

Baie de Dumbéa et Boulari, Nouvelle-Calédonie
Landsat 8, 11 avril 2016

Vers une modélisation déterministe des écoulements de surface en Nouvelle-Calédonie

Implémentation du code GR4H sur quatre
bassins versants du Grand Nouméa

T. Desclaux, M. Pischedda, H. Lemonnier, B. Soulard, R. Le Gendre

16/06/2017



FICHE DOCUMENTAIRE

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Numéro d'identification du rapport : PRESENCE_001 | Date de publication : 16/06/2017 |
| Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> | Nombre de pages : 35 |
| Adresse électronique : | Illustration(s) : 17 |
| | Langue du rapport : Français |
| Titre de l'article Vers une modélisation déterministe des écoulements de surface en Nouvelle-Calédonie Implémentation du code GR4H sur quatre bassins versants du Grand Nouméa | |
| Contrat n° non signé à date de publication Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif <input type="checkbox"/> | |
| Auteur(s) principal(aux) : T. Desclaux, M. Pischedda, H. Lemonnier, B. Soulard, R. Le Gendre | Organisme / Direction / Service, laboratoire : Ifremer - UR LEAD-NC |
| Encadrement(s) : | Contacts : romain.le.gendre@ifremer.fr |
| Cadre de la recherche : Projet PRESENCE - Accord Cadre Ifremer / Collectivités de la Nouvelle-Calédonie | |
| Destinataires : <ul style="list-style-type: none">○ Province Sud - DENV○ Province Nord - DDEE | <ul style="list-style-type: none">○ Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie - DAM et DAVAR○ Province des Îles Loyautés |
| Mots-clés : Continuum Terre-Lagon, Nouvelle-Calédonie, Rivières, GR4H, Bassins versants, Grand Nouméa, Modélisation, Débits | |
| Words keys : Land-lagoon continuum, New Caledonia, River, GR4H, Watershed, Nouméa, Model, River Flow | |

RESUME

Ce rapport fait suite au stage de Marine Pischedda (Master 2 La Rochelle) réalisé au sein de l'unité de recherche "Lagons, Ecosystèmes et Aquaculture Durable en Nouvelle-Calédonie" (LEAD/NC) de l'Ifremer entre février et juillet 2016. Cette étude a été conduite sur quatre bassins versants du Grand Nouméa : la Coulée, la Dumbéa Est, la Dumbéa Nord et la Couvelée.

L'objectif principal était de démontrer la pertinence de l'utilisation de modèle pluie-débit au pas de temps horaire (GR4H en l'occurrence) sur les bassins versants calédoniens. Le cadre plus général de ce travail était d'aboutir à une représentation affinée du continuum terre-mer par le couplage des modèles GR4H et MARS3D développés pour simuler la circulation côtière. Les périodes d'étiages ayant un impact au lagon spatialement restreint, les événements d'intérêt sont donc principalement les épisodes de crues auxquels est soumis l'environnement calédonien.

L'étude montre clairement que, pour des bassins sur lesquels nous disposons d'une série de données suffisantes (> 5 ans), le modèle GR4H avec la méthode proposée d'optimisation aboutit à une pertinence des simulations très satisfaisante ($NSE > 0.75$ pour les 4 bassins). Si il est possible d'extrapoler les paramètres obtenus sur la Dumbéa Est et la Dumbéa Nord à la Coulée, l'opération est moins évidente pour la Couvelée, qui, bien qu'étant contigüe à la Dumbéa Nord présente des caractéristiques hydrologiques radicalement différentes des autres bassins. Enfin, l'utilisation couplée de GR4H et des lames d'eau Antilope a été explorée, ouvrant la voie à la simulation en temps réel des débits des rivières où la donnée de pluie est difficilement collectable.

Le modèle GR4H présente donc de nombreux avantages pour la communauté scientifique mais aussi pour les gestionnaires de la ressource en eau.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la DAVAR (Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales) et plus particulièrement son Observatoire de la Ressource en Eau (ORE) de nous avoir permis de travailler au pas de temps horaire sur 4 bassins du Grand Nouméa en nous fournissant le jeu de données idoine. Nous remercions également l'équipe ORE pour son expertise avisée, son soutien et la bonne connaissance du fonctionnement des bassins versants calédoniens. Par ailleurs, nos remerciements vont également à Météo France NC et notamment Alexandre Peltier pour la fourniture de données (radar et stations de mesure) ainsi que pour ses conseils pertinents.

CITATION

Ce rapport doit être cité comme suit :

Desclaux T., Pischedda M., Lemonnier H., Soulard B., Le Gendre R. Vers une modélisation déterministe des écoulements de surface en Nouvelle-Calédonie. Implémentation du code GR4H sur quatre bassins versants du Grand Nouméa. Rapport IFREMER – UR LEADNC. 2016. 35 pages.



TABLE DES MATIERES

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION | 1 |
| 1. ZONE D'ETUDE | 3 |
| 1.1. CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET REGIONAL | 3 |
| 1.2. BASSINS ETUDIES | 4 |
| 2. MATERIEL ET METHODES | 7 |
| 2.1. DONNEES UTILISEES | 7 |
| 2.1.1. <i>Précipitations</i> | 7 |
| 2.1.2. <i>Evapotranspiration potentielle</i> | 8 |
| 2.1.3. <i>Débits</i> | 9 |
| 2.2. LA MODELISATION PLUIE-DEBIT | 9 |
| 2.2.1. <i>Choix du modèle</i> | 9 |
| 2.2.2. <i>Description du modèle GR4H</i> | 10 |
| 2.2.3. <i>Méthode de calage utilisée</i> | 11 |
| 2.2.4. <i>Découpage en année hydrologiques</i> | 12 |
| 2.2.5. <i>Exploration du comportement du modèle</i> | 12 |
| 3. RESULTATS | 15 |
| 3.1. MISE EN PLACE DE LA MODELISATION | 15 |
| 3.1.1. <i>Sélection de la donnée de pluie</i> | 15 |
| 3.1.2. <i>Sélection de la donnée d'évapotranspiration</i> | 15 |
| 3.1.3. <i>Sensibilité des résultats aux conditions initiales</i> | 16 |
| 3.1.4. <i>Analyse de la sensibilité des résultats aux paramètres du modèle</i> | 16 |
| 3.1.5. <i>Sensibilité à la durée d'optimisation</i> | 19 |
| 3.2. OPTIMISATION DU MODELE SUR LES 4 BASSINS VERSANTS | 20 |
| 3.3. PERSPECTIVES ET LIMITATIONS | 23 |
| 3.3.1. <i>Régionalisation des paramètres du modèle</i> | 23 |
| 4. DISCUSSION ET CONCLUSION | 25 |
| ANNEXE 1. SELECTION DES CRITERES DE VALIDATION/OPTIMISATION | 31 |
| ANNEXE 2. UTILISATION DE LA DONNEE RADAR | 33 |
| 1. PRESENTATION DU PRODUIT ANTILOPE J+1 | 33 |
| 2. LECTURE DES DONNEES ANTILOPE JP1 POUR LA SIMULATION DES DEBITS DE LA DUMBEA EST | 35 |

TABLE DES ILLUSTRATIONS

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURE 1 : CARTE DE LA ZONE D'ÉTUDE : LOCALISATION ET DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS, LIMNIMETRES, STATIONS METEO ET POINTS DE CALCUL DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION, TOPONYMES, RELIEF, BATHYMETRIE..... | 3 |
| FIGURE 2: REPARTITION SAISONNIERE INTER-ANNUELLE DES PRECIPITATIONS A LA STATION DE MONTAGNE DES SOURCES, SUR LE BASSIN DE LA DUMBEA EST..... | 7 |
| FIGURE 3: EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE SIMULEE PAR METEO-FRANCE SUR LE BASSIN DE LA DUMBEA EST REPRESENTEE EN FONCTION DE L'ANNEE ET DU MOIS..... | 8 |
| FIGURE 4 : DEBITS MESURES SUR LA DUMBEA EST DU 3 AU 8 FEVRIER. DEBITS HORAIRES EN TRAIT CONTINU, DEBITS JOURNALIERS INTERPOLES LINEAIREMENT AU PAS DE TEMPS HORAIRE..... | 9 |
| FIGURE 5 : SCHEMA CONCEPTUEL DU MODELE GR4H (ADAPTE DE PERRIN ET AL., 2003)..... | 10 |
| FIGURE 6 : ETP UTILISEE COMME FORÇAGES (GAUCHE) ET DEBITS SIMULES PAR GR4H (DROITE) POUR LES DEUX SIMULATIONS DECRITES DANS LE TEXTE..... | 15 |
| FIGURE 7 : DEBITS SIMULES (DROITE) ET REMPLISSAGE DU RESERVOIR DE ROUTAGE (GAUCHE) POUR DES SIMULATIONS REALISEES EN DEMARRANT DE RESERVOIRS VIDES (BLEU) OU PLEINS (ROUGE)..... | 16 |
| FIGURE 8 : KGE (GAUCHE), ERREUR SUR LES VOLUMES (MILIEU) ET ERREUR SUR LES VOLUMES DE CRUES (DROITE) EN FONCTION DE LA CAPACITE DU RESERVOIR DE STOCKAGE (HAUT), DU COEFFICIENT D'ÉCHANGE SOUTERRAIN (MILIEU HAUT), DE LA CAPACITE DU RESERVOIR DE ROUTAGE (MILIEU BAS) ET DU TEMPS DE BASE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE (BAS) POUR LA DUMBEA NORD (VERT) ET EST (VIOLET). LES VALEURS OPTIMALES DES PARAMETRES SONT REPRESENTES PAR DES LIGNES VERTICALES DE COULEUR..... | 18 |
| FIGURE 9 : VALEUR DES PARAMETRES DU MODELE EN FONCTION DE LA DUREE D'OPTIMISATION POUR LA DUMBEA EST ET LA DUMBEA NORD. X1, TAILLE DU RESERVOIR DE STOCKAGE, X2 COEFFICIENT D'ÉCHANGES SOUTERRAINS, X3 TAILLE DU RESERVOIR DE ROUTAGE ET X4 TEMPS DE BASE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE..... | 19 |
| FIGURE 10 : DEBITS SIMULEES EN FONCTION DES DEBITS OBSERVES POUR CHAQUE BASSIN VERSANT. (LIGNE GRISE =30% D'ERREUR ; LIGNE NOIRE = 50% D'ERREUR)..... | 20 |
| FIGURE 11 : VOLUMES ANNUELS OBSERVES (BLEU) ET SIMULES (ROUGE) (HAUT) POUR LA COULEE, LA DUMBEA EST, LA DUMBEA NORD ET LA COUVELEE (DE GAUCHE A DROITE)..... | 21 |
| FIGURE 12 : PRECIPITATIONS (NOIR), DEBITS OBSERVES (BLEU) ET SIMULES (ROUGE) POUR LA DUMBEA EST (HAUT), DUMBEA NORD (MILIEU) ET COUVELEE (BAS)..... | 22 |
| FIGURE 13 : VOLUMES ANNUELS OBSERVES (BLEU) ET SIMULES (ROUGE) (HAUT) POUR LA COUVELEE (DE GAUCHE A DROITE). PARAMETRES REGIONALISES SUR LA DUMBEA EST ET LA DUMBEA NORD PUIS X2 MODIFIE SUR LA COUVELEE..... | 24 |
| FIGURE 14 : CUMUL DES PRECIPITATIONS ANTILOPE J+1 SUR LA ZONE D'ÉTUDE. LES DONNEES SONT RAPPORTEES EN MM/AN..... | 33 |
| FIGURE 15 : CORRELATION ENTRE CHAQUE POINT DE LA GRILLE ET LA SERIE TEMPORELLE ENREGISTRE PAR LE PLUVIOMETRE POUR LES SIX PLUVIOMETRES DE L'ÉTUDE. DANS LE SENS DE LECTURE, COULEE, MONTAGNE DES SOURCES (DAVAR), MONTAGNE DES SOURCES (METEO-FRANCE), DUMBEA..... | 34 |
| FIGURE 16 : CARTE DE REPRESENTATIVITE DES PLUVIOMETRES ET COMPARAISON AVEC LE DECOUPAGE OBTENU PAR LES POLYGOINES DE THIessen.. | 34 |
| FIGURE 17: DEBITS SIMULES AVEC ANTILOPE JP1 ET GR4H CALIBRE ENTRE 2014 ET 2015 SUR LES PERIODES DE JANVIER A MAI 2016 (GAUCHE) ET MARS 2016 (DROITE)..... | 35 |



TABLE DES TABLEAUX

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLEAU 1: CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS BASSINS ETUDIES (D'APRES ALRIC, 2009 ; DITTT, 2011). CODE COULEUR UTILISE : VERT POUR LES VALEURS MAXIMALES, ROUGE POUR LES VALEURS MINIMALES. | 5 |
| TABLEAU 2 : NOM DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES, PROVENANCE DE LA DONNEE ET PERIODE COUVERTE PAR LA DONNEE DE PLUIE | 7 |
| TABLEAU 3 : STATIONS LIMNIMETRIQUES DISPONIBLES ET INTERVALLE DE TEMPS OU LES DEBITS SONT FOURNIS | 9 |
| TABLEAU 4 : KGES CALCULE POUR CHAQUE BASSIN ET CHAQUE METHODE DE SPATIALISATION DE LA PLUIE TESTEE..... | 15 |
| TABLEAU 5 : PARAMETRES OPTIMISES SUR LES 4 BASSINS VERSANTS ETUDIES | 20 |
| TABLEAU 6 : METRIQUES STATISTIQUES DE VALIDATION POUR LES 4 BASSINS ETUDIES | 20 |
| TABLEAU 7 : PARAMETRES OPTIMISES SUR LES 4 BASSINS VERSANTS ETUDIES | 23 |
| TABLEAU 8 : METRIQUES STATISTIQUES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DU MODELE | 23 |
| TABLEAU 9 : METRIQUES STATISTIQUES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DU MODELE POUR LA COUVELEE | 24 |
| TABLEAU 10 : METRIQUES DE VALIDATION CALCULEES A LA SUITE D'UNE OPTIMISATION EN CHOISSANT NSE, KGE OU KGES COMME FONCTION OBJECTIF | 31 |
| TABLEAU 11 : CORRELATION ET BIAIS ENTRE LAME D'EAU ANTILOPE AU DESSUS DU PLUVIOMETRE ET PLUVIOMETRE..... | 33 |

INTRODUCTION

Le lagon de Nouvelle-Calédonie est le plus grand lagon semi-fermé et la deuxième plus grande barrière récifale au monde, derrière la grande barrière de corail australienne. Il constitue ainsi un environnement unique et, depuis juillet 2008, plusieurs parties de ce lagon sont inscrites au patrimoine mondial de l'UNESCO. Comme dans la plupart des îles tropicales hautes, les dépressions et cyclones tropicaux génèrent des précipitations soudaines et très intenses qui engendrent ainsi de très forts régimes de crues. Lors d'évènements pluvieux de ce type, le débit des rivières calédoniennes peut être multiplié par cent en moins d'une heure (Terry et al., 2008). Par ailleurs, ce territoire fait également l'objet d'extractions minières à grande échelle, du fait de la teneur importante en métaux, notamment en nickel, présents dans ses sols. Cette extraction, le plus souvent à ciel ouvert, entraîne un déplacement et une érosion de volumes considérables de terres, induisant des apports sédimentaires très importants à la côte (Dumas et al., 2010; Losfeld et al., 2015, Fernandez et al., 2006). Ces augmentations de matières en suspension sont un des facteurs de stress pour les structures coralliennes, engendrant par exemple des phénomènes d'étouffement ou encore une diminution de la lumière nécessaire à la vie corallienne (Bessell-Browne et al., 2017). Par ailleurs, la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie fait l'objet de feux récurrents de grande ampleur, surtout concentrés pendant la période sèche (Dumas et al., 2013), modifiant ainsi la susceptibilité à l'érosion des sols concernés. Les rivières sont les vecteurs de transport principaux de ces sédiments mais également d'éléments dissous potentiellement néfastes au fonctionnement de l'écosystème corallien (excès de sels nutritifs, de pesticides et autres contaminants).

Les apports terrigènes constituent donc une pression majeure sur l'état de santé des écosystèmes lagunaires. Afin de pouvoir introduire des forçages terrigènes pertinents dans les modèles de circulation lagunaire, il semble important de bien appréhender le fonctionnement des bassins versants calédoniens ainsi que leurs spécificités. Dans les études précédentes sur la dynamique du lagon Sud-Ouest (Fernandez et al., 2006 ; Faure et al., 2010 ; Fuchs et al., 2012), les apports en eau douce n'étaient soit pas représentés du tout, soit de manière schématique (valeurs journalières). Pourtant, une des spécificités des apports en Nouvelle-Calédonie réside dans le caractère chronique et intense des évènements importants. Un axe de travail important pour la représentation d'un continuum terre-lagon réaliste se trouve donc dans la prise en compte des apports terrigènes, d'un point de vue spatial (obtenir de l'information aux exutoires des principaux cours d'eau) et temporel (disposer de séries temporelles au pas de temps horaire).

Par ailleurs, si le débit des rivières de Nouvelle-Calédonie est actuellement suivi sur 22 bassins versants, de nombreux autres bassins ne sont pas instrumentés. Aussi les modèles hydrologiques pourraient permettre de compléter la base de données existante et de pouvoir fournir aux modèles de circulation lagunaire une estimation des débits de la plupart des fleuves de Nouvelle-Calédonie. En effet, de tels outils peuvent permettre d'estimer les débits de bassins instrumentés pendant de nombreuses années mais qui ne le sont plus, ou même sur des bassins dont les caractéristiques hydrologiques se rapprochent de celles de bassins instrumentés (Hrachowitz et al., 2013). Jusqu'au début du 20^e siècle, les scientifiques travaillant dans le domaine de l'hydrologie utilisaient principalement des formulations empiriques ou encore la méthode dite « rationnelle », développée par Mulvaney en 1850, basée sur la notion de temps de concentration (Todini, 1988). Suite à l'introduction du concept d'hydrogramme unitaire par Sherman (1932), une nouvelle méthodologie d'étude du fonctionnement des bassins versants est apparue, les modèles dits « conceptuels ». « Un modèle est une représentation sous une forme quelconque d'un objet, d'un processus ou d'un système » (UNESCO-OMM, 1992). La représentation de l'écoulement d'une rivière peut être réalisée par le biais d'un modèle hydrologique. Ce dernier est défini comme étant une

simplification mathématique des processus prépondérants du cycle hydrologique. Un des objectifs principaux des modèles hydrologiques consiste à reproduire le débit d'une rivière à l'exutoire de son bassin versant ; c'est notamment le rôle des modèles pluie-débit. Il existe entre autres des modèles hydrologiques globaux, considérant le bassin versant comme étant une entité unique (e.g modèles « Génie Rural » - 1989, « MORDOR » - 1990) et des modèles distribués, ou semi-distribués, prenant en compte la variabilité spatiale au sein d'un bassin versant (e.g « HBV » - 1976, « TOPMODEL » - 1979, « MIKE-SHE » - 1982). Dans le cadre de cette étude, le choix a été porté sur le modèle GR4H : modèle du Génie Rural à 4 paramètres Horaires, qui est la version horaire du modèle journalier GR4J développé par l'IRSTEA (Perrin et al., 2003). Ce choix a été motivé par le pas de temps horaire utilisé, la rapidité d'exécution de ce code (modèle « non spatialisé »), son faible nombre de paramètres, son implémentation à des latitudes comparables et sur des bassins à réaction rapide (Bennett et al., 2014).

L'objectif principal de l'étude, dans une optique de mise en place de modèles représentant le continuum terre-mer, est principalement d'investiguer la pertinence de l'utilisation du modèle GR4H sur les bassins calédoniens. Ce rapport est donc volontairement très méthodologique et présente des analyses de sensibilité, une quantification de la pertinence de GR4H ainsi qu'un test de régionalisation.



1. ZONE D'ETUDE

1.1. Contexte hydrologique et régional

La Nouvelle-Calédonie est un archipel de 18 575 km² situé dans l'océan Pacifique Sud-Ouest entre le 18^{ème} et le 23^{ème} parallèle sud, à 1 200 km à l'est de l'Australie et 1 500 km au nord-ouest de la Nouvelle-Zélande. Elle est composée de plusieurs îles. L'île principale est appelée « Grande Terre » (16 664 km²). Celle-ci est étirée tout en longueur avec un relief marqué. Schématiquement elle peut être coupée en deux sur sa longueur par une barrière montagneuse, appelée la chaîne (Figure 1). Ceci entraîne deux conséquences notables pour les écoulements de surface. Tout d'abord, étant donné que les pentes sont fortes et orientées vers l'océan, le réseau hydrographique surfacique est dense et court. Sur les 150 fleuves côtiers que compte l'île, seuls 9 dépassent 30 km de long et le plus grand, le Diahot mesure 55 km. De plus, les sommets de la chaîne dépassent souvent 1 000 mètres et retiennent les nuages et les précipitations. La côte Est, sous le vent, est ainsi plus arrosée que le reste du Territoire.

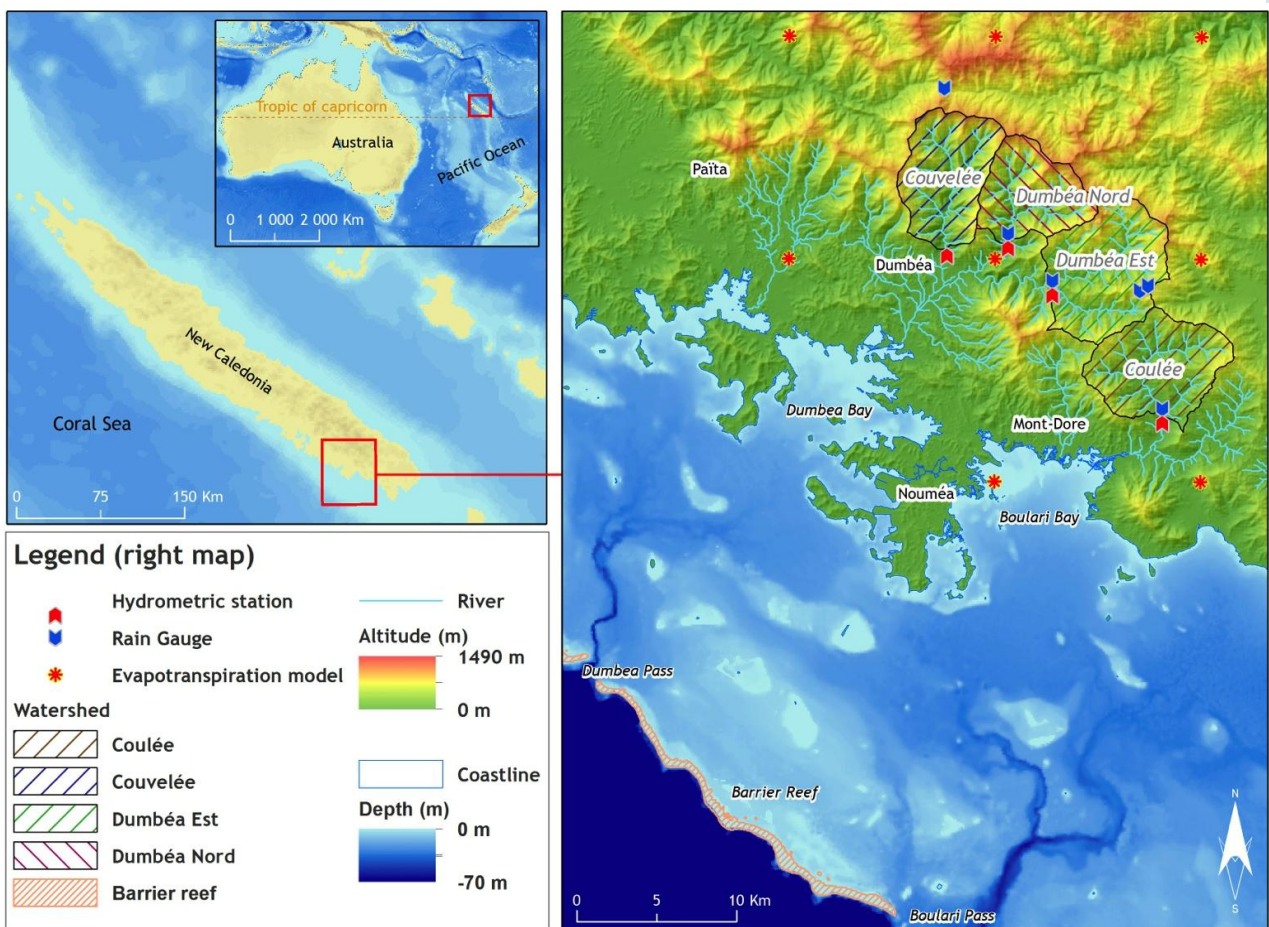


Figure 1: Carte de la zone d'étude : localisation et délimitation des bassins versants, limnimètres, stations météo et points de calcul de l'évapotranspiration, toponymes, relief, bathymétrie.

La météorologie de la Nouvelle-Calédonie est principalement régie par des variations interannuelles, saisonnières et journalières. Elles sont décrites notamment par Caudmont et Maitrepierre, (2007), dont nous reprenons ici uniquement les grandes lignes.

Les premières ont pour origine principale le phénomène ENSO (El Niño Southern Oscillation) (Fischer, 2004). Caractérisé par 3 phases, El Niño, La Niña et neutre, ENSO se répète selon une période de 2 à 7 ans.

Lors de l'apparition de la phase El Niño, les alizés faiblissent. Les eaux chaudes de surface, accompagnées de nuages et de précipitations, refluent d'ouest en est à l'échelle du Pacifique. En Nouvelle-Calédonie, les précipitations faiblissent. À l'inverse, pendant une phase la Niña, les alizés se renforcent et poussent les eaux chaudes et les dépressions vers l'ouest, vers la Nouvelle-Calédonie.

À une échelle temporelle plus courte, les variations saisonnières sont régies par des successions de régimes météorologiques tropicaux et tempérés influencées par la position de la ceinture anticyclonique subtropicale et des basses pressions intertropicales qui déterminent deux saisons principales séparées par deux intersaisons :

- de novembre à avril : c'est la saison chaude ou cyclonique,
- d'avril à mai : c'est une saison de transition, durant laquelle, les dépressions tropicales sont de moins en moins actives, même si l'air reste humide et chaud. Des pluies orageuses peuvent se déclencher sur la chaîne.
- de mai à septembre : c'est la saison fraîche, des perturbations d'origine polaire peuvent occasionnellement atteindre le territoire et provoquer des "coups d'Ouest". Cette saison est marquée par une grande variabilité, notamment des précipitations.
- de septembre à novembre : c'est une saison de transition sèche durant laquelle l'alizé soufflant de sud-est est présent en quasi permanence.

Enfin, la variabilité journalière est régie par le cycle jour-nuit. Le soleil, réchauffant l'air situé au dessus de la terre va mettre en place des cellules convectives qui vont attirer les nuages vers les reliefs. Cela engendre par exemple des pluies sur la Côte Ouest plutôt concentrées en fin d'après-midi entre 15h et 18h locales (Caudmont et Maitrepierre, 2007). Les cyclones et dépressions tropicales induisent des événements dont la durée est de l'ordre de la journée (Terry et Wotling 2011).

1.2. Bassins étudiés

Ce rapport présente les résultats obtenus sur 4 bassins versants, trois affluents de la rivière Dumbéa et La Coulée. La Dumbéa et la Coulée sont deux fleuves côtiers se jetant respectivement dans la baie de Dumbéa et de Boulari, bordant le Grand Nouméa (Figure 1). Cette agglomération représente à elle seule plus des deux tiers de la population de Nouvelle-Calédonie (Institut de la Statistique et des Etudes Economiques de Nouvelle-Calédonie (ISEE), 2014). En outre, la Dumbéa est une source en eau potable pour le Grand Nouméa (Terry and Wotling, 2011). Cette rivière est composée de cinq affluents principaux (Figure 1) : la Ouanéoué, la Nondoué, la Couvelée, la Dumbéa Nord et la Dumbéa Est. Ces trois dernières sont aujourd'hui instrumentées de limnimètres qui permettent de suivre leurs débits au pas de temps horaire. La rivière de la Coulée est composée de 2 cours d'eau principaux : la Coulée amont, située au Nord-ouest du bassin qui est instrumenté, et la Lembi, non instrumentée. Ces cours d'eau drainent les bassins versants du même nom.

Les principales caractéristiques des bassins instrumentés sont présentées sur le Tableau 1. Les paramètres physiques (surface, altitude et pente moyenne) sont repris des valeurs calculées par Alric (2009) et issues des données extraites de la DITTT (2011). Sauf mention contraire, les paramètres hydrologiques sont repris des données présentées par Alric (2009). Le module annuel est défini comme étant le débit moyen inter-annuel. Les débits de crues ont été calculés par Alric (2009), généralement en étant ajustés graphiquement à la loi de Gumbel. La pluie annuelle cumulée est issue du travail réalisé par la DAVAR en collaboration avec Météo-France (Perchat, 2003). Le module annuel rapporté à la surface du bassin est calculé directement à partir des précédentes données tout comme le coefficient d'écoulement, défini



- Zone d'étude -

comme étant le rapport du module annuel rapporté à la surface et de la pluie annuelle cumulée. L'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) est calculée à partir des données Météo-France présentées plus loin. Cette variable est définie comme étant le cumul annuel de la quantité d'eau évapotranspirée d'un couvert végétal bas, continu et homogène, qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique, pathologique ou d'alimentation en eau. Enfin, la densité de drainage, définie comme la longueur des cours d'eau divisée par la surface des bassins, est calculée à partir des données extraites de DITTT (2011). D'un point de vue global, ces données montrent que les bassins étudiés sont de taille relativement petite, environs 40 km² en général, alors qu'ils sont très pentus avec des pentes moyennes de l'ordre de 35%. Cela est classique pour des bassins de Nouvelle-Calédonie (voir Terry et Wotling 2011). Les caractéristiques hydrologiques révèlent que les bassins sont généralement très arrosés, avec des cumuls de pluie moyens supérieurs de 2 000 mm, ce qui est typique de bassins situés en zone tropicale. Enfin, les caractéristiques hydrologiques présentées montrent une différence marquée entre le bassin de la Dumbéa Est, très arrosée, avec un fort coefficient d'écoulement et une faible densité de drainage, et le bassin de la Couvelée, moins arrosé, avec un coefficient d'écoulement faible et une densité de drainage forte.

Tableau 1: Caractéristiques des différents bassins étudiés (d'après Alric, 2009 ; DITTT, 2011).
 Code couleur utilisé : vert pour les valeurs maximales, rouge pour les valeurs minimales.

| | Coulée | Dumbéa Est | Dumbéa Nord | Couvelée |
|--------------------------------------------------|--------|------------|-------------|----------|
| Paramètres physiques | | | | |
| Surface (km ²) | 43,77 | 51,21 | 32,31 | 40,0 |
| Altitude moyenne (m) | 330 | 510 | 570 | 490 |
| Pente moyenne (%) | 31,2 | 33,3 | 46,7 | 45,2 |
| Paramètres hydrologiques | | | | |
| Module annuel (m ³) | 1,78 | 3,06 | 1,61 | 1,22 |
| Débit de crue (m ³ .s ⁻¹) | 100 | 200 | 100 | 45 |
| Pluie annuelle cumulée (mm/an) | 2381 | 2762 | 2581 | 2057 |
| Module annuel rapporté à la surface (mm/an) | 1382 | 2062 | 1663 | 917 |
| Coefficient d'écoulement (%) | 61 | 81 | 66 | 41 |
| ETP annuelle (mm) | 931 | 989 | 821 | 729 |
| Densité de drainage (km/km ²) | 0,87 | 0,93 | 0,71 | 1,88 |

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Données utilisées

2.1.1. Précipitations

Les données de précipitations utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de pluviomètres et ont été fournies par l'Observatoire de la Ressource en Eau (ORE), service de la DAVAR (Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales), et par Météo France (MF). Elles sont fournies en 6 points positionnés comme présenté sur la Figure 1. Les données ont toutes été fournies au pas de temps horaire. La provenance des données, l'intervalle de temps couvert, ainsi que l'altitude de la station de mesure sont récapitulés pour chaque station dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Nom des stations pluviométriques, provenance de la donnée et période couverte par la donnée de pluie

| Nom de la station | Provenance donnée | Altitude (m) | Période couverte |
|--------------------------|-------------------|--------------|-----------------------------|
| Dumbéa Est (1) | ORE (DAVAR) | 120 | 15 fév 2007 – 20 juin 2016 |
| Dumbéa Nord (2) | ORE (DAVAR) | 80 | 10 fév 1989 – 20 juin 2016 |
| Montagne des Sources (3) | ORE (DAVAR) | 760 | 18 mai 1988 – 20 juin 2016 |
| Montagne des Sources (4) | Météo-France | 772 | 1er janv 2003 – 31 mai 2016 |
| Coulée (5) | ORE (DAVAR) | 5,1 | 27 juil 2007 – 20 juin 2016 |
| Ouiné (6) | ORE (DAVAR) | 908 | 6 nov 1990 – 31 juil 2014 |

N.B : la description du jeu de données précipitations dans ce paragraphe est basée sur la période initialement fournie au début de l'étude à savoir la période 2003-2012.

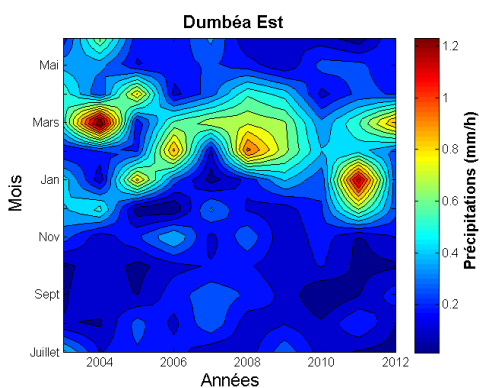


Figure 2: Répartition saisonnière inter-annuelle des précipitations à la station de Montagne des Sources, sur le bassin de la Dumbéa Est.

La Figure 2 présente la donnée de précipitation à l'échelle mensuelle et annuelle pour la Dumbéa Est. La variabilité saisonnière est conforme à celle de la région. La période humide se situe entre novembre et avril et la période sèche le reste de l'année. Par ailleurs, les durées de saison des pluies présentent une variabilité importante à l'échelle-interannuelle. D'une année à l'autre, les cumuls de précipitations ne sont pas les mêmes, avec des variations pouvant être supérieures à 700 mm d'une année sur l'autre. L'année la plus humide est 2008 atteignant un cumul de précipitations de plus de 3 300 mm. L'année 2010, quant à elle, correspond à l'année étudiée la plus sèche avec un cumul de 2 400 mm. Les années

2003 et 2004 ont présenté des périodes de pluie intenses mais plus restreintes temporellement (entre mi-février et fin mars). Inversement, l'année 2008 est caractérisée par une saison des pluies plus longue, s'étendant de janvier à fin avril.

Représentativité des données de précipitations à l'échelle du bassin

Pour pouvoir travailler à l'échelle de bassins versants et non à l'échelle du pluviomètre, il est nécessaire de « convertir » la donnée ponctuelle de ce dernier en une donnée spatialisée, et donc de « spatialiser » la donnée de pluie. Pour cela plusieurs approches sont possibles. Les quatre ci-dessous ont été testées en entrée du modèle GR4H :

1. Considérer que la pluie tombée au pluviomètre est bien représentative de la pluie tombée sur tout le bassin. C'est la méthode la plus simple. La qualité de la donnée de pluie va dépendre de la position géographique du pluviomètre pris en compte.
2. Utiliser les résultats relatifs aux bassins versants de Nouvelle-Calédonie publiés par la DAVAR (Alric, 2009). Pour cela, la pluie moyenne enregistrée au pluviomètre est comparée avec la pluie moyenne calculée par la DAVAR en collaboration avec Météo-France (Perchat, 2003). La pluie lue par le pluviomètre est alors corrigée par un coefficient de proportionnalité égal au rapport entre les moyennes précédemment calculées. Cette méthode garantit en particulier que les grandes caractéristiques hydrologiques des bassins étudiés, comme le coefficient d'écoulement, sont respectées.
3. Appliquer la méthode des polygones de Thiessen, qui affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en %, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Lesdits polygones sont générés à partir des positions des pluviomètres et sont définis par les médiatrices des segments reliant les pluviomètres entre eux. Chaque polygone désigne la zone d'influence du pluviomètre qu'il contient. La série temporelle obtenue a ensuite été corrigée comme décrite dans le point 2 pour garantir le respect des caractéristiques hydrologiques. Cette correction est en particulier nécessaire sur le bassin de la Dumbéa Nord qui n'est représenté que par un seul pluviomètre positionné en aval du bassin.
4. Utiliser les lames d'eau radar du produit Antilope fourni par Météo-France sur la période 2014-2016. Ce produit est un produit issu des observations radar, corrigées à J+1 avec les données des pluviomètres. Elles fournissent, avec une résolution spatiale de 1 km² et temporelle de 1 h, une estimation 2D de la pluie tombée. Un test d'utilisation des produits Antilope est présenté en Annexe.

2.1.2. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la fraction d'eau qui va « repartir » vers l'atmosphère et donc qui n'intégrera pas l'écoulement de surface ou les réservoirs souterrains. Deux jeux de données d'évapotranspiration potentielle ont été utilisés dans le cadre de cette étude. Le premier est composé des valeurs climatologiques mensuelles entre 1996 et 2005 au niveau de la station météorologique de Nouméa.

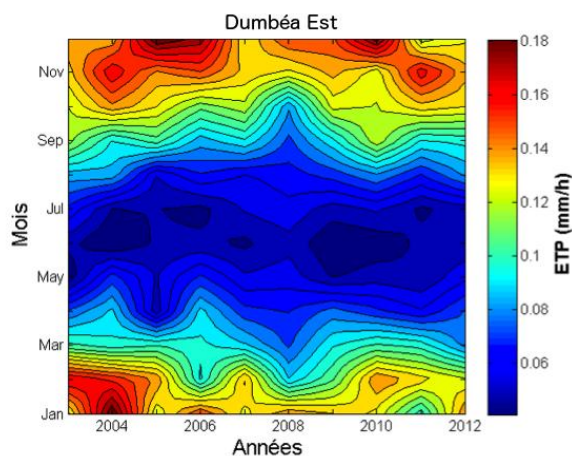


Figure 3: Evapotranspiration potentielle simulée par Météo-France sur le bassin de la Dumbéa Est représentée en fonction de l'année et du mois



Le second est issu des modèles de Météo France au pas de temps journalier pour la période 2000-2015 sur une grille de 8 km *8 km (Prats, 2009). Cette donnée est calculée à partir de la température de l'air, de l'insolation et de la force du vent. La variabilité de l'ETP modélisée en fonction des mois et des années est représentée sur la figure 3. Elle est maximale en décembre et minimale en juin. L'année 2004 est l'année où l'ETP a été la plus forte et 2008 l'année où elle a été la plus faible.

Tableau 3 : Stations limnimétriques disponibles et intervalle de temps où les débits sont fournis

| Station | Période couverte |
|-------------|-----------------------------------------|
| Dumbéa Est | 1 ^{er} janv 2003 – 25 mai 2016 |
| Dumbéa Nord | 1 ^{er} janv 2003 – 25 mai 2016 |
| Couvelée | 21 déc 1967 – 08 juin 2016 |
| Coulée | 4 avr 2000 – 26 mai 2016 |

2.1.3. Débits

Les données de débit utilisées proviennent de limnimètres situés le plus en aval possible des bassins étudiés. Les instruments enregistrent une hauteur d'eau. Cette hauteur a été convertie, par l'ORE, en débit grâce à des courbes de tarage au pas de temps horaire. L'intervalle de temps couvert pour chaque station de mesure est présenté sur le Tableau 3.

2.2. La modélisation pluie-débit

2.2.1. Choix du modèle

Un des objectifs recherchés dans le cadre de ce travail est d'arriver à simuler les apports d'eau douce dans les lagons de Nouvelle-Calédonie à partir de données de précipitations. La suite du travail consistera à coupler le code GR4H au code hydrodynamique MARS3D. Ainsi il est important de pouvoir fournir aux maquettes hydrodynamiques des séries temporelles de débit continues et à un pas de temps adapté aux processus principaux gouvernant l'extension des panaches (précipitations, marée et vents).

En Nouvelle-Calédonie la composante principale de la marée est semi-diurne (Douillet 1998). Le vent connaît lui des variations journalières importantes, surtout près des côtes (Caudmont et Maitrepierre 2007). Enfin, les cours d'eau calédoniens présentent des temps de réponse très rapides, généralement inférieurs à 2-3 heures (Alric, 2009). À titre d'illustration (Figure 4), on peut tracer la valeur du débit horaire issue des données décrites précédemment d'une part, et d'autre part la valeur du débit horaire qui serait interpolée à partir d'une donnée journalière. Une telle donnée a été obtenue en agrégeant la donnée horaire en donnée journalière. Cela révèle notamment que la temporalité et l'amplitude des crues n'est pas correctement représentée avec une donnée journalière. Ainsi, pour pouvoir décrire avec précision la dynamique des rivières mais également l'extension spatiale des panaches, le phasage entre les pics de crue, l'instant de marée et l'heure de la journée représente un point crucial.

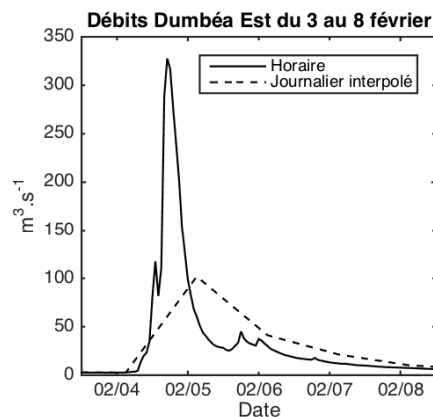


Figure 4 : Débits mesurés sur la Dumbéa Est du 3 au 8 février. Débits horaires en trait continu, débits journaliers interpolés linéairement au pas de temps horaire.

Ces éléments pris en considération, les résultats de Mathevet, (2005) nous ont guidés vers le modèle GR4H. En effet, en plus d'avoir montré les meilleures performances au pas de temps horaire parmi les modèles testés, ce modèle paraît robuste car appliqué notamment à plusieurs centaines de bassins de France et d'Australie (Mathevet 2005, Bennet et al 2014). Il est simple de compréhension : seules deux variables d'états sont nécessaires pour décrire l'écoulement. Enfin, il est simple à calibrer : seuls 4 paramètres peuvent être modifiés pour représenter l'ensemble des caractéristiques des écoulements rencontrés.

2.2.2. Description du modèle GR4H

Le modèle GR4H, "Génie Rural à 4 paramètre Horaire", est un modèle déterministe développé par l'Irstea et dérivé du modèle journalier GR4J (Mathevet, 2005; Perrin et al., 2003). Ce modèle utilise en entrée les données issues de deux variables que sont :

- les précipitations (P),
- l'évapotranspiration potentielle (E).

Les deux variables d'états sont :

- le réservoir de production (S), c'est à dire la partie des précipitations qui va être stockée dans le sol,
- le réservoir de routage (R), qui permet de répartir temporellement la quantité d'eau participant au débit de la rivière.

Quatre coefficients sont utilisés pour paramétrer le comportement du milieu :

- la capacité maximale du réservoir de production (x_1),
- le coefficient d'échange souterrain (x_2),
- la capacité maximale de R (x_3),
- le temps de base de l'hydrogramme unitaire (x_4).

Une fois les variables P et E fournies au modèle, la pluie nette (P_n) et l'évapotranspiration nette (E_n) sont calculées comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Si } P > E, & \quad P_n = P - E, \quad E_n = 0 \\ \text{Si } P < E, & \quad P_n = 0, \quad E_n = E - P \end{aligned}$$

P_n va se diviser en deux parties. La première, P_s , sera stockée dans le réservoir de production alors que la seconde ira directement alimenter la partie routage du modèle. La quantité P_s est proportionnelle au remplissage du réservoir S. Si le réservoir est vide, quasi-totalité de P_n alimentera ce réservoir alors qu'à l'inverse, lorsqu'il est plein, P_n sera redirigé directement vers la partie routage. Le réservoir de stockage se vide selon deux processus. Lorsque l'évapotranspiration nette est supérieure à 0, de l'eau est directement prise de ce réservoir. Par ailleurs, le réservoir de stockage se vide par percolation dans la partie routage du modèle. Dans les deux cas, la quantité d'eau qui quitte S est proportionnelle à la quantité d'eau contenue dans S et au taux de remplissage de ce réservoir. L'eau qui arrive dans la partie routage, P_r , est divisée en deux. 90% de P_r vont être routés vers un hydrogramme unitaire UH1 puis vers le réservoir de routage R, et les 10% restant vont être dirigés vers un second hydrogramme unitaire UH2, deux fois plus long que le premier. UH1 et UH2 permettent de simuler le temps de montée, c'est à dire l'écart entre un évènement pluvieux et le pic de débit résultant. Une fonction $F(x_2)$ contrôle les échanges souterrains entre le bassin

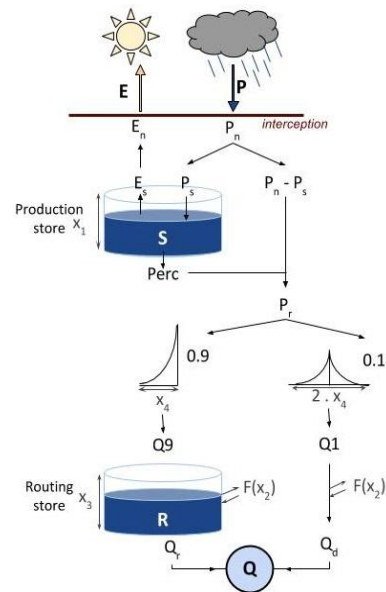


Figure 5 : Schéma conceptuel du modèle GR4H (adapté de Perrin et al., 2003)



versant étudié et les bassins voisins. Le débit final est obtenu à partir des écoulements issus de R et de UH2, soumis à F(x2) (Perrin et al., 2003; Mathevet, 2005).

2.2.3. Méthode de calage utilisée

Pour obtenir des débits simulés fidèles aux observations, il est nécessaire de passer par une étape de calibration du modèle. Quatre paramètres du modèle GR4H, x1, x2, x3 et x4, doivent être calibrés. À ces fins, une optimisation a été conduite. Cela signifie que l'on recherche parmi toutes les valeurs de (x1,x2,x3,x4) possibles celles qui donnent les meilleurs résultats pour la simulation. Pour permettre une estimation simple et automatique de la qualité des résultats, une fonction objectif est utilisée. Lorsque sa valeur est haute, la simulation est jugée de bonne qualité, lorsqu'elle est basse la simulation est jugée de mauvaise qualité. Par itérations successives, le processus consiste à déterminer le point du simplexe où la fonction est maximale afin de le remplacer par la réflexion (c'est-à-dire le symétrique) de ce point par rapport au centroïde des N points restants. Si la valeur de la fonction en ce nouveau point est inférieure aux valeurs prises sur les autres points, le simplexe est étiré dans cette direction. Sinon, il est supposé que l'allure locale de la fonction est une vallée, et le simplexe est réduit par une similitude centrée sur le point du simplexe où la fonction est minimale. Cet algorithme est simple, robuste et rapide et est bien adapté à des problèmes pour des petites dimensions (Lagarias, 1998). Il est classé avec les algorithmes d'optimisations dits locaux par Mathevet (2005), classe d'algorithme qui a montré les meilleurs résultats et la plus grande efficacité chez cet auteur. Cependant, comme il procède par évaluation directe de la fonction objectif, il est possible qu'il finisse par converger vers un minimum local mais non global. Il peut aussi converger vers un point non minimum. Pour limiter ces risques d'erreurs, le simplexe est relancé plusieurs fois depuis plusieurs états initiaux. Cela garantit de manière pratique que le point finalement retenu est bien un minimum global.

Afin de tester l'influence de la fonction objectif utilisée dans l'algorithme d'optimisation, différents critères d'efficacité ont été testés :

- NSE, le critère de Nash-Stucliffe : $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Pred,i} - Q_{Obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs,i} - \overline{Q_{Obs}})^2}$, (Nash and Sutcliffe, 1970) avec QPred, le débit simulé et QObs, le débit observé.
- KGE, le critère de Kling-Gupta : $KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$ (Gupta et al 2009) avec : r corrélation, α rapport entre variance prédite et variance observée et β rapport entre les moyennes (ou biais).
- KGE, le critère de Kling-Gupta sans prendre en compte les différences de variances : $KGEs = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$

L'objectif de l'étude est avant tout de reproduire convenablement la valeur des débits observés pendant les crues mais aussi leur phasage. Aussi, pour comparer ces métriques statistiques plusieurs critères de validation ont été définis que sont :

- l'erreur sur les volumes totaux ;
- l'erreur sur les volumes de crues : cette valeur est obtenue en considérant qu'à partir d'une certaine valeur, issue du rapport de Alric (2009), la rivière considérée est « en crue ». On compare alors les volumes mesurés et simulés pendant la crue observée.
- la corrélation entre volumes mesurés et simulés ;
- le déphasage sur les crues : pour obtenir cette valeur, la procédure suivante est répétée 100 fois :
 - a) La date à laquelle le débit maximal est observé est notée.
 - b) Une fenêtre de 48h autour de cette date est définie.

- c) À l'intérieur de cette fenêtre, la date à laquelle le débit maximal simulé se produit est comparée à la date précédemment observée.
- d) Les deux débits retenus sont mis de côté et la procédure reprend au point (a)
- o Le déphasage sur les crues est défini comme étant la moyenne des différences des dates comparées au point (c). Cette métrique mesure non seulement le déphasage entre crues mesurées et crues simulées mais aussi la cinétique de crues, puisque la valeur relative des valeurs est prise en compte.

2.2.4. Découpage en année hydrologiques

En raison du climat de la Nouvelle-Calédonie, les mois de janvier à mars sont les mois où les précipitations sont les plus intenses (saison des cyclones également). Afin de pouvoir découper les données en différentes années de manière cohérentes, le jeu de données a été découpé selon des années dites années hydrologiques. Suite à discussion avec l'ORE, les années hydrologiques ont été définies en démarrant le 1^{er} octobre, au milieu de la saison de transition sèche et en s'achevant le 30 septembre.

2.2.5. Exploration du comportement du modèle

Sensibilité du modèle aux valeurs initiales des variables d'état

Au début de chaque simulation, un temps de mise en route appelé spin-up est nécessaire et correspond à l'initialisation des réservoirs du modèle. Le spin-up peut varier d'un modèle à l'autre et il est donc important de l'estimer pour le modèle choisi. Pour cela deux simulations de un an ont été conduites sur la Dumbéa Est. La donnée de précipitation utilisée correspond à la donnée de pluie spatialisée grâce aux polygones de Thiessen. L'ETP utilisée est issue du jeu de donnée dénommé précédemment E2. Le paramétrage choisi est le même pour les deux simulations. Pour la première simulation, les réservoirs sont initialement vides, alors que pour la seconde, ils sont initialement pleins.

Sensibilité du modèle aux paramètres

L'analyse de sensibilité du modèle aux paramètres choisis a été conduite pour la Dumbéa Nord et Est. Cette étude a été réalisée en amont de notre étude. La pluie est donc issue des pluviomètres les plus proches des bassins corrigés d'un coefficient relatif aux effets d'orographie (méthodologie 2 partie III) Pour chaque bassin versant, une optimisation a été réalisée en faisant varier les 4 paramètres du modèle. Cette optimisation est conduite sur la période 2003-2015 pour la Dumbéa Nord et 2007 - 2015 pour la Dumbéa Est. L'analyse de sensibilité est ensuite conduite en faisant varier chaque paramètre dans un intervalle défini arbitrairement, les autres paramètres restant fixés à leur position optimale. Cette stratégie est une stratégie simple, qui est à rapprocher de celle de Nascimento et al. (1995) qui a conduit une analyse de sensibilité de ce type sur le modèle GR4J. Les métriques de validation que sont le KGEs, l'erreur totale sur les volumes et l'erreur sur les volumes de crues sont calculées pour chaque paramétrisation.

Sensibilité du paramétrage obtenu à la durée de calibration

L'opération de calibration consiste à trouver des valeurs des paramètres du modèle qui minimise l'erreur de modélisation sur la période considérée. La philosophie générale de calibration des modèles hydrologiques consiste à découper la période d'étude en plusieurs périodes : période de calibration et période de contrôle de la performance. Cette méthode, appelée "split sample test" est inspirée de Klemeš (1986). Cela permet de se rapprocher du plus près des conditions réelles de simulation. Une période de



- Matériel et méthodes -

5 ans est généralement utilisée pour calibrer le modèle (Berthier 2005), le reste de la série temporelle servant à évaluer les performances du modèle. Cependant, devant la longueur des séries temporelles de mesures fournies par la DAVAR et Météo-France, nous avons testé la sensibilité du paramétrage obtenu à la durée de calibration. Cela a été fait sur les 4 bassins étudiés, avec des pluies spatialisées suivant les polygones de Thiessen. La durée de calage a varié entre 1 et 12 ans.

Sélection d'une fonction objectif

La sélection des critères de validation s'est faite au début de l'étude sur les bassins de la Dumbéa Est et de la Dumbéa Nord. La donnée de pluie était issue du pluviomètre le plus proche des bassins versants considérés (paragraphe 2.1.1 - méthode 1). L'ETP a été convertie depuis l'ETP journalière de Météo-France. Les réservoirs étant initialement vides, une année climatologique a été rajoutée au début des séries temporelles considérées. Le test a été répété sur la Dumbéa Est avec des données de pluie spatialisées (paragraphe 2.1.1 - méthode 3). Les résultats de cette analyse sont présentés en Annexe 1. Il en résulte que le KGEs est sélectionné comme fonction objectif.

3. RESULTATS

3.1. Mise en place de la modélisation

3.1.1. Sélection de la donnée de pluie

Sur chaque bassin, la pluie a été calculée de 3 manières différentes et une optimisation a été conduite. Le Tableau 4 présente le KGEs correspondant à chaque optimisation. Pour tous les bassins, la méthode combinant Thiessen et la correction « orographique » fournit les simulations présentant les KGEs les plus importants.

Tableau 4 : KGEs calculé pour chaque bassin et chaque méthode de spatialisation de la pluie testée.

| Donnée de pluie | Coulée | Dumbéa Est | Dumbéa Nord | Couvelée |
|----------------------------------------|--------|------------|-------------|----------|
| Au pluviomètre | 0.93 | 0.93 | 0.866 | 0.95 |
| Correction « orographique » | 0.93 | 0.93 | 0.86 | 0.95 |
| Thiessen + correction « orographique » | 0.94 | 0.97 | 0.867 | 0.97 |

3.1.2. Sélection de la donnée d'évapotranspiration

L'évapotranspiration est la seconde variable forçante du modèle et il est intéressant de qualifier la qualité de la donnée nécessaire au bon fonctionnement du modèle GR4H (Oudin et al., 2004). En particulier, il est nécessaire de répondre à deux questions.

 Comment interpoler la donnée d'ETP pour obtenir une ETP horaire ?

Répondre à cette question revient à savoir si les variations de l'ETP au cours de la journée doivent être prises en compte, par exemple via l'application d'une sinusoïde. Deux simulations ont été réalisées pour répondre à cette question :

- o La première, simple, considère que l'ETP est constante au cours de la journée, égale à 1/24 fois l'ETP journalière.
- o La seconde, extrême, considère que l'ETP est nulle tout au long de la journée sauf entre midi et 13h où toute l'ETP est concentrée.

Les résultats obtenus avec ces simulations sont présentés sur la Figure 6. Ils montrent que, quelque soit la méthode d'interpolation choisie pour la conversion de l'ETP en donnée horaire, les débits ne changent pas significativement pendant les crues. Des différences sont notables pendant les périodes d'étiages mais restent en général inférieures à 0.1 m³/s. Ainsi la qualité de la donnée d'évapotranspiration n'a que peu d'influence sur les résultats du modèle hors des périodes d'étiages.

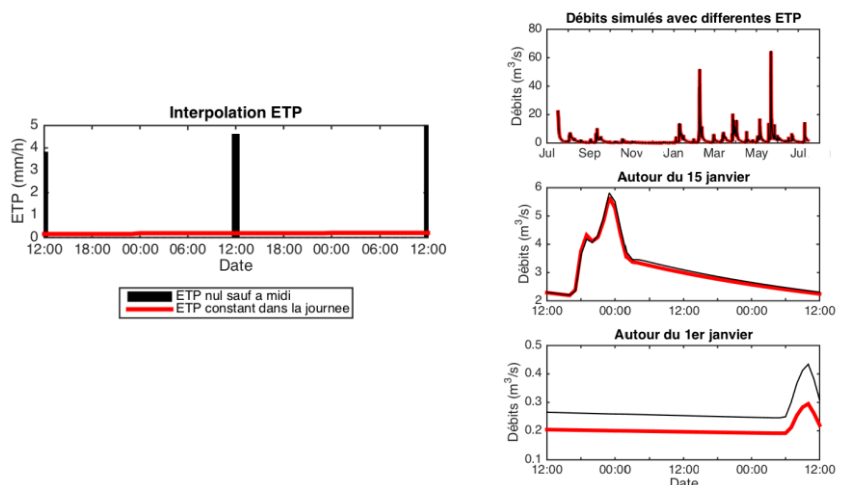


Figure 6 : ETP utilisée comme forçages (gauche) et débits simulés par GR4H (droite) pour les deux simulations décrites dans le texte

En conséquence, on considèrera dans le cadre de cette étude que l'on peut passer d'une ETP journalière à une ETP horaire simplement en fixant l'ETP constante au cours de la journée et égale à 1/24 fois la valeur de l'ETP journalière, ce qui est en ligne avec les résultats de Oudin et al. (2004)

 Quel jeu de données choisir parmi ceux présentés dans le paragraphe 2.1 ?

L'ETP mensuelle mesurée à Nouméa est appelée E1 tandis que l'ETP journalière simulée autour de notre zone est dénommée E2. Pour déterminer l'influence de la prise en compte de la variabilité journalière d'ETP, une optimisation rapide a été menée sur le bassin de la Dumbéa Est.

LES RESULTATS OBTENUS, NON PRESENTES ICI, MONTRENT QUE L'UTILISATION DE E2, ETP VARIABLE AU COURS DU MOIS PERMET D'AMELIORER LES PERFORMANCES DU MODELE. LA CLIMATOLOGIE MENSUELLE, E1 PERMET QUANT A ELLE D'OBTENIR QUAND MEME DES RESULTATS ASSEZ SATISFAISANTS.

3.1.3. Sensibilité des résultats aux conditions initiales

Les remplissages des deux réservoirs, production et routage, ainsi que les débits simulés sont présentés sur la Figure 7.

Ces résultats montrent qu'au bout de 1 mois, la condition initiale n'a plus d'influence sur la valeur des différentes variables d'état.

En conséquence, pour s'affranchir de questions relatives à l'initialisation du modèle, la méthodologie suivante a été appliquée :

1. Les réservoirs sont initialement vides.
2. Avant toute simulation, une série temporelle d'année climatique est concaténée avant tout forçages réalistes. Cela permet de lancer la simulation avec des réservoirs dont le remplissage est approché.
3. Les résultats du modèle sont interprétés au plus tôt un mois après le début des forçages réalistes.

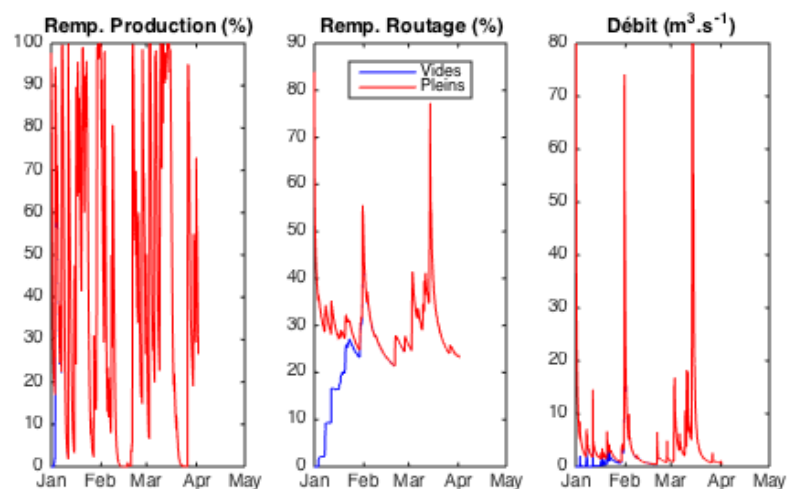


Figure 7 : Débits simulés (droite) et remplissage du réservoir de routage (gauche) pour des simulations réalisées en démarrant de réservoirs vides (bleu) ou pleins (rouge).

3.1.4. Analyse de la sensibilité des résultats aux paramètres du modèle

Les valeurs de ces métriques étudiées sont présentées sur la Figure 8. Les principaux résultats de cette analyse sont :

- Les variations de X1 dans l'intervalle [0 ; 30] n'ont que peu d'influence sur les résultats du modèle. Ce résultat est cohérent avec l'historique de la création de GR4H. En effet, ce modèle est issu d'un modèle plus simple, à 3 paramètres où le coefficient X1 était fixé. Cependant il avait été fixé par



- Résultats -

Edijatno et al (1999) à 330 mm pour les bassins métropolitains alors qu'il est de l'ordre de 10 mm dans notre étude.

- Les variations du paramètre d'échanges souterrains X2 dans l'intervalle [-9 ; 0] ont une influence sur le KGE, l'erreur sur les volumes totaux et sur les volumes de crues. De plus, les valeurs prises par le coefficient X2 sont différentes sur le bassin Est (-1.09 mm) et sur le bassin Nord (-4.6 mm). Ces différences obtenues sont à rapprocher des résultats observés par Alric (2009), qui estime qu'en moyenne 81% de l'eau tombée sur la Dumbéa Est s'écoule jusqu'au limnimètre alors qu'il ne s'écoule que 66% de l'eau tombée sur la Dumbéa Nord.
- Les variations de X3 dans l'intervalle [200 ; 600] ont une influence certaine sur les erreurs commises sur les volumes de crues. Elles ont une influence faible sur le KGE et l'erreur sur les volumes totaux. Le sens de variation des erreurs sur les volumes de crues indique que plus X3 est grand et plus les débits de crues simulés sont faibles.
- Les variations de X4 dans l'intervalle [0 ; 6.5] ont une influence modérée sur le KGE et les erreurs sur les volumes.

POUR CONCLURE, LE MODELE SEMBLE PLUS SENSIBLE A LA PARAMETRISATION DE X2 (ECHANGES SOUTERRAINS) QU'AUX VALEURS DES AUTRES PARAMETRES. SA VALEUR JOUE A LA FOIS SUR LES VOLUMES TOTAUX ET LES VOLUMES DE CRUES. LE PARAMETRE X3, QUI REPRESENTE LA CAPACITE DU RESERVOIR DE PRODUCTION, IMPACTE EGALEMENT LA PERFORMANCE DES RESULTATS EN CE QUI CONCERNE NOTAMMENT LES DEBITS DE CRUES. SUITE A L'ANALYSE, LES DEUX AUTRES PARAMETRES (CAPACITE DU RESERVOIR DE STOCKAGE ET TEMPS DE BASE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE) PEUVENT ETRE CONSIDERES COMME PEU SENSIBLES SUR LES METRIQUES EXPLOITEES.

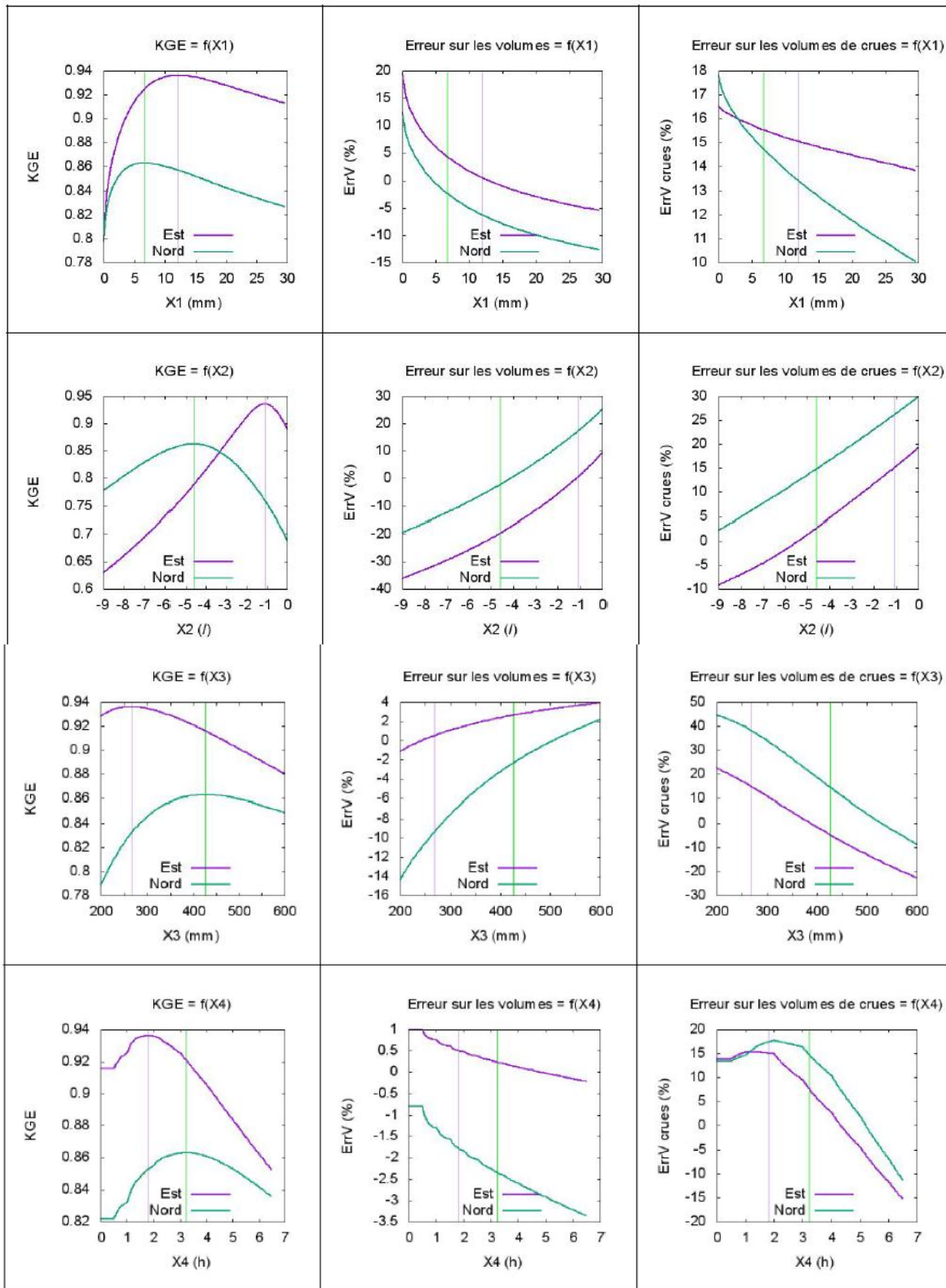


Figure 8 : KGE (gauche), erreur sur les volumes (milieu) et erreur sur les volumes de crues (droite) en fonction de la capacité du réservoir de stockage (haut), du coefficient d'échange souterrain (milieu haut), de la capacité du réservoir de routage (milieu bas) et du temps de base de l'hydrogramme unitaire (bas) pour la Dumbéa Nord (vert) et Est (violet). Les valeurs optimales des paramètres sont représentées par des lignes verticales de couleur.



3.1.5. Sensibilité à la durée d'optimisation

Les résultats sont présentés sur la Figure 9. Les variations des paramètres optimisés sont les plus fortes les premières années, entre 1 et 5 ans de calage. Des variations continuent à être visibles au delà de 5 ans de calage pour les paramètres X1, taille du réservoir de stockage, et X4, temps de base de l'hydrogramme unitaire sur la Couvelée. Or X1 et X4 ont été jugés peu sensibles. De plus, après 9 ans de calage, la valeur de ces paramètres se stabilisent. Nous considérerons donc que ces variations sont négligeables. Des variations du paramètre X2, coefficient d'échanges souterrains, sont lisibles pour la Dumbéa Nord après 10 ans de calage. Ces variations ne sont pas négligeables et donnent une première indication quant à la qualité, un peu moins bonne, du calage réalisé sur ce bassin.

EXCEPTÉ POUR LA DUMBEA NORD, ON PEUT DONC ESSAYER DE CALER GR4H SUR 5 ANS, 9 ANS OU 12 ANS SANS QUE CELA NE MODIFIE SENSIBLEMENT LE RESULTAT DE CE CALAGE. LE CALAGE SERA REALISE SUR LES 4 BASSINS ETUDIES SUR UNE PERIODE DE 12 ANS, EN GARDANT A L'ESPRIT QUE LE CALAGE EFFECTUE SUR LA DUMBEA NORD EST DE MOINS BONNE QUALITE QUE CELUI REALISE SUR LES TROIS AUTRES BASSINS.

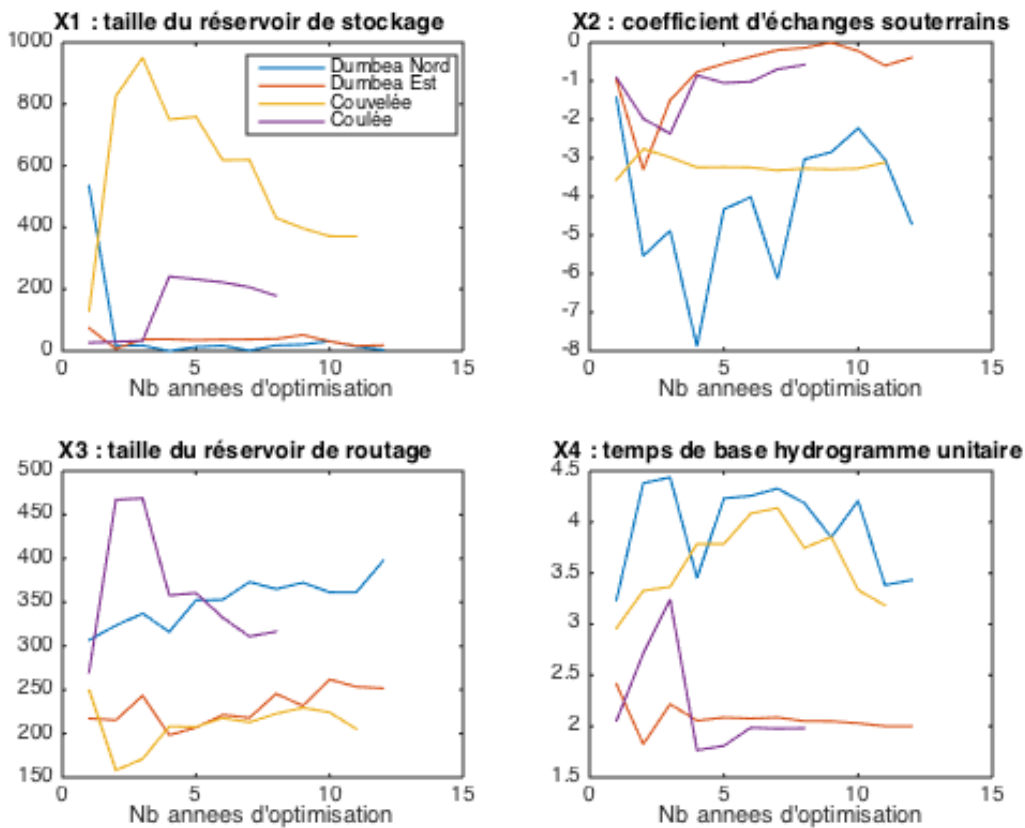


Figure 9 : Valeur des paramètres du modèle en fonction de la durée d'optimisation pour la Dumbéa Est et la Dumbéa Nord. X1, taille du réservoir de stockage, X2 coefficient d'échanges souterrains, X3 taille du réservoir de routage et X4 temps de base de l'hydrogramme unitaire.

3.2. Optimisation du modèle sur les 4 bassins versants

Les résultats issus de l'optimisation des 4 paramètres du modèle GR4H sur chacun des 4 bassins sont présentés dans le Tableau 5, le Tableau 6, la Figure 10 et la Figure 11. Ceci a été réalisé sur l'intégralité de la période disponible.

Le KGEs est partout supérieur à 0.87, le NSE à 0.76. Ces métriques statistiques sont les meilleures sur la Dumbéa Est et la Couvelée et les moins bonnes sur la Dumbéa Nord. Quelque soit les bassins, l'erreur sur les volumes totaux est inférieure à 0.2 %, l'erreur sur les volumes de crues inférieure à 26 %. Le déphasage des 100 plus hautes valeurs est partout inférieur à 1 h. La comparaison directe des valeurs observées et simulées (Figure 10) montre que sur la Dumbéa Nord, le modèle surestime de nombreuses crues de plus de 50 %. Sur la Coulée, GR4H sous-estime la plupart des crues mais de moins de 30 %. La Dumbéa Est et la Couvelée simulent bien l'intensité des crues. Tous bassins confondus, il a été observé 220 heures de crues. C'est à dire que pendant 220 heures, le débit a été supérieur au débit de crue défini pour chaque bassin par Alric (2009). 76% des crues sont représentées par le modèle avec une erreur de moins de 30%, 16% avec une erreur comprise entre 30 et 50% et 7,7% avec une erreur supérieure à 50%. Les volumes annuels (Figure 11) sont simulés dans les bons ordres de grandeur et le modèle reproduit avec fidélité les variations interannuelles du débit des rivières. En général, l'erreur commise est inférieure à 15%, même si il arrive que certaines années soient représentées avec une erreur sur les volumes de 25%, comme l'année 2010 pour la Couvelée. Sur les 43 années simulées, tous bassins confondus, seules 6 années sont simulées avec une erreur de plus de 15%.

Les séries temporelles de débits observés et simulés pour la Dumbéa Est en 2011 sont présentées sur la Figure 12 à titre d'exemple. Cette année est l'année où l'erreur sur les volumes annuels est la plus faible (inférieure à 1%). Le même exercice est reproduit pour l'année 2004 et la Dumbéa Nord et l'année 2010 et la Couvelée, ces deux années correspondant aux années où les volumes annuels sont les moins bien représentés.

Tableau 5 : Paramètres optimisés sur les 4 bassins versants étudiés.

| | Coulée | Dumbéa Est | Dumbéa Nord | Couvelée |
|--------------------------------------------------|--------|------------|-------------|----------|
| X1 : taille du réservoir de stockage (mm) | 171.5 | 18.8 | 10.4 | 338 |
| X2 : paramètres d'échanges souterrains (mm) | -0.5 | -0.4 | -3.3 | -3.2 |
| X3 : taille du réservoir de routage (mm) | 318.7 | 247.4 | 384.1 | 209.6 |
| X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire (h) | 2 | 2 | 3.4 | 3.2 |

Tableau 6 : Métriques statistiques de validation pour les 4 bassins étudiés

| | Coulée | Dumbéa Est | Dumbéa Nord | Couvelée |
|--------------------------------------|--------|------------|-------------|----------|
| KGEs | 0.94 | 0.97 | 0.87 | 0.97 |
| NSE | 0.87 | 0.91 | 0.76 | 0.91 |
| Erreur sur les volumes (%) | -0.2 | 0.01 | 0.2 | 0.001 |
| Erreur sur les volumes des crues (%) | -26 | 1.6 | 19.9 | 11 |
| Corrélation | 0.94 | 0.97 | 0.87 | 0.97 |
| Déphasage | -1h | -22min | 46min | -1h |

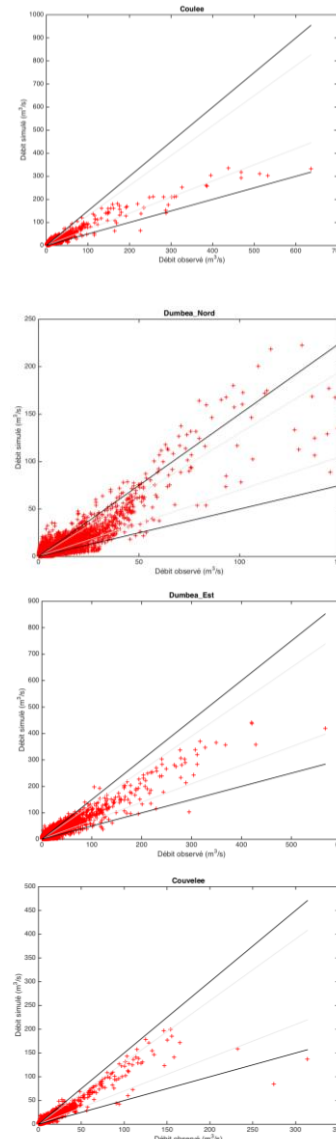


Figure 10 : Débits simulés en fonction des débits observés pour chaque bassin versant. (Ligne grise = 30% d'erreur ; Ligne noire = 50% d'erreur)



- Résultats -

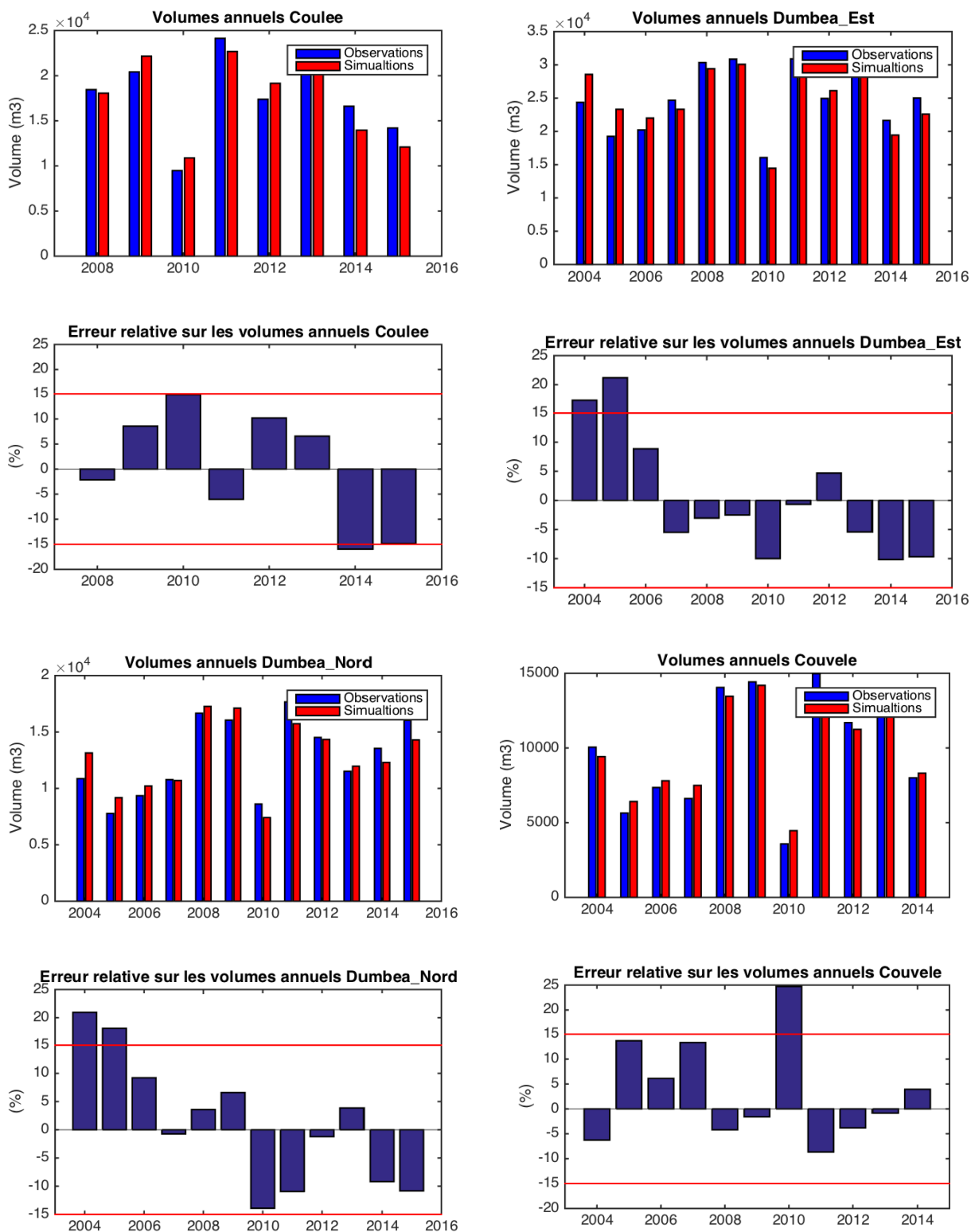


Figure 11 : Volumes annuels observés (bleu) et simulés (rouge) (haut) pour la Coulée, la Dumbéa Est, la Dumbéa Nord et la Couvele (de gauche à droite).

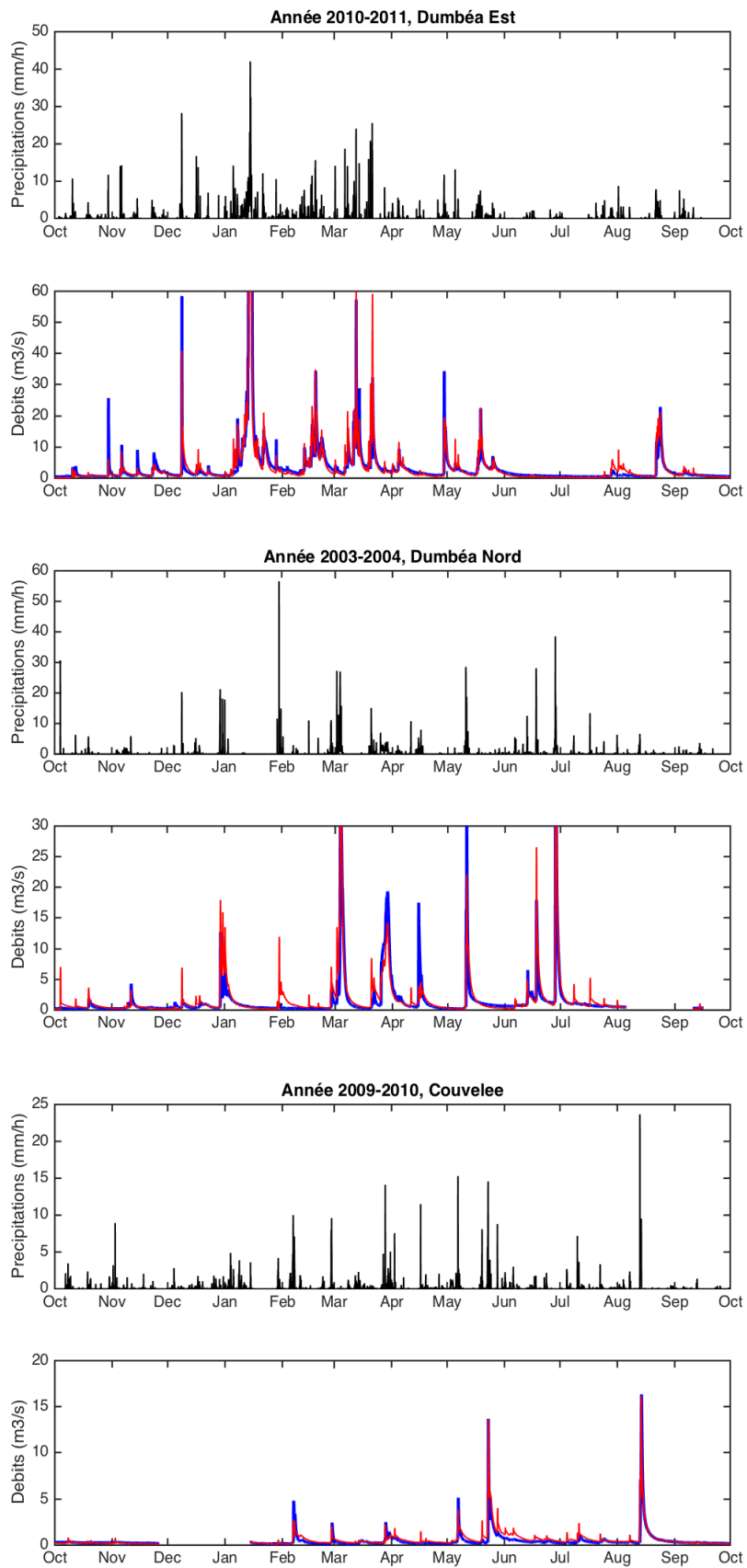


Figure 12 : Précipitations (noir), débits observés (bleu) et simulés (rouge) pour la Dumbéa Est (haut), Dumbéa Nord (milieu) et Couvelee (bas)



3.3. Perspectives et limitations

3.3.1. Régionalisation des paramètres du modèle

Approche basée sur la proximité géographique

Pour faire une démonstration des possibilités et limitations du modèle GR4H sur les bassins observés, un test de régionalisation a été conduit en prenant en compte les éléments décrits plus haut. Les paramètres choisis ont été déterminés à partir des simulations réalisées sur la Dumbéa Est et la Dumbéa Nord uniquement. Une valeur moyenne des paramètres a ainsi été déterminée et appliquée à tous les bassins. La paramétrisation retenue est présentée dans le Tableau 7. Le Tableau 8 présente les valeurs du KGE, NSE, de l'erreur sur les volumes totaux et de crues. Il montre qu'avec ces paramètres, les diagnostics de performance sont très satisfaisants sur tous les bassins excepté la Couvelée, qui surestime largement les débits. Ceci dit, quelque soit le bassin, la corrélation entre valeurs observées et simulées semble correcte et le déphasage des crues ne dépasse pas 1h.

Les volumes annuels, tracés sur la Figure 13 sont bien représentés sauf pour le bassin de la Couvelée, où le modèle surestime largement les volumes écoulés.

Tableau 7 : Paramètres optimisés sur les 4 bassins versants étudiés.

| Paramètre | Valeur |
|--------------------------------------------------|--------|
| X1 : taille du réservoir de stockage (mm) | 11.1 |
| X2 : paramètres d'échanges souterrains (mm) | -2 |
| X3 : taille du réservoir de routage (mm) | 400 |
| X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire (h) | 2.7 |

Tableau 8 : Métriques statistiques d'évaluation des performances du modèle

| | Couvelée | Dumbéa Est | Dumbéa Nord | Coulée |
|--------------------------------------|----------|------------|-------------|--------|
| KGE | 0.58 | 0.93 | 0.84 | 0.89 |
| NSE | 0.72 | 0.87 | 0.71 | 0.83 |
| Erreur sur les volumes (%) | 41.5 | -5 | 8 | 6.9 |
| Erreur sur les volumes des crues (%) | 33 | -22.8 | 30 | -28 |
| Corrélation | 0.94 | 0.95 | 0.87 | 0.92 |
| Déphasage | 45min | 50min | 25min | 10min |

Adaptation du modèle au bassin de la Couvelée

Les résultats présentés plus haut montrent qu'il n'est pas possible de simuler correctement les débits de la Couvelée avec les paramètres calibrés sur la Dumbéa Nord et Est. Compte tenu de l'analyse de sensibilité présentée précédemment, une approche consiste à ne travailler que sur le coefficient X2, le plus sensible, pour pouvoir améliorer la qualité de la simulation. Ainsi, alors que les autres paramètres sont restés

inchangés, seul X2 a été modifié de manière à obtenir la meilleure qualité de simulation possible. Le paramètre optimisé a pour valeur -8.65. Les résultats obtenus avec cette paramétrisation sont détaillés sur le Tableau 9 et la Figure 13. Les volumes annuels et de crues sont beaucoup mieux représentés avec respectivement 0.02% d'erreur et 9.5% d'erreur au total. La corrélation entre observation et simulation reste très bonne (0.95). L'erreur la plus importante sur les volumes annuels est commise en 2010 où le modèle surestime de 40% les volumes. Cependant, cette année était difficilement simulée, même avec un modèle optimisé, avec lequel une erreur sur les volumes annuels était de 25%. De manière générale, les résultats présentés ci dessous sont de qualité comparable avec ceux présentés par la Figure 11 et le Tableau 6, où les 4 paramètres de GR4H avaient été calibrés sur la Couvelée.

Tableau 9 : Métriques statistiques d'évaluation des performances du modèle pour la Couvelée

| | Couvelée |
|--------------------------------------|----------|
| KGE | 0.95 |
| NSE | 0.89 |
| Erreur sur les volumes (%) | 0.02 |
| Erreur sur les volumes des crues (%) | 9.5 |
| Corrélation | 0.95 |
| Déphasage | 45min |

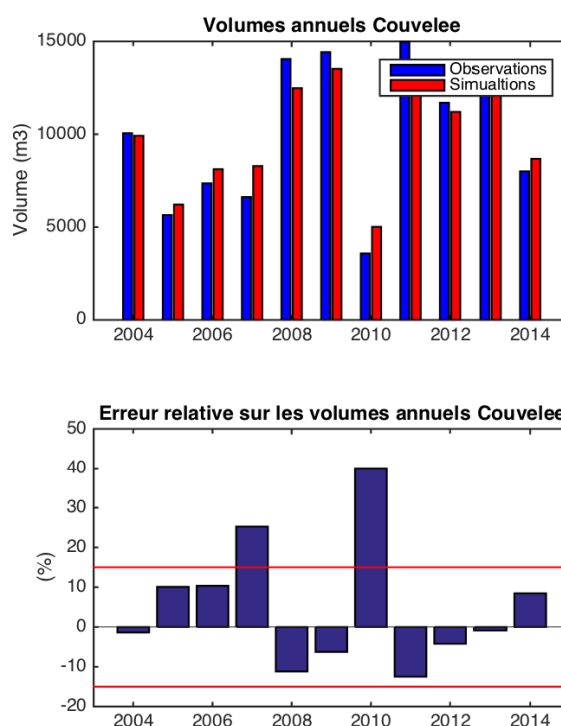


Figure 13 : Volumes annuels observés (bleu) et simulés (rouge) (haut) pour la Couvelée (de gauche à droite). Paramètres régionalisés sur la Dumbéa Est et la Dumbéa Nord puis X2 modifié sur la Couvelée.



4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Résultats, en adéquation avec la littérature

Les résultats de notre étude montrent qu'il est possible de simuler les débits des quatre principaux bassins versants autour du Grand Nouméa au pas de temps horaire grâce à un modèle global, GR4H, qui nécessite la calibration de seulement quatre paramètres. La littérature fait état de nombreuses applications similaires (e.g. Mathevet 2005, Bennet et al 2014). Sur l'ensemble des 4 bassins étudiés, tous ont un NSE supérieur à 0.76, ce qui est une bonne valeur, comparée aux valeurs que l'on peut obtenir dans la littérature. Par exemple, sur les centaines de bassins simulés par Mathevet (2005) seuls, les 10% les mieux représentés ont un NSE supérieur à 0.76. Or, le modèle GR4H et son prédécesseur, GR4J ont montré des performances souvent égales ou supérieures aux autres modèles conceptuels existants dans la littérature (e.g. Mathevet, 2005, Bennett et al., 2014, Perrin et al., 2003). Aussi, si d'autres modèles auraient pu être testés, les résultats obtenus ici ont été jugés satisfaisants.

Le bassin de la Dumbéa Nord est le bassin qui est le moins bien représenté. Il se trouve par ailleurs que, ce bassin est représenté quasi-exclusivement par le pluviomètre situé au point le plus aval de la montagne. Or le bassin de la Dumbéa Nord est le plus élevé et pentu de tous les bassins. Sachant que les effets d'orographie sur la pluie sont très marqués dans la région (Romieux 2011), il est possible que, selon la direction de propagation des pluies, ce pluviomètre ne puisse représenter qu'une partie des pluies tombées sur ce bassin. Cette hypothèse pourrait aussi expliquer la variabilité du calibrage obtenu sur cette même zone. A l'inverse, le bassin de la Dumbéa Est qui est le mieux représenté par GR4H se trouve être le bassin le plus couvert par les pluviomètres (N = 3).

Méthode : Sélection des critères de validation

Le KGEs a été utilisé comme fonction objectif pour calibrer les paramètres. Associée à l'algorithme du simplexe de Nelder-Mead, elle a montré de bonnes performances, puisque les métriques statistiques plus usuelles comme le NSE, le KGE, corrélation et biais donnaient également de bons résultats sur toutes les rivières simulées. Il est cependant possible que la même étude, réalisée avec une autre fonction objectif aboutisse à des valeurs de paramètres calibrés légèrement différents. Cependant, utiliser le « KGEs » nous a permis de traiter avec une importance différente les débits « normaux », mesurés avec précision, et les débits « de crue », plus complexes à estimer.

Méthode : Durée de la période de calage

La méthode proposée ici consiste, en partant d'une même année, à calibrer le modèle sur des périodes de plus en plus longues, jusqu'à calibrer le modèle sur la quasi-totalité de la série temporelle disponible. Nos résultats ont montré que sur la globalité des bassins étudiés, cinq années étaient suffisantes pour atteindre une relative stabilité des paramètres calibrés, tandis qu'au bout de 10 ans, la robustesse des paramètres testés était maximale. Cette méthode est à rapprocher des méthodes classiques de calibration en modélisation océanographique, que ce soit pour réaliser des études physiques et géochimiques (Fernandez et al., 2006), biogéochimiques (Menesguen et al 2014) ou d'éco-physiologie (Bourlès et al 2009). Cette méthode permet d'obtenir pour un bassin, une calibration unique assortie d'une possible qualification, à priori, de la qualité du calage obtenu. Ainsi, il a été possible de prédire, dès la mise en

place de l'étude, que le bassin de la Dumbéa Nord était le bassin où le calage était de moins bonne qualité. Cela s'est vérifié dans les résultats obtenus par la suite.

Cependant, cette méthode diffère des méthodes classiques utilisées en hydrologie, comme la méthode du split sample test (Klemeš 1986), souvent utilisée en hydrologie (e.g. Kohavi, 1995, Mathevet, 2005, Benett et al 2013). Dans cette méthode, la série temporelle est divisée en deux parties : deux tiers des données sont utilisées pour la calibration du modèle et un tiers pour la validation. Cette méthode permet d'estimer si la calibration est suffisamment robuste pour pouvoir, une fois le modèle paramétré sur un bassin et une période donnée, transposer le calage obtenu sur une période ou un bassin sur lequel le modèle n'a pas été testé. Avec cette méthode on peut obtenir, pour un même bassin plusieurs calibrations différentes, qu'il faut alors réussir à distinguer. Brigode (2015) réalise ainsi plus de 100 calibrations sur des périodes différentes pour la rivière de la Kamp (Autriche). Il prouve que la crue exceptionnelle qu'a connue la rivière en 2002 influence la valeur des paramètres calibrés, les calibrations réalisées sur des périodes comprenant l'année 2002 simulant mieux les crues extrêmes que les autres. Dans notre étude, la relative stabilité des paramètres obtenus avec plus de 5 ans de calibration nous a conduit à supposer que le comportement des bassins versants, si changeant qu'il puisse être, était correctement représenté par un paramétrage « moyen », établi sur 10 ans de données. Cependant, les résultats présentés ici, bien que de bonne qualité, pourraient être affinés en suivant la méthodologie de Klemeš (1986).

La relative stabilité des paramètres calibrés sur les bassins versants proche de Nouméa est peut être liée au fait que la Nouvelle-Calédonie est régie par un climat de type tropical à subtropical humide. La zone comprise entre 18 et 22°S et 160 et 170°E, entourant la Grande Terre, est soumise en moyenne à 3.2 dépressions tropicales par an, dont 1.4 cyclones tropicaux (Caudemont et Maitrepierre 2007). Aussi, les phénomènes dits extrêmes sont relativement courants. Il est possible qu'au bout de 5 années de calibration, le modèle ait assisté à suffisamment d'épisodes contrastés pour que la calibration puisse être considérée comme robuste.

Méthode : Spatialisation des pluies

Plusieurs méthodes de spatialisation des pluies ont été utilisées. La méthode consistant à découper la zone d'étude grâce aux polygones de Thiessen combinée à la correction appelée « orographique » s'est avérée la plus efficace. La méthode dite de Thiessen est une méthode classiquement utilisée (Ly et al., 2013). D'autres méthodes, telle que la méthode appelée Inverse Distance and Elevation Weighting (IDEW) permettent d'interpoler spatialement la pluie en pondérant chaque pluviomètre par la distance et la différence d'altitude entre le pluviomètre et le point considéré. Cette méthode s'est révélée particulièrement adaptée pour des régions où les effets d'orographie sont importants, particulièrement au pas de temps horaire (Ly et al 2013, Masih et al 2011). Cette méthode pourrait ainsi être potentiellement intéressante à utiliser étant donné le caractère pentu des bassins calédoniens. Enfin dans un futur plus ou moins proche, les lames d'eau radar présentent également une sérieuse piste d'amélioration de la modélisation pluie-débit appliquée à la Nouvelle-Calédonie.

Perspectives : Pas de régionalisation possible suivant la proximité géographique

Une des perspectives, étant donné le faible nombre de paramètres de GR4H et la qualité des résultats obtenus, serait de pouvoir procéder à un travail de régionalisation, i.e de généraliser l'approche pluie-débit à l'échelle du territoire en travaillant sur les rivières majeures (jaugées ou non) et en utilisant la base de données disponible sur le Territoire. Pour cela, une première étude, se basant sur une régionalisation



basée sur la proximité géographique des bassins a été menée ici. Deux bassins, la Dumbéa Est et Nord, ont été étudiés en détail. À partir des résultats obtenus sur ces deux bassins, un paramétrage moyen a été établi et extrapolé aux autres bassins voisins. La validité de ces paramètres moyens a été testée sur les bassins contigus que sont la Coulée et la Couvelée. Ce calage a permis d'obtenir de bons résultats sur la Coulée, mais les résultats n'étaient pas acceptables pour la Couvelée. Cependant, en modifiant uniquement le paramètre X2, coefficient d'échanges souterrains, des résultats corrects ont pu être obtenus. Cela est à mettre en relation avec les différences qui existent entre ces quatre bassins. Même s'il en est géographiquement proche, le bassin de la Couvelée présente des caractéristiques hydrologiques nettement différentes des autres bassins. C'est notamment le cas pour le coefficient d'écoulement, bien plus faible sur ce bassin que sur les autres. Il semble ainsi complexe de pouvoir extrapoler les paramètres obtenus sur deux bassins aux bassins voisins.

Une approche reposant sur la similarité de paramètres hydrologiques, serait ainsi sûrement mieux adaptée au contexte Calédonien. Une méthodologie proche de celle qui avait été adoptée par le Gouvernement de Nouvelle Calédonie et la Province Sud (2011) pourrait ainsi être adoptée. Dans leur étude, ceux-ci découpent la Nouvelle-Calédonie en 7 grandes Hydro-écorégions en se basant sur la climatologie, le relief, la géologie, le réseau hydrographique, la chimie de l'eau... Cette approche pourrait être adaptée à la modélisation des écoulements de surface, en sélectionnant les variables hydrologiques d'intérêt, ce qui pourrait permettre par la suite de pouvoir estimer les débits de bassins non jaugés (Hrachowitz et al., 2013).

Cependant, dans la littérature, les études de régionalisation sont conduites avec des jeux de données beaucoup plus conséquents. Oudin et al (2007), par exemple, travaille avec 1040 bassins. Cette étude ayant été réalisée uniquement avec 4 bassins versants, une telle approche n'a pas pu être expérimentée ici.

Perspectives : Utilisation des lames d'eau Antilope.

Grâce à un an et demi de données fournies par Météo-France, nous avons pu utiliser les lames d'eau Antilope pour analyser la répartition spatiale des pluies et la représentativité des pluviomètres (cf Annexe 2). Cette étude a donné des résultats globalement similaires à ceux obtenus par les polygones de Thiessen, ce qui a validé, a posteriori, la méthode de spatialisation préférée dans cette étude.

En utilisant une année de donnée pour calibrer le modèle GR4H sur les données Antilope, nous avons pu simuler de manière correcte les débits de la Dumbéa Est. La première moitié de l'année 2016 a été ignorée lors de la calibration, appliquant ainsi la méthode du split-sample test (Klemès 1986). Sur cette année, nous avons obtenu des résultats satisfaisants, les petites crues observées étant correctement simulées, que ce soit en amplitude ou en phasage. Si ces résultats étaient approfondis avec des données radar ou prévisionnelles disponibles sur de plus grandes périodes, ils pourraient alors permettre une utilisation opérationnelle du modèle GR4H dans des zones où la donnée de pluie est difficile à obtenir. De plus, si les résultats de débits des fleuves côtiers étaient couplés avec des résultats de marée et de houle, ils pourraient permettre de mettre en place des systèmes d'alerte aux inondations, système dont la Nouvelle-Calédonie est aujourd'hui dépourvue. L'Australie utilise par exemple le modèle GR4H pour prédire les débits des fleuves 6 jours à l'avance, voire jusqu'à 9 jours sur certains fleuves (Bennett 2014).

 Perspectives : Impact des rivières sur les lagons - Exemple de la baie de Dumbéa et de Boulari

Ce travail pourra servir de base à un travail plus approfondi permettant l'étude du continuum terre-mer. Les crues des fleuves côtiers entourant le Grand Nouméa peuvent avoir des impacts significatifs sur le lagon environnant. Lors de la dépression tropicale moyenne du 4 février 2014 par exemple, il s'est écoulé, en 24 heures, via les rivières de la Dumbéa Est et Nord plus de 22 millions de mètres cubes d'eau douce et plus de 9 millions de mètres cubes sur la rivière de la Coulée.

A titre de comparaison, la baie de Dumbéa, dont la limite externe peut être définie par une ligne courant de la pointe Taureau à l'île Freycinet contient, à marée basse coefficient 120, un volume d'eau d'environ 100 millions de mètres cube d'eau. De même, la baie de Boulari, dont la limite externe peut être définie par une ligne droite courant de la pointe Bureau à la pointe Lassale contient environ 95 millions de mètres cube. Ces chiffres mettent en évidence la relative importance des crues à l'échelle des baies. Sans prendre en compte l'influence des courants, et en supposant que l'eau de la baie soit brassée de sorte que la concentration en sel soit homogène, on peut estimer que, sur 24 heures, les crues issues d'évènements tropicaux moyens diluent l'eau de la baie de Dumbéa de 35‰ à environ 27‰. Si ce niveau de salinité est prolongé plus de 16 jours, il est probable que la survie du corail *Acropora* spp., présent en Nouvelle-Calédonie, soit compromise (Berkelmans et Schaffelke, 2012). Or ce niveau de salinité, que nous venons d'estimer grossièrement peut être atteint jusque sur l'île au canard, situé bien en dehors des baies que nous venons de décrire. En effet, pour réaliser cette estimation, le volume sortant à l'exutoire de la Dumbéa a été considéré comme étant la somme des volumes sortants de la Dumbéa Est, Nord et de la Couvelée. Hors, même si les débits de crue de la Ouanéoué et de la Nondoué sont faibles en comparaison de ceux des rivières mentionnées (Hydrex 1995), ils participent à la dilution de l'eau de la baie de Dumbéa. De même, la partie située entre les limnimètres et l'exutoire de la Dumbéa n'a pas été prise en compte. Enfin, dans notre calcul, aucun élément d'hydrodynamique n'a été apporté. Il est probable que l'eau de la baie de Dumbéa ne soit pas mélangée de manière homogène et que localement puissent se former des zones où la salinité soit bien inférieure à 27PSU. Sous l'action de la marée et des vents, il est possible que ces panaches d'eau douce soient confinés dans certains endroits du lagon, alors exposés pendant de longues périodes à des dessalures.



BIBLIOGRAPHIE

- ALRIC, R., 2009. RECUEIL DES DEBITS CARACTERISTIQUES DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE. DAVAR-SESER-ORE.
- BERTHIER, C.-H., 2005. QUANTIFICATION DES INCERTITUDES DES DEBITS CALCULES PAR UN MODELE PLUIE-DEBIT EMPIRIQUE. UNIVERSITE PARIS SUD XI, PARIS.
- BENNETT, ND, CROKE, B., GUARISO, G, 2013. CHARACTERISING PERFORMANCE OF ENVIRONMENTAL MODELS. ... MODELLING & SOFTWARE.
- BENNETT, DAVID E. ROBERTSON, DURGA LAL SHRESTHA, Q.J. WANG, DAVID ENEVER, PRASANTHA HAPUARACHCHI, NARENDRA K. TUTEJA (2014), A SYSTEM FOR CONTINUOUS HYDROLOGICAL ENSEMBLE FORECASTING (SCHEF) TO LEAD TIMES OF 9 DAYS, JOURNAL OF HYDROLOGY.
- BERKELMANS, R., SCHAFFELKE, A., (2012) SALINITY THRESHOLDS OF ACROPORA SPP. ON THE GREAT BARRIER REEF. CORAL REEFS.
- BESSELL-BROWNE P, NEGRI AP, FISHER R, CLODE PL, DUCKWORTH A, JONES R (2017) IMPACTS OF TURBIDITY ON CORALS: THE RELATIVE IMPORTANCE OF LIGHT LIMITATION AND SUSPENDED SEDIMENTS. *MARINE POLLUTION BULLETIN*, 117, 161-170.
- BOURLES YVES, MAURER DANIELE, LE MOINE OLIVIER, GEIRON PHILIPPE, MAZURIE JOSEPH, GANGNERY ALINE, ALUNNO-BRUSCIA MARIANNE, POUVREAU STEPHANE, GOULLETQUER PHILIPPE (2009). MODELLING CRASSOSTREA GIGAS GROWTH AND REPRODUCTION IN DIFFERENT CONTRASTED ECOSYSTEMS BY USING DYNAMIC ENERGY BUDGETS : GENERIC VALIDATION OF THE OYSTER-DEB MODEL. AQUACULTURE EUROPE 2009, TRONDHEIM, 14-17 AUGUST 2010. [HTTP://ARCHIMER.IFREMER.FR/DOC/00032/14367/](http://archimer.ifremer.fr/doc/00032/14367/)
- BRIGODE, P., PAQUET, E., BERNARDARA, P., GAILHARD, J., GARAVAGLIA, F., RIBSTEIN, P., BOURGIN, F., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN, V., 2015. DEPENDENCE OF MODEL-BASED EXTREME FLOOD ESTIMATION ON THE CALIBRATION PERIOD: CASE STUDY OF THE KAMP RIVER (AUSTRIA). *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL* 60, 1424-1437. doi:10.1080/02626667.2015.1006632
- CAUDMONT, S., MAITREPIERRE, L., 2007. ATLAS CLIMATIQUE DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE.
- CHAMPEAUX J. L., LAURANTIN O., MERCIER B., MOUNIER F., LASSEGUES P., TABARY P., 2011: QUANTITATIVE PRECIPITATION ESTIMATIONS USING RAIN GAUGES AND RADAR NETWORKS: INVENTORY AND PROSPECTS AT METEO-FRANCE. WMO JOINT MEETING OF CGS EXPERT TEAM ON SURFACE-BASED REMOTELY-SENSED OBSERVATIONS & IMO EXPERT TEAM ON OPERATIONAL REMOTE SENSING
- CHAUVEAU MATHILDE, SEBASTIEN CHAZOT, CHARLES PERRIN, PIERRE-YVES BOURGIN, ERIC SAUQUET, JEAN-PHILIPPE VIDAL, NATHALIE ROUCHY, ERIC MARTIN, JULIAN DAVID, THOMAS NOROTTE, PASCAL MAUGIS, XAVIER DE LA CAZE (2013). QUELS IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES EAUX DE SURFACE EN FRANCE A L'HORIZON 2070 ? LA HOUILLE BLANCHE.
- DITTT, 2011 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA GRANDE TERRE. URL : [HTTP://WWW.GEOPORTAL.GOUV.NC/GEOPORTAL/CATALOG/SEARCH/RESSOURCE/DETAILS.PAGE?UUID=%7BD4ADA749-D41E-4685-952D-A587948931CF%7D](http://www.geoportal.gouv.nc/geoportal/catalog/search/ressource/details.page?uuid=%7BD4ADA749-D41E-4685-952D-A587948931CF%7D)
- DOUILLET, P., 1998. TIDAL DYNAMICS OF THE SOUTH-WEST LAGOON OF NEW CAL.PDF. *OCEANOLOGICA ACTA* 21.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V.K., 1994. OPTIMAL USE OF THE SCE-UA GLOBAL OPTIMIZATION METHOD FOR CALIBRATING WATERSHED MODELS. *J. HYDROL.* 265-284.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V.K., 1992. EFFECTIVE AND EFFICIENT GLOBAL OPTIMIZATION FOR CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODELS. *WATER RESOUR. RES.* 28, 1015-1031.
- DUMAS, P., PRINTEMPS, J., MANGEAS, M., LUNEAU, G., 2010. DEVELOPING EROSION MODELS FOR INTEGRATED COASTAL ZONE MANAGEMENT: A CASE STUDY OF THE NEW CALEDONIA WEST COAST. *MAR. POLLUT. BULL.* 61, 519-529. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.06.013
- DUMAS P., TOUSSAINT M., HERRENSCHMIDT J.-B., CONTE A. ET MANGEAS M., « LE RISQUE DE FEUX DE BROUSSE SUR LA GRANDE TERRE DE NOUVELLE-CALÉDONIE : L'HOMME RESPONSABLE, MAIS PAS COUPABLE », *REVUE GEOGRAPHIQUE DE L'EST [EN LIGNE]*, VOL. 53 / 1-2 | 2013
- EDJATNO, 1991. MISE AU POINT D'UN MODELE ELEMENTAIRE PLUIE-DEBIT AU PAS DE TEMPS JOURNALIER. UNIVERSITE LOUIS PASTEUR/ENGEES, STRASBOURG.
- EDJATNO, DE OLIVEIRA NASCIMENTO, N. I. L. O., YANG, X., MAKHLOUF, Z., & MICHEL, C. (1999). GR3J: A DAILY WATERSHED MODEL WITH THREE FREE PARAMETERS. *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL*, 44(2), 263-277.
- FAURE, V., PINAZO, C., TORRETON, J. P., & DOUILLET, P. (2010). MODELLING THE SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE SW LAGOON OF NEW CALEDONIA II: REALISTIC 3D SIMULATIONS COMPARED WITH IN SITU DATA. *MARINE POLLUTION BULLETIN*, 61(7), 480-502.
- FERNANDEZ, J. M., OUIILON, S., CHEVILLON, C., DOUILLET, P., FICHEZ, R., & LE GENDRE, R. (2006). A COMBINED MODELLING AND GEOCHEMICAL STUDY OF THE FATE OF TERRIGENOUS INPUTS FROM MIXED NATURAL AND MINING SOURCES IN A CORAL REEF LAGOON (NEW CALEDONIA). *MARINE POLLUTION BULLETIN*, 52(3), 320-331.
- FISCHER, M., 2004. A NON-LINEAR STATISTICAL DOWNSCALING MODEL: EL NIÑO/SOUTHERN OSCILLATION IMPACT ON PRECIPITATION OVER NEW CALEDONIA. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 31.
- FUCHS, R., DUPOUY, C., DOUILLET, P., CAILLAUD, M., MANGIN, A., & PINAZO, C. (2012). MODELLING THE IMPACT OF A LA NIÑA EVENT ON A SOUTH WEST PACIFIC LAGOON. *MARINE POLLUTION BULLETIN*, 64(8), 1596-1613.
- GRANGERE, KARINE, SEBASTIEN LEFEBVRE, ALAIN MENESGUEN AND FABIEN JOUENN. (2009) ON THE INTEREST OF USING FIELD PRIMARY PRODUCTION DATA TO CALIBRATE PHYTOPLANKTON RATE PROCESSES IN ECOSYSTEM MODELS ESTUARINE, COASTAL AND SHELF SCIENCE.
- GOLMOHAMMADI, G., PRASHER, S., MADANI, A., RUDRA, R., 2014. EVALUATING THREE HYDROLOGICAL DISTRIBUTED WATERSHED MODELS: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *HYDROLOGY* 1, 20-39. doi:10.3390/HYDROLOGY1010020
- GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., MARTINEZ, G.F., 2009. DECOMPOSITION OF THE MEAN SQUARED ERROR AND NSE PERFORMANCE CRITERIA: IMPLICATIONS FOR IMPROVING HYDROLOGICAL MODELLING. *J. HYDROL.* 377, 80-91. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- HRACHOWITZ, M., SAVENIJE, H.H.G., BLÖSCHL, G., McDONNELL, J.J., SIVAPALAN, M., POMEROY, J.W., ARHEIMER, B., BLUME, T., CLARK, M.P., EHRET, U., FENICIA, F., FREER, J.E., GELFAN, A., GUPTA, H.V., HUGHES,

- D.A., HUT, R.W., MONTANARI, A., PANDE, S., TETZLAFF, D., TROCH, P.A., UHLENBROOK, S., WAGENER, T., WINSEMIUS, H.C., WOODS, R.A., ZEHE, E., CUDENNEC, C., 2013. A DECADE OF PREDICTIONS IN UNGAUGED BASINS (PUB)—A REVIEW. *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL* 58, 1198–1255. doi:10.1080/02626667.2013.803183
- HYDREX (1995) DELIMITATION DE LA ZONE INONDABLE DE LA DUMBEA. INSTITUT DE LA STATISTIQUE ET DES ETUDES ECONOMIQUES DE NOUVELLE-CALÉDONIE (ISEE), 2014. SYNTHÈSE DU RECENSEMENT DE LA POPULATION 2014.
- KLEMES, V., 1986. OPERATIONAL TESTING OF HYDROLOGICAL SIMULATION MODELS. *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL* 31, 13–24. doi:10.1080/02626668609491024
- KOHAVI, R, 1995. A STUDY OF CROSS-VALIDATION AND BOOTSTRAP FOR ACCURACY ESTIMATION AND MODEL SELECTION. *IJCAI*.
- LAGARIAS, J., REEDS, J.A., WRIGHT, M.H., WRIGHT, P.E., (1998). CONVERGENCE PROPERTIES OF THE NELDER MEAD SIMPLEX METHOD IN LOW DIMENSIONS
- LE MOINE, N., 2008. LE BASSIN VERSANT DE SURFACE VU PAR LE SOUTERRAIN : UNE VOIE D'AMÉLIORATION DES PERFORMANCES ET DU RÉALISME DES MODÈLES PLUIE-DEBIT ? UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE.
- LOBLIGEIS, F., ANDREASSIAN, V., PERRIN, C., LOUMAGNE, C., 2012. INVESTIGATING THE INFLUENCE OF RAINFALL SPATIAL VARIABILITY ON FLOW SIMULATION, IN: ERAD 2012, THE SEVENTH EUROPEAN CONFERENCE ON RADAR IN METEOROLOGY AND HYDROLOGY. P. 4–P.
- LOSFELD, G., L'HUILLIER, L., FOGLIANI, B., JAFFRE, T., GRISON, C., 2015. MINING IN NEW CALEDONIA: ENVIRONMENTAL STAKES AND RESTORATION OPPORTUNITIES. *ENVIRON. SCI. POLLUT. RES.* 22, 5592–5607. doi:10.1007/s11356-014-3358-x
- LY, S., CHARLES, C., DEGRE, A., 2013. DIFFERENT METHODS FOR SPATIAL INTERPOLATION OF RAINFALL DATA FOR OPERATIONAL HYDROLOGY AND HYDROLOGICAL MODELING AT WATERSHED SCALE: A REVIEW.
- MATHEVET, T., 2005. QUELS MODÈLES PLUIE-DEBIT GLOBAUX AU PAS DE TEMPS HORAIRE ? DÉVELOPPEMENT EMPIRIQUES ET COMPARAISON DE MODÈLES SUR UN LARGE ÉCHANTILLON DE BASSINS VERSANTS. ÉCOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS, PARIS.
- MENESGUEN ALAIN, DUSSAUZE MORGAN, LECORNU FABRICE, DUMAS FRANCK, THOUVENIN BÉNÉDICTE (2014). OPERATIONAL MODELLING OF NUTRIENTS AND PHYTOPLANKTON IN THE BAY OF BISCAY AND ENGLISH CHANNEL. *MERCATOR OCEAN - QUARTERLY NEWSLETTER*, 49, 87-93. OPEN ACCESS VERSION : [HTTP://ARCHIMER.IFREMER.FR/DOC/00197/30797/](http://archimer.ifremer.fr/doc/00197/30797/)
- MICHEL, C., 1989. *HYDROLOGIE APPLIQUÉE AUX PETITS BASSINS VERSANTS RURAUX*. CEMAGREF, ANTONY.
- NASCIMENTO N. O. (1995). ASSESSING MAN'S INFLUENCE ON THE HYDROLOGICAL CYCLE WITH A CONCEPTUAL RAINFALL-RUNOFF MODEL, MANUSCRIPT DE THÈSE.
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., 1970. RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART I-A DISCUSSION OF PRINCIPLES. *J. HYDROL.* 10, 282–290.
- NELDER, J.A., MEAD, R., 1965. A SIMPLEX METHOD FOR FUNCTION MINIMIZATION. *COMPUT. J.* 7, 308–313.
- UDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., ANCTIL, F., 2004. LOCATING THE SOURCES OF LOW-PASS BEHAVIOR WITHIN RAINFALL-RUNOFF MODELS: LOW-PASS BEHAVIOR OF RAINFALL-RUNOFF MODELS. *WATER RESOUR. RES.* 40, N/A-N/A. doi:10.1029/2004WR003291.
- UDIN, L., ANDREASSIAN, V., ROJAS-SERNA, C., LE MOINE, N., & MICHEL, C. (2007). TESTING SIMILARITY INDICES TO REDUCE PREDICTIVE UNCERTAINTY IN UNGAUGED BASINS. *IAHS PUBLICATION*, 313, 303.
- PERCHAT C., 2003 - TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE. DAVAR.
- PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V., 2003. IMPROVEMENT OF A PARSIMONIOUS MODEL FOR STREAMFLOW SIMULATION. *J. HYDROL.* 279, 275–289. doi:10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- PRATS, S., 2009. TABLE GRILLE_ETP_Q_NC STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT. Météo-France.
- ROMIEUX, N., 2011. SYNTHÈSE ET RÉGIONALISATION DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES DE LA NOUVELLE-CALÉDONIE.
- TERRY, J.P., KOSTASCHUK, R.A., WOTLING, G., 2008. FEATURES OF TROPICAL CYCLONE-INDUCED FLOOD PEAKS ON GRANDE TERRE, NEW CALEDONIA. *WATER ENVIRON. J.* 22, 177–183. doi:10.1111/j.1747-6593.2007.00098.x
- TERRY, J.P., WOTLING, G., 2011. RAIN-SHADOW HYDROLOGY: INFLUENCES ON RIVER FLOWS AND FLOOD MAGNITUDES ACROSS THE CENTRAL MASSIF DIVIDE OF LA GRANDE TERRE ISLAND, NEW CALEDONIA. *J. HYDROL.* 404, 77–86. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.04.022
- TODINI, E., 1988. RAINFALL-RUNOFF MODELING — PAST, PRESENT AND FUTURE. *J. HYDROL.* 100, 341–352. doi:10.1016/0022-1694(88)90191-6



ANNEXES

Annexe 1. SELECTION DES CRITERES DE VALIDATION/OPTIMISATION

Les métriques résultantes sont présentées dans le Tableau 10. Ces résultats montrent que le KGEs présente les meilleures caractéristiques, que ce soit en terme de corrélation ou de biais. L'erreur sur les volumes de crues est moindre qu'avec les autres fonctions objectifs, mais ce résultat n'est pas générique. Il peut arriver en effet qu'avec le KGEs, les crues soient représentées avec des erreurs de l'ordre de 20 à 30 %. Cependant, la mesure de la valeur du débit lors d'une crue est relativement complexe.

En effet, lors de tels événements, la rivière sort de son lit mineur et le lien entre hauteur d'eau et débit est alors plus compliqué à obtenir. De plus, il est très difficile de se rendre sur site lors de tels événements. C'est ainsi qu'il est possible d'avoir, sur la donnée mesurée, une erreur de l'ordre de 30 % (Wotling, com. pers).

Le KGEs a également présenté un comportement plus stable et fiable lors de l'optimisation, dans le sens où l'algorithme de Nelder-Mead convergeait plus vite et de manière plus sûre vers un minimum global. Il a donc été choisi de travailler par la suite avec la métrique KGEs. Lorsque cette métrique est proche de 1, la simulation est considérée comme bonne. Le NSE a été calculé à des fins de comparaison avec la littérature.

Tableau 10 : Métriques de validation calculées à la suite d'une optimisation en choisissant NSE, KGE ou KGEs comme fonction objectif

| | NSE | KGE | KGEs |
|----------------------------|------------|------------|-------------|
| Erreur sur les volumes (%) | -9,69 | -0,07 | -0,02 |
| Erreur sur les crues (%) | -8,96 | -6,75 | -2,94 |
| Corrélation | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| Déphasage | -0,32 | -0,32 | -0,32 |

Annexe 2. UTILISATION DE LA DONNEE RADAR

1. Présentation du produit Antilope J+1

Afin de régionaliser la donnée de pluie, le produit Antilope à j+1 de Météo-France a été utilisé. Une description complète de ce produit est disponible notamment chez Champeaux et al. (2011). Ce produit est créé à partir des données des radars installés sur Nouméa, Tiebaghi et Lifou, corrigées grâce aux pluviomètres disponibles. Les données sont fournies au pas de temps horaire avec une résolution de 1 km par 1 km et couvrent la période allant du 30 juin 2014 19:00 au 31 mai 2016 23:00 avec des lacunes du 20 octobre 2014 18:00 au 21 novembre 2014 19:00 et du 30 juin 2015 18:00 au 31 décembre 2015 19:00 (heures GMT). Pour les données disponibles, le cumul des précipitations a été calculé puis rapporté à un cumul annuel et est tracé sur la Figure 14. Des "bandes" ou "stries" de moindres précipitations alignées avec le Faubourg-Blanchot, où se situe le radar Météo-France, sont visibles dans les données. Elles apparaissent généralement après la présence de hauts sommets. C'est notamment le cas sur le bassin de la Dumbéa Nord, caché du radar par les monts Koghis et dont la pluviométrie mesurée par radar est de 0.24mm/h en moyenne, ce qui est plus faible que pour des bassins voisins de la Dumbéa Est (0.30mm/h), et de la Couvelée (0.28mm/h).

Par ailleurs, la comparaison avec les données issues des pluviomètres a été réalisée et les métriques statistiques résultantes sont présentées sur le Tableau 11. Pour la station de Ouiné, les données pluviomètres et radar n'étaient concomitantes que sur un mois. Cette station a donc été laissée de côté pour cette analyse statistique. Les résultats que nous obtenons confirment un biais du radar qui peut être significatif sur certaines zones. C'est le cas notamment sur la station de la Dumbéa Nord où le biais est de -10 % et sur la Coulée où le biais est de 16 %. Cependant, la corrélation entre lame d'eau et pluviomètres est supérieure à 0.86 sur tous les pluviomètres étudiés. C'est une caractéristique connue des radars qu'ils détectent avec précision l'occurrence de pluies mais captent plus difficilement la hauteur d'eau réellement tombée au sol.

Tableau 11 : Corrélation et biais entre lame d'eau Antilope au dessus du pluviomètre et pluviomètre.

| Nom de la station | Corrélation | Biais (%) |
|------------------------------|-------------|-----------|
| Dumbéa Est (DAVAR) | 0.86 | 2.4 |
| Dumbéa Nord (DAVAR) | 0.87 | -10.2 |
| Montagne des Sources (DAVAR) | 0.89 | -2.7 |
| Montagne des Sources (MF) | 0.97 | -3.6 |
| Coulée (DAVAR) | 0.92 | 15.9 |

Spatialisation des pluies

Une utilisation du produit Antilope consiste à considérer qu'un endroit est représenté par un pluviomètre si la pluie qui y tombe est corrélée avec la pluie enregistrée par ledit pluviomètre. Ainsi, le pluviomètre qui

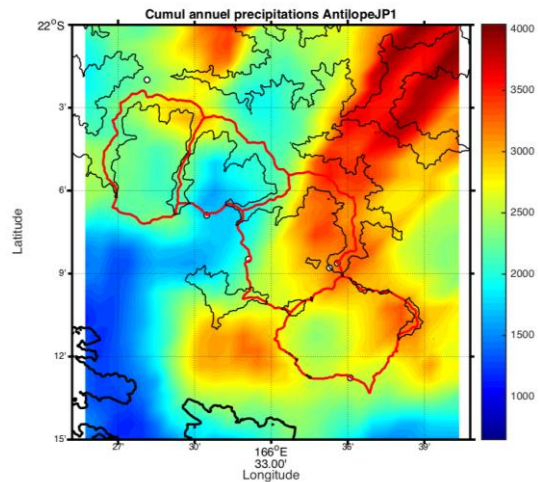


Figure 14 : Cumul des précipitations Antilope J+1 sur la zone d'étude. Les données sont rapportées en mm/an.

représente le mieux cet endroit est le pluviomètre dont la donnée est la mieux corrélée avec la pluie qui tombe sur ledit endroit. Grâce au produit Antilope, on peut calculer pour chaque point de la grille et chaque pluviomètre, la corrélation entre la pluie enregistrée au point et la pluie enregistrée au pluviomètre. Pour la Ouiné, la corrélation est calculée entre chaque point de la grille et le point le plus proche du pluviomètre. On a ainsi un estimateur de la représentativité spatiale de chaque instrument. Les cartes résultantes sont présentées sur la Figure 15. Ils montrent sans surprise que les pluviomètres représentent mieux la zone qui leur est voisine et que cette représentativité diminue avec la distance.

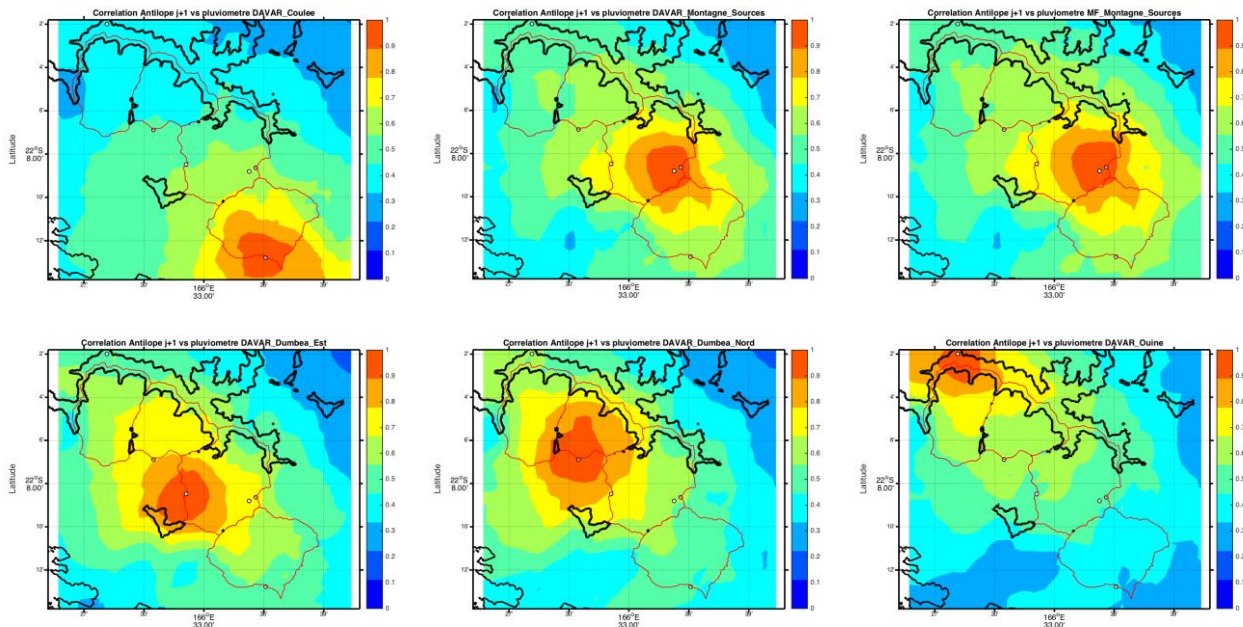


Figure 15 : Corrélation entre chaque point de la grille et la série temporelle enregistré par le pluviomètre pour les six pluviomètres de l'étude. Dans le sens de lecture, Coulée, Montagne des Sources (DAVAR), Montagne des Sources (Météo-France), Dumbéa

Une manière d'utiliser cette carte peut être de sélectionner pour chaque point de la lame d'eau le pluviomètre le plus représentatif, i.e. le plus corrélé. Une telle carte est présentée sur la figure 17. Chaque pluviomètre est associé à une couleur et la zone qu'il représente est colorisée de la couleur du pluviomètre. Cette carte montre que les zones obtenues sont similaires au découpage suivant les polygones de Thiessen. Des méthodes plus complexes existent permettant de prendre en compte la donnée radar. En particulier d'autres méthodes existent pour découper la donnée spatialisée en zones de similarités pluviométriques. En outre, en découpant le modèle global GR5H¹ en un modèle semi-distribué Lobligeois (2014) raffine ainsi la précision de son modèle. De telles méthodes n'ont pas été testées ou explorées dans le cadre de notre étude.

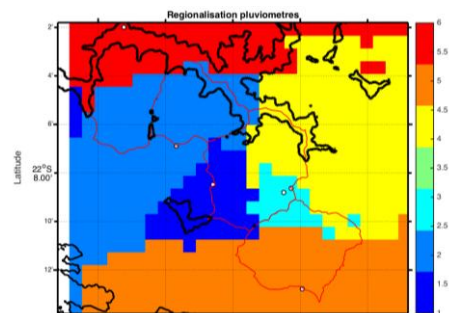


Figure 16 : Carte de représentativité des pluviomètres et comparaison avec le découpage obtenu par les polygones de Thiessen

¹ Modèle "Génie Rural à 5 paramètres horaires", amélioration de GR4H



2. Lecture des données ANTILOPE JP1 pour la simulation des débits de la Dumbéa Est

La lecture des données Antilope J+1 peut permettre la simulation des débits des bassins étudiés. À titre d'exemple, nous avons calibré le modèle GR4H sur les données Antilope J+1 entre juillet 2014 et le 1^{er} janvier 2016. Les résultats obtenus sur la période suivante, à savoir entre le 1^{er} janvier 2016 et fin mai 2016 sont présentés sur la Figure 17 et comparés avec l'observation. La simulation est en accord avec la mesure. Les légères crues que l'on observe sont représentées au bon moment. Leur intensité est dans les bons ordres de grandeur, même si la première crue de la saison est sous-estimée d'environ 30%.

En 2016, l'erreur totale sur les volumes est de moins de 3%. Cependant, la décroissance du débit est trop rapide après chaque petite crue. Enfin, le NSE calculé sur la période est de 0.51.

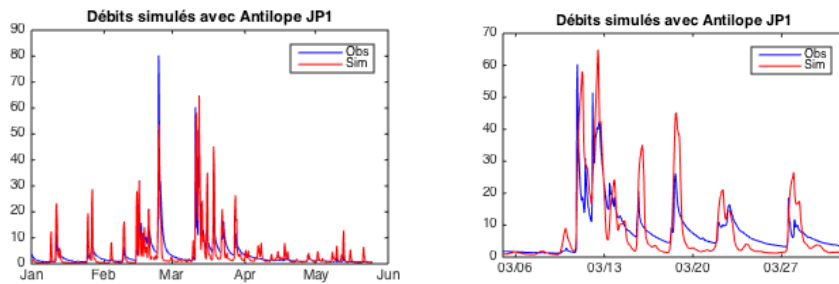


Figure 17: Débits simulés avec Antilope JP1 et GR4H calibré entre 2014 et 2015 sur les périodes de janvier à mai 2016 (gauche) et mars 2016 (droite)