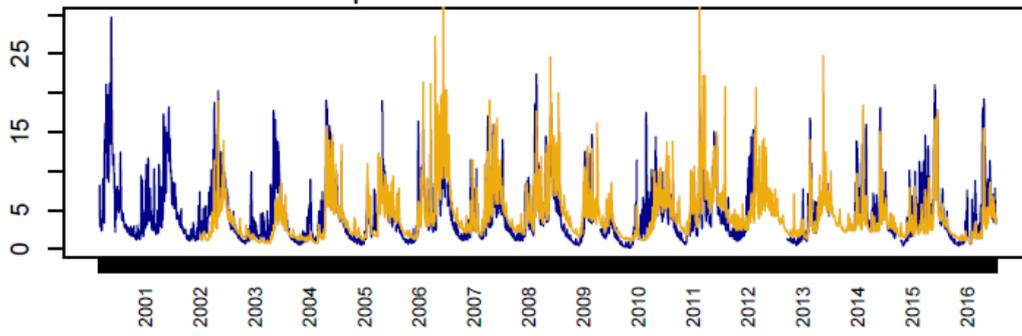
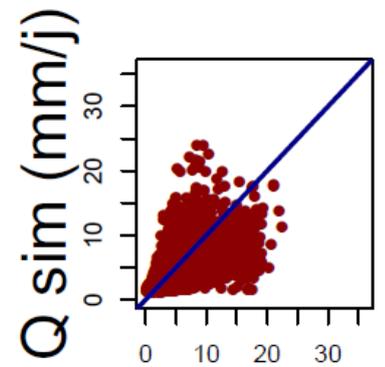
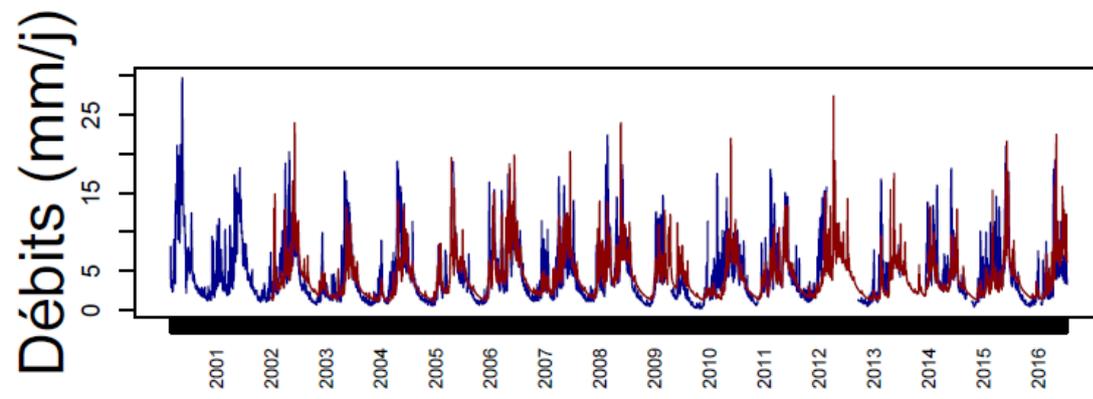
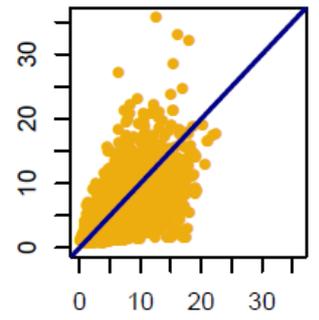


FIGURE 14 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de la Mana à Saut Sabbat

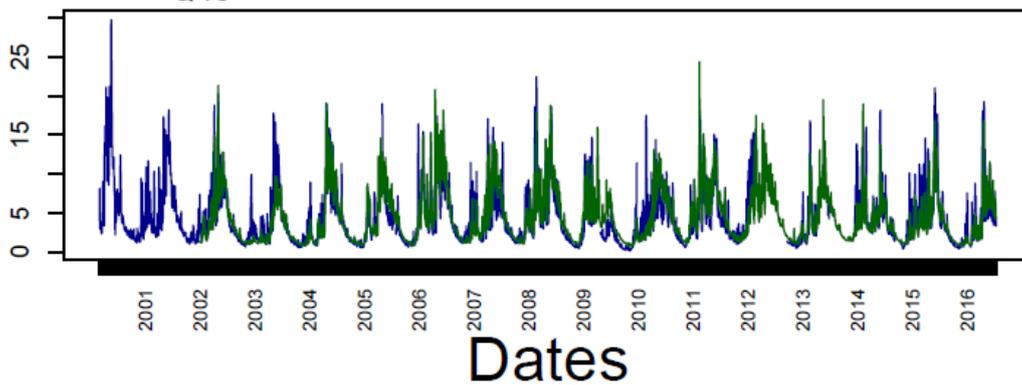
Chroniques des débits sim avec la pluie observée et la pluie satellite pour le bassin à Saut Bief



Q obs vs Q sim avec Psat pour le BV à Saut Bief



- Q observé
- Q TRMM brute
- Q CAD
- Q IS



- Q sim TRMM brute
- Q sim CAD
- Q sim IS
- Equation $y = x$

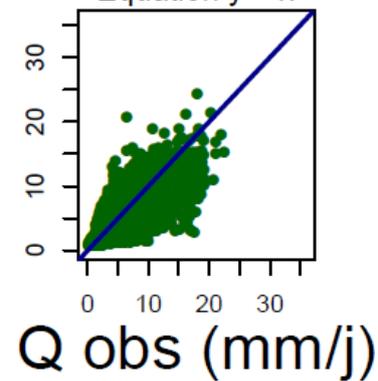


FIGURE 15 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur toute la chronique pour le bassin de la Comté à Saut Bief

Le constat est identique avec les autres bassins versants, les hydrogrammes de débits simulés sont les plus corrélés à la réalité en utilisant la pluie IS, et les nuages de points de la fonction $Q_{sim} = f(Q_{obs})$ tendent plus vers la droite 1 :1 qu'avec les deux autres pluies. Il est surprenant de constater ce résultat pour des bassins proches de la côte, où la densité de postes pluviométriques est importante (cf figure 3). Comme exemple, nous avons le bassin de la Comté

à Saut Bief proche de Régina (cf figure 15), où nous avons fait l'hypothèse que de part une plus grande proximité avec les postes, la méthode CAD serait la plus performante pour la modélisation hydrologique sur ce bassin.

Les interprétations graphiques peuvent être complétées par des critères numériques avec la comparaison des NSE des trois simulations, synthétisés dans le tableau 4 suivant :

Tableau 4 – Synthèse des NSE en calage du modèle pour chaque bassin

Codes BV	Nom Station	Pluie TRMM brute	Pluie CAD	Pluie IS
70500080	Saut Sabbat	0.61	0.46	0.84
91040020	Saut Bief	0.54	0.64	0.73
80320030	Saut Athanase	0.52	0.49	0.76
60200030	Saut Maripa	0.72	0.56	0.87
52210020	Maripasoula	0.71	0.46	0.83
50410030	Langa Tabiki	0.60	0.45	0.80

On remarque que les valeurs du NSE sont conformes à nos interprétations précédentes, la méthode CAD donne un NSE plus faible que la simulation avec la pluie TRMM brute dans la plupart des cas (exemple pour le Maroni à Langa Tabiki, on passe de 0.60 à 0.45) ; et c'est la correction IS qui donne le NSE le plus élevé. C'est la méthode qui paraît la plus adaptée pour la modélisation hydrologique pour l'ensemble des bassins versants.

Pour tenter de comprendre pourquoi dans chaque cas c'est la pluie IS qui est la plus performante, nous avons regardé les paramètres du modèle pour chaque simulation, regroupé dans le tableau 5 :

Tableau 5 – Paramètres des modèles pour les trois produits initiaux

Types de Pluies	Code station	Nom Station	X1(mm)	X2	X3(mm)	X4(jours)
IS	70500080	Saut Sabbat	2441	-2.2	69	3.5
IS	91040020	Saut Bief	2276	0.8	55	2.5
IS	80320030	Saut Athanase	3678	-1.0	105	2.5
IS	60200030	Saut Maripa	2322	-0.8	116	3.3
IS	52210020	Maripasoula	2398	-3.5	80	4.4
IS	50410030	Langa Tabiki	2039	-2.6	87	4.6
CAD	70500080	Saut Sabbat	4583	-7.3	141	2.4
CAD	91040020	Saut Bief	2059	1.9	95	2.5
CAD	80320030	Saut Athanase	7864	-7.0	351	2.2
CAD	60200030	Saut Maripa	4770	-11.1	513	1.2
CAD	52210020	Maripasoula	2836	-3.2	189	3.4
CAD	50410030	Langa Tabiki	2670	-3.0	178	3.3
TRMM brute	70500080	Saut Sabbat	3103	0.8	80	2.5
TRMM brute	91040020	Saut Bief	2231	3.2	52	2.4
TRMM brute	80320030	Saut Athanase	5826	0.5	164	2.2
TRMM brute	60200030	Saut Maripa	2566	1.6	141	2.5
TRMM brute	52210020	Maripasoula	2922	-0.8	129	3.4
TRMM brute	50410030	Langa Tabiki	3011	-1.9	155	2.6

Prenons le cas du bassin du Maroni à Langa Tabiki comme exemple. Nous nous sommes focalisé sur le paramètre X1, capacité maximale du réservoir de production. Sur la tableau 5, il est le plus élevé avec la pluie TRMM brute et le plus faible avec la pluie IS. Or, sur les hydrogrammes de la figure 10, nous avons vu que les pics de crue en simulation étaient les plus élevés avec la pluie TRMM brute. Comme la pluie TRMM brute est fortement bruitée, elle a tendance à surestimer les fortes pluies et à sous-estimer les faibles pluies (Brochart *et al.*, 2014); les extrêmes sont aggravés.

Notre hypothèse est que pour encaisser ces fortes pluies, le modèle cale le paramètre X1 de façon à atténuer ces pics de pluie en période de crue. Cela a des conséquences sur le calage des autres paramètres, entre autres sur X3, capacité du réservoir de routage, qui augmente pour contribuer lui aussi à atténuer les extrêmes de pluie.

Comme la correction IS varie en fonction de l'intensité des pluies satellites, elle lisse les valeurs de pluies, cela diminue les fortes valeurs et augmentent les faibles, en plus du fait qu'elle ne considère pas la pluie nulle. Elle ne provoque pas de torsion du modèle pour caler X1, et semble plus stable. C'est le cas pour tous les bassins (cf tableau 5), et dans certains cas, le paramètre X1 est plus élevé avec la méthode CAD qu'avec la pluie TRMM brute, ce qui explique en partie pourquoi les simulations faites avec la pluie CAD peuvent être de moins bonne qualité que celles faites avec la pluie TRMM brute. Plutôt que de réduire les fortes pluies, parfois la méthode CAD les aggrave.

3.2 Hydrogrammes et comparaisons des débits simulés sur des périodes spécifiques

L'objectif de l'étude est de fournir une méthode viable à la CVH de Guyane française pour faire de la prévision hydrologique, anticiper des événements comme les crues ou les étiages. Nous avons zoomé les hydrogrammes précédents sur certains événements climatiques pour voir comment le modèle simule un débit dans ces conditions. Considérons l'exemple du bassin versant du Maroni à Langa Tabiki.

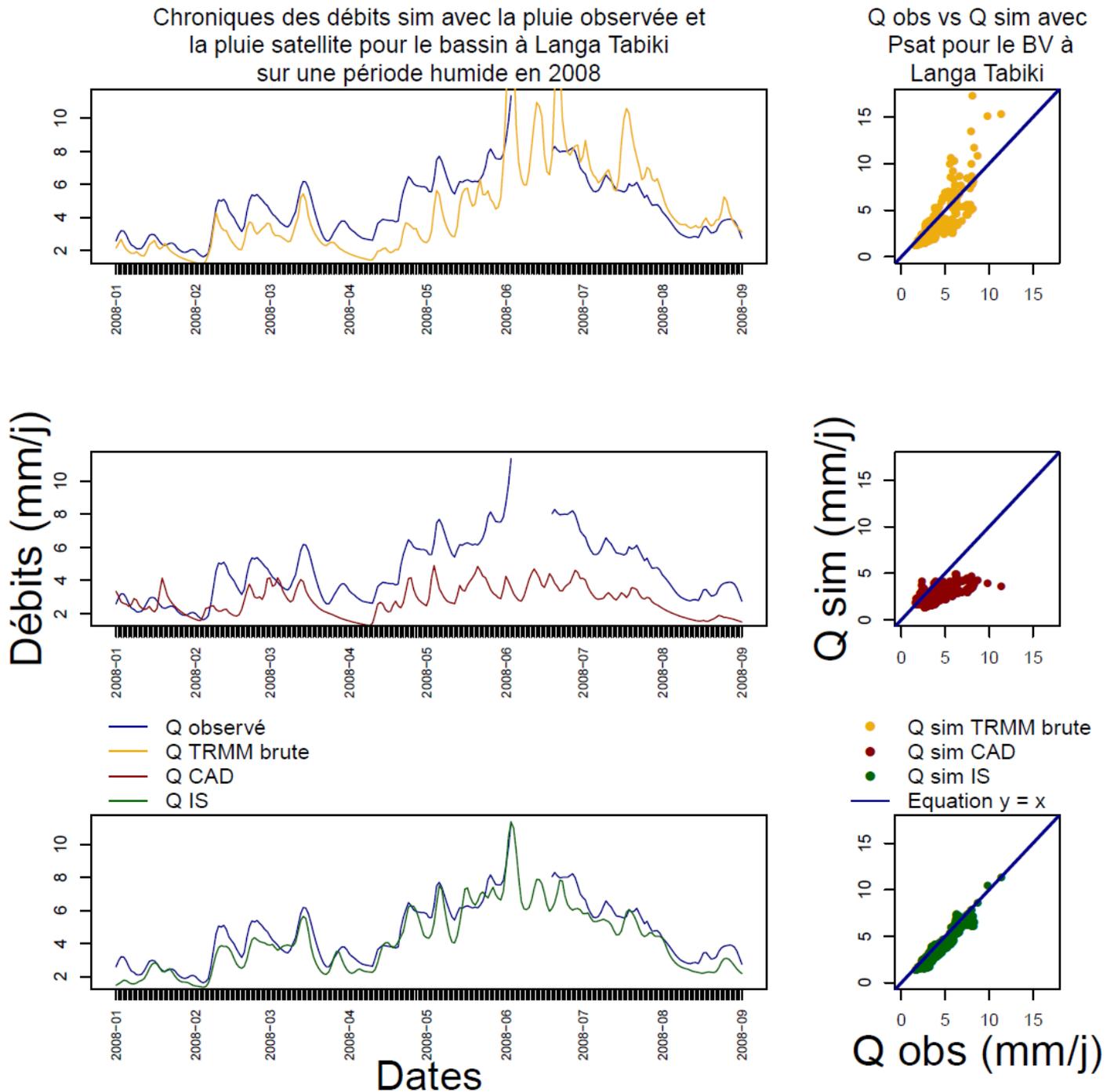


FIGURE 16 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur une période humide pour la bassin du Maroni à Langa Tabiki

La figure 16 illustre les hydrogrammes obtenues sur une période humide avec l'exemple du bassin du Maroni à Langa Tabiki. Là encore, la corrélation entre hydrogrammes des débits

simulés et hydrogrammes des débits observés est la plus importante avec la pluie IS (en vert). C'est aussi la pluie IS qui donne un nuage de points suivant le mieux la tendance de la droite 1 :1 sur le graphique de la fonction $Q_{sim} = f(Q_{obs})$. Pour ce bassin, la correction IS est la plus efficace pour la modélisation hydrologique en période de crue, et c'est aussi le cas pour les autres bassins.

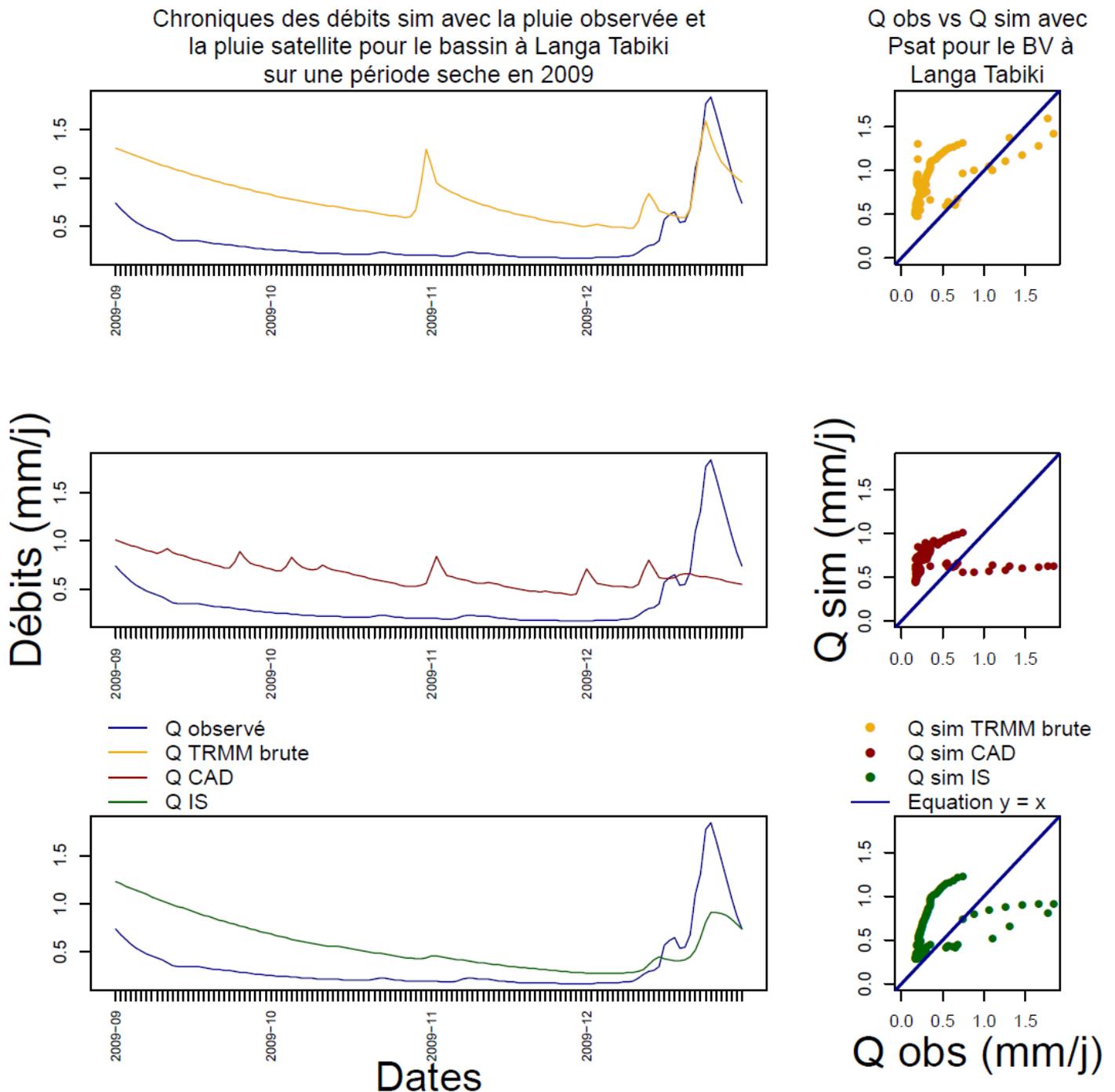


FIGURE 17 – Hydrogrammes des débits simulés et observés sur une période sèche pour la bassin du Maroni à Langa Tabiki

La figure 17 illustre les hydrogrammes obtenus sur une période sèche avec l'exemple du bassin du Maroni à Langa Tabiki. Même si cela paraît moins évident que sur la chronique complète ou sur une période humide, la correction IS reste un peu mieux adaptée, l'hydrogramme des débits simulés avec cette pluie colle le plus à la réalité. Cependant, il n'est pas possible de dire que la correction IS est efficace pour la prévision hydrologique en période d'étiage, les résultats

restent mauvais même si plus parmi les trois testées c'est la pluie la plus adaptée. Ici, il est difficile de faire la part entre les incertitudes liées à la pluie, celles liées au modèle, et enfin celles liées aux incertitudes sur les débits.

3.3 Analyse par Split-Sample Test

Pour donner du poids à nos interprétations, nous avons réalisé un calage-contrôle sur chaque simulation en fonction du bassin et de la pluie étudiée. Le principe de ce test est illustré sur la figure 18 : il consiste à diviser la chronique totale disponible de nos données en deux sous-périodes, de taille équivalentes, et à caler le modèle sur chaque sous-période que nous appellerons P1 et P2. Nous obtenons donc un critère de performance pour le calage sur P1 et un autre pour P2. Puis, nous lançons le modèle calé sur P1 sur la période P2 pour obtenir un critère de performance en validation, et inversement.

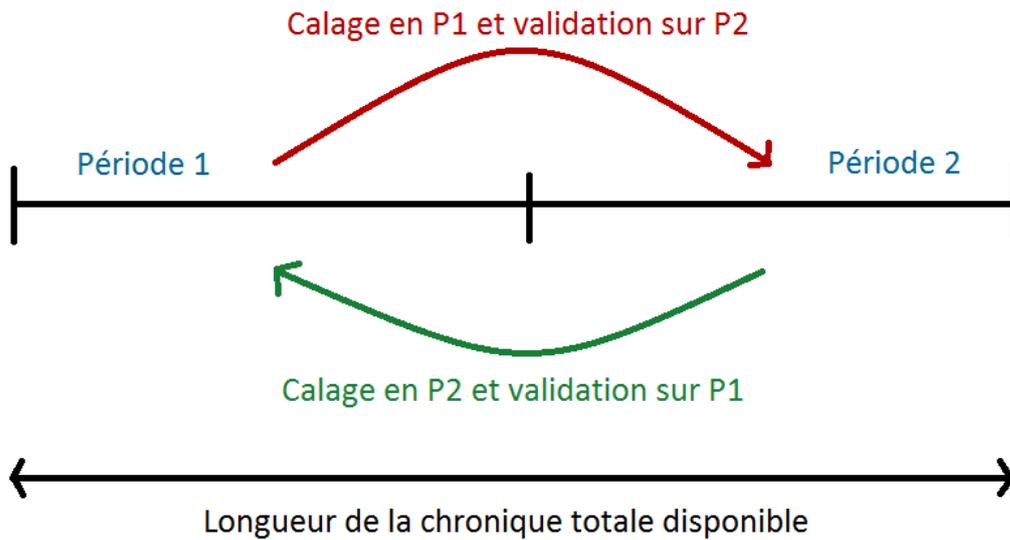


FIGURE 18 – Schéma explicatif du calage-validation (Split-Sample Test)

Pour être sûr de la cohérence du test, nous avons comparé le NSE, critère de performance utilisé, obtenu en calage sur P1 avec le NSE en validation sur P1, dont le modèle avait au préalable été calé sur P2. En toute logique, le NSE d'une sous-période est plus important en calage qu'en validation, car le modèle se base sur les données de cette sous-période pour caler ses paramètres ; il est plus adapté à cette sous période. Si ce n'est pas le cas, ça peut vouloir dire que le modèle a calé ses paramètres sur des optima secondaires, et que le test est à reprendre. Pour notre étude, les NSE en validation étaient toujours plus faibles que les NSE en calage, donc le problème ne s'est pas posé.

Nous avons ensuite moyenné par bassin les NSE en calage de chaque sous-période, et ceux en validation, et nous avons tracé les NSE moyens en validation en fonction des NSE moyens en calage, illustré sur la figure 19. Nous n'avons pas pu le réaliser sur bassin de la Mana à Saut Sabbat car la lacune dans la chronique du bassin est trop importante pour un calage-validation. Si les NSE moyens en validation sont proches des NSE moyens en calage pour une pluie et un bassin donnés, alors le modèle est dit robuste pour cette pluie sur ce bassin. Nous remarquons que les modèles les plus robustes sont obtenus avec la pluie IS car les points (en vert) sont les plus proches de la droite de régression $y = x$ (en bleu), pour quatre bassins sur cinq. Ce sont aussi les points avec les NSE les plus importants (entre 0.63 et 0.83 en validation). C'est un

résultat concordant avec nos précédents observations, la correction IS semble être la méthode la plus efficace pour la modélisation hydrologique en Guyane française.

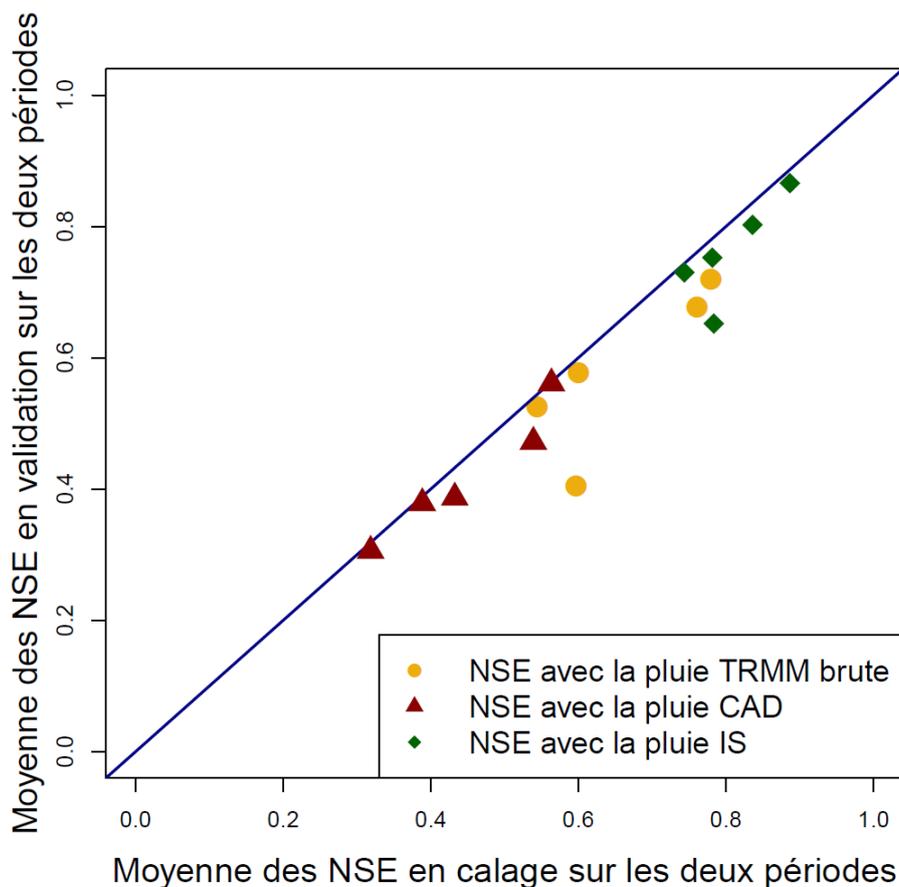


FIGURE 19 – Graphique du calage-validation par bassin et par pluie

3.4 Études sur la fréquence au non dépassement des pluies par bassin

Pour valider l'hypothèse que nous avons fait précédemment sur le fait que pluie TRMM brute et la méthode CAD introduisait des valeurs extrêmes de pluie dans le modèle que celui ne gérait pas bien, nous avons regardé les fréquences au non dépassement de chaque pluie par bassin, illustrées sur la figure 20 (Freq Non Dep = fréquence au non dépassement).

Nous remarquons que l'hypothèse que nous avons faite précédemment sur la stabilité des pluies IS se confirme ici, les courbes vertes sont moins étendues que les courbes jaunes et rouges, qui semblent quasiment confondues. Les courbes de la pluie IS classée croient plus vite et arrivent à leur palier maximum à de plus faibles valeurs que dans les deux autres cas.

De plus, nous avons reporté sur chaque graphique la valeur du quantile 90, c'est à dire la valeur qui n'est pas dépassée 90% du temps. On remarque que les quantiles de pluies Q_{90} des pluies IS sont toujours presque deux fois plus faibles que ceux des autres pluies, ce qui correspond aux interprétations précédentes. Pour quatre bassins sur six, le Q_{90} de la pluie CAD est plus élevé que celui de la pluie TRMM brute, ce qui peut en partie expliquer que les simulations soient dégradés avec la pluie CAD par rapport à la pluie TRMM brute, du fait de la torsion du modèle pour encaisser les fortes valeurs de pluie.

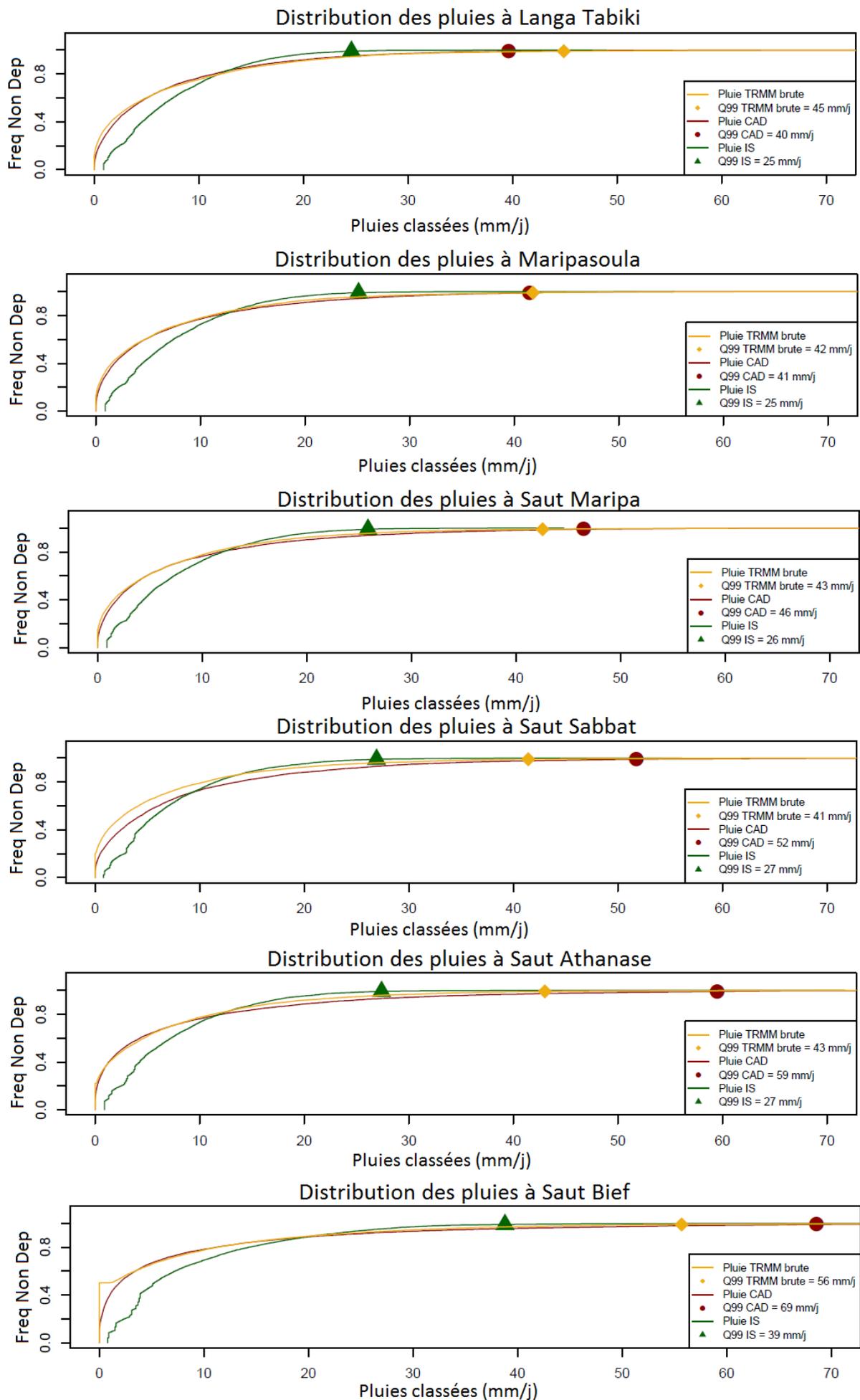


FIGURE 20 – Fréquences au non dépassement de chaque type de pluie par bassin

Conclusion partielle : validation des trois produits initiaux de pluies satellitaires

L'ensemble des analyses précédentes convergent vers le fait que la correction IS est plus efficace pour la modélisation hydrologique que la méthode CAD. Les hydrogrammes des débits simulés sont mieux représentés par rapport aux débits observés, les NSE sont plus forts et le modèle se comporte de façon plus cohérente avec cette correction. Une explication possible serait de dire que la méthode CAD ne considère pas l'abattement des pluies dû à la différence d'échelle de surface entre le pixel de maille ($\simeq 800km^2$) et les postes pluviométriques sensés le corriger ($< 1m^2$); les postes informent sur une pluie locale alors que le pixel rend compte d'une tendance globale. Comme la correction IS repose sur un principe de moyenne, l'abattement des pluies est considérée et la pluie IS ne souffre pas de ce problème.

Cependant, même si la pluie IS est plus adaptée que les deux autres produits pour la modélisation hydrologique, elle n'est pas parfaite et présente des défauts majeurs :

- Non considération des pluies nulles : c'est son défaut principal, elle estime qu'il pleut un peu chaque jour sur chaque pixel, et elle peut surestimer les pluies en périodes d'étiage.
- Sous-estimation des fortes pluies : dû au principe de moyenne, les pics de fortes pluies sont sous-estimés, ce qui l'avantage pour une étude hydrologique à long terme, mais n'est pas nécessairement optimal pour de la prévision d'évènements extrêmes comme les crues.

Il est possible d'améliorer le produit, et l'idée que nous avons eu dans la suite de l'étude était de combiner la stabilité associée à la correction IS avec la variabilité proposée par la méthode CAD, et nous allons maintenant présenter des propositions de produits hybrides entre ces deux corrections.

4 Analyses des corrections hybrides proposées

4.1 Différentes stratégies testées

4.1.1 Hybridation directe de CAD sur IS

Nous avons cherché à mélanger les deux méthodes et c'est pourquoi, dans un premier temps, nous avons corrigé les pluies IS avec la méthode CAD. En théorie, cela nous permet de partir de la stabilité de la pluie IS, qui corrige déjà les fortes variations de la pluie TRMM brute, et d'y rajouter les variations de pluie réelles observées avec la méthode CAD, entre la pluie nulle et les fortes pluies. Le principe de correction de la méthode CAD sur la pluie IS est le même que celui décrit dans la partie 2.1.1, au paragraphe sur la correction proposée par Météo France ; il s'agit de faire une correction additive des pixels de grilles de la pluie IS par rapport aux pluies réelles par interpolation par IDW. Pour la suite, nous l'appellerons la précipitation hybride directe.

Comme la pluie IS est celle qui obtenait les meilleurs résultats par rapport aux trois produits initiaux, nous comparons chaque pluie hybridée proposée à la pluie IS dans l'optique de trouver une pluie qui donne offre de plus grandes performances pour la modélisation hydrologique. Pour le reste du rapport, nous avons aussi fait le choix de nous restreindre à l'étude des hydrogrammes associés au bassin versant du Maroni à Langa Tabiki, en raison d'un nombre de pages limite imposé. Nous avons choisi ce bassin car c'est le plus grand de notre échantillon, et donc celui pour lequel les pixels de pluies satellitaires sont les plus représentatifs. La figure 21 représente les hydrogrammes des débits simulés avec les pluies IS et hybrides directe comparés aux débits observés.

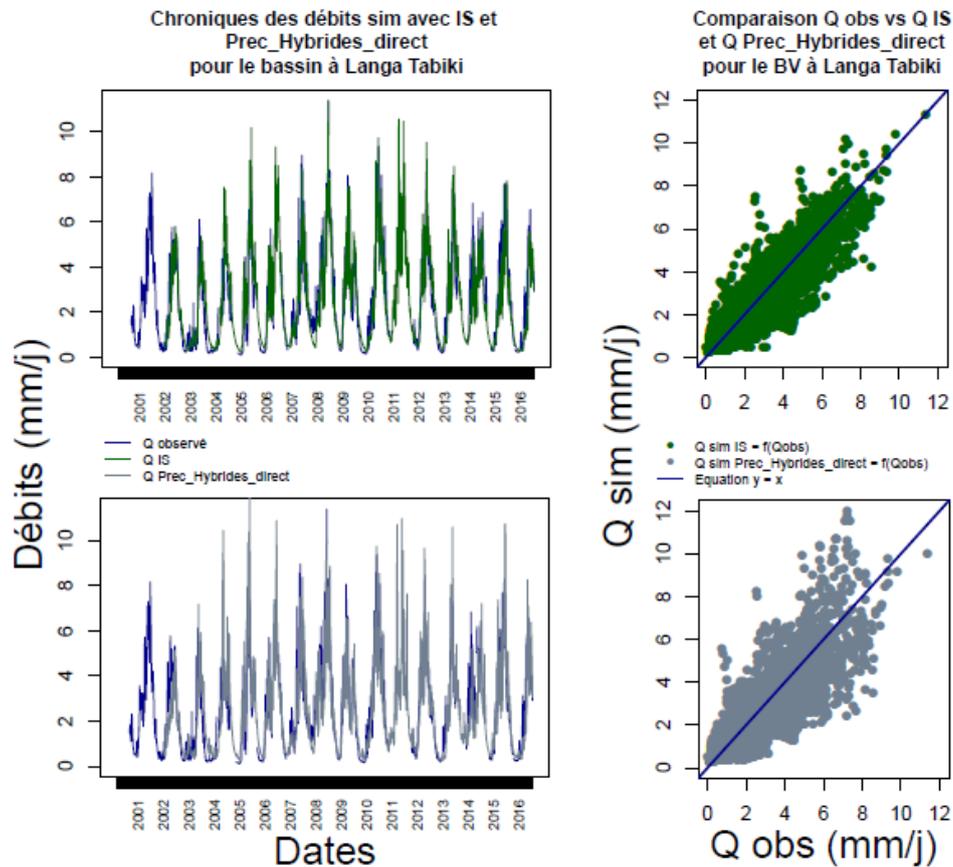


FIGURE 21 – Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride directe pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

L'introduction des données de pluie réelle par la méthode CAD injecte des extrêmes dans la simulation des débits par rapport à la pluie IS, certains pics de crue sont surestimés, ce que nous retrouvons sur le graphique de la fonction $Q_{simhybridedirect} = f(Q_{obs})$ où on observe que le nuage de points tend vers une surestimation des débits simulés avec la pluie hybride directe, il suit moins la tendance de la droite 1 :1 que le débit simulé avec la pluie IS. Le graphique 27 montre aussi que la la pluie IS conserve un score plus élevé que la pluie hybride directe. Pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki, la pluie hybride directe n'est pas plus efficace que la pluie IS pour la modélisation hydrologique. C'est aussi le cas pour la plupart des autres bassins versants de l'étude.

4.1.2 Hybridation directe de CAD sur IS par palier de distance limite

Nous avons cherché à comprendre pourquoi la méthode CAD n'améliore toujours la correction IS, et nous avons supposé que la prise en compte de postes pluviométriques trop éloignés des pixels à corriger introduit des erreurs dans la correction, même si la méthode CAD est équilibrée par la distance entre le pixel à corriger et le poste de référence.

Nous avons donc imposé une distance limite à l'application de la méthode CAD sur la correction IS. C'est-à-dire que nous fixons un palier de distance limite, par exemple 20km, et lors de la correction d'un pixel, tous les postes éloignés à plus de 20km du pixel corrigé ne sont pas considérés comme référence pour la méthode CAD. Nous avons appliqué ce principe avec plusieurs distances limites : 20km, 50km, 100km, 150km, 200km, 250km, 300km, 400km, 450km, 500km, 600km et 750km.

Pour trois bassins versants sur six, cette correction a donné des résultats plus performants pour la pluie IS pour la modélisation hydrologique au regard du NSE, pour des paliers compris entre 50 et 100 km (cf partie 4.2).

Les figures 22 et 23 présentent les hydrogrammes des débits observés et simulés avec des pluies hybrides limitées respectivement à 50 et 100 km.

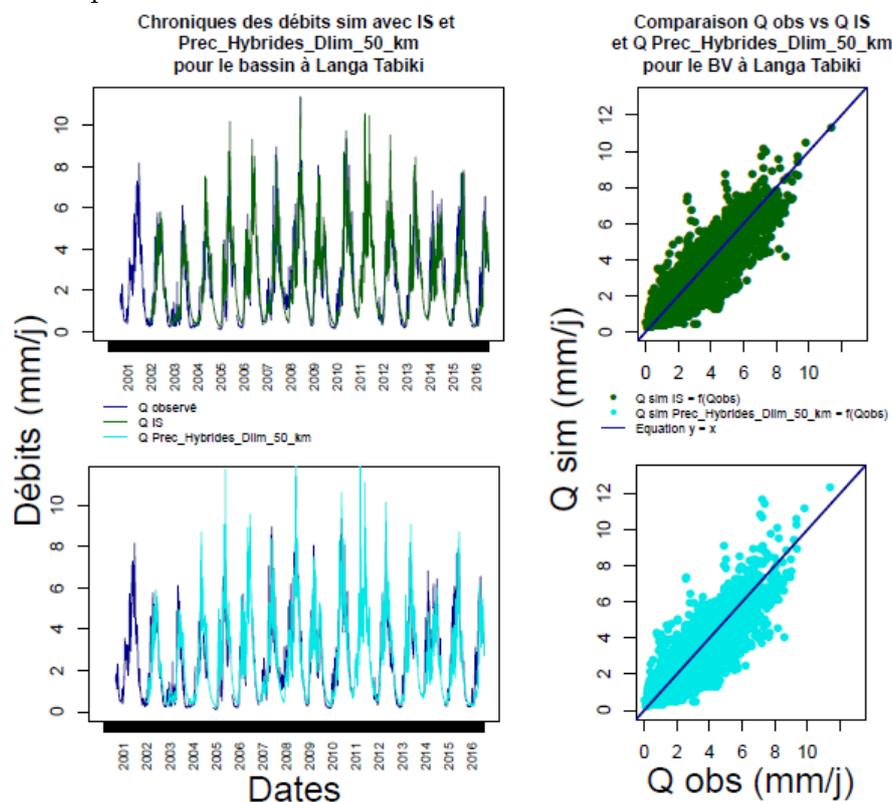


FIGURE 22 – Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride limitée à 50km pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

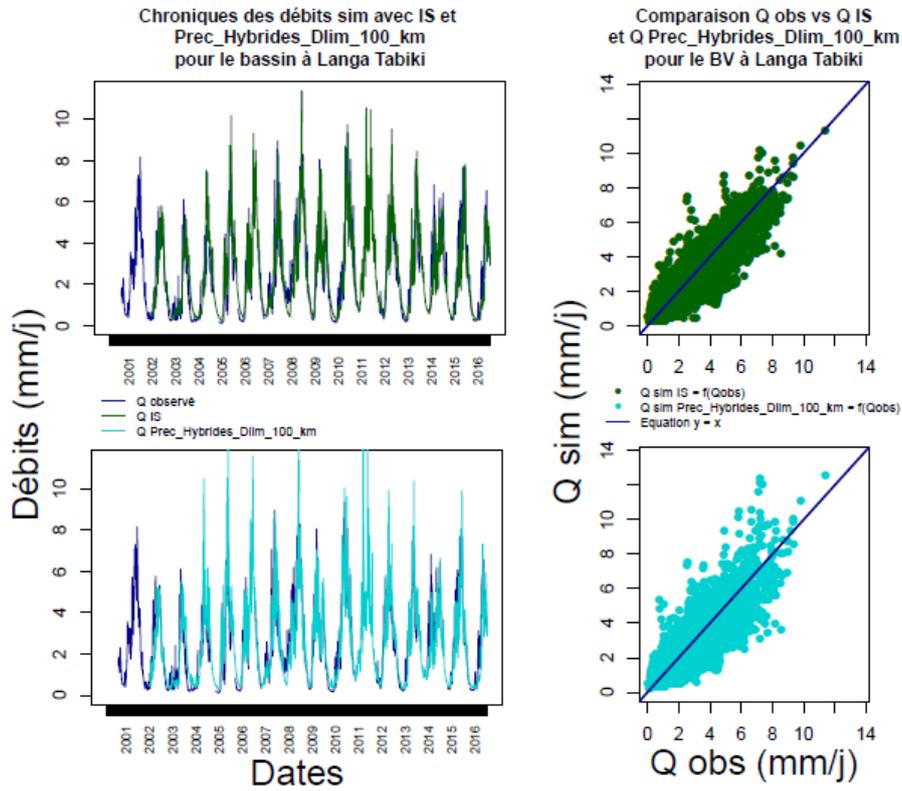


FIGURE 23 – Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride limitée à 100km pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

Pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki, le problème des pluies hybrides limitées par palier de distance est similaire à celui de la pluie hybride directe, les pics de crue sont surestimés, et le nuage de points suit moins la tendance de la droite 1 :1 que la pluie IS. Les critères numériques illustrés en partie 4.2 sur la figure 27 vont dans ce sens, le NSE le plus élevé est obtenu avec la pluie IS pour ce bassin.

C'est la pluie IS qui reste la plus efficace pour la modélisation hydrologique.

4.1.3 Correction Multiplicative Datée sur la pluie IS

Comme les stratégies de correction additives n'améliorent pas la situation dans tous les cas, nous avons cherché à redéfinir la correction de la pluie IS avec les 10 postes pluviométriques de référence disponibles, en utilisant un terme correctif multiplicateur. Pour rappel en partie 2.1.1 sur la correction additive datée, nous avons vu que chaque pixel est corrigé par un terme qui lui est additionné. Le but ici est d'utiliser une correction multiplicative. Le principe de pondération est similaire à la méthode CAD, nous conservons l'influence de la distance, mais nous considérons les rapports entre valeurs des postes de référence et valeur du pixel à corriger. C'est à dire que sur chaque pixel, par exemple le pixel i , nous le comparons au poste j :

$$K_p = \frac{P_{obs\ poste\ j}}{P_{IS\ pixel\ i}}$$

On met IS au dénominateur car comme il n'est jamais nulle (cf partie 2.1.1), le calcul est toujours possible. Nous répétons ce calcul avec tous les postes pluviométriques, et nous interpolons les K_p obtenus par l'inverse de la distance :

$$R_i = \frac{\sum(\frac{1}{d_i^2} \times K_p)}{\sum_i(\frac{1}{d_i^2})}$$

avec :

- d_i la distance entre le pixel i et la station pluviométrique où K_p est calculé.
- R_i le terme de correction des précipitations pour le pixel i .

Enfin, nous corrigeons le pixel i de la pluie IS par le terme R_i :

$$P_{hybride\ multi} = P_{IS\ pixel\ i} \times R_i$$

La figure 24 présente l'hydrogramme de la pluie hybride multiplicative comparé à celui de la pluie IS :

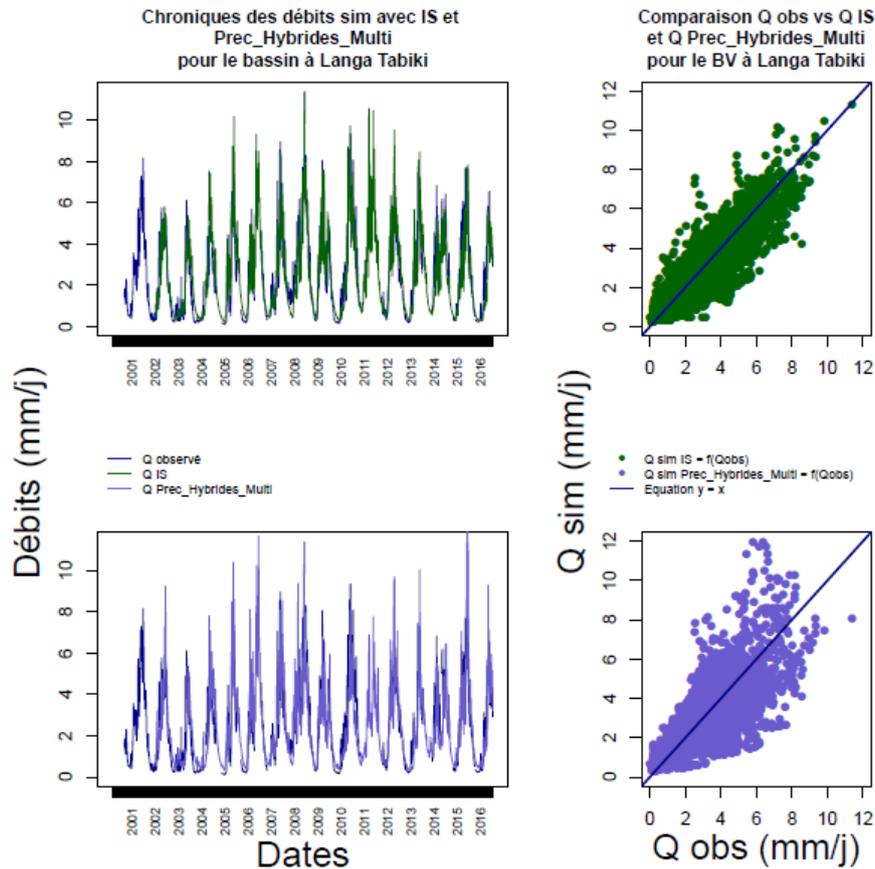


FIGURE 24 – Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie hybride multiplicative pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

Les pics de crue en violet sur la figure 24 sont surestimés par rapport à la réalité, ce que nous retrouvons sur le graphique de la fonction $Q_{sim\ hybride\ multi} = f(Q_{obs})$, le nuage de points dévie de la droite 1 :1 dans les fortes valeurs de débits, et est plus étalé que celui obtenu avec la pluie IS. Entre les deux produits, la pluie IS reste la plus efficace pour la modélisation hydrologique.

4.1.4 Simulation avec de la pluie réelle interpolée sur chaque pixel

En testant ce produit, l'objectif est double. ans un premier temps, cela nous donne une référence de pluie plus ou moins représentative sur la Guyane française, pour y comparer chaque pluie satellitaire. Comme le nombre de postes est restreint et la disposition spatiale de ces postes non homogène, cette référence n'est pas un critère de qualité mais nous permet d'avoir une idée de la pluie réelle sur l'ensemble de la zone d'étude.

Le deuxième objectif est de tester s'il est possible de se passer de l'imperfection des pluies satellitaires pour la modélisation hydrologique en Guyane française et de fournir au modèle une pluie réelle interpolée.

Nous avons testé deux stratégies d'interpolation de pluie réelle :

- avec les 10 postes disponibles en temps réel,
- avec 22 postes supplémentaires sur la Guyane française mais avec des chroniques incomplètes et donc non disponibles en temps réel, ce qui est pénalisant pour la modélisation hydrologique ; en tout 32 postes (cf figure).

Les figures 25 et 26 illustrent les hydrogrammes obtenues avec la pluie interpolée respectivement à 10 postes et à 32 postes.

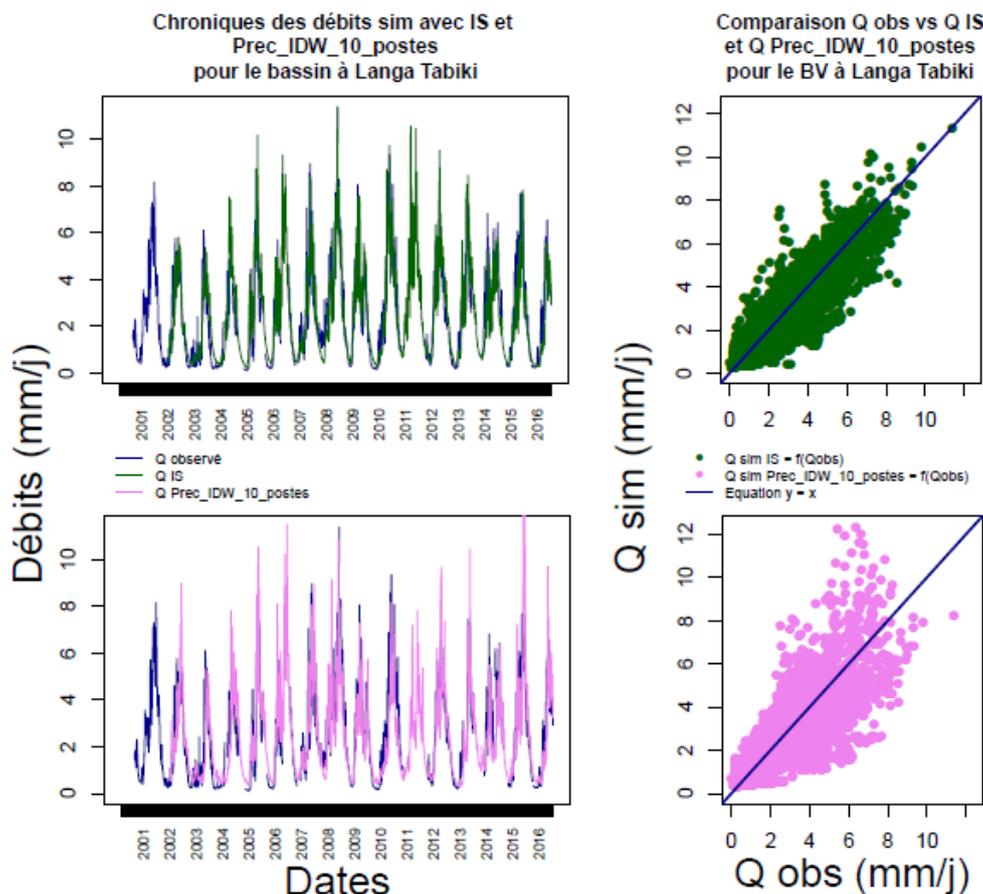


FIGURE 25 – Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie réelle interpolée avec 10 postes pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

La figure 25 montre que les hydrogrammes des débits simulés avec la pluie réelle interpolée avec 10 postes sont plus hauts que les pics de crue observés, et plus hauts que ceux obtenus avec la pluie IS. On remarque de plus que sur le graphique de la fonction $Q_{sim interpolation 10 postes} = f(Q_{obs})$, le nuage de points dévie de la droite 1 :1 pour les valeurs extrêmes, avec des débits globalement surestimés. .

Avec la figure 26, le constat est similaire, les pics de crue sur les hydrogrammes sont plus importants et le nuage de points de la fonction $Q_{sim interpolation 32 postes} = f(Q_{obs})$ dévie aussi de la droite 1 :1 au niveau des valeurs extrêmes par rapport à la pluie IS. Dans les deux situations, la pluie IS reste la plus pertinente pour la modélisation hydrologique pour ce bassin versant. Les critères numériques illustrés en partie 4.2 sur la figure 27 vont dans ce sens, comme dans les cas précédents.

Ce constat est généralisable à tous les postes avec la pluie interpolée avec 10 postes, mais dans le cas de la pluie interpolée avec 32 postes, deux bassins ont des qualités de simulations plus importantes grâce à la pluie interpolée avec 32 postes plutôt qu’avec la pluie IS : il s’agit de la Comté

à Saut Bief et la Mana à Saut Sabbat. Cependant, tous ces postes ne sont pas disponibles en temps réel et cette stratégie n'est donc pas applicable pour la modélisation hydrologique temps réel.

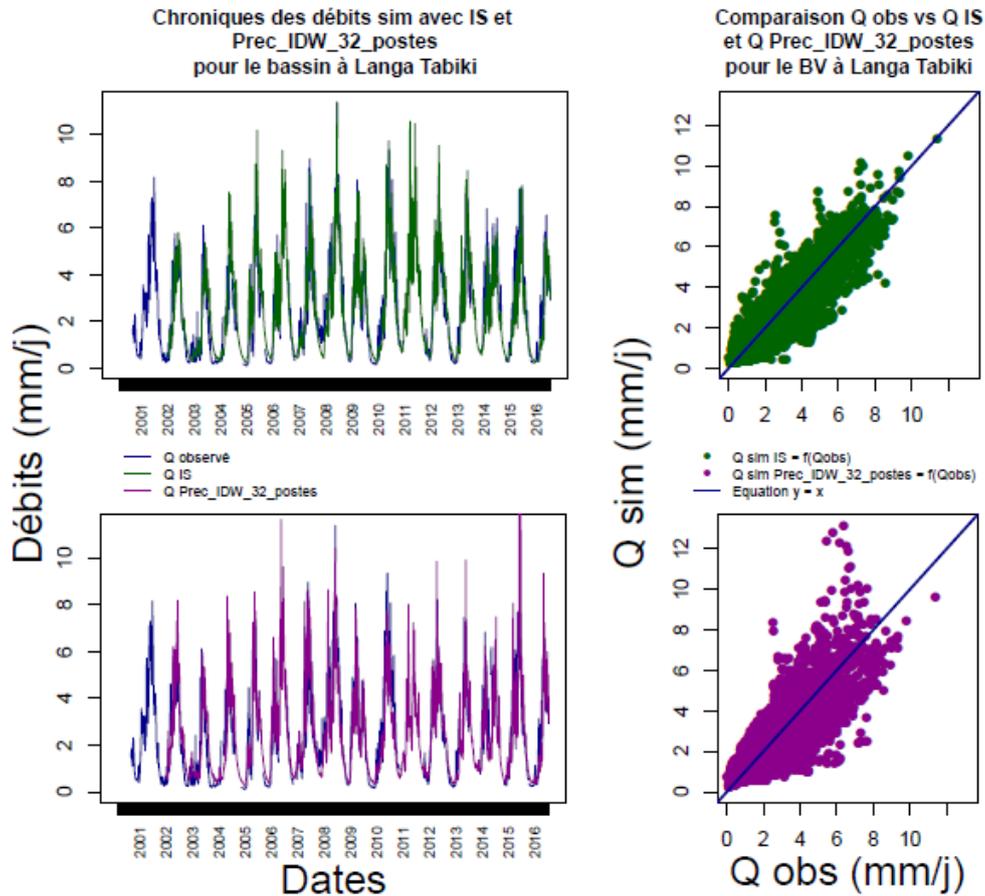


FIGURE 26 – Hydrogrammes des débits observés et simulés avec la pluie IS et la pluie réelle interpolée avec 32 postes pour le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

4.2 Synthèse des stratégies d'hybridation par analyse du NSE

Nous avons testé et évalué plusieurs produits, en utilisant des hydrogrammes, des comparaisons de débits simulés contre débits observés, et nous nous sommes appuyés sur le NSE comme critère numérique. Par soucis de clarté, nous n'avons pas pu analyser tous les bassins pour illustrer nos propos. Cependant, nous avons regroupé tous les NSE obtenus pour chaque simulation sur chaque bassin dans les figures 27 à 32, pour synthétiser nos résultats. Comme dans chaque cas, le NSE se comporte de la même manière que nos interprétations avec les critères graphiques plus qualitatifs, ce qui à défaut de pouvoir représenter les hydrogrammes de chaque simulation sur chaque bassin nous permettra de voir leur comportement.

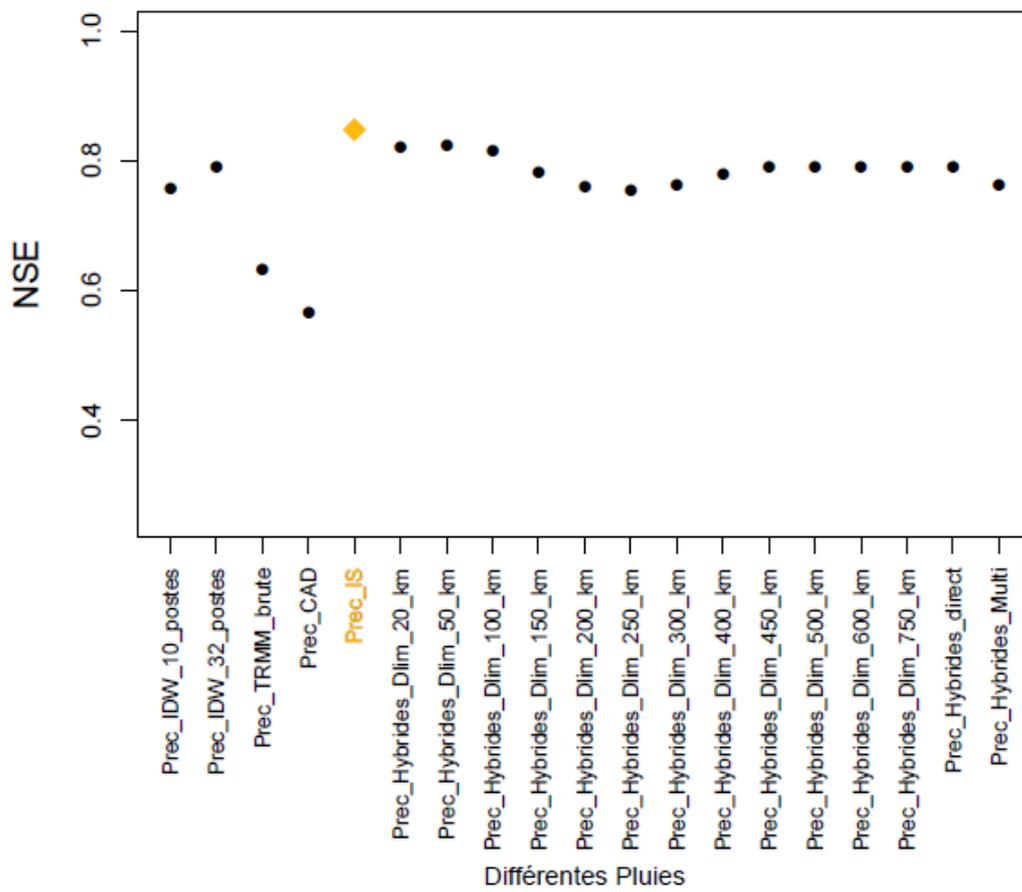


FIGURE 27 – Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant du Maroni à Langa Tabiki

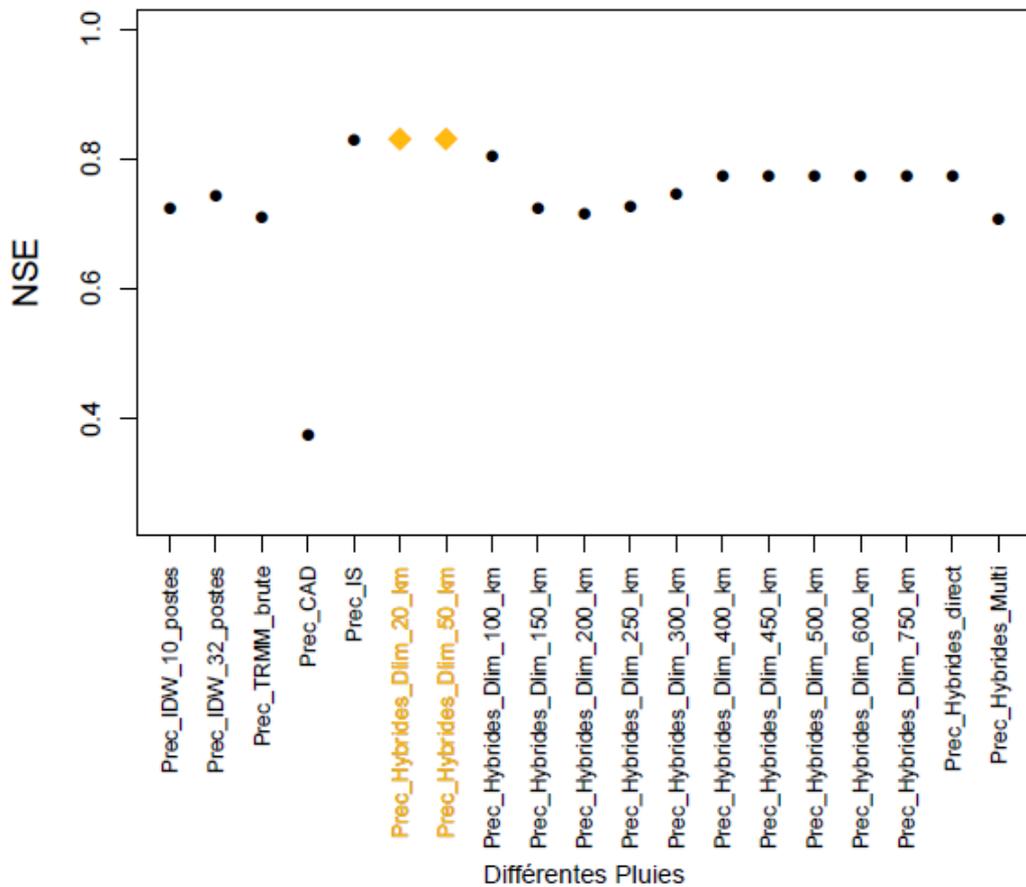


FIGURE 28 – Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant du Maroni à Maripasoula

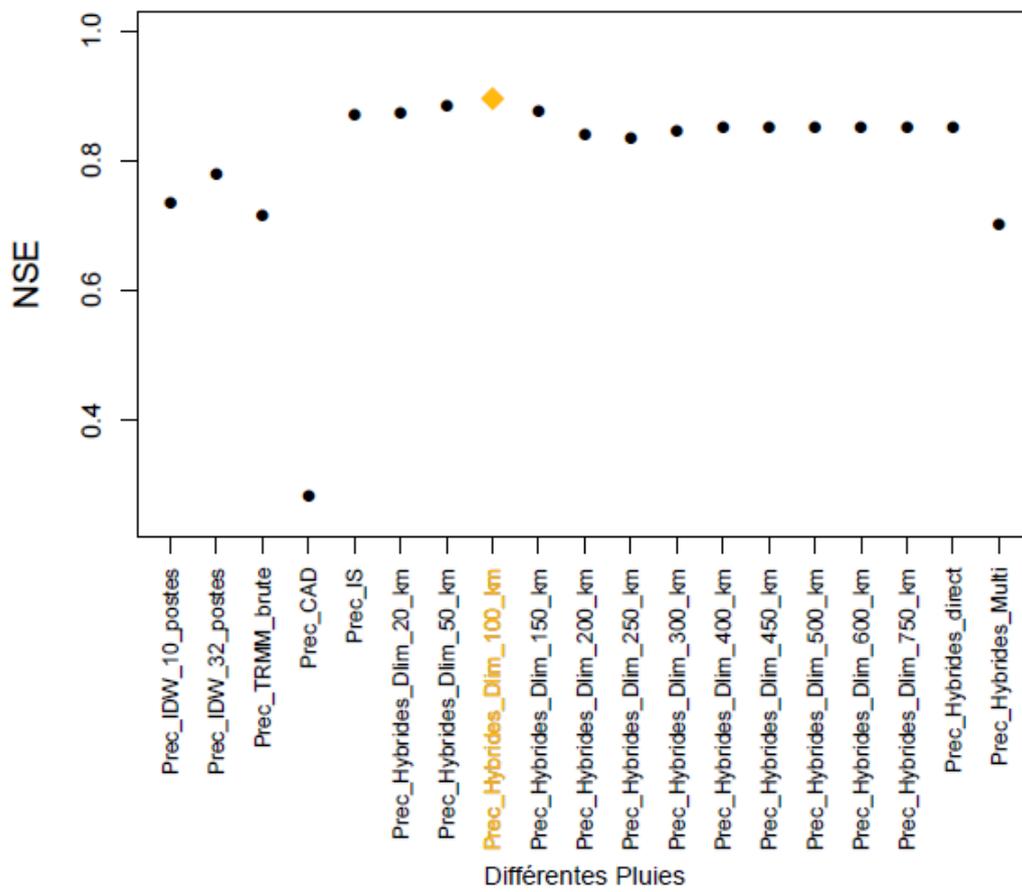


FIGURE 29 – Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant de l'Oyapock à Saut Maripa

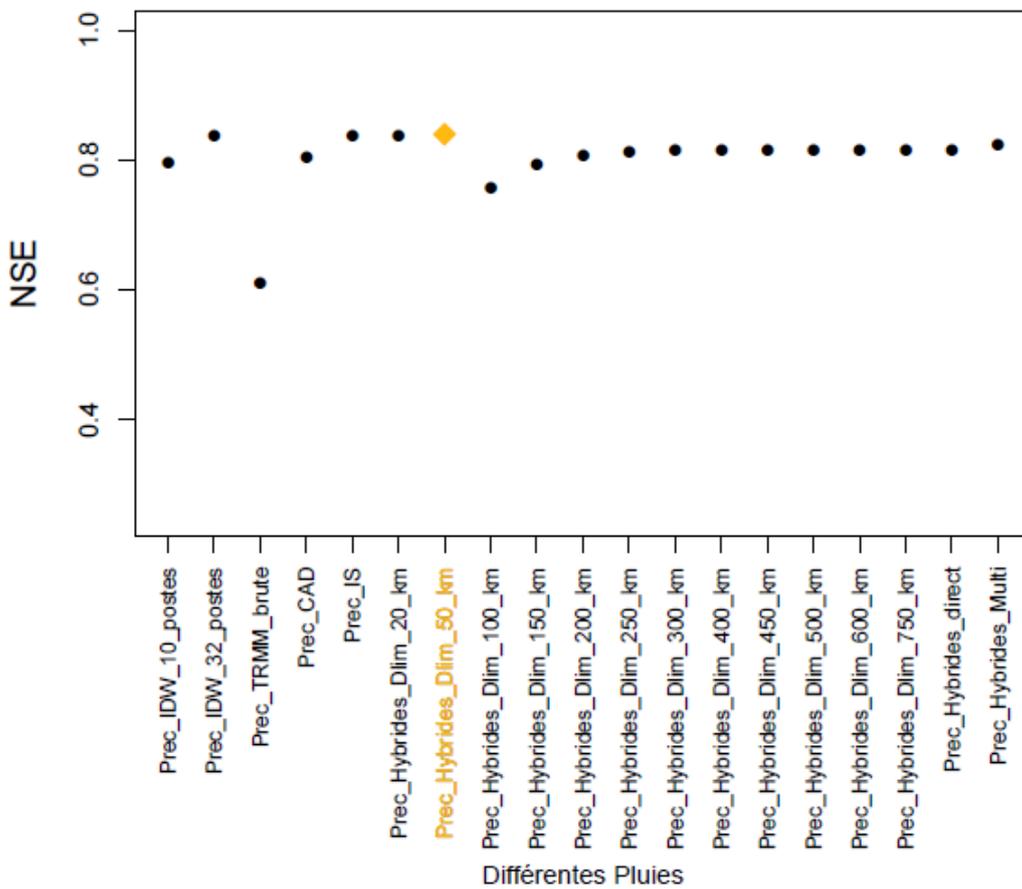


FIGURE 30 – Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant de la Mana à Saut Sabbat

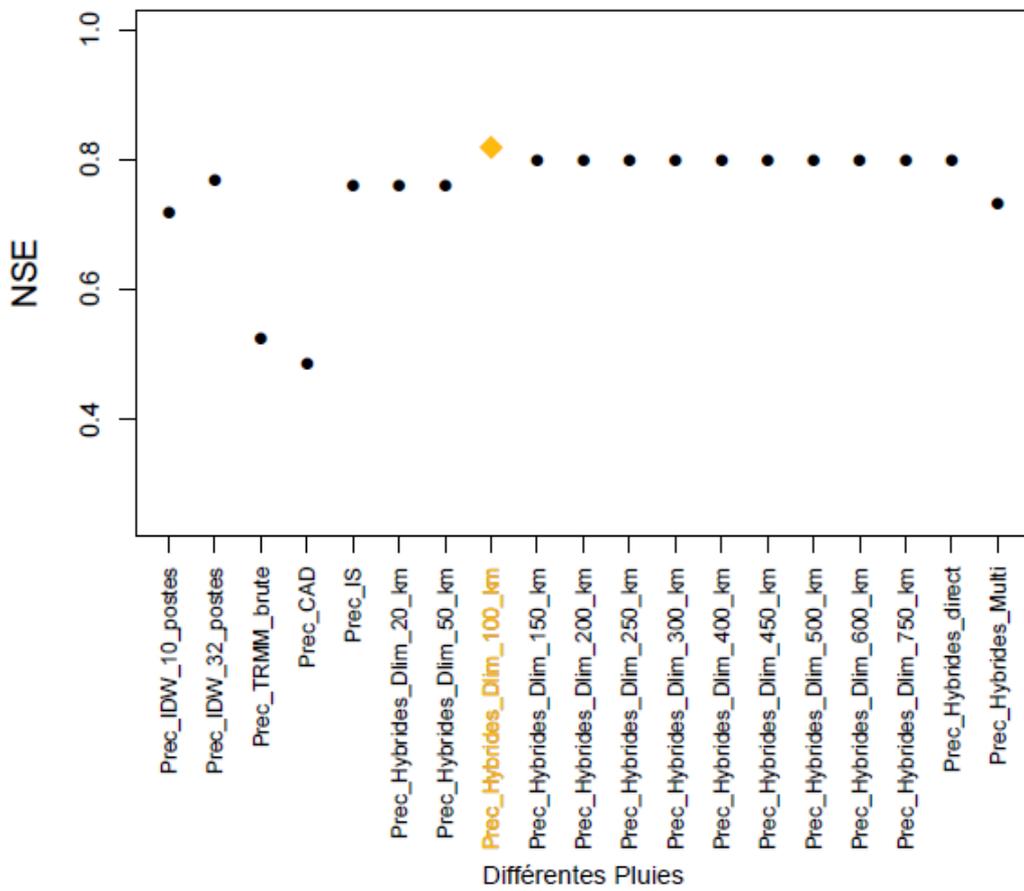


FIGURE 31 – Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant de l’Approuague à Saut Athanase

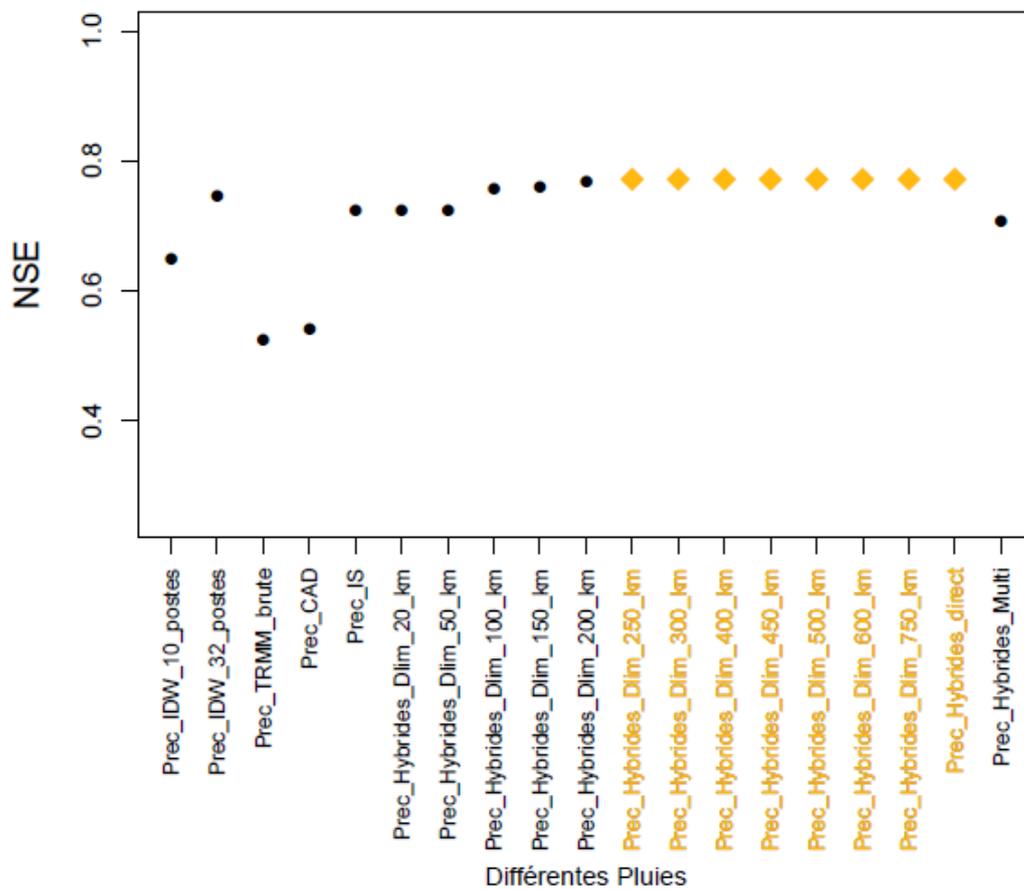


FIGURE 32 – Evolution du NSE pour chaque simulation sur le bassin versant la Comté à Saut Bief

On remarque que pour cinq bassins sur six, les NSE associés aux pluies hybrides limitées par un palier de distance sont supérieurs aux NSE des pluies IS ; seul le bassin du Maroni à Langa Tabiki conserve la pluie IS comme pluie optimale pour la modélisation hydrologique, avec un NSE de 0.83 (cf figure 27). Pour les cas restants, c'est majoritairement avec un palier de distance compris entre 20 et 100km que les NSE sont les plus importants ; sauf pour le bassin de la Comté à Saut Bief, dans la région de Régina, marquée par les plus fortes pluies. Dans ce cas là, le NSE est le plus important soit pour les fortes valeurs de palier, soit pour la pluie hybride directe. Pour ce bassin, à partir de 200km, le NSE est le même que celui de la pluie hybride directe où on ne considère pas de palier de distance, il accepte les 10 postes disponibles comme référence (cf figure 32).

Il y a donc quatre bassins marqués par un palier limite de distance au delà duquel la simulation se dégrade (cf figures 11 à 31). Ce palier est compris entre 20 et 100km, et semble le plus optimal pour corriger la pluie IS avec la méthode CAD, même pour les bassins du Maroni à Langa Tabiki et de la Comté à Saut Bief où les NSE associés à ces paliers sont proches des NSE max de chaque bassin. L'hybridation de la correction IS avec la méthode CAD par palier de distance permettrait d'obtenir un produit de pluie satellitaire plus performant que la pluie IS pour la modélisation hydrologique.

Enfin, on constate que pour les quatre bassins sur lesquels les NSE sont les plus performants avec un palier entre 20 et 100km, les NSE se dégradent quand le palier augmente jusqu'à 200 à 300 km, et augmentent avec le palier quand on passe les 300km, on observe une cuvette dans la courbe des NSE. Pour expliquer ce phénomène, notre hypothèse est que les postes proches des pixels peuvent avoir un écart conséquent avec la valeur des pixels, ce qui dégrade la simulation, mais qu'en considérant les postes les éloignés, on tempère cette influence et on introduit plus de stabilité ; c'est un phénomène certainement associé à l'abattement entre le pixel et le poste.

Conclusion

Nous avons vu que la pluie TRMM brute est difficilement exploitable en l'état pour la modélisation hydrologique. Elle nécessite un post-traitement, et nous avons vu deux corrections proposées par MétéoFrance, la méthode CAD, et Irstea, la correction IS.

La méthode CAD est une méthode datée qui consiste à corriger la pluie en lui additionnant un facteur correcteur, pondéré par IDW (interpolation selon l'inverse de la distance) en fonction du réseau pluviométrique. En théorie, plus il y a de stations pluviométriques à proximité, plus cette correction est efficace.

De son côté, la correction IS propose de définir des échelles d'intensité à dépendance spatiale et saisonnière, par des moyennes glissantes entre des observations aux postes pluviométriques et les estimations de TRMM. C'est une correction non datée.

Plusieurs outils ont été utilisés pour déterminer le produit le plus adapté entre ces trois là pour simuler un débit :

- l'analyse des hydrogrammes sur la chronique complète puis plus précisément sur une période humide et sur une période sèche.
- la comparaison des débits simulés aux débits observés sur ces trois cas.
- l'analyse des valeurs du NSE de chaque simulation.
- Un test de robustesse par simulation via le Split-Sample Test.

Nous avons conclu précédemment que la correction IS est plus efficace pour la modélisation hydrologique que la méthode CAD. Notre hypothèse était que la correction IS considère l'abattement des pluies, comme elle fonctionne sur un principe de moyenne, ce que ne fait pas la méthode CAD, qui est pénalisée par la différence d'échelle surfacique entre le poste pluviométrique et le pixel de TRMM.

Cependant, nous avons aussi vu que la correction IS présentait des défauts, comme une non prise en compte des pluies nulles ou une sous-estimation des fortes pluies. C'est pourquoi par la suite nous avons cherché à hybrider nos deux post-traitements statistiques, selon plusieurs méthodes, en les comparant à la correction IS choisie comme référence à surpasser :

- Hybridation directe : non retenue car amélioration pour seulement un bassin sur six,
- Hybridation par palier de distance : amélioration du produit pour quatre bassins sur six.
- Application d'une correction multiplicative pondérée par IDW sur la correction IS : même principe que pour la méthode CAD mais la correction est multiplicative et non additive. Non retenue car dégradation des résultats dans chaque cas par rapport à la correction IS.
- Pluie réelle interpolée : on tente de se passer de la pluie satellitaire et on interpole directement la pluie réelle. Non retenue que seul dix postes sont disponibles en temps réel et avec un produit issue d'une interpolation entre ces dix postes, la simulation est dégradée par rapport à la correction IS sur l'ensemble des bassins.

La méthode d'hybridation par palier de distance semble sortir du lot par rapport à toutes celles testées, elle présente les meilleures performances. Il serait intéressant d'approfondir cette méthode, pour tenter de la rendre opérationnelle sur l'ensemble de la Guyane française. Une des possibilités serait d'insérer la composante distance de façon continue et non découpée par palier comme c'est le cas actuellement.

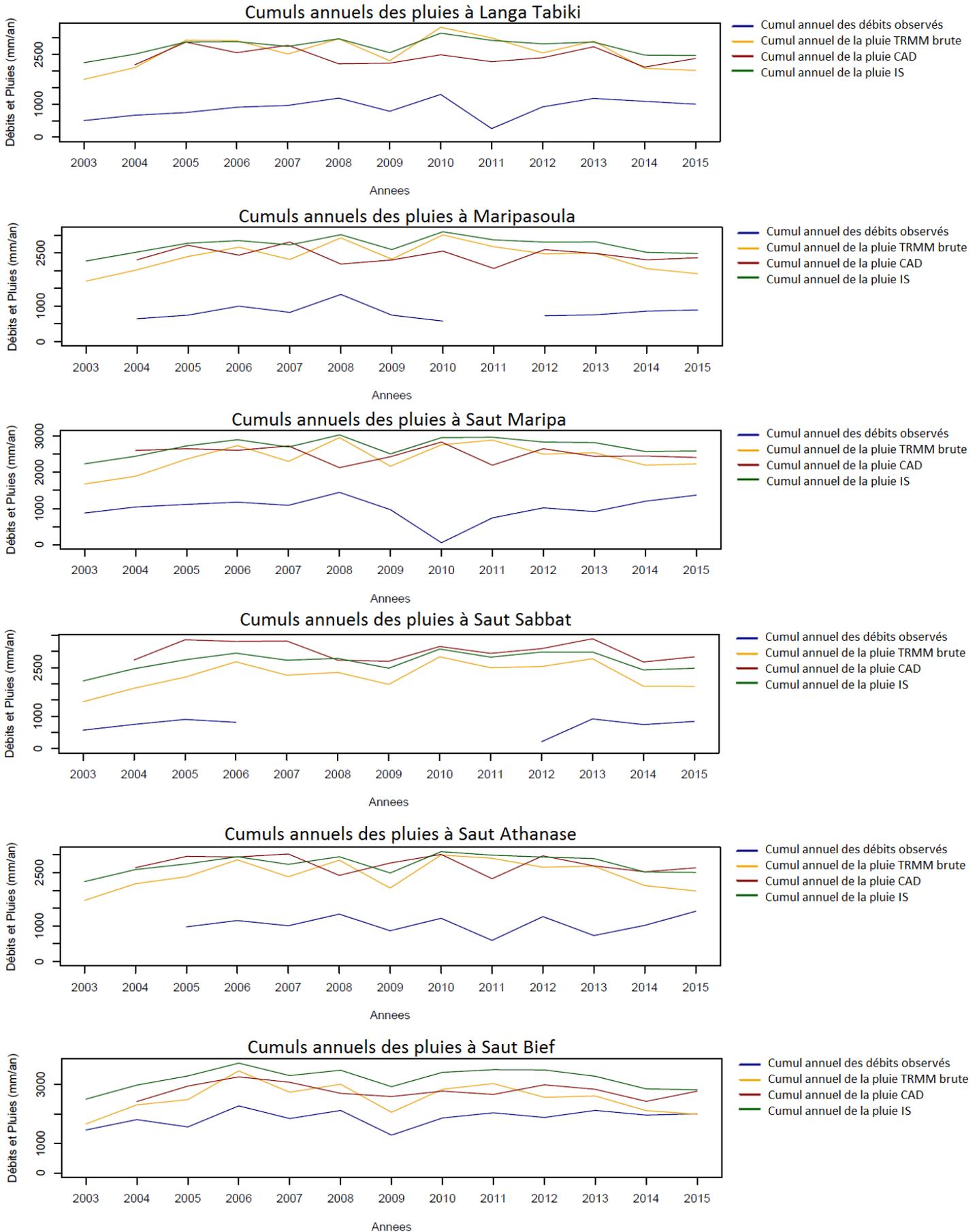
Si ce produit peut être amélioré, ce serait un bon substitut à la pluie satellite pour la modélisation hydrologique en Guyane française.

Références

- BEAUFORT, A., GIBIER, F. et PALANY, P. (2016). Estimation des pluies satellites et simulation des humidités de sol en Guyane. Rapport de fin de mission, MétéoFrance.
- BROCHART, D. et ANDREASSIAN, V. (2013). Correction des estimations des pluies par satellite pour les bassins versants de Guyane française. Rapport technique, Onema, Charpy, Irstea, Antony, France.
- BROCHART, D., ANDREASSIAN, V. et PERRIN, C. (2013). Évaluation hydrologique des produits satellitaires de pluie en Guyane. Rapport technique, Onema, Irstea, Ministère de l'Ecologie et de l'Environnement.
- BROCHART, D., ANDREASSIAN, V., PERRIN, C. et MONFORT, M. (2014). Confronting intensity scaling to quantile mapping for the real time correction of satellite-based rainfall estimates : test over French Guiana. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Non publié.
- CORON, L., THIREL, G., DELAIGUE, O., PERRIN, C. et ANDREASSIAN, V. (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R Package. *Environmental Modelling and Software*, 94:166–171.
- LOBLIGEOIS, F. (2014). *Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français*. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, Irstea, Antony, France.
- PERRIN, C., ANDREASSIAN, V. et MICHEL, C. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279:275–289.
- PIANI, C., WEEDON, G. P., BEST, M., GOMES, S. M., VITERBO, P., HAGEMANN, S. et HAERTER, J. O. (2010). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3–4):199–215.
- RINGARD, J., BECKER, M., SEYLER, F. et LINGUET, L. (2015). Temporal and Spatial Assessment of Four Satellite Rainfall Estimates over French Guiana and North Brazil. *REMOTE SENSING*, 7(12):16441–16459.

Annexe 1

Cumuls annuels pour chaque bassin



Résumé

Nous analysons ici deux méthodes de correction des pluies satellitaires, une Correction Additive Datée (méthode CAD), qui corrige les pixels satellitaires suivants les données de pluies observées aux postes pluviométriques pondérées par IDW ; et une correction par échelle d'intensité (correction IS), déterminé par la moyenne glissante entre pluie satellitaire et pluie observée. Nous nous plaçons du point de vue de l'hydrologue ; c'est-à-dire en évaluant les produits en fonction de leur capacité à reproduire un débit, via un modèle hydrologique pluie-débit.

Nous observons que les deux méthodes de post-traitement permettent d'améliorer la simulation des débits par rapport à la pluie TRMM brute ; cependant la correction IS obtient des performances systématiquement plus élevées, de façon surprenante. Notre analyse tend à montrer que l'avantage de la correction IS est qu'elle va beaucoup plus loin dans l'atténuation des fortes valeurs des pluies brutes, parce qu'elle prend en compte l'effet d'abatement des pluies, ce que la méthode CAD semble ne pas faire. Néanmoins, la correction IS est imparfaite, et une hybridation par palier de distance des deux post-traitements améliore la simulation et permettrait de faire de la prévision hydrologique en Guyane française.