



**HAL**  
open science

## Prévision des crues en Guyane grâce au modèle GRP

Antoine Pelletier

► **To cite this version:**

Antoine Pelletier. Prévision des crues en Guyane grâce au modèle GRP. Hydrologie. 2017. hal-02608696

**HAL Id: hal-02608696**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02608696v1>**

Submitted on 16 May 2020

**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.

---

# Rapport de projet d'ingénieur en laboratoire

## Prévision des crues en Guyane grâce au modèle GRP

Antoine PELLETIER

*Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement  
et l'agriculture*

*Équipe HBAN-Hydro*

**Encadrants** : Julie VIATGÉ et Vazken ANDRÉASSIAN



# Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mes encadrants de stage, Julie VIATGÉ et Vazken ANDRÉASSIAN, qui m'ont accompagné tout au long de ce travail.

Je remercie également mes compagnons de bureau, Léonard SANTOS et Cédric REBOLHO, pour m'avoir accueilli avec la plus grande sympathie.

Je remercie Charles PERRIN, animateur de l'équipe Hydrologie, ainsi que tous les membres de l'équipe, pour m'avoir permis de vivre une expérience qui, bien que courte, fut scientifiquement très riche.

Je remercie enfin tous ceux qui, à l'École des Ponts comme à IRSTEA, ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet.

# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>I Contexte de l'étude</b>	<b>4</b>
<b>1 La prévision des crues : généralités</b>	<b>4</b>
1.1 Principe . . . . .	4
1.2 Différents modèles pluie-débit . . . . .	6
<b>2 Le modèle GRP et ses utilisations</b>	<b>6</b>
2.1 Présentation . . . . .	6
2.2 Fonctionnement . . . . .	7
2.3 Utilisation en calage-contrôle . . . . .	10
<b>3 Le bassin du Maroni</b>	<b>11</b>
3.1 Éléments de géographie . . . . .	11
3.2 Données hydrologiques . . . . .	12
3.3 Données météorologiques . . . . .	13
<b>II L'utilisation de GRP en Guyane</b>	<b>16</b>
<b>1 Historique : l'étude du CEREMA</b>	<b>16</b>
1.1 Présentation . . . . .	16
1.2 Données d'entrée . . . . .	16
1.3 Paramètres testés . . . . .	17
1.4 Résultats . . . . .	18
<b>2 Pistes d'amélioration des performances</b>	<b>18</b>
<b>III Construction des schémas de répartition journalière des pluies</b>	<b>20</b>
<b>1 Principe</b>	<b>20</b>
<b>2 Découpage temporel et spatial</b>	<b>20</b>
2.1 Découpage temporel . . . . .	20
2.2 Découpage spatial . . . . .	21
<b>3 Calage du modèle bêta-rectangulaire</b>	<b>22</b>
<b>IV Nouvelles performances du modèle</b>	<b>25</b>
<b>1 Paramètres et données d'entrée</b>	<b>25</b>
1.1 Données d'entrée . . . . .	25
1.2 Paramètres d'entrée : . . . . .	25

<b>2 Résultats</b>	<b>26</b>
2.1 Critères de performance du modèle . . . . .	26
2.1.1 Maripasoula . . . . .	26
2.1.2 Langa Tabiki . . . . .	29
2.2 Commentaires . . . . .	31
<b>Conclusion</b>	<b>34</b>
<b>Références</b>	<b>34</b>

# Introduction

Si des modèles de prévision des crues fonctionnels sont aujourd’hui largement utilisés au quotidien par les services de l’État en France métropolitaine, ce n’est pas le cas des départements d’outre-mer, dont les conditions climatiques particulières rendent les outils développés pour la Métropole inadaptés. C’est le cas du modèle GRP, en usage opérationnel dans près de la moitié des bassins versants métropolitains mais dont les tests en Guyane se sont pour l’instant infructueux.

Le but de la présente étude, en se fondant sur le retour d’expérience d’un essai d’utilisation du modèle GRP en Guyane, est d’explorer des pistes d’amélioration de ses performances par des modifications incrémentales de son fonctionnement, dans le but d’éviter la mise en place de modèles plus lourds comme les modèles semi-distribués. La première partie propose une mise en contexte de l’étude à travers une introduction aux concepts de la prévision des crues, une présentation du modèle GRP et du territoire concerné ; la deuxième partie résume le retour d’expérience de l’étude passée qui sert de base à la présente et expose les pistes d’améliorations envisagées ; la troisième partie détaille une construction technique utile à l’implémentation de la première piste ; enfin, la quatrième partie est consacrée aux résultats de cette étude et aux conclusions qui en sont tirées.

## Première partie

# Contexte de l'étude

## 1 La prévision des crues : généralités

### 1.1 Principe

La prévision des crues dite « pluie-débit » repose sur un principe simple : si l'on considère un bassin versant sur lequel on dispose de données de précipitations, on doit pouvoir prédire le débit à l'exutoire de ce bassin versant. La connaissance du débit permet ensuite d'estimer la hauteur d'eau à l'exutoire et de déterminer s'il on est en situation de crue. La fonction de transfert entre les données de précipitations et le débit de sortie est déterminée au moyen de modélisations hydrologiques appelées « modèles pluie-débit ».

Il existe différents types de modèles, mais la plupart reposent sur un système d'équations à paramètres dont il faut déterminer les valeurs les plus représentatives du comportement du bassin versant considéré. Pour cela, on effectue un *calage* du modèle à partir de données de pluie et de débit historiques, appelées *chroniques*. Une fois connues les valeurs des paramètres, le modèle peut alors fonctionner en mode *prévision* à partir de données de précipitations issues de prévisions météorologiques.

En France, la prévision des crues est assurée par les 22 SPC (Services de Prévision des Crues) en France métropolitaine et par les CVH (Cellules de Veille Hydrologique) dans les collectivités d'outre-mer ; l'ensemble est coordonné par le SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), basé à Toulouse. Ces services fonctionnent 24h/24h, de manière à assurer une veille hydrologique permanente sur les cours d'eau suivis par l'État. L'ensemble des prévisions en Métropole est consultable sur le site Internet Vigicrues. La figure 2 montre la carte des SPC métropolitains.

Le développement de modèles pluie-débit est contraints par plusieurs exigences :

- la *robustesse* des modèles, qui doivent pouvoir fonctionner de manière fiable même avec des données lacunaires ou imparfaites : les chroniques de pluie et de débit sont rarement dénuées d'erreur, et les prévisions météorologiques sont évidemment soumises à incertitude ;
- la *simplicité* des modèles, qui doivent pouvoir prédire en temps réel : les capacités de calcul des services de l'État sont limitées, des modèles trop complexes ne pourraient pas être utilisés opérationnellement ;
- la facilité de prise en main des modèles, que même des personnels non spécialistes doivent pouvoir utiliser.

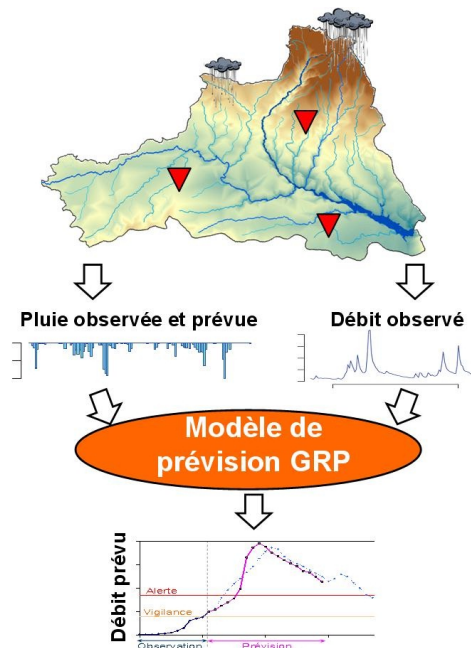


FIGURE 1 – Principe général de la prévision pluie-débit et de l’alerte Vigicrues.

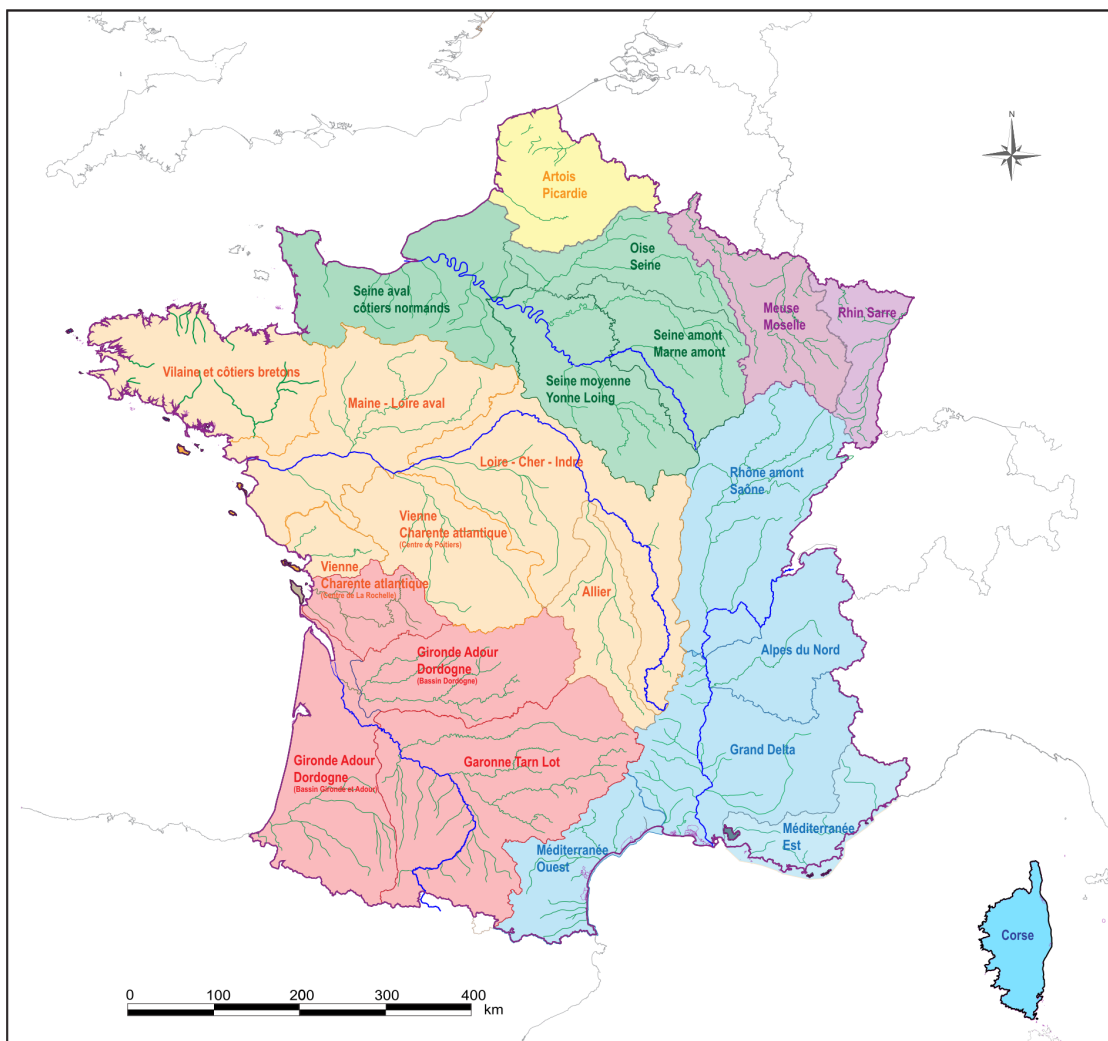


FIGURE 2 – Carte des SPC en France métropolitaine.

## 1.2 Différents modèles pluie-débit

Il existe de nombreux modèles pluie-débit, chacun étant développé dans une optique différente : prévision des crues ou des étiages, horizon temporel de prédiction, nature des données d'entrée... On distingue notamment :

- les modèles physiques, incorporant des modélisations hydrodynamiques du bassin versant, des modèles *conceptuels*, qui représentent le stockage d'eau par le bassin versant au moyen d'un ou plusieurs réservoirs ;
- les modèles *globaux*, qui travaillent sur des variables moyennées à l'échelle du bassin versant, des modèles *distribués* utilisant un découpage plus ou moins fin du bassin versant - en sous-bassins versants, voire en pixels d'un modèle numérique de terrain ;
- les modèles de prévision des crues, faits pour rendre compte fidèlement des pics de débit - souvent des épisodes courts, de l'ordre de quelques jours - des modèles de prévision des étiages, à échelle de temps plus longue ;
- les types de précipitations pris en compte, soit la pluie uniquement, soit les prévisions solides également ;
- les *pas de temps* des modèles, qui correspondent à l'écart temporel entre deux valeurs de débit en sortie : on distingue des modèles horaires (les plus utilisés pour la prévision des crues opérationnelle), des modèles journaliers, mensuels ou annuels.

Parmi les modèles développés à IRSTEA, on peut citer le modèle journalier GR4J : il s'agit d'un modèle global fonctionnant au pas de temps journalier, avec quatre paramètres à optimiser en calage. GR5J et GR6J, des versions à cinq et six paramètres existent également ; elles sont notamment utilisées en prévision des étiages. Ce modèle est disponible en *open source*, dans le module *airGR* pour le langage R.

## 2 Le modèle GRP et ses utilisations

### 2.1 Présentation

Le modèle développé à IRSTEA le plus utilisé pour la prévision opérationnelle des crues est le modèle GRP (modèle du Génie Rural pour la Prévision des crues). Il s'agit d'un modèle hydrologique conceptuel, conçu pour la prévision des débits à court terme lors d'épisodes de crues ; il n'est en particulier pas adapté à la prévision des étiages. C'est un modèle **global** - une version semi-distribuée, TGR, existe cependant - **continu** - il utilise un historique des conditions passées précédant l'événement en cours, ce qui nécessite un chronique pluviométrique non lacunaire en entrée - et doté d'une **structure à réservoirs**, c'est-à-dire qu'un bassin versant est représenté par un ensemble de réservoirs dont le remplissage est régi par un système d'équations différentielles.

Contrairement à GR4J, il fonctionne au **pas de temps horaire**, ce qui le rend particulièrement adapté à la prévision en temps réel des crues. Il est d'ailleurs utilisé ou en cours de test dans plus de la moitié des SPC métropolitains ; son développement s'est fait dans le cadre d'une convention passée entre la DGPR (Direction générale de prévention des risques, une direction centrale du ministère chargé du développement durable) et IRSTEA. Il a été testé sur plus



d'un millier de bassins versants métropolitains, ce qui lui a conféré une bonne adaptabilité. Il ne comporte que trois paramètres, ce qui lui confère une bonne robustesse face aux erreurs sur les données d'entrée. Il dispose également d'un module neige nommé CemaNeige, indispensable dans les bassins métropolitains significativement influencés par la neige.

## 2.2 Fonctionnement

Le modèle prend en entrée quatre types de données :

- une chronique de précipitations, nécessairement continue - sans lacunes - au pas de temps horaire, pour un ou plusieurs stations pluviométriques réparties dans le bassin versant ;
- une chronique d'évapotranspiration potentielle (ETP), représentant la quantité d'évaporation pouvant se produire en cas de d'approvisionnement en eau suffisant. Le modèle n'est pas très sensible aux variations de cette donnée d'entrée, aussi une chronique journalière peut être utilisée ;
- une chronique de température, au pas de temps horaire, utilisée par le module neige ;
- une chronique de débits passés, au pas de temps horaire, utilisé pour le calage. Elle peut comporter des lacunes, contrairement à la chronique de pluie.

Le fonctionnement du modèle en mode simulation - une fois les paramètres calés - va maintenant être exposé pour un pas de temps ; il est représenté sur le schéma de la figure 3.

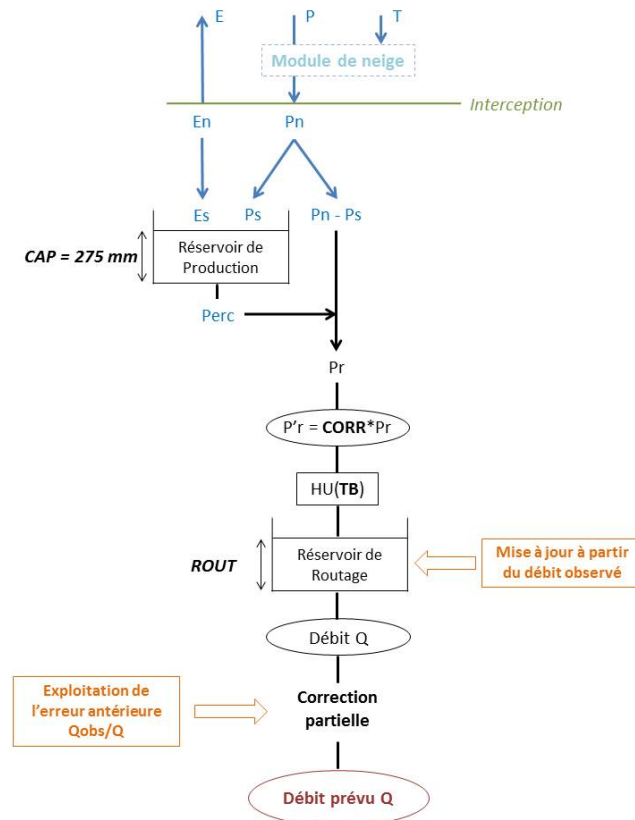


FIGURE 3 – Schéma de fonctionnement du modèle GRP.

**Interception :** les précipitations sont d'abord corrigées par l'ETP, pour en déduire la lame d'eau qui ruisselle effectivement, selon les équations :

- si  $P \geq E$ , alors  $P_n = P - E$  et  $E_n = 0$ ;
- si  $P < E$ , alors  $P_n = 0$  et  $E_n = E - P$ .

**Réservoir de production :** si  $P_n > 0$ , le réservoir de production, de capacité fixe  $CAP = 275mm$ , se remplit d'une quantité  $P_s$ ; si  $E_n > 0$ , il se vide par évaporation d'une quantité  $E_s$ . Ce réservoir se vide aussi par percolation souterraine d'une quantité  $Perc$ . Ces grandeurs sont régies par les équations suivantes, avec  $S$  le niveau de remplissage du réservoir :

$$P_s = \frac{CAP \cdot \left[1 - \left(\frac{S}{CAP}\right)^2\right] \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{CAP}\right)}{1 + \frac{S}{CAP} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{CAP}\right)} \text{ et } E_s = 0 \text{ si } P_n > 0$$

$$E_s = \frac{S \cdot \left(2 - \frac{S}{CAP}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{CAP}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{CAP}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{CAP}\right)} \text{ et } P_s = 0 \text{ si } E_n > 0$$

On met ensuite à jour le niveau du bassin :

$$S = S - E_s + P_s$$

Puis on calcule la percolation :

$$Perc = S \left(1 - \left[1 + \left(\frac{S}{5 \cdot CAP}\right)^4\right]^{-0,25}\right)$$

On met enfin à jour encore une fois le niveau du bassin :

$$S = S - Perc$$

**Pluie efficace :** on peut maintenant calculer la quantité d'eau allant effectivement alimenter l'écoulement, notée  $P_r$ , par la formule suivante :

$$P_r = Perc + P_n - P_s$$

Un facteur de correction  $Corr$ , l'un des paramètres à caler du modèle, permet de tenir compte d'éventuels échanges avec des nappes profondes ou d'autres bassins versants - phénomènes karstiques par exemple. La pluie efficace corrigée est alors :

$$P_{r'} = P_r \cdot Corr$$

**Hydrogramme unitaire :** on doit tenir compte du décalage temporel entre pluie et débit ; l'hydrogramme unitaire du module de transfert remplit cette fonction, par une fonction de transfert  $HU(k)$  ainsi définie, avec  $T_B$  le temps de base qui est un des paramètres à caler du modèle.

$$HU(k) = 0 \text{ si } k \leq 0$$

$$HU(k) = 0 \text{ si } k > T_B$$

$$HU(k) = \frac{k^{1.25}}{k^{1.25} + (T_B - k)^{1.25}} - \frac{(k - 1)^{1.25}}{(k - 1)^{1.25} + (T_B - k + 1)^{1.25}} \text{ sinon.}$$

Le débit transféré est alors calculé par un produit de convolution, avec  $t$  l'instant auquel on souhaite prédire le débit :

$$Q_{HU}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} P_r(t - k + 1) \cdot HU(k)$$

On voit alors que le modèle utilise les pluies efficaces des  $T_B$  derniers pas de temps pour déterminer le débit à l'instant présent.

**Réservoir de routage :** le transfert de l'écoulement est ensuite assuré par un réservoir de routage de capacité  $ROUT$ , qui est le troisième et dernier paramètre à caler du modèle. Le niveau du réservoir de routage au pas de temps est noté  $R_t$ , il est mis à jour par :

$$R_{t+1} = \frac{R_t \cdot ROUT}{ROUT + R_t}$$

Le débit en sortie du réservoir est alors :

$$Q(t + 1) = R_t - R_{t+1} = \frac{R_t^2}{R_t + ROUT}$$

**Assimilation des données :** le modèle GRP peut fonctionner en mode simulation simple, mais dans un contexte de prévisions opérationnelles, on dispose en général de la donnée de débit observée au moment de la prévision (transmise en temps réel par le réseau hydrométrique), ce qui permet de corriger les écarts parfois importants trouvés entre débit simulé et débit observé. On prend en compte cette donnée en deux étapes :

- on met à jour le niveau du réservoir de routage au pas de temps antérieur, pour que le débit en sortie du réservoir déterminé par l'équation ci-avant soit égal au débit observé ;
- on utilise l'erreur de prédiction faite par le modèle au pas de temps précédent, soit par une méthode auto-régressive simple appelée *méthode Tangara*, soit par un réseau de neurones artificiels.

Les détails de cette assimilation de donnée, assez complexes, ne seront pas détaillés ici.

En résumé, le modèle GRP est composé de trois parties :

- un **module de production**, qui représente la fonction de transfert entre les précipitations et la lame d'eau contribuant effectivement à l'écoulement dans l'exutoire ;

- un **module de transfert**, qui modélise le comportement temporel du bassin versant ;
- un **module de correction**, qui corrige l’erreur de prédiction du modèle par rapport aux débits observés.

Il comporte trois paramètres à caler :

- $CORR$ , le coefficient d’ajustement de la pluie efficace (sans dimension) ;
- $ROUT$ , en mm, la capacité du réservoir de routage ;
- $TB$ , en h, le temps de base de l’hydrogramme unitaire.

La capacité  $CAP$  du réservoir de production a été fixée à 275 mm, car la laisser libre n’apportait pas de gains de performance significatifs et rendait plus difficile l’optimisation. Le tableau 1 donne la répartition usuelle des paramètres pour les bassins métropolitains.

	$CORR$	$T_B$ (h)	$ROUT$ (mm)
Quantile 10 %	0,50	0,50	240
Médiane	0,84	8,0	935
Quantile 90 %	1,28	31,5	4109

TABLE 1 – Valeurs des quantiles des paramètres de GRP calé sur les bassins métropolitains.

## 2.3 Utilisation en calage-contrôle

Un mode d’utilisation particulier du modèle GRP, adapté à l’évaluation de ses performances globales sur une chronique passée, est la procédure dite de *calage-contrôle*. Le principe est le suivant : on donne à GRP en entrée une chronique de pluie, de débit observé, d’ETP et éventuellement de température si l’on doit utiliser le module neige, toutes ces chroniques étant sur le même intervalle de temps continu - des lacunes dans les chroniques de débit et d’ETP sont possibles. Ensuite, cet intervalle est divisé en deux périodes  $P_1$  et  $P_2$  égales ; le modèle est d’abord calé sur  $P_1$ , puis le débit est simulé sur  $P_2$  avec les paramètres issus du calage et on évalue les performances du modèle en simulation. On répète ensuite ces opérations en inversant les deux périodes.

On doit également spécifier au modèle trois paramètres :

- l’**horizon de calage**, qui correspond à l’horizon de prévision pour lequel on veut optimiser le calage des paramètres du modèle. Il est en général de 24 à 72 h ;
- le **seuil de calage**, qui est la valeur limite de débit en-deça de laquelle on ne prend pas en compte les données de débit pour le calage. Cela permet d’optimiser le calage sur les pics de crue et non pas sur les valeurs basses, GRP n’étant de toute façon pas adapté à la prévision des étiages ;
- le **seuil de vigilance**, qui est le seuil de débit au-delà duquel le cours d’eau est considéré comme en crue. Il est utilisé dans le calcul des performances du modèle.

L’évaluation des performances du modèle se fait grâce à deux classes de critères :

**Erreurs quadratiques moyennes :** On calcule à partir des erreurs quadratiques moyennes entre le débit observé  $Q_{obs}$  et le débit prévu  $Q_{prev}$  un critère d’efficacité du modèle sur la période

de contrôle :

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i+L) - Q_{prev}(i+L))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i+L) - Q_{obs}(i))^2}$$

$L$  est l'horizon de calage considéré. Ce critère peut prendre toutes les valeurs entre  $-\infty$  et 1, un bon modèle dépassant en général les 0,7.

**Table de contigence :** Connaissant le seuil de vigilance, on peut calculer le nombre de dépassement de ce seuil dans la chronique des débits observés et dans celle des débits prévus, et en regarder les correspondances. On se trouve alors face à quatre situations :

- $a$  : alerte valable, le seuil est dépassé par l'observation et la prévision ;
- $b$  : fausse alerte, le seuil est dépassé par la prévision mais pas par l'observation ;
- $c$  : alerte manquée, le seuil est dépassé par l'observation mais pas par la prévision ;
- $d$  : non alerte valable, le seuil n'est dépassé ni par l'observation ni par la prévision.

On compte alors le nombre d'occurrences de ces situations sur toute la période de contrôle et on calcule les critères suivants :

**La probabilité de détection :** probabilité qu'une alerte ayant effectivement lieu ait été prévue, donnée par :

$$POD = \frac{a}{a+c}$$

**Le taux de fausses alertes :** proportion des fausses alertes au sein de l'ensemble des dépassements prévus, donnée par :

$$FAR = \frac{b}{a+b}$$

**L'indice de succès critique :** proportion de succès dans les alertes et les non-alertes du modèle, donnée par :

$$CSI = \frac{a}{a+b+c}$$

Un bon modèle doit avoir une bonne  $POD$  et un bon  $CSI$ , ainsi qu'un faible  $FAR$ .

## 3 Le bassin du Maroni

### 3.1 Éléments de géographie

Le Maroni est un fleuve d'Amérique du Sud, dont la rive droite fait office, sur la plus grande partie de son cours long de 612 km, de frontière entre le Suriname et le département français d'outre-mer de Guyane. Le cours d'eau se nomme Lawa dans sa partie supérieure, jusqu'à sa

confluence avec la rivière Tapanahoni qui coule du Suriname. C'est une voie de communication privilégiée avec l'intérieur de la Guyane et la commune de Saint-Laurent-du-Maroni, deuxième ville de Guyane, se situe près de son embouchure dans l'Océan Atlantique.

Cinq stations hydrométriques équipent le fleuve - d'amont en aval, Taluen, Maripasoula, Papaïchton, Grand Santi et Langa Tabiki - mais seules les stations de Maripasoula et Langa Tabiki disposent de chronique de débit assez longues et d'assez bonne qualité pour être utilisées avec GRP. La station de Langa Tabiki draine un bassin versant de 62 320 km<sup>2</sup>, majoritairement situé au Suriname ; la station de Maripasoula, quant à elle, draine un bassin versant de 27 900 km<sup>2</sup>, essentiellement situé en Guyane française. La figure 4 montre une représentation cartographique de ces bassins versants.

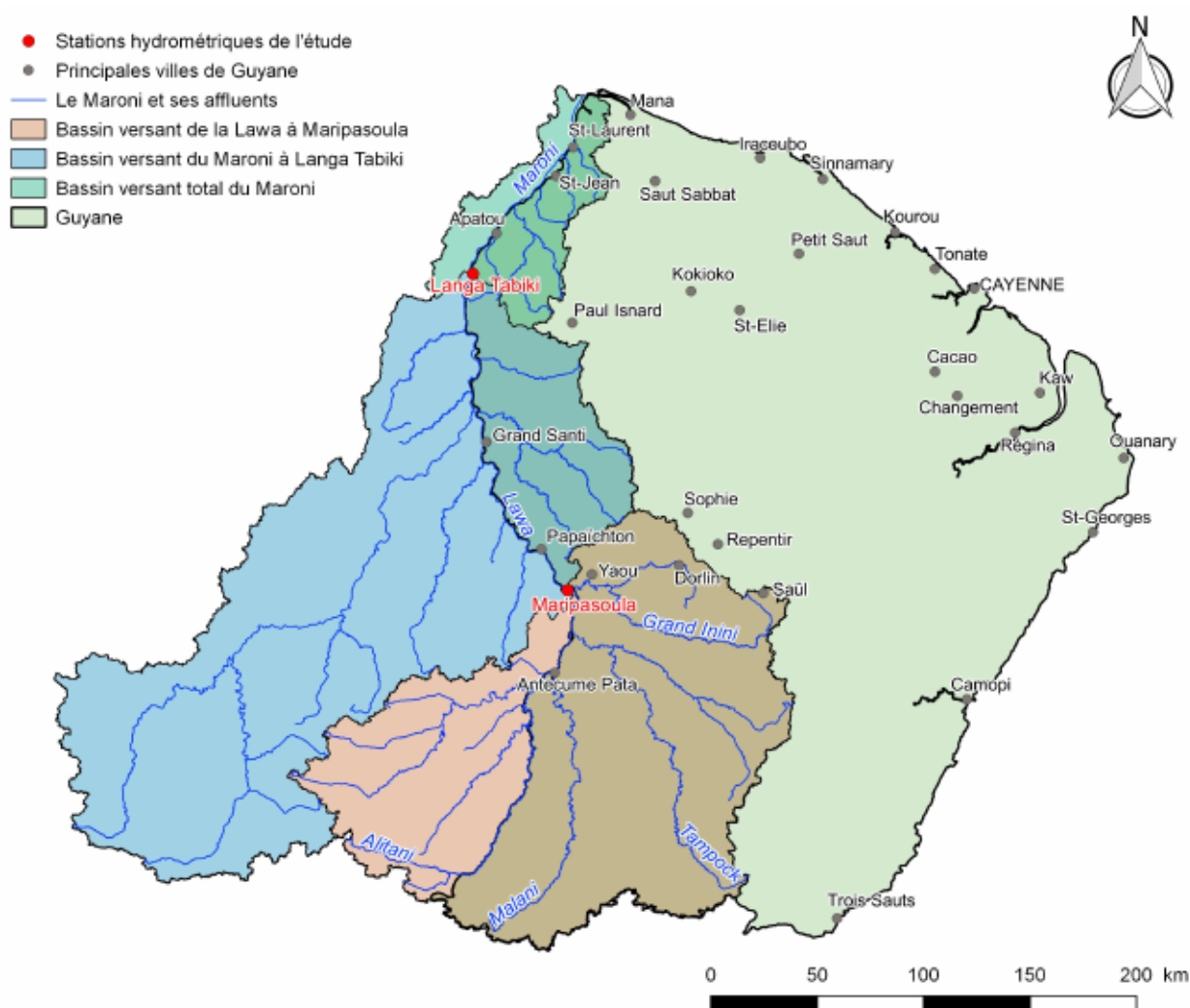


FIGURE 4 – Bassin versant du Maroni et sous-bassins à Langa Tabiki et Maripasoula.

### 3.2 Données hydrologiques

À Langa Tabiki, le débit moyen interannuel est de 1720 m<sup>3</sup>/s, ce qui donne un débit spécifique de 28,2 l/s/km<sup>2</sup> et une lame d'eau annuelle de 890 mm, ce qui est largement supérieur à ce qu'on observe sur les fleuves métropolitains. La station de Maripasoula étant située bien en amont, le débit interannuel y est plus faible - 756 m<sup>3</sup>/s - mais le débit spécifique y est proche -

26,7 l/s/km<sup>2</sup> - ce qui montre que les deux bassins versants sont pareillement productifs. La figure 5 montre l'évolution annuelle des débits spécifiques mensuels moyens dans les deux bassins versants.

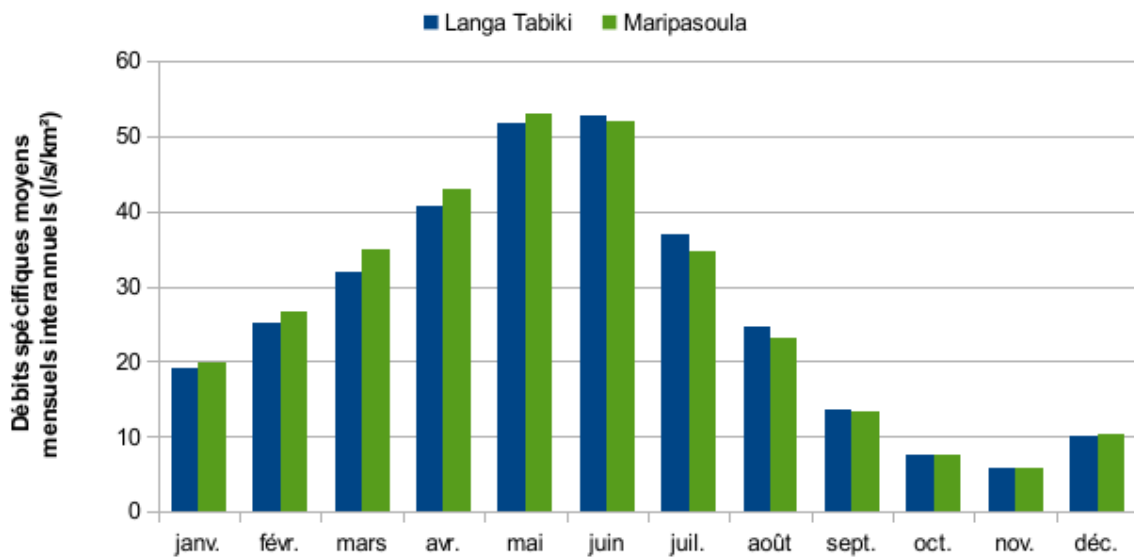


FIGURE 5 – Évolution des débits spécifiques mensuels moyens du Maroni à Langa Tabiki et Maripasoula. Source : Banque Hydro.

On peut voir que la période d'étiage s'étend d'août à février, avec les débits minimaux en novembre ; les hautes eaux concernent la période de mars à juillet.

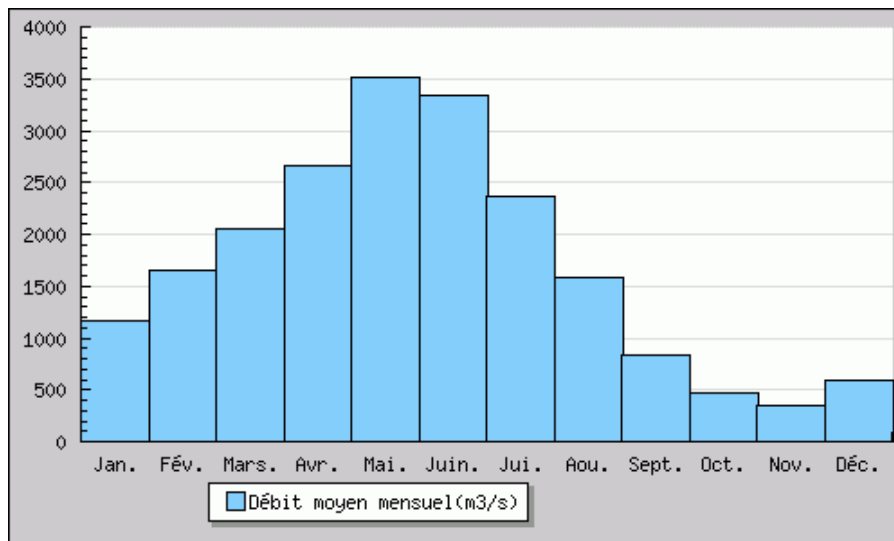


FIGURE 6 – Évolution des débits mensuels moyens du Maroni à Langa Tabiki. Source : Banque Hydro.

### 3.3 Données météorologiques

Seules deux stations pluviométriques de Météo France sont situées sur le bassin versant, à Maripasoula - sur la même base militaire où se trouve la station hydrométrique - et à Saint-Laurent-du-Maroni, en aval du fleuve. Les totaux annuels moyens de précipitations y sont

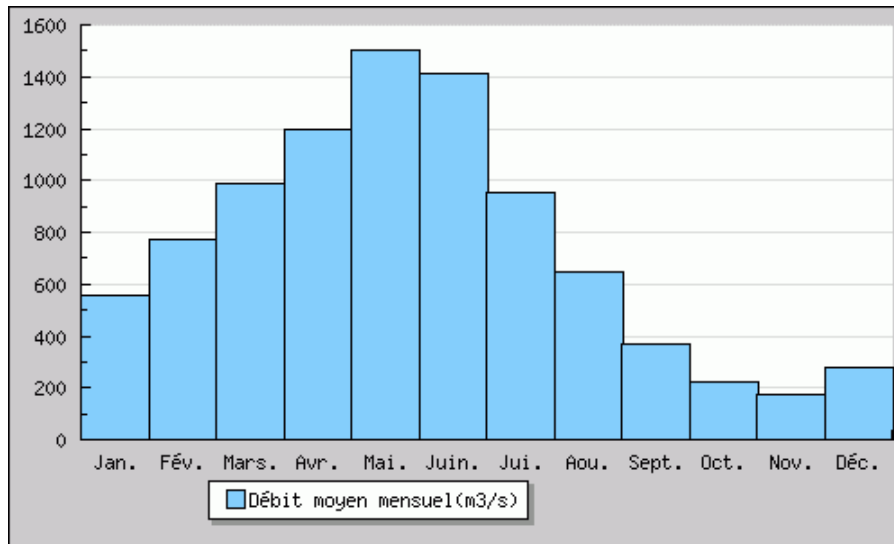


FIGURE 7 – Évolution des débits mensuels moyens du Maroni à Maripasoula. Source : Banque Hydro.

respectivement de 2421 mm et de 2528 mm ; les moyennes mensuelles sont visibles sur la figure 8.

La hauteur de précipitations trois à quatre fois supérieure aux moyennes métropolitaines explique les lames d'eau très importantes des deux sous-bassins, calculées ci-avant. À Maripasoula, en aval du bassin, la période des hautes eaux correspond à la saison des hautes précipitations ; c'est moins le cas à Saint-Laurent-du-Maroni, sans doute en raison d'influences maritimes plus importantes. Cependant, une grande variabilité interannuelle existe dans ces évolutions saisonnières : le début des saisons sèches et humides peut varier de plusieurs semaines d'une année sur l'autre, notamment à cause des déplacements de la ZCI (zone de convergence intertropicale), qui génère d'importantes précipitations lorsqu'elle se trouve au-dessus de la Guyane.

La figure 9 montre de faibles variations saisonnières des normales de température, et donc de relativement faibles variations de l'ETP, ce qui est normal dans un climat équatorial comme le climat guyanais. L'utilisation du module CemaNeige sera en tout cas inutile.



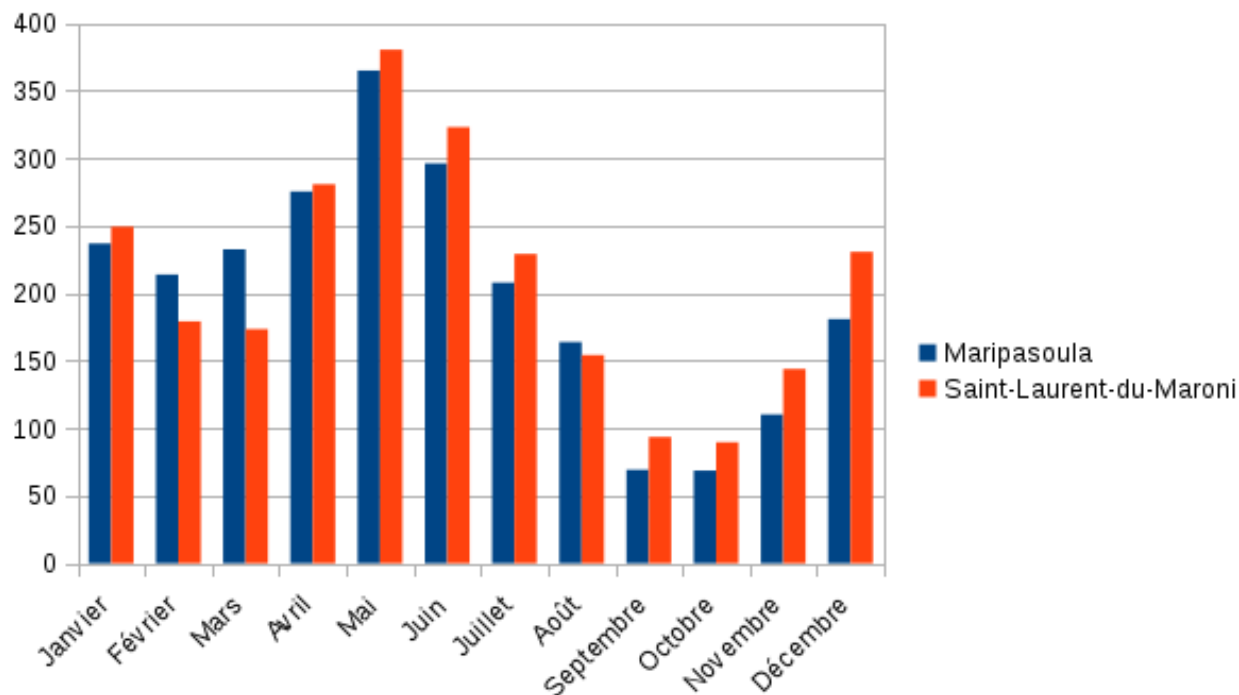


FIGURE 8 – Précipitations moyennes mensuelles en mm, à Maripasoula et Saint-Laurent-du-Maroni. Source : Météo France.

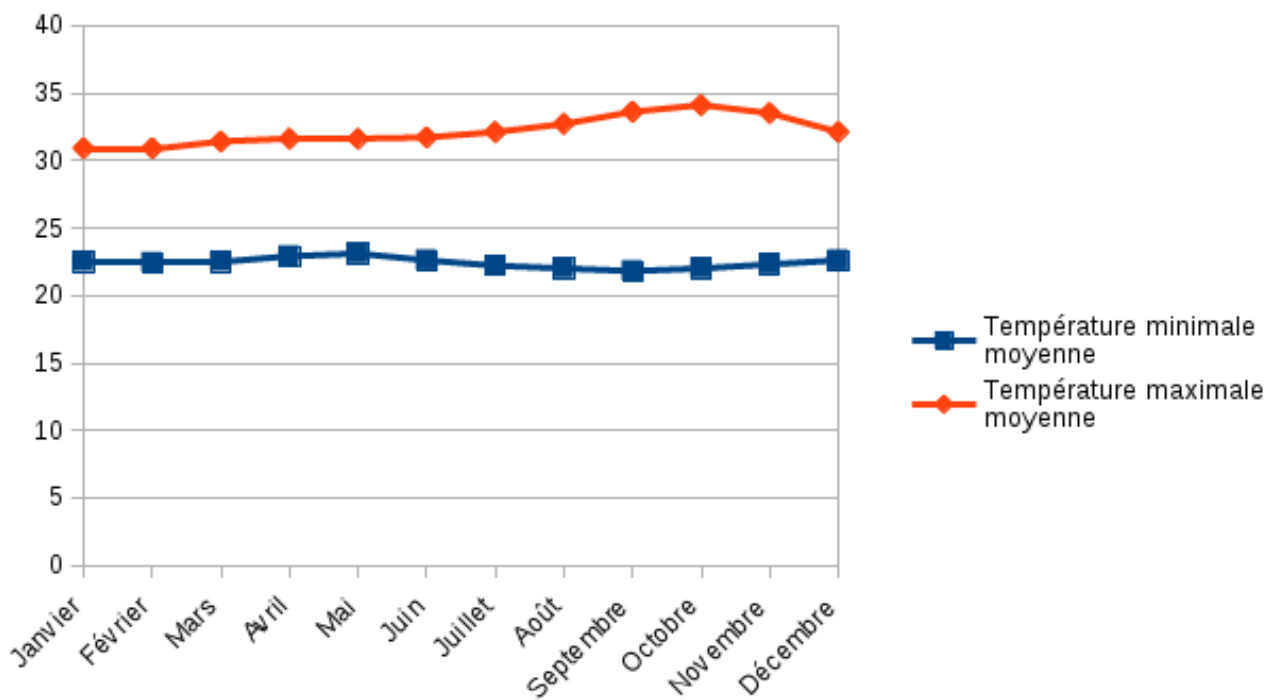


FIGURE 9 – Normales mensuelles de température à la station de Maripasoula. Source : Météo France.

## Deuxième partie

# L'utilisation de GRP en Guyane

## 1 Historique : l'étude du CEREMA

### 1.1 Présentation

La Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Guyane a mis en place en 2010 une Cellule de Veille Hydrologique (CVH), suite aux crues et aux étiages intenses des années précédentes. Sur le modèle de ce qui est implémenté en Métropole, le modèle GRP y étant utilisé opérationnellement pour la prévision des crues, la CVH a souhaité tester le modèle GRP sur les stations de Maripasoula et de Langa Tabiki, se trouvant sur le cours du Maroni. L'étude a été confiée au LRB (laboratoire régional de Blois) du CEREMA Normandie-Centre (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).

Cette étude a consisté à effectuer une procédure de calage-contrôle sur les chroniques temporelles disponibles, afin d'évaluer les performances du modèle GRP. Les données d'entrée utilisées sont détaillées ci-après.

### 1.2 Données d'entrée

**Débits :** les chroniques de débit ont été extraites de la Banque Hydro, base de donnée hydrométrique officielle des service de l'État. Les nombreuses lacunes y ont été comblées par interpolation linéaire entre les points connus, parfois sur des périodes de plusieurs mois ; par ailleurs, le rapport de l'étude fait mention d'une correction des « débits aberrants », sans que soient donnés de détails sur cette correction qui a pu nuire à la qualité des données d'entrée finalement apportées au modèle.

**Pluies :** les chroniques de pluie proviennent des pluies satellitaires TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 3B42-v7. Elles étaient produites par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), le satellite lancé en novembre 1997 ayant mis fin à sa mission en avril 2015 ; les hauteurs de précipitations étaient déterminés par un radar météorologique embarqué sur le satellite, conçu initialement pour l'étude des tempêtes tropicales.

Les données fournissent une information de pluie tri-horaire sur toute la ceinture équatoriale de la Terre, avec une résolution de  $0,25^\circ$  par  $0,25^\circ$ , soit 28 km par 28 km. L'agrégation de ces pixels permet ensuite de calculer des précipitations moyennes à l'échelle des bassins versants considérés, ce qui a permis d'obtenir une chronique de pluie sur la période 1999-2015, au moyen d'un travail de géomatique.

Le calibrage de l'instrument radiométrique a été effectué pour l'ensemble de la ceinture tropicale, ce qui génère de grosses incertitudes sur la Guyane : des abaques de correction ont été développées par Brochart et Andréassian en 2014, elles permettent de corriger les pluies satellitaires brutes pour que leurs valeurs soient plus proches de la réalité des précipitations. On dispose ainsi de deux chroniques de pluies : des pluies brutes et des pluies corrigées, sur lesquelles on peut comparer les performances du modèle.

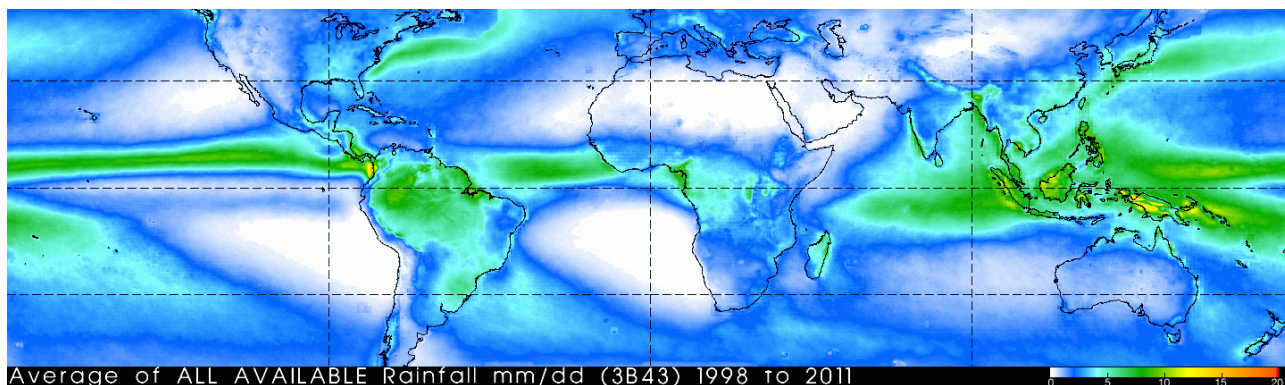


FIGURE 10 – Cumul moyen des précipitations mensuelles mesurées par TRMM entre 1998 et 2011. Source : NASA.

**ETP** : des valeurs moyennes mensuelles d'ETP issues de la littérature (Roche, 1982) ont été divisées pour obtenir une chronique journalière d'ETP de 1999 à 2015.

### 1.3 Paramètres testés

Pour chacun des deux bassins versants étudiés, divers paramètres de calage ont été entrés dans le modèle, afin de mettre en évidence les performances de GRP dans des situations différentes.

À Maripasoula, ont été testés :

- 4 horizons de calage différents : 24 h, 36 h, 48 h et 72 h ;
- 8 seuils de calage : de 0 à 1750 m<sup>3</sup>/s par pas de 250 m<sup>3</sup>/s.

Le seuil de calage a été fixé à 2000 m<sup>3</sup>/s, soit un peu en-dessous du seuil de vigilance jaune de la station, qui est de 2300 m<sup>3</sup>/s. L'objectif de ce choix était d'augmenter le nombre d'événements utilisés pour le calcul des performances du modèle.

À Langa Tabiki, ont été testés :

- les 4 mêmes horizons de calage ;
- 10 seuils de calage : de 0 à 4500 m<sup>3</sup>/s par pas de 500 m<sup>3</sup>/s.

Le seuil de calage a été fixé à 5000 m<sup>3</sup>/s, là encore en-deçà du seuil de vigilance jaune de la station - 5760 m<sup>3</sup>/s - pour les mêmes raisons qu'à Maripasoula.

## 1.4 Résultats

Les résultats détaillés de l'étude sont disponibles dans le rapport du CEREMA. Cependant, la conclusion générale est que les performances ne sont pas bonnes : le critère d'efficacité est presque toujours inférieur à 0,2 à Maripasoula et à 0,35 à Langa Tabiki, alors qu'un bon modèle devrait dépasser les 0,7. Les probabilités de détection ne dépassent pas 22 % à Maripasoula et 38 % à Langa Tabiki ; l'indice de succès critique ne dépasse pas 15 % à Maripasoula et 33 % à Langa Tabiki. Les performances sont moins bonnes avec les pluies corrigées qu'avec les pluies brutes.

Les valeurs des paramètres du modèle GRP une fois calés sont éloignées des valeurs typiques des bassins versants métropolitains, avec des réservoirs de routage de très grande capacité (de l'ordre de 100 000 mm) et des temps de réaction  $T_B$  très élevés (plus de 50 h). De manière générale, la bonne couleur de vigilance - verte, jaune, orange ou rouge - est prévue dans moins de deux cas sur trois pour l'horizon de calage le plus court, et ce taux diminue avec l'augmentation de l'horizon de calage.

La conclusion de l'étude suggère d'utiliser un modèle semi-distribué pour prendre en compte l'effet de la spatialisaton des pluies sur les affluents du Maroni.

Maripasoula – Horizon de calage 36 h – Pluies brutes								
Qcal m <sup>3</sup> /s	Eff -	POD %	FAR %	CSI %	Bon %	Mauvais %	Bonne prévision ↗ %	Bonne prévision ↘ %
0	0,099	17,2	53,9	14,3	65	38	52%	67%
250	0,099	17,2	53,8	14,3	65	38	52%	67%
500	0,085	16,9	55,3	14,0	64	38	50%	67%
750	0,119	15,3	54,0	13,0	64	38	50%	67%
1 000	0,121	13,9	49,4	12,3	65	37	52%	67%
1 250	0,138	12,1	41,8	11,1	66	36	55%	68%
1 500	0,162	11,9	36,9	11,1	66	36	55%	68%
1 750	0,156	12,2	31,9	11,6	66	36	55%	68%

FIGURE 11 – Exemple de tableaux de synthèse des résultats du calage-contrôle avec un jeu de paramètres, montrant les piètres performances du modèle.

## 2 Pistes d'amélioration des performances

Afin d'améliorer les performances insuffisantes du modèle GRP constatées par l'étude du CEREMA, la présente étude se propose d'étudier deux pistes d'action, l'une sur les données d'entrée, l'autre sur le fonctionnement du modèle.

**Répartition journalière des pluies :** les pluies satellitaires sont tri-horaires (pas de temps 3 h) et elles sont soumises à de fortes erreurs qui pourraient compromettre les performances du modèle. On se propose de calculer des valeurs de précipitations quotidiennes cumulées et de les désagréger au pas de temps horaire en utilisant des schémas de répartition horaires des pluies au cours d'une journée, déterminés à partir des données pluviométriques au sol de Météo France.

**Augmentation de la capacité du réservoir de production :** la capacité du réservoir de production est fixée à 275 mm pour les utilisations métropolitaines de GRP. La très grande valeur calée du réservoir de routage dans les résultats de l'étude sus-citée suggère qu'un plus grand réservoir de production est nécessaire pour « éponger » les précipitations très importantes se produisant à la saison humide en Guyane. On se propose de porter à 1000 mm la capacité du réservoir de production.

## Troisième partie

# Construction des schémas de répartition journalière des pluies

## 1 Principe

L'étude du CEREMA utilisait des données au pas de temps tri-horaire désagrégées au pas de temps horaire par division simple. Cette méthode rend insuffisamment compte des variations de hauteurs précipitées entre les différentes heures de la journée, et l'absence de moyenne temporelle sur plusieurs données ne permet pas d'atténuer les fortes incertitudes qui pèsent sur les données de pluies satellitaires TRMM.

On se propose d'utiliser plutôt les hauteurs de précipitations données par TRMM agrégées au pas de temps journalier et de déterminer, au moyen des données pluviométriques issues des pluviomètres au sol de Météo France, des schémas de répartition des précipitations entre les différentes heures de la journée, soit des vecteurs de 24 coefficients dont la somme vaut 1 qui permettent de passer d'une donnée de précipitation journalière à des données horaires. Bien sûr, en raison de la variabilité saisonnière du climat guyanais, ce schéma ne peut être le même pour toute l'année : il nous faut donc au préalable découper l'année de façon pertinente.

Pour construire ces schémas, on dispose des chroniques de pluie au pas de temps horaire de cinq stations pluviométriques :

- 97302001 : station de Cayenne-Ville ;
- 97307001 : station de Cayenne-Matoury (aéroport) ;
- 97308001 : station de Saint-Georges-de-l'Oyapock ;
- 97311001 : station de Saint-Laurent-du-Maroni ;
- 97353001 : station de Maripasoula.

Les données de pluie horaires de ces stations sont utilisées pour les prévisions de Météo France ; les chroniques utilisées pour la présente étude couvrent la période novembre 2008 - août 2013, ce qui est suffisamment long pour atténuer la variabilité interannuelle du climat guyanais.

## 2 Découpage temporel et spatial

### 2.1 Découpage temporel

On souhaite déterminer un découpage pertinent de l'année en périodes de temps égales sur lesquelles calculer un schéma de répartition journalier des précipitations, afin de représenter les variations saisonnières tout en conservant un nombre limité de schémas différents. Il n'est a



FIGURE 12 – Positions géographiques des stations pluviométriques dont on dispose des chroniques de précipitations.

priori pas évident de savoir s'il faut un découpage hebdomadaire, mensuel, bimestriel, trimestriel ou semestriel de l'année ; aussi, il a été préféré de faire appel à des méthodes d'analyse spectrale afin de mettre en évidence une période de découpage pertinente.

Connaissant une chronique de pluie  $p(t)$ , on calcule sa densité spectrale de puissance, carré du module de sa transformée de Fourier. Si les maxima de cette densité sont les périodes de répétition du signal, de périodicité, ses minima sont les échelles de temps de changement du signal, qui constituent des périodes de découpage pertinentes dans notre cas.

Le calcul de la fonction d'autocorrélation, puis de la transformée de Fourier s'est faite grâce au logiciel de calcul scientifique R. Les résultats sont présentés sur la figure 13.

L'échelle de temps mensuelle, correspondant à une période de 672 à 744 h, semble compatible avec les résultats de ce calcul. On choisit donc un découpage mensuel de l'année pour la construction de nos schémas de répartition journaliers.

## 2.2 Découpage spatial

Les cinq chroniques de pluies connues aux cinq stations météorologiques ne nous permettent de disposer que de cinq informations ponctuelles, non spatialisées. Pour reconstituer un schéma



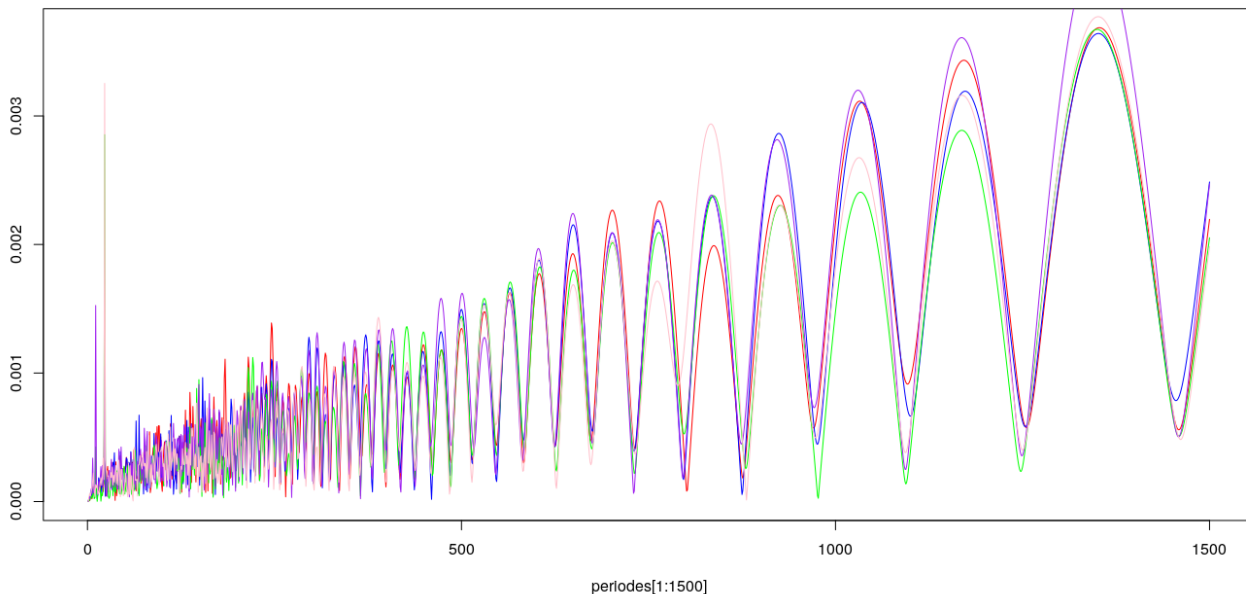


FIGURE 13 – Densités spectrales de puissance des différentes chroniques de pluie (chaque couleur est une station différente). En abscisse : période en heures.

de répartition journalier par bassin versant, il est nécessaire de reconstituer des zones d'influence de chaque information ponctuelle et donc de chaque station pluviométrique.

Différentes approches sont possibles, la plus simple dans notre cas est celle des polygones de Voronoï, un découpage du plan en polygones convexes à partir d'un nuage de points, les frontières étant les médiatrices des points voisins (voir la figure 14). On découpe donc le territoire guyanais en polygones à partir des cinq stations, en utilisant le logiciel QGIS.

Ensuite, pour un bassin de surface  $S$ , partagé entre les zones d'influence de  $n$  points, on calcule les aires des intersections entre le bassin versant et chaque zone d'influence. On obtient alors des surfaces  $S_i$  telles que  $\sum_{i=1}^n S_i = S$ . En posant  $\tau_i = S_i/S$ , si les  $H_i$  sont les vecteurs de coefficients de répartition horaires des  $n$  points, le vecteur de coefficients de répartition horaire du bassin versant s'exprime alors par :

$$H = \sum_{i=1}^n \tau_i H_i$$

Dans notre situation, le bassin versant de Maripasoula est entièrement couvert par la zone d'influence de la station de Maripasoula. Le bassin de Langa Tabiki est partagé entre la station de Saint-Laurent-du-Maroni (0,0852) et celle de Maripasoula (0,915).

### 3 Calage du modèle bêta-rectangulaire

Pour les cinq chroniques de pluie dont on dispose et pour chaque mois, on calcule d'abord, pour chaque heure de la journée, une valeur moyenne de la hauteur de précipitation tombée pendant cette heure au cours du mois de l'année considérée, que l'on divise ensuite par la hauteur



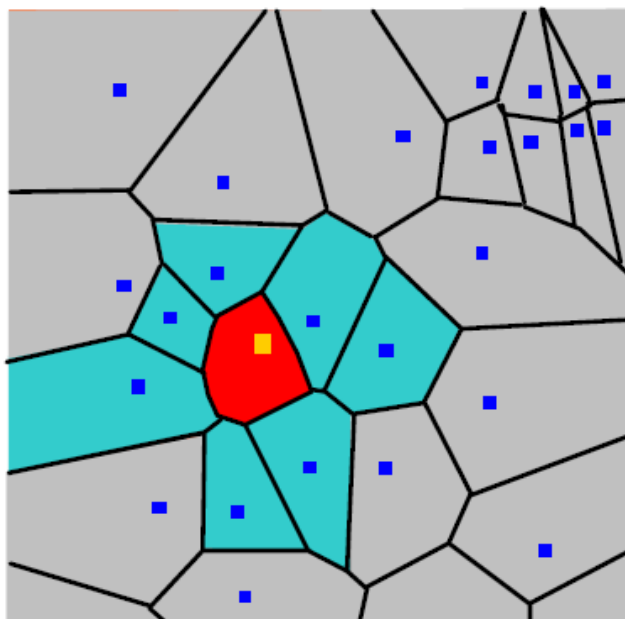


FIGURE 14 – Exemple de découpage en polygones de Voronoï : chaque point à l'intérieur du polygone rouge est plus proche du point jaune que de n'importe quel point bleu.

moyenne précipitée en une journée. Par exemple, on calcule la hauteur moyenne précipitée entre 15 h et 16 h au mois de mars à Cayenne pour les cinq années de chronique dont on dispose.

Pour chaque station et pour chaque mois, on obtient un vecteur de 24 coefficients. Afin de limiter les effets des erreurs qui peuvent subsister, le nombre d'années considéré n'étant pas très grand, on choisit de ne pas utiliser ces coefficients tels quels comme schémas de répartition horaire, mais de caler sur ceux-ci un modèle à quatre paramètres, le modèle bêta-rectangulaire, défini, pour  $h \text{ in } [0; 23]$  :

$$f(h) = k.h^\alpha.(24 - h)^\beta + q$$

Les paramètres sont liés par le fait que l'intégrale du modèle sur l'intervalle  $[0; 23]$  doit être égale à 1. Comme le montre la figure 15, ce modèle est capable de rendre compte d'une grande variété de forme de schémas, tout en présentant des valeurs non nulles aux bornes de l'intervalle considéré, ce qui est adapté à notre situation.

Le calage sur chaque série de 24 coefficients est effectuée par un algorithme pas-à-pas utilisant les moindres carrés non linéaires, à l'aide du logiciel R. Les graphiques représentant les résultats de chaque calage sont présentés en annexe, la figure 16 en montre un exemple.

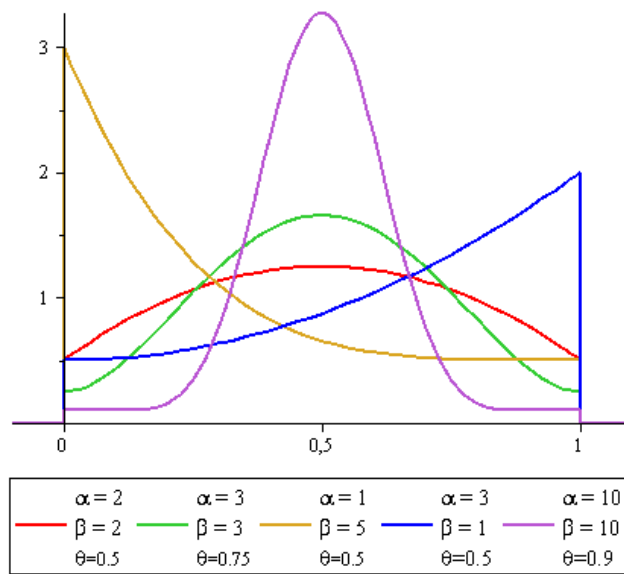


FIGURE 15 – Différentes formes prises par le modèle bêta-rectangulaire, pour diverses combinaisons de paramètres.

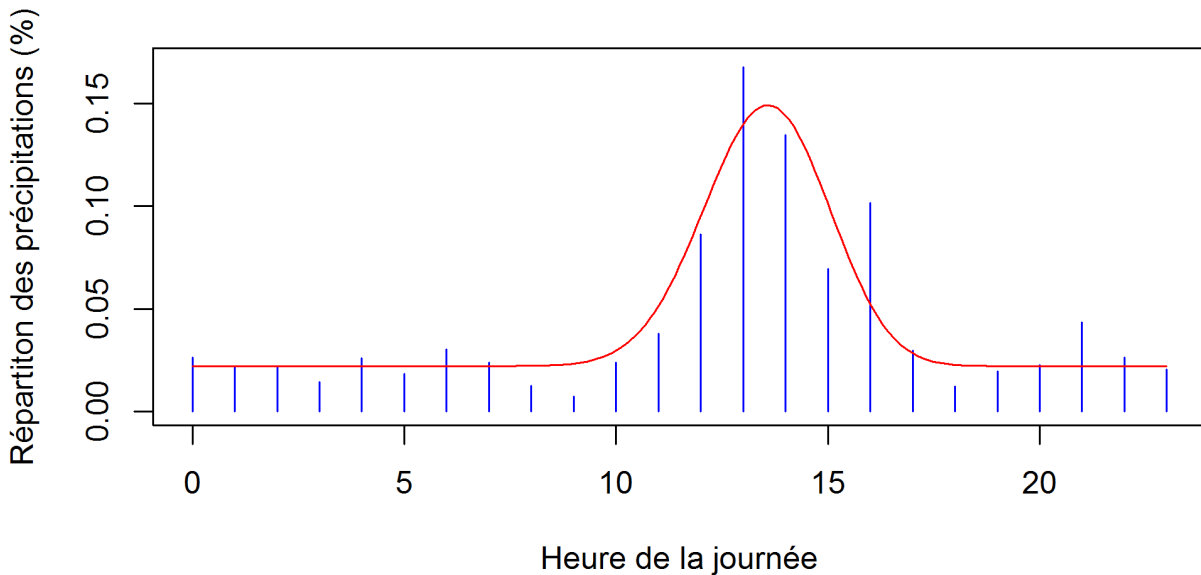


FIGURE 16 – Exemple de résultat de calage : le schéma de répartition de juillet à Matoury. En bleu, les coefficients calculés à partir de la chronique de pluie ; en rouge, la courbe du modèle bêta-rectangulaire.

## Quatrième partie

# Nouvelles performances du modèle

Afin de déterminer l'apport des schémas de répartition journaliers et de l'augmentation de la capacité du réservoir de production, on utilise comme dans la précédente étude des procédures de calage-contrôle dans différentes situations : avec et sans schémas, avec et sans augmentation de la capacité du réservoir de production, et avec différents paramètres d'entrée.

## 1 Paramètres et données d'entrée

### 1.1 Données d'entrée

Pour entreprendre des essais de calage-contrôle comme l'étude du CEREMA, on utilise les données d'entrée suivante, sur la période allant du 1<sup>er</sup> mars 2000 au 31 décembre 2016.

**Pluies :** on utilise les données issues de TRMM puis de son successeur GPM (Global Precipitation Measurement), fournies déjà agrégées par bassin versant au pas de temps journalier et corrigées. Deux chroniques de pluie sont alors construites : l'une avec schéma, utilisant les schémas de répartition journaliers déterminés ci-avant, et l'autre sans schéma, utilisant une désagrégation uniforme de la pluie journalière en pluie horaire.

**Débits :** pour éviter les écueils d'une correction hasardeuse rencontrés dans l'étude du CEREMA, on choisit d'utiliser directement les données de la Banque Hydro, sans retraitement. Elles présentent beaucoup de lacunes, mais on ne peut les combler sans détériorer gravement les données.

**ETP :** on utilise les données d'ETP fournies directement par Météo France à ses deux stations de Maripasoula et Saint-Laurent-du-Maroni.

### 1.2 Paramètres d'entrée :

À Maripasoula, on utilise les paramètres de calage suivants :

- 3 horizons de calage différents : 24 h, 36 h et 48 h ;
- 10 seuils de calage : de 0 à 2250 m<sup>3</sup>/s par pas de 250 m<sup>3</sup>/s.

Le seuil de calage a été fixé à 2000 m<sup>3</sup>/s par le CEREMA, on conserve cette valeur.

À Langa Tabiki, on utilise :

- les 3 mêmes horizons de calage ;
- 10 seuils de calage : de 0 à 4500 m<sup>3</sup>/s par pas de 500 m<sup>3</sup>/s.

Le seuil de calage a été fixé à 5000 m<sup>3</sup>/s par le CEREMA, on conserve cette valeur.

Avec deux chroniques de pluie, deux valeurs de capacité du réservoir de production, deux bassins versants et 30 jeux de paramètres par bassin, on a 240 procédures de calage-contrôle qui fourniront un éventail large de situations pour tester les performances de GRP. On choisit également d'utiliser la correction par réseaux de neurones artificiels plutôt que la correction Tangara, en raison de ses meilleures performances.

## 2 Résultats

### 2.1 Critères de performance du modèle

Afin d'évaluer de manière globale les performances du modèle, on considère pour chaque configuration les quatre critères donnés par l'utilitaire de calage-contrôle : l'efficacité, la probabilité de détection (POD), le taux de fausses alertes (FAR) et le l'indice de sélectivité critique (CSI). À titre indicatif, on note aussi les trois paramètres calés sur les deux périodes de calage.

En raison du temps de calcul des procédures de calage-contrôle, très long, toutes les configurations n'ont pas pu être testées : on s'est limité à l'horizon de calage 24 h pour l'augmentation de la capacité du réservoir de production, les résultats partiels obtenus avec de horizons de calage plus longs ne laissant pas entrevoir de tendance différente de celle observée.

#### 2.1.1 Maripasoula

Qcal (m <sup>3</sup> /s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.596	117841.34	50133.13	0.64	0.58	55.18	58.47	63.4	13.7	57.6
250	0.591	117841.34	50133.13	0.64	0.58	55.42	58.71	64.0	13.2	58.3
500	0.611	114911.93	50584.76	0.63	0.58	55.98	58.71	63.4	13.0	57.9
750	0.608	106335.77	52647.76	0.63	0.58	62.05	58.60	63.7	12.6	58.4
1000	0.617	111622.30	57864.89	0.64	0.58	65.36	60.86	63.7	12.2	58.6
1250	0.628	114087.07	67506.41	0.65	0.58	67.49	62.63	63.4	11.5	58.6
1500	0.641	141492.58	76567.20	0.65	0.58	74.72	81.72	60.3	11.6	55.8
1750	0.649	129821.70	71368.13	0.68	0.62	88.34	92.91	57.4	15.3	52.0
2000	0.665	141151.59	101801.95	0.69	0.67	98.85	94.22	57.7	16.8	51.7
2250	0.612	199776.81	149783.53	0.70	0.91	81.30	37.79	58.7	18.4	51.8

FIGURE 17 – Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m <sup>3</sup> /s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.534	109097.73	46400.02	0.63	0.57	55.11	60.18	60.5	19.7	52.7
250	0.530	109097.73	46400.02	0.63	0.57	55.11	60.18	62.8	18.0	55.2
500	0.544	104819.96	47754.27	0.63	0.57	56.30	60.34	62.4	18.5	54.6
750	0.550	100709.91	48803.02	0.63	0.57	62.28	60.23	60.7	18.0	53.5
1000	0.562	100685.91	54226.21	0.63	0.57	66.12	62.95	60.3	16.7	53.8
1250	0.575	104393.18	62516.23	0.64	0.57	68.94	67.07	59.4	16.4	53.2
1500	0.589	128127.77	70114.41	0.64	0.56	75.72	85.32	58.6	13.4	53.7
1750	0.591	118577.27	66808.12	0.67	0.60	90.87	96.53	60.0	15.5	54.1
2000	0.599	136163.86	87472.26	0.68	0.66	101.01	95.55	56.4	16.0	51.0
2250	0.538	180827.02	109826.49	0.68	0.89	87.58	44.88	58.6	19.9	51.1

FIGURE 18 – Sans schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm

<b>Qcal (m³/s)</b>	<b>Eff</b>	<b>Rout1 (mm)</b>	<b>Rout2 (mm)</b>	<b>CORR1</b>	<b>CORR2</b>	<b>TB1 (h)</b>	<b>TB2 (h)</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
0	0.506	100709.91	44114.71	0.62	0.57	55.35	61.89	54.4	21.9	47.2
250	0.501	100709.91	44121.89	0.62	0.57	55.11	61.97	54.4	21.9	47.2
500	0.553	97134.18	43927.64	0.62	0.56	56.79	62.83	56.3	21.3	48.8
750	0.526	95058.69	46134.31	0.62	0.56	62.89	62.23	53.1	22.3	46.1
1000	0.535	95639.29	51060.96	0.63	0.57	65.79	65.29	52.6	21.6	46.0
1250	0.547	94843.45	55968.52	0.63	0.56	69.96	70.36	52.3	20.9	45.9
1500	0.559	120881.29	63443.21	0.63	0.55	76.16	89.16	50.4	19.1	45.0
1750	0.564	113463.39	59874.09	0.66	0.59	93.37	98.65	53.3	17.7	47.8
2000	0.571	126424.10	78026.58	0.67	0.64	103.23	96.62	50.7	17.1	45.9
2250	0.478	172780.50	77361.44	0.67	0.88	92.37	49.31	52.9	25.3	44.9

FIGURE 19 – Sans schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm

<b>Qcal (m³/s)</b>	<b>Eff</b>	<b>Rout1 (mm)</b>	<b>Rout2 (mm)</b>	<b>CORR1</b>	<b>CORR2</b>	<b>TB1 (h)</b>	<b>TB2 (h)</b>	<b>POD</b>	<b>FAR</b>	<b>CSI</b>
0	0.603	81507.45	32681.26	0.70	0.66	56.86	61.76	63.4	15.2	56.9
250	0.603	84833.84	32694.88	0.70	0.66	56.62	61.87	66.6	13.5	60.3
500	0.616	83224.10	32786.27	0.70	0.66	57.33	61.98	66.2	13.6	60.0
750	0.628	75070.50	35417.94	0.70	0.66	63.25	61.63	64.7	13.5	58.7
1000	0.626	73918.77	40111.51	0.70	0.67	67.65	63.33	64.7	13.1	58.9
1250	0.647	84241.64	44175.59	0.72	0.68	69.19	67.04	63.7	11.8	58.7
1500	0.669	103744.90	44214.95	0.72	0.69	77.50	88.21	60.9	11.5	56.4
1750	0.679	81792.13	47342.04	0.75	0.72	96.05	96.21	60.9	13.8	55.5
2000	0.683	76910.87	64860.82	0.76	0.76	108.90	96.02	59.9	15.6	54.0
2250	0.594	102152.55	104819.96	0.78	0.99	96.71	36.68	56.8	22.4	48.8

FIGURE 20 – Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0,585	118184,6	50071,35	0,63	0,58	49,6	53,09	63,1	13,8	57,3
250	0,581	118184,16	50071,35	0,63	0,58	49,6	53,09	63,7	12,2	58,6
500	0,601	113550,9	51736,76	0,63	0,58	50,8	52,72	63,4	13	57,9
750	0,599	104990,84	52305,7	0,63	0,57	57,16	52,73	63,4	13	57,9
1000	0,609	112223,55	57526,45	0,63	0,58	60,18	55,35	63,1	11,9	58,1
1250	0,621	112077,35	70089,48	0,64	0,58	63,3	56,91	62,5	10,4	58,2
1500	0,637	138742,62	74556,73	0,65	0,58	69,89	78,23	61,5	11	57,2
1750	0,648	127649,66	71496,48	0,68	0,62	83,48	88,98	56,8	13,9	52
2000	0,658	144899,09	97342,64	0,68	0,67	93,57	90,88	57,7	16,1	52
2250	0,596	199077,48	156372,94	0,7	0,9	75,19	35,01	57,4	19,1	50,6

FIGURE 21 – Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0,524	109097,73	45935,26	0,63	0,57	49,84	54,56	62,8	20,8	53,9
250	0,521	109097,73	46062,21	0,63	0,57	49,84	54,61	62,6	19,3	54,4
500	0,534	104819,96	46045,08	0,62	0,57	50,8	55,21	62,6	20,6	53,8
750	0,541	100709,91	47922,25	0,62	0,56	56,78	54,85	61,5	19,2	53,7
1000	0,556	101096,46	54033,78	0,62	0,57	60,54	57,18	60	18,6	52,8
1250	0,571	104393,18	63292,73	0,63	0,57	64,15	60,23	60	16,7	53,6
1500	0,585	130256,24	67476,88	0,64	0,56	70,46	82,19	58,4	14,3	53,2
1750	0,588	115814,52	62658,7	0,67	0,6	85,81	92,92	59,6	16,1	53,5
2000	0,595	134744,33	86915,45	0,68	0,66	95,73	90,25	57,1	16,1	51,4
2250	0,521	181775,38	112698,25	0,68	0,88	80,06	40,4	56,2	19,9	49,4

FIGURE 22 – Avec schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0,494	100709,91	42315,64	0,62	0,56	49,36	56,08	55,8	25,2	47
250	0,491	100709,91	42315,64	0,62	0,56	49,36	56,08	55,5	25,3	46,7
500	0,59	96761,02	44042,58	0,61	0,56	50,8	56,55	55,8	23,7	47,6
750	0,519	94842,18	45531,61	0,62	0,56	57,08	56,07	53,6	24,8	45,5
1000	0,532	95530,9	51063,1	0,62	0,56	59,93	59,39	52,3	23,3	45,1
1250	0,543	97340,41	56794,68	0,63	0,56	64,21	64,18	51,7	21,7	45,2
1500	0,558	121190,63	62317,59	0,63	0,55	70,42	84,77	50,1	17,8	45,2
1750	0,561	112475,88	57937,17	0,66	0,59	87,55	94,72	53,6	18	47,9
2000	0,569	124642,84	75886,48	0,67	0,64	98,06	93,07	51,4	16,5	46,6
2250	0,473	169969,3	78979,24	0,67	0,87	86,12	45	52,3	26,7	43,9

FIGURE 23 – Avec schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0 0.593	84630.52	31953.10	0.70	0.66	51.32	56.59	63.1	16.3	56.2	
250 0.592	84630.52	32510.94	0.70	0.66	51.32	56.25	66.6	12.8	60.6	
500 0.622	85020.03	33287.05	0.70	0.66	52.03	56.21	65.6	13.7	59.4	
750 0.599	76243.38	35604.91	0.70	0.66	58.29	55.80	65.9	15.7	58.7	
1000 0.619	76859.02	39768.82	0.70	0.67	62.24	57.84	64.0	12.5	58.7	
1250 0.639	82863.28	44764.48	0.71	0.67	64.94	62.25	62.8	12.3	57.7	
1500 0.664	106545.49	43914.87	0.71	0.68	71.85	84.57	59.3	10.9	55.3	
1750 0.675	81541.35	145660.27	0.75	0.72	91.51	92.43	60.6	14.3	55.0	
2000 0.669	77594.85	65520.69	0.75	0.75	103.39	93.32	60.9	16.8	54.2	
2250 0.597	106858.09	105159.18	0.78	0.98	87.84	33.87	56.8	19.6	49.9	

FIGURE 24 – Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm

## 2.1.2 Langa Tabiki

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.535	109097.73	88618.47	1.12	1.17	85.49	68.65	45.5	20.5	40.7
500	0.538	109097.73	88618.47	1.12	1.17	85.49	68.65	45.7	22.3	40.4
1000	0.530	109097.73	90416.57	1.12	1.17	83.82	68.17	47.6	23.6	41.5
1500	0.518	109097.73	91180.30	1.12	1.16	81.18	66.83	46.2	24.4	40.2
2000	0.518	107999.20	96353.09	1.10	1.16	88.28	66.45	46.0	24.0	40.2
2500	0.517	99987.86	104819.96	1.10	1.16	89.09	61.57	45.7	23.5	40.1
3000	0.516	103290.68	133252.25	1.10	1.15	93.86	51.76	46.2	21.8	40.9
3500	0.514	118183.48	150241.48	1.14	1.17	84.56	43.14	45.3	22.1	40.1
4000	0.511	102463.60	190994.31	1.16	1.16	86.25	40.03	46.2	22.1	40.9
4500	0.513	138690.38	199720.61	1.21	1.21	53.43	24.44	45.1	24.3	39.4

FIGURE 25 – Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.436	92640.84	81805.16	1.09	1.17	87.02	69.84	41.6	28.8	35.6
500	0.434	95692.38	80889.66	1.10	1.16	86.31	70.38	40.8	29.0	35.0
1000	0.431	92966.98	81805.16	1.09	1.16	85.01	70.02	39.4	29.3	33.8
1500	0.427	95692.38	82896.09	1.09	1.16	82.70	68.81	40.3	29.1	34.6
2000	0.427	93704.79	87400.30	1.08	1.14	90.67	69.08	39.5	27.8	34.3
2500	0.427	89858.59	96761.02	1.08	1.15	90.17	62.52	40.6	26.9	35.4
3000	0.424	91718.93	117508.04	1.07	1.14	94.67	55.59	40.0	26.1	35.0
3500	0.432	103826.26	133252.25	1.10	1.15	82.39	47.21	36.3	19.9	33.3
4000	0.412	91558.04	165780.88	1.12	1.14	84.86	42.94	37.6	27.1	33.0
4500	0.439	115363.22	175148.92	1.17	1.18	47.41	28.04	38.9	28.6	33.7

FIGURE 26 – Sans schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.417	87051.84	75515.69	1.09	1.16	85.74	71.22	34.6	24.2	31.2
500	0.410	87931.77	75515.69	1.08	1.16	85.18	71.22	38.3	28.3	33.3
1000	0.407	86738.26	75515.69	1.08	1.15	84.80	71.22	37.3	27.8	32.6
1500	0.401	87616.45	75515.69	1.07	1.15	82.07	70.26	37.3	28.3	32.5
2000	0.398	90242.12	84971.64	1.06	1.13	88.58	69.38	36.6	26.6	32.3
2500	0.407	94170.04	90752.19	1.06	1.14	89.34	63.47	34.4	22.7	31.2
3000	0.400	86797.59	109097.73	1.05	1.12	92.49	58.69	33.4	21.4	30.6
3500	0.399	95257.25	120536.62	1.06	1.13	80.50	51.66	33.5	22.2	30.6
4000	0.380	84941.18	142826.47	1.09	1.12	77.65	47.51	36.0	27.1	31.7
4500	0.371	92966.88	151448.28	1.13	1.15	48.17	35.92	36.1	27.8	31.7

FIGURE 27 – Sans schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.545	64603.76	49020.77	1.27	1.32	88.26	75.68	46.2	23.0	40.6
500	0.543	64502.73	48682.58	1.27	1.31	86.80	75.79	46.2	23.9	40.4
1000	0.528	64846.41	49020.81	1.27	1.31	86.71	75.44	46.9	25.8	40.3
1500	0.527	67358.96	48682.58	1.27	1.31	83.41	74.99	46.9	26.1	40.2
2000	0.528	61826.50	52866.47	1.27	1.31	93.59	74.78	45.3	23.9	39.6
2500	0.522	63904.71	57707.28	1.26	1.31	93.63	71.69	46.4	25.2	40.2
3000	0.537	67507.84	74133.16	1.27	1.31	96.73	60.41	43.0	21.4	38.5
3500	0.523	66606.59	90623.32	1.28	1.33	97.72	50.30	41.6	19.9	37.7
4000	0.530	61973.55	122849.20	1.31	1.31	92.83	44.98	44.4	19.9	40.0
4500	0.509	67761.71	128027.36	1.35	1.36	82.34	28.07	45.3	24.5	39.5

FIGURE 28 – Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0,531	109097,73	89800,25	1,12	1,16	81,9	63,67	45,7	23,2	40,2
500	0,533	109097,73	88062,1	1,12	1,17	81,9	64,22	45,5	23	40,1
1000	0,524	109097,73	89152,08	1,12	1,16	80,23	63,56	46,7	24,3	40,6
1500	0,514	106545,49	90836,09	1,11	1,16	78,24	61,64	46,7	23,7	40,8
2000	0,511	105450,02	96750,88	1,1	1,15	85,39	61,45	45,5	22,7	40,2
2500	0,513	101920,08	107176,31	1,09	1,15	85,91	56,2	46,9	24,4	40,7
3000	0,509	102481,29	133252,25	1,09	1,15	91,72	46,73	45,3	20,9	40,5
3500	0,506	111392,61	150241,48	1,12	1,17	83,35	38,84	46	21,6	40,8
4000	0,501	98556,89	196487,2	1,15	1,16	85,43	36,04	45,5	20,2	40,8
4500	0,499	147006,7	205719,56	1,21	1,2	44,69	22,55	45,7	26,3	39,3

FIGURE 29 – Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0,431	91940,23	82884,62	1,09	1,16	82,7	64,5	41,4	30	35,2
500	0,429	95692,38	81646,32	1,09	1,15	81,74	64,63	41,3	29,5	35,2
1000	0,426	94808,81	82884,62	1,09	1,15	80,21	64,19	39,5	30,1	33,8
1500	0,422	93751,72	82884,62	1,09	1,15	78,74	63,23	40,2	30,5	34,1
2000	0,421	93315,35	89467,64	1,07	1,13	85,97	62,81	39,5	29,3	34
2500	0,421	87605,08	96761,02	1,07	1,14	86,23	56,3	40,8	27,8	35,3
3000	0,419	89163,81	118184,16	1,06	1,13	92,72	50,8	39,2	26,5	34,4
3500	0,427	102558,62	138690,38	1,09	1,15	80,07	40,27	39,2	24	34,9
4000	0,406	88670,38	174118,86	1,11	1,13	81,99	36,5	38,1	27,9	33,2
4500	0,435	118184,16	172466,72	1,16	1,17	38,36	25,78	38,3	27,6	33,4

FIGURE 30 – Avec schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0,41	86279,13	76512,16	1,08	1,15	82,39	65,63	37,7	28,8	32,7
500	0,406	86279,13	76512,16	1,07	1,15	81,67	65,63	39	27,7	33,9
1000	0,403	87066,95	76512,16	1,07	1,15	79,91	65,63	37,8	28,5	32,8
1500	0,397	88718	76512,16	1,07	1,14	78	64,59	37,9	28,6	32,9
2000	0,393	89745,88	84732,04	1,06	1,13	84,79	64,22	36,4	27,7	32
2500	0,402	82896,09	90469,62	1,05	1,13	86,46	57,56	35,1	23,3	31,7
3000	0,394	86573,22	112289,93	1,05	1,12	89,63	52,09	33,7	21,2	30,9
3500	0,395	94715,45	118883,89	1,06	1,12	76,77	46,1	33,5	22	30,6
4000	0,372	85717,99	144986,59	1,09	1,11	74,81	41,39	35,2	27,9	31
4500	0,353	94026,34	150241,48	1,12	1,15	43,63	30,23	36	28	31,5

FIGURE 31 – Avec schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm

Qcal (m³/s)	Eff	Rout1 (mm)	Rout2 (mm)	CORR1	CORR2	TB1 (h)	TB2 (h)	POD	FAR	CSI
0	0.539	64846.41	47367.10	1.26	1.31	84.05	72.06	46.7	23.4	40.8
500	0.539	64603.76	49300.19	1.26	1.31	83.62	71.58	45.7	23.5	40.1
1000	0.531	64830.20	49082.28	1.26	1.31	82.19	71.11	46.4	24.9	40.2
1500	0.522	67507.84	49920.63	1.26	1.31	79.75	70.20	46.9	24.7	40.6
2000	0.526	62070.64	53191.95	1.26	1.30	89.62	70.39	45.1	26.0	38.9
2500	0.523	62317.59	58225.81	1.26	1.30	90.75	67.10	46.0	25.1	39.8
3000	0.533	64860.82	76404.39	1.26	1.30	95.54	54.52	43.4	22.2	38.7
3500	0.518	64210.45	92704.73	1.28	1.33	96.18	45.50	40.2	21.9	36.2
4000	0.524	59636.79	128027.36	1.30	1.31	91.56	40.75	43.2	20.0	39.0
4500	0.509	64361.59	133252.25	1.33	1.34	83.64	26.40	45.1	24.6	39.3

FIGURE 32 – Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm



## 2.2 Commentaires

Comme précisé dans l'étude du CEREMA, le critère d'efficacité n'est pas très adapté à l'évaluation des performances du modèle. On comparera alors les critères POD, FAR et CSI entre les différentes configurations.

On observe tout d'abord une diminution des performances nette avec l'augmentation de l'horizon de calage, ce qui est normal : le modèle GRP est d'autant plus performant que les prévisions sont à court terme.

Les différences de performances entre les calages utilisant les chroniques de pluies avec schémas et sans schémas n'est pas significative. Les écarts observés semblent relever davantage de fluctuations aléatoires que d'une véritable tendance, comme le montrent les figures 33 et 34.

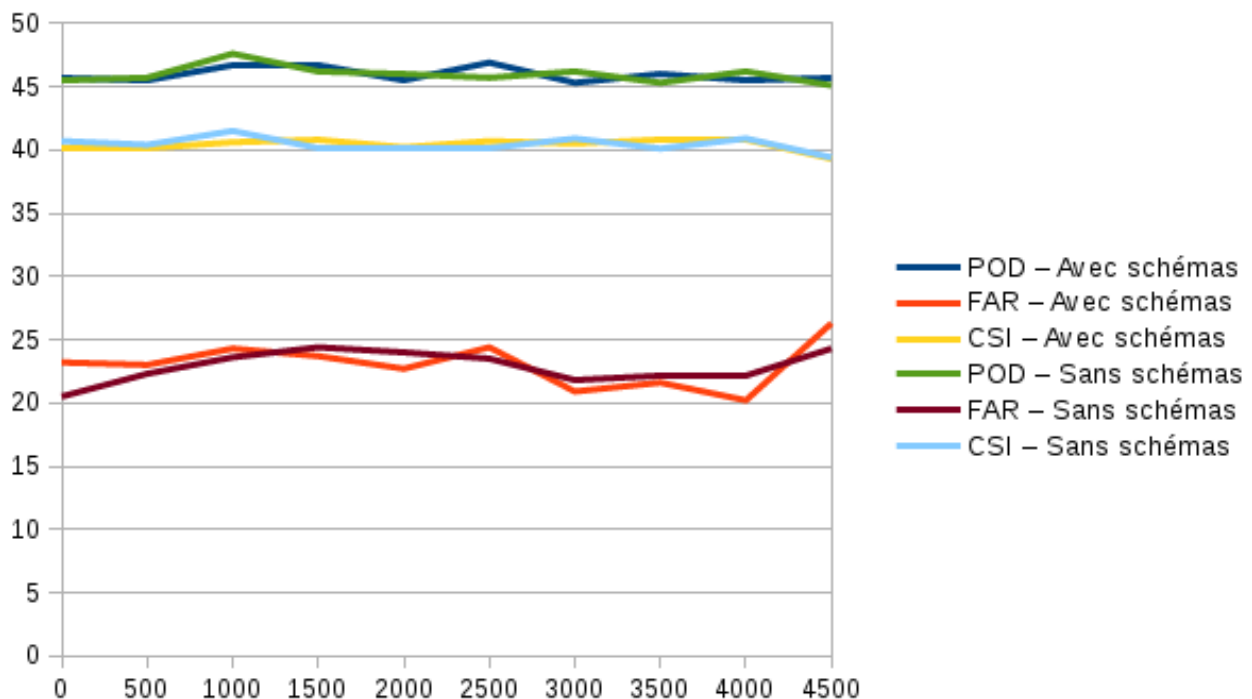


FIGURE 33 – Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Langa Tabiki, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans schémas journaliers.

En augmentant la capacité du réservoir de production, on diminue comme prévu celle du réservoir de routage, qui passe de 90000 mm à 50000 mm environ à Langa Tabiki et de 60000 mm à 35000 mm à Maripasoula. Néanmoins, les gains de performance ne sont pas substantiels : on note une faible diminution du taux de fausses alertes aux bas seuils de calage à Langa Tabiki, sans tendance significative sur les autres critères de performance, comme visible sur la figure 35 ; à Maripasoula, les gains de performance sont aussi minimes, mais concernent les deux autres critères.

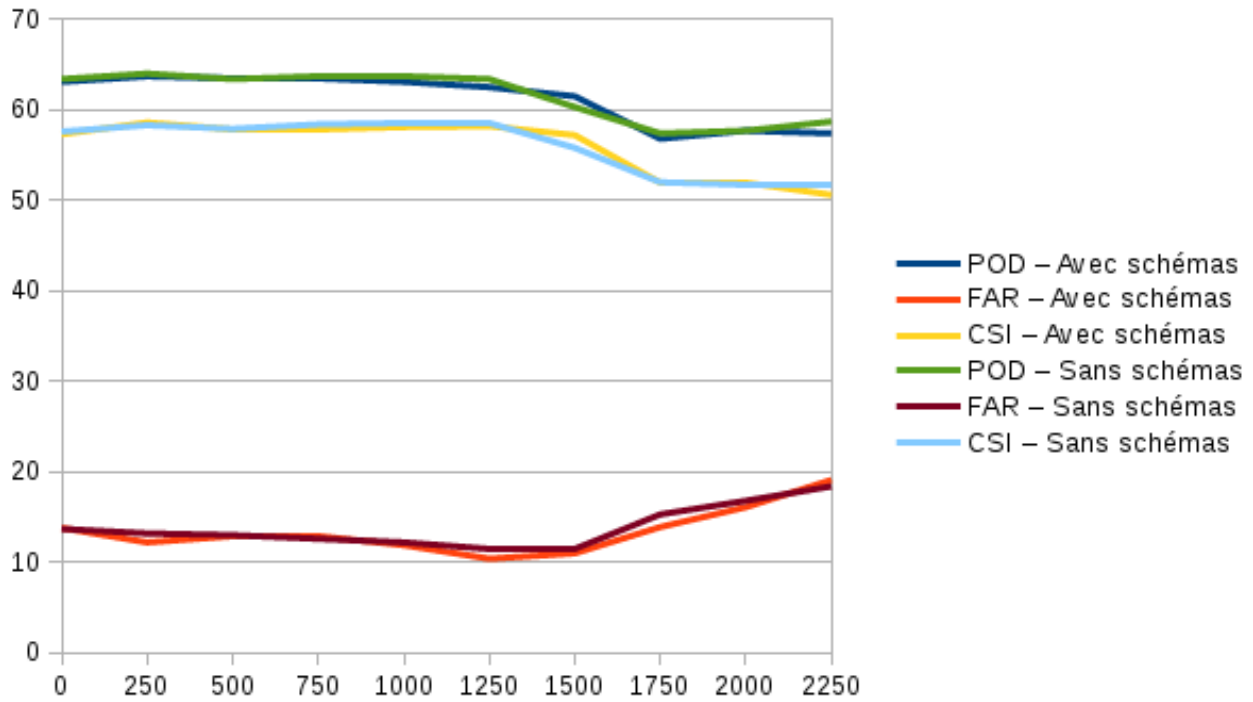


FIGURE 34 – Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Maripasoula, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans schémas journaliers.

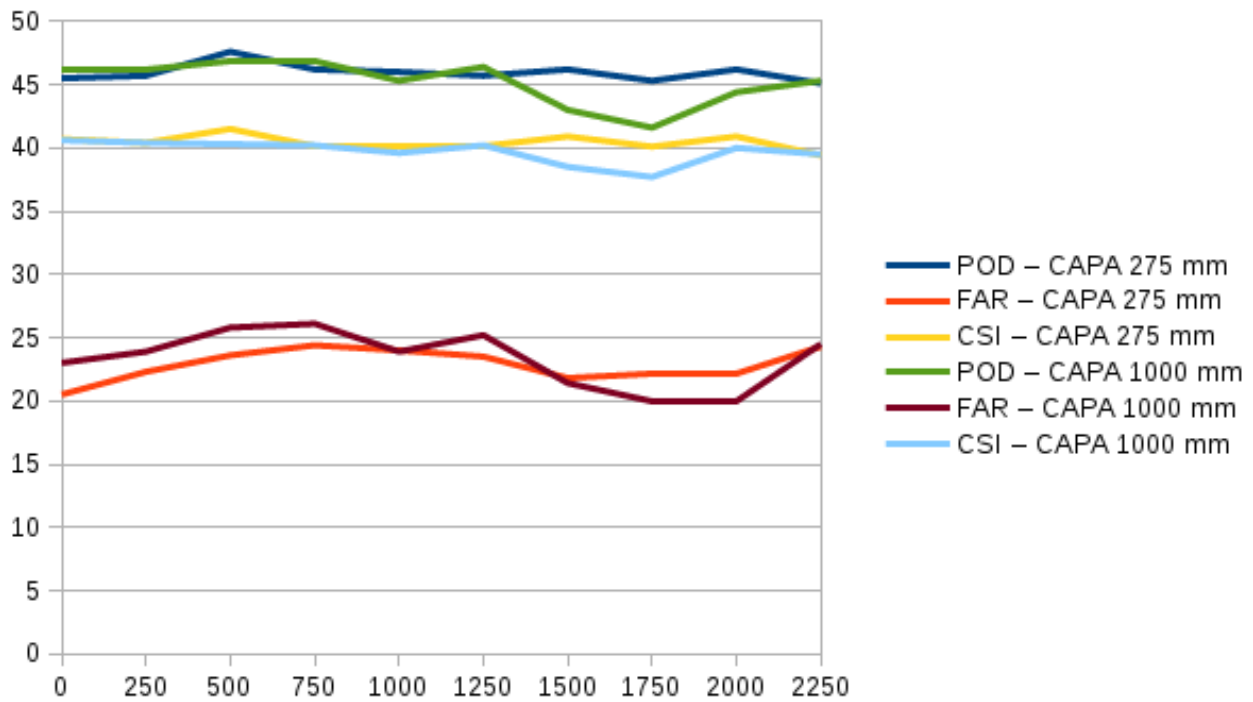


FIGURE 35 – Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Langa Tabiki, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans augmentation de la capacité du réservoir de production.

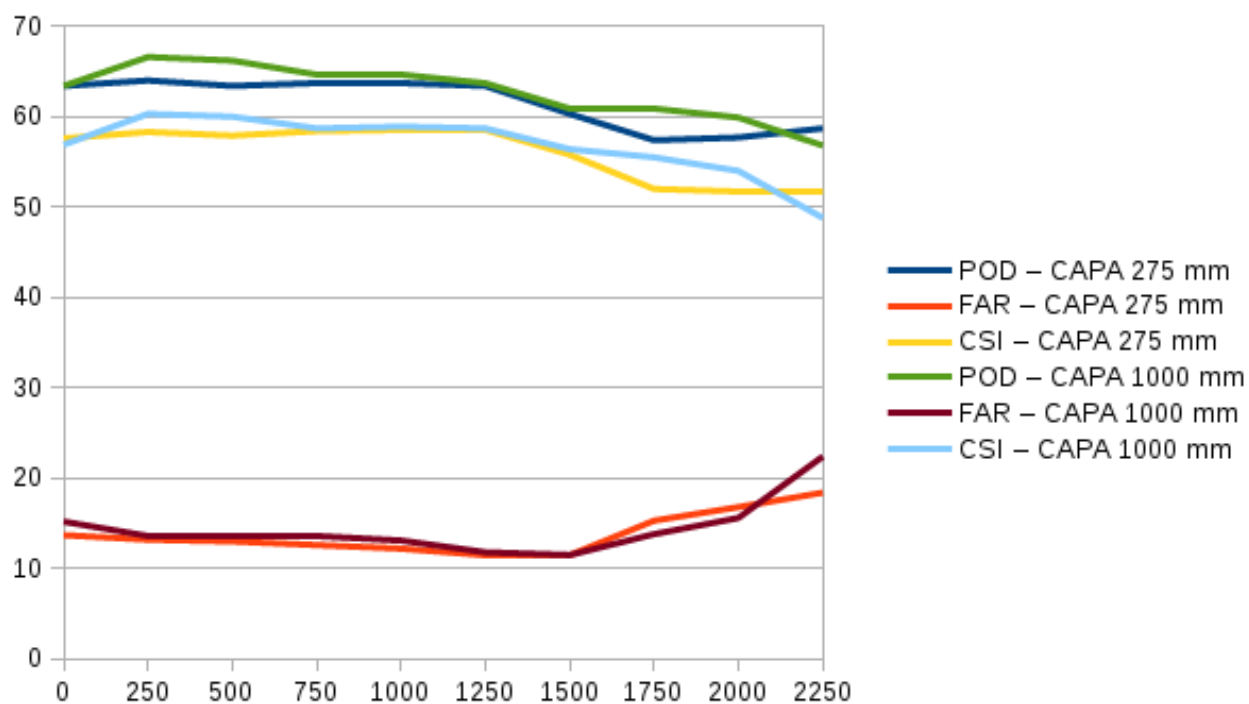


FIGURE 36 – Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Maripassoula, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans augmentation de la capacité du réservoir de production.

# Conclusion

La présente étude était avant tout prospective : avant de considérer le modèle GRP comme inadapté aux régimes hydrologiques en vigueur en Guyane, elle souhaitait s'intéresser aux possibilités d'améliorations de ses performances apportées par hypothèses : l'existence d'une répartition horaire persistante des précipitations et l'insuffisance de la capacité du réservoir de production.

Il apparaît que l'utilisation des schémas de répartition journalière de la pluie est infructueuse : aucune amélioration des performances du modèle n'est visible, ce qui est sans doute dû au temps de réponse des bassins versants, largement supérieur à 24 h. La désagrégation horaire fine de l'information journalière sur les précipitations n'a que très peu d'influence sur la réponse effective du bassin versant, les variations étant épongées par les énormes réservoirs.

En revanche, l'augmentation de la capacité du réservoir de production a un effet sur les performances du modèle, même s'il est assez minime dans la présente étude. Le valeur de 1000 mm a été ici choisie sans démarche d'optimisation ; la détermination d'une valeur optimale propre à la Guyane, comme 275 mm en Métropole, améliorerait sans doute grandement les performances du modèle.

Au reste, les pluies satellitaires, même corrigées, n'ont pas la qualité des données des stations pluviométriques in situ : même si le régime hydrologique guyanais est différent de celui métropolitain, la mauvaise qualité des données d'entrées a une part de responsabilité dans les mauvaises performances du modèle.

## Références

- [1] Lionel BERTHET : *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique*. Thèse de doctorat, Agro ParisTech, Cemagref Antony, 2010.
- [2] David BROCHART, Vazken ANDRÉASSIAN, Charles PERRIN et Maxime MONFORT : *Confronting intensity scaling to quantile mapping for the real time correction of satellite-based rainfall estimates : test over French Guiana*. 2014.
- [3] DEAL GUYANE - CVH et CEREMA : *Calage de modèles GRP sur le Maroni*. Rapport technique, août 2016.
- [4] IRSTEA ANTONY : *Calage et application opérationnelle du modèle de prévision de crue GRP*. Rapport technique, février 2017.
- [5] Pierre-Alain ROCHE, Jacques MIQUEL et Eric GAUME : *Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision*. Springer Science & Business Media, septembre 2012. Google-Books-ID : VetHAAAAQBAJ.
- [6] M. TANGARA : *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. Thèse de doctorat, EPHE, Cemagref Antony, 2005.
- [7] Julie VIATGÉ, Carina FURUSHO-PERCOT et Charles PERRIN : *Retour d'expérience sur le modèle GRP et ses résultats*. Rapport technique, Programme MEEM (DGPR/SRNH) - IRSTEA 2016, février 2017.

## Table des figures

1	Principe général de la prévision pluie-débit et de l'alerte Vigicrues.	5
2	Carte des SPC en France métropolitaine.	5
3	Schéma de fonctionnement du modèle GRP.	7
4	Bassin versant du Maroni et sous-bassins à Langa Tabiki et Maripasoula.	12
5	Évolution des débits spécifiques mensuels moyens du Maroni à Langa Tabiki et Maripasoula. Source : Banque Hydro.	13
6	Évolution des débits mensuels moyens du Maroni à Langa Tabiki. Source : Banque Hydro.	13
7	Évolution des débits mensuels moyens du Maroni à Maripasoula. Source : Banque Hydro.	14
8	Précipitations moyennes mensuelles en mm, à Maripasoula et Saint-Laurent-du-Maroni. Source : Météo France.	15
9	Normales mensuelles de température à la station de Maripasoula. Source : Météo France.	15
10	Cumul moyen des précipitations mensuelles mesurées par TRMM entre 1998 et 2011. Source : NASA.	17
11	Exemple de tableaux de synthèse des résultats du calage-contrôle avec un jeu de paramètres, montrant les piètres performances du modèle.	18
12	Positions géographiques des stations pluviométriques dont on dispose des chroniques de précipitations.	21
13	Densités spectrales de puissance des différentes chroniques de pluie (chaque couleur est une station différente). En abscisse : période en heures.	22
14	Exemple de découpage en polygones de Voronoï : chaque point à l'intérieur du polygone rouge est plus proche du point jaune que de n'importe quel point bleu.	23
15	Différentes formes prises par le modèle bêta-rectangulaire, pour diverses combinaisons de paramètres.	24
16	Exemple de résultat de calage : le schéma de répartition de juillet à Matoury. En bleu, les coefficients calculés à partir de la chronique de pluie ; en rouge, la courbe du modèle bêta-rectangulaire.	24
17	Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm	26
18	Sans schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm	26
19	Sans schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm	27

20	Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm	27
21	Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm	28
22	Avec schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm	28
23	Avec schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm	28
24	Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm	28
25	Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm	29
26	Sans schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm	29
27	Sans schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm	29
28	Sans schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm	29
29	Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 275 mm	30
30	Avec schémas - Horizon de calage 36 h - Réservoir de production à 275 mm	30
31	Avec schémas - Horizon de calage 48 h - Réservoir de production à 275 mm	30
32	Avec schémas - Horizon de calage 24 h - Réservoir de production à 1000 mm	30
33	Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Langa Tabiki, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans schémas journaliers.	31
34	Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Maripasoula, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans schémas journaliers.	32
35	Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Langa Tabiki, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans augmentation de la capacité du réservoir de production.	32
36	Évolution des critères de performance en fonction du seuil de calage, à Maripasoula, pour un horizon de calage de 24h, avec et sans augmentation de la capacité du réservoir de production.	33